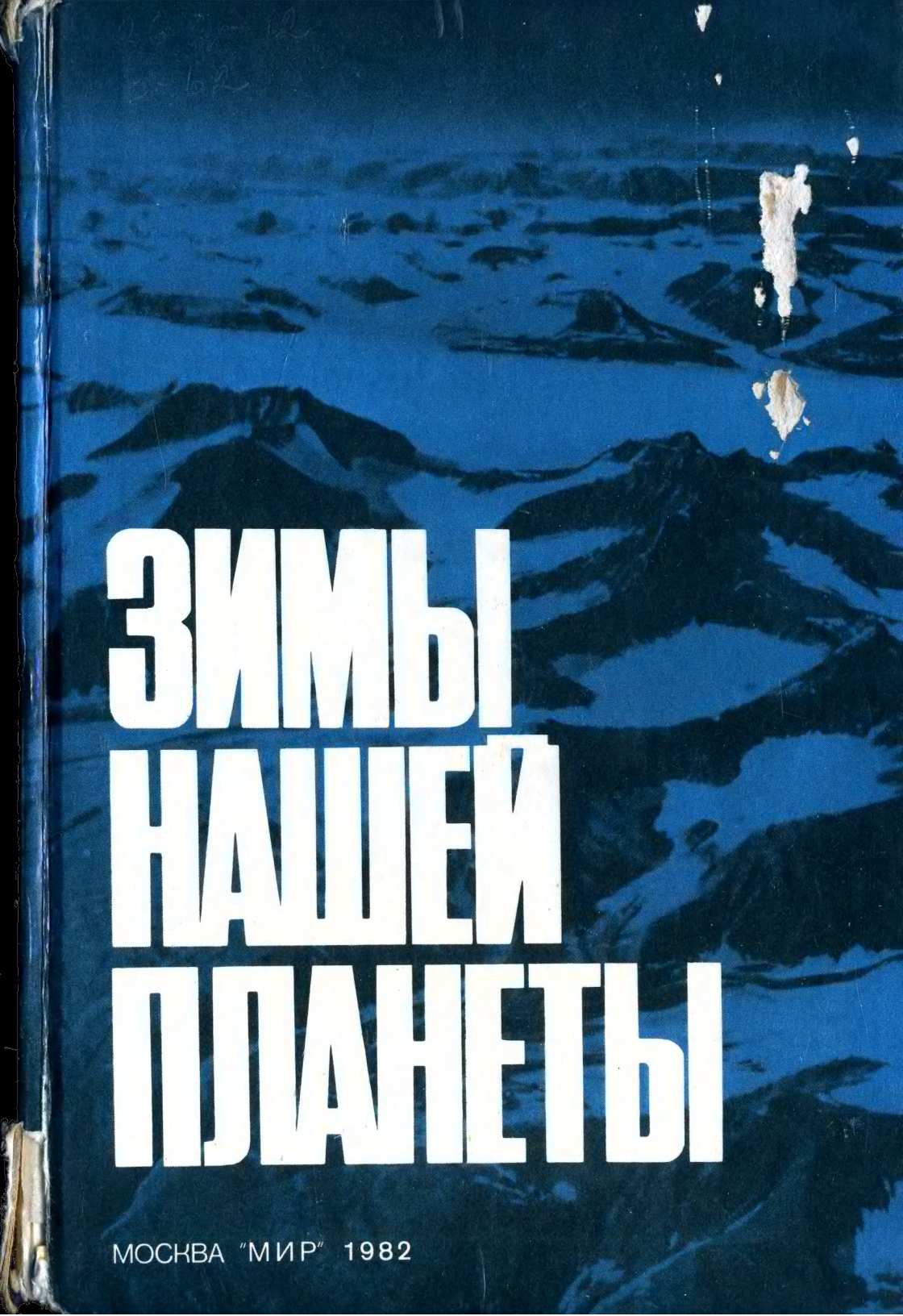




26.3.12
0-62

ЗИМЫ НАШЕЙ ПЛАНЕТЫ

МОСКВА "МИР" 1982

ЗИМЫ НАШЕЙ ПЛАНЕТЫ



THE WINTERS OF THE WORLD

Earth under the Ice Ages

Edited by
Brian S. John
MA, D. Phil

David and Charles
Newton Abbot London North Pomfret (Vt) 1979

ЗИМЫ НАШЕЙ ПЛАНЕТЫ

ЗЕМЛЯ ПОДО ЛЬДОМ

Под редакцией

Б. Джона

Перевод с английского

д-ра геогр. наук

Л. Р. Серебрянного

Москва «Мир» 1982

ББК 26.228
3-62
УДК 551.336

Авторы: Б. Джон, Э. Дербишир, Г. Янг, Р. Фейрбридж,
Дж. Эндрюс

Зимы нашей планеты: Пер. с англ./Под ред. Б. Джона. – М.: Мир, 1982.

3-62 Мир, 1982. – 336 с., ил.

Коллективная работа известных ученых Великобритании, США и Канады, в научно-популярном стиле излагающая основные факты, теории и гипотезы, касающиеся ледниковых периодов Земли («зим нашей планеты»), а также современного распространения ледников и многолетней мерзлоты на земном шаре, влияния оледенений на изменение климата и развитие фауны и флоры.

Книга рассчитана на геологов, географов, преподавателей высшей и средней школы и на широкий круг любителей природы.

3 $\frac{20801-125}{041(01)-82}$ 125-82, ч. 1 1904040000 ББК 26.228
551.49

Редакция литературы по геологии

Книга, которую вы держите в руках, раскрывает специфический и многообразный мир льда, составляющий самостоятельную оболочку нашей планеты – криосферу, или гляциосферу. Эта оболочка играет исключительно важную роль в формировании погоды и климата, а также существенно влияет на рельеф, водный баланс и живые существа. Летопись природных льдов хранит память о грандиозных событиях – великих древних оледенениях, которые неоднократно повторялись на протяжении всей эволюции Земли. В такие суровые периоды, образно называемые «зимами нашей планеты», покровы материковых льдов занимали обширные территории вокруг полюсов и проникали далеко в пределы умеренных широт.

Активное развитие ледниковых процессов сопровождало всю историю человечества. Не исключено, что ее наиболее «критические», переломные интервалы были связаны именно с разрастанием или таянием крупных ледниковых покровов прошлого. Угроза установления очередного ледникового периода не снимается и в ближайшем будущем, и это событие может иметь глубочайшие экономические последствия.

Учитывая неослабевающий интерес широких читательских кругов к проблемам формирования климата и колебаний ледников, английский ученый Брайан Джон, много лет исследовавший геологическое строение и рельеф ледниковых областей, взялся за нелегкую задачу обобщения материалов о древних оледенениях и вместе с группой авторитетных специалистов подготовил предлагаемую читателю книгу.

В этой книге отражена идея советского ученого Г. Ф. Лунгерсгаузена о том, что в истории Земли эпохи материковых оледенений периодически повторялись приблизительно через 150 млн. лет. В схему Лунгерсгаузена хорошо укладываются самое молодое – четвертичное, или, правильнее, кайнозойское, оледенение, пермско-каменноугольное оледенение, следы которого известны с середины XIX века, и недавно установленные обширные оледенения в позднем ордовике. Невыраженность в геологической летописи ледникового периода в юрское время приписывается стечению неблагоприятных обстоятельств: тогда при глобальном похолодании в высоких широтах не было крупных массивов су-

ши, где могли бы сформироваться материковые ледниковые покровы. Необычайный интерес представляют подробно освещенные в данной книге проявления целой серии докембрийских оледенений, наиболее древних на Земле, которые оказали колоссальное влияние на развитие жизни.

Во многих главах книги тщательно рассматриваются следы древних ледников в виде конкретных отложений и форм рельефа. Однако в силу своей научно-популярной ориентации книга вовсе не претендует на исчерпывающую полноту изложения стратиграфических, литологических или геоморфологических материалов: напротив, они приводятся лишь в той мере, в какой это необходимо для установления последовательности или интенсивности оледенений прошлого. Научной основой для регистрации этих данных служат концепция тектоники плит, анализ глубоководных морских осадков, палеомагнитные исследования и датирование по радиоизотопам, т.е. наиболее передовые направления в современной геологии, хорошо известные всем, кто интересуется историей Земли. Авторы книги широко использовали новейшие достижения гляциологии, что помогло раскрыть условия существования древних ледников и ледниковых покровов, их температурный режим, динамические особенности и характер воздействия на рельеф. В книге дана развернутая картина эволюции наземных, подземных и морских льдов и заложен фундамент для трактовки ледниковых процессов с позиций системного анализа — от индивидуальных ледников через оледенения к ледниковым периодам, преобразовавшим облик Земли. В этом, пожалуй, заключается очевидная оригинальность книги. Такой подход оказывается реальной базой для реконструкции дальнейшего развития оледенения и других зависящих от него природных условий нашей планеты. Именно теперь, когда стремительно растет воздействие человека на окружающую среду, буквально на глазах нынешнего поколения происходят резкие и порой необратимые изменения в ее структуре, а во многих местах естественные ландшафты уступают место сильно преобразованным, антропогенным. Гигантские масштабы этих процессов определяют необходимость самого тщательного анализа ведущих естественных факторов, поскольку нежелательные нарушения их направленности могут привести к катастрофическим последствиям. В центре внимания исследователей в первую очередь оказываются климат и оледенение. Прогностическим работам в этой области посвящается специальный раздел рассматриваемой книги.

Отдавая должное научной компетенции и эрудиции авторов монографии, следует отметить, что некоторые из выдвигаемых ими положений нельзя принимать безоговорочно. По нашему мнению, преувеличена роль гляциоклиматических изменений в новейшей истории народов Европы, недооценивается воздей-

ствие ледников на рельеф горных стран, не показана общность механизмов формирования боковых и конечных морен.

В тексте перевода мы стремились по возможности сохранить своеобразие манеры изложения и научной лексики оригинала. При этом необходимо сделать некоторые оговорки. Авторы книги пользовались уже почти не употребляющимся термином «третичный период», с которым в современной отечественной литературе соотносят два периода — палеогеновый и неогеновый. Внести исправления мы не сочли возможным, так как пришлось бы столкнуться со сложностями перевода, например, таких понятий, как «середина третичного периода» и т. п.

В книге часто применяется термин «последнее межледниковье», которое сопоставляется с рисс-вюрмским межледниковьем в Альпах и эмским — на севере Европы, но вместе с тем неоднократно проводится сравнение голоцена с межледниковьем. Таким образом, термин «последнее межледниковье» утрачивает логический смысл.

Для обозначения крупных ледниковых образований на суше авторы книги почти всюду использовали термин «ледниковый покров» (icesheet) и лишь очень редко — «ледниковый щит» (iceshield, ice dome), что и сохранено в переводе. Ясно, что применение термина «ледниковый покров» для крупных ледниковых тел, облекавших поверхность горных стран, не вполне правомочно; в этих случаях гораздо лучше было бы ввести другой термин (хотя бы «ледниковый чехол»). Тем не менее от этого пришлось отказаться, так как в оригинальном тексте не всегда имеются точные указания на морфологию рассматриваемых ледниковых образований в горах.

При переводе мы, как правило, отдавали предпочтение русским вариантам терминов, лишь в нескольких случаях пришлось прибегнуть к транслитерации (например, dropstone — дропстон) из-за отсутствия подходящих терминов в отечественной литературе. Несомненную пользу читателям книги принесет сопровождающий ее словарь терминов.

В целом мы надеемся, что книга «Зимы нашей планеты» будет с интересом встречена многочисленными читателями в нашей стране. Эта книга может оказаться полезной для специалистов, сталкивающихся с проявлениями древнего и современного оледенения. Однако несравненно более важно то, что книга привлечет внимание всех, кто интересуется историей развития нашей планеты и долгосрочными прогнозами состояния окружающей среды.

Л. Р. Серебрянный,
доктор географических наук

БЛАГОДАРНОСТИ

Нам хотелось бы поблагодарить следующих лиц и организации за любезно предоставленное разрешение на воспроизведение иллюстраций: компанию Aerofilms – рис. 26; Х. Энджела – рис. 94 (справа сверху); Я. Бардарсона – рис. 146; Британский музей – рис. 91; компанию British Petroleum – рис. 169; Ч. Клаппертона – рис. 54 и 87; Э. Дербишира – рис. 50, 51, 57, 58, 62, 65, 66, 67, 68, 71, 76, 79 и 81; Министерство энергетики, рудников и ресурсов Канады – рис. 147, 155 и 156; Р. В. Фейрбриджа – рис. 113, 114, 116, 118, 124; Геодезический институт Дании, Копенгаген, – рис. 1, 2, 25, 42, 47, 48, 64, 84, 99, 122, 145, 158, 160; М. Юханссона – рис. 97; Б. С. Джона – рис. 20, 53, 59, 61, 73, 77, 80, 83, 148; А. Косибу – рис. 60, 72; Х. А. Мак-Клюра – рис. 120; Дж. Росс-Маккея – рис. 82; К. Маннерфельта – рис. 78; собрание картин Менселл – рис. 168; NASA – рис. 98; Национальное хранилище аэрофотоснимков Канады – рис. 4; Д. Норта – рис. 117; Агентство печати «Новости», СССР, – рис. 90, 92, 161 и 162; хранилище картин Энн Ронан – рис. 21 (слева); газету Scotsman – рис. 21 (справа); Институт полярных исследований имени Скотта – рис. 39 и 40, А. Дж. Смита – рис. 22, 132; А. М. Спенсера – рис. 105, 106, 107 и 108; С. Стридсберга – рис. 109; студию Джон – рис. 75, 95 и 96; Д. Э. Сагдена – рис. 52 и 142; Ч. М. В. Суитинбенка и Министерство торговли США – рис. 7 и 8; галерею Тейт, Лондон, – рис. 19; С. Тоураринссона – рис. 74 и 119; Дж. Топхема – рис. 34 и 94 (справа внизу); Управление береговой охраны США – рис. 5, 38 и 85; Геологическую службу США – рис. 27; военно-морской флот США – контртитул, рис. 24, 36, 86, 96, 123 и 171; компанию Муррея Уотсона Biofotos – рис. 94 (справа внизу); норвежскую компанию Fjellanger Widerøe – рис. 94 (справа сверху); Дж. М. Янга – рис. 100, 101 и 110.

Нам хотелось бы также поблагодарить Британскую антарктическую службу за разрешение использовать фотографии, сделанные сотрудниками этой организации.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Это книга о ледниковых периодах, которые периодически повторялись на нашей планете в необъятном геологическом прошлом. Теперь мы живем в период, который обычно тоже считают ледниковым¹, однако его геолого-таксономический ранг трудно уточнить из-за малой длительности. Ведь весь четвертичный период продолжается всего около 2 млн. лет, а известно, что некоторые древние ледниковые периоды длились более 50 млн. лет каждый. Древние оледенения, так же как и современное, оказывали глубокое воздействие на природу Земли: ледники покрывали значительные части материков, при этом изменялись климат и морские течения, а растительный и животный мир преобразовывался до неузнаваемости. Оледенения сопровождались вымиранием большого числа видов растений и животных; многие виды под воздействием механизмов «ледникового стимулирования» были вынуждены приспосабливаться к суровым и быстро и менявшимся климатическим условиям, при этом повышалось видовое разнообразие организмов. Если человека можно назвать продуктом нынешнего ледникового периода, то многие другие виды по аналогии следует считать продуктами более древних ледниковых периодов.

Цель книги «Зимы нашей планеты» — дать читателю представление о различных ледниковых периодах, и этой цели подчинена ее структура. Я надеюсь, что книга достаточно полно отразила роль ледниковых периодов в формировании облика Земли и развитии ее разнообразного растительного и животного мира. В гл. 1 показано глобальное значение льда и приведены основные геологические сведения, необходимые для понимания последующих разделов книги. Гл. 2 посвящена причинам возникновения ледниковых периодов, а в гл. 3 Эдвард Дербишир рассматривает влияние крупных оледенений на окружающую среду. В гл. 4–7 обсуждаются конкретные ледниковые периоды. В гл. 4 Грант Янг разбирает весьма разрозненные свидетельства существования ледниковых периодов в докембрии. В гл. 5 Родс Фейрбридж при-

¹ Здесь имеется в виду четвертичный период. — Прим. перев.

водит свидетельства ордовикского оледенения, уделяя особое внимание сенсационным открытиям следов оледенения в пустыне Сахаре. В гл. 6 я представил обобщающий обзор многочисленных данных о пермско-каменноугольном ледниковом периоде, который особенно сильно проявился на южных материках. Далее, в гл. 7 Джон Эндрюс описывает особенности «нашего» — четвертичного — ледникового периода. Эта глава существенно отличается от других глав, поскольку мы располагаем многочисленными свидетельствами развития четвертичного оледенения и его побочных воздействий, а также аналитическими данными. С первого взгляда некоторые нынешние открытия и умозаключения о четвертичном оледенении могут произвести ошеломляющее впечатление, но следует напомнить, что, только поняв особенности этого близкого к нам ледникового периода, можно правильно истолковать события более древних ледниковых периодов. Надо также отметить, что, только выяснив истинные причины возникновения и таяния кайнозойских ледниковых покровов в умеренных широтах, мы сможем прогнозировать изменения климата Земли в последующие несколько столетий. Этой теме посвящена последняя глава книги.

Авторы отдельных глав являются авторитетными специалистами в соответствующих отраслях науки.

Эдвард Дербишир — профессор географии в университете города Кил, Великобритания. Как геоморфолог, он специально изучал воздействие оледенения на рельеф и провел полевые работы во многих районах, включая Арктику и Антарктиду.

Грант Янг — геолог, предпринявший тщательное изучение следов оледенения в докембрии, особенно на территории Северной Америки. В настоящее время он работает на кафедре геологии университета Западного Онтарио в Канаде.

Родс Фейрбридж, профессор геологии Колумбийского университета в Нью-Йорке, давно занимался изучением климатов прошлого. Он опубликовал много книг и статей по проблемам ледниковых периодов и активно участвовал в обсуждении теорий климатических изменений.

Джон Эндрюс — в настоящее время профессор Института арктических и альпийских исследований в городе Боулдер, штат Колорадо, США. Много лет он работал в Канадской Арктике, изучая проблемы возникновения и распада Северо-Американского ледникового покрова, и написал интересные труды о взаимоотношениях ледников с окружающей средой.

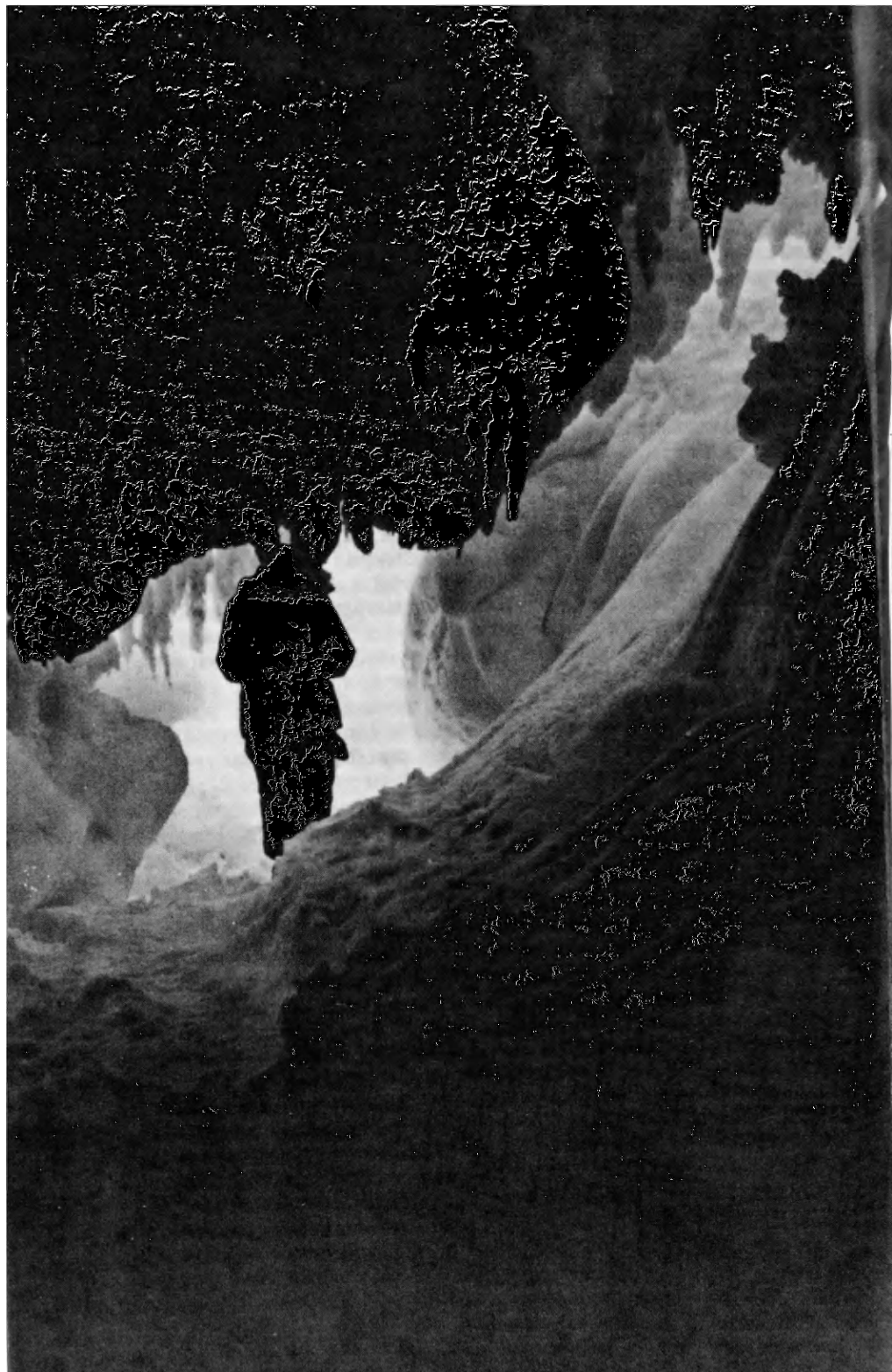
Что сказать о самом себе? Об этом вполне достаточно написано на переплете этой книги.

В главах книги отражаются личные интересы и взгляды авторов. Проницательный читатель обнаружит противоречия и несоответствия, но надо иметь в виду, что изучение древних ледни-

ковых периодов еще находится в зачаточном состоянии, дискуссии же всегда полезны для науки. Многие теоретические положения современной гляциологии и геоморфологии должны быть проверены применительно к оледенениям нынешнего ледникового периода, и лишь через несколько лет их можно будет успешно использовать для трактовки ледниковых периодов прошлого. Надеюсь, что эта книга поможет определить направления предстоящих исследований. Я надеюсь также, что она донесет до читателя атмосферу далеких времен глобальных катастроф – тех времен, которые мы называли «зимами нашей планеты».

Брайан Джонс

Январь 1979 г.



1. ПЛАНЕТА ЗЕМЛЯ И ХОЛОДНЫЕ ИНТЕРВАЛЫ ЕЕ ИСТОРИИ

Брайан Джонс

Планета, на которой мы живем, в настоящее время переживает необычно теплую эпоху. Хотя наше время приходится на середину ледникового периода, природная обстановка, окружающая нас, типична для межледниковий, которые разделяют интервалы распространения обширных ледниковых покровов.

Всего лишь 18 000 лет назад большая часть Северного полушария была покрыта льдом: огромные материковые ледниковые покровы Северной Америки, Скандинавии и Западной Сибири далеко распространялись в умеренных широтах, а небольшие ледники развивались в горах в тропических широтах. Гренландский и Антарктический ледниковые покровы, которые существуют и в настоящее время, тогда имели большую мощность и распространялись гораздо шире, чем теперь. В совокупности в то время ледниковый лед покрывал около 40 млн. км², или почти 30% площади суши земного шара.

Влияние похолодания выходило за пределы территорий, покрытых льдом: система климатических и растительных зон сильно отличалась от современной, а температуры морских вод резко понижались. Площадь вечной мерзлоты, или многолетнемерзлых грунтов, расширялась до 27 млн. км² (20% площади суши). Плавающие льды, включая паковые, припайные и шельфовые льды и айсберги, занимали примерно 50% площади Мирового океана.

Следовательно, всего 18 000 лет назад значительно более половины площади нашей планеты в той или иной степени испытало воздействие льдов, и в периоды исключительно снежной погоды необъятные просторы в Северном полушарии скрывала ослепительно белая пелена. Если бы пришелец, разбирающийся в состояниях воды, посетил тогда нашу Землю, он наверняка назвал бы ее «планетой льда».

Такая география Земли 18 000 лет назад — отнюдь не плод фантазии. В нынешний (четвертичный.— *Перев.*) ледниковый период лед оказывал влияние на поверхность нашей планеты в столь больших масштабах по крайней мере четыре раза, но отдельные авторитетные современные исследователи за последние 2 млн. лет насчитывают до 17 различных оледенений. Некоторые из них, несомненно, были более грандиозными, чем последнее

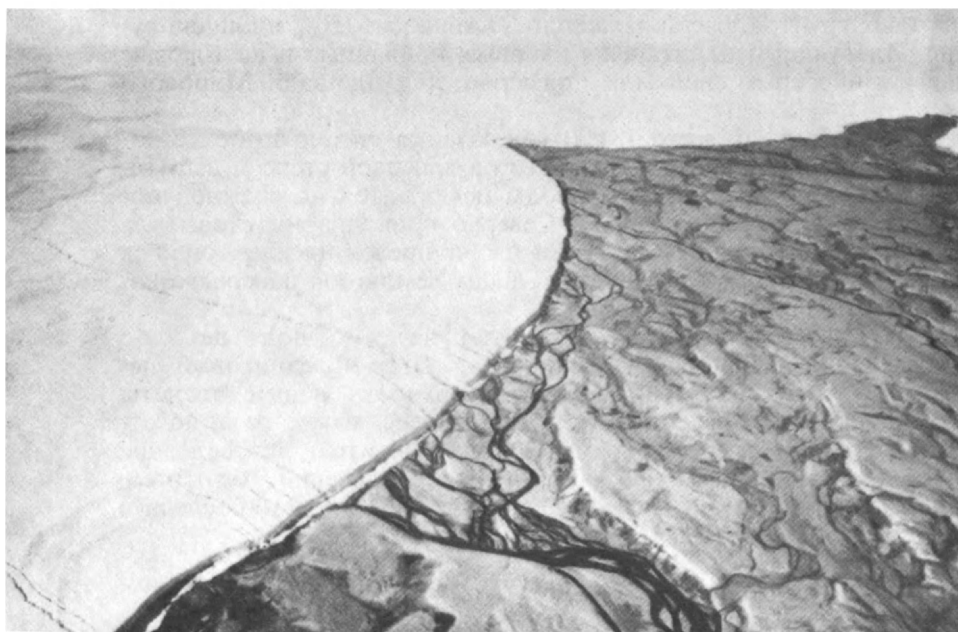


Рис. 1. Ледниковые покровы Северного полушария во время оледенения.

В Южном полушарии Антарктический ледниковый покров обычно занимал большую площадь, чем в настоящее время. Площади, занятые ледниковыми покровами и крупными ледяными шапками, заштрихованы.

Рис. 2. Край Гренландского ледникового покрова.

Область распространения этого покрова подвергается воздействию различных процессов – ледниковой эрозии и аккумуляции, а за пределами покрова облик поверхности непрерывно изменяют талые ледниковые воды.



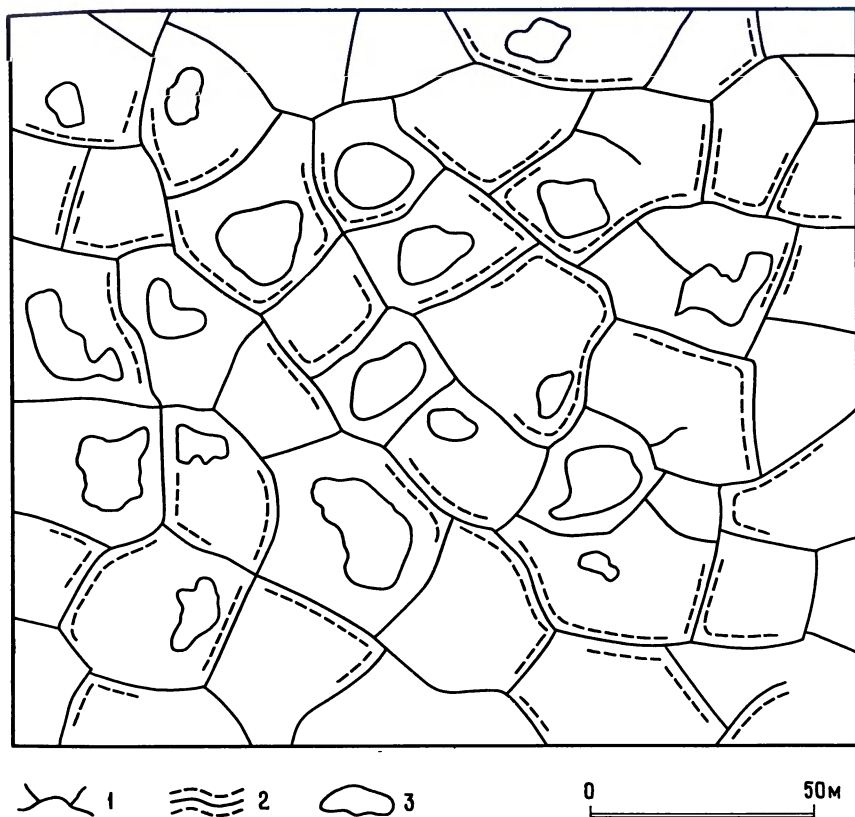


Рис. 3. Структурный грунт на полуострове Таймыр, Сибирь.

Сеть полигональных ячеек указывает на развитие вечной мерзлоты, или многолетнемерзлого грунта. 1 – ледяные клинья; 2 – гряды высотой до 1 м; 3 – небольшие озера (скопления талых вод).

оледенение. Например, около 100 000 лет назад ледниковые покровы занимали почти 45 млн. км² территории суши; области развития вечной мерзлоты и морских льдов также распространялись на значительно большую площадь.

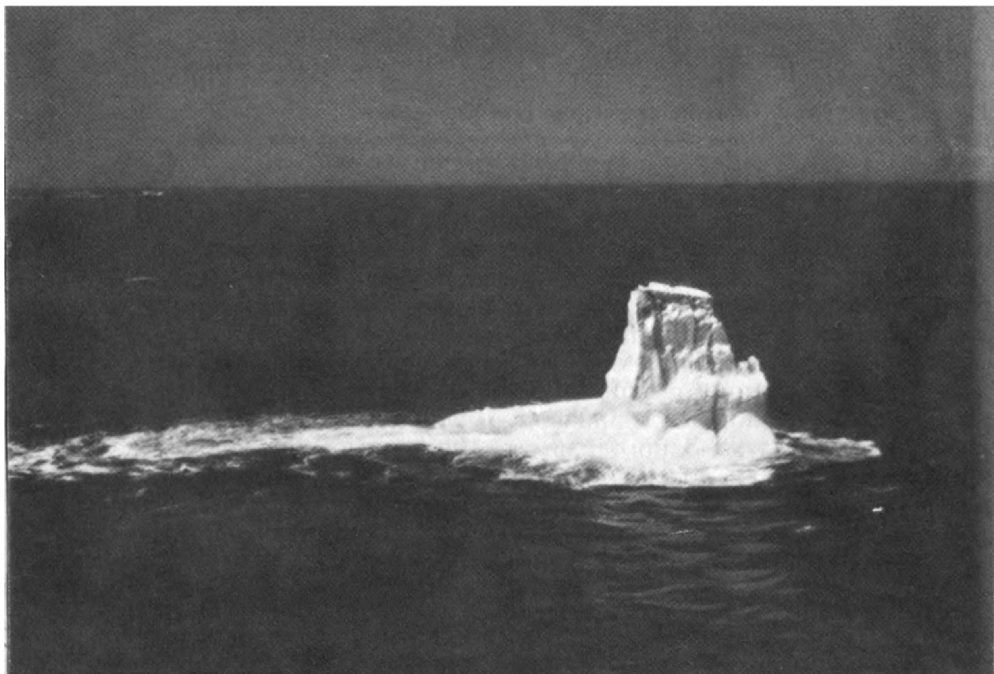
Межледниковая обстановка на Земле, подобная современной, – сугубо временное состояние. Если судить по истории более ранних оледенений и межледниковий нынешнего ледникового периода, интервалы холодного климата, по-видимому, продолжались около 100 000 лет каждый, тогда как интервалы теплого климата – менее 20 000 лет. Современное межледниковье уже длится свыше половины указанного срока, и есть основания по-



Рис. 4. Ледяное поле в заливе Джеймс, Канада.

Плавучие льды этого типа, вероятно, широко распространялись в высоких и умеренных широтах во время всех оледенений прошлого.

Рис. 5. Небольшой айсберг, отколовшийся от конца одного из ледников западной Гренландии, уносится течением на юг в море Лабрадор.



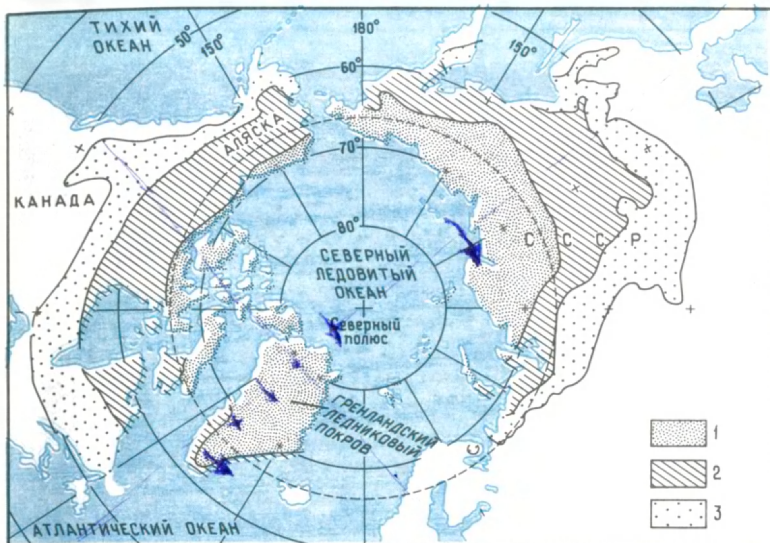
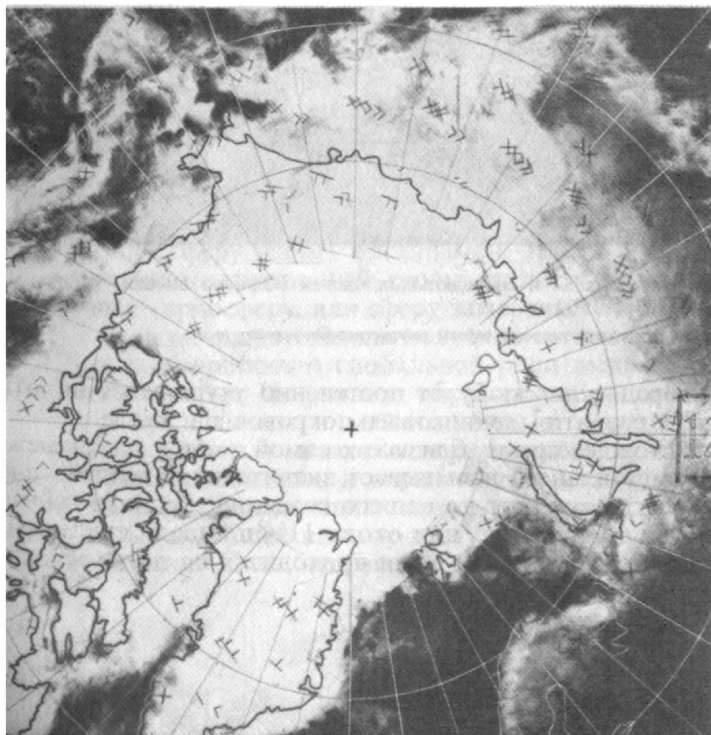


Рис. 6. Распространение вечной мерзлоты (многолетнемерзлых пород) в Северном полушарии.

Обширные территории в Канаде и Сибири скованы вечной мерзлотой. Распространение многолетнемерзлых пород: 1 – сплошное; 2 – островное; 3 – редкоостровное.

Рис. 7. Снимок арктических районов, сделанный со спутника в начале мая 1970 г.

Виден замерзший океан и площади суши, покрытые снегом и льдом.



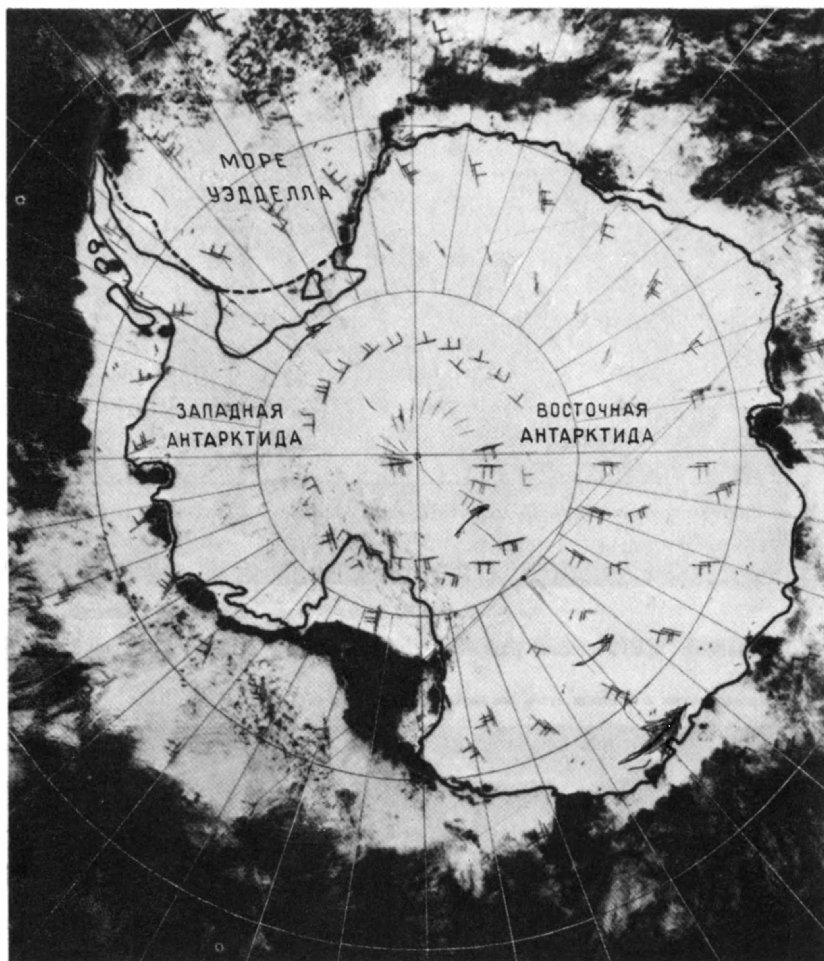


Рис. 8. Снимок Антарктиды и сопредельных частей Южного океана, сделанный со спутника в декабре 1969 г.

Видны Антарктический ледниковый покров и районы распространения морских льдов.

лагать, что впредь климат будет постепенно ухудшаться вплоть до очередного развития ледниковых покровов на Земле.

Даже в настоящее время, близкое к самой теплой части межледниковья, наша планета испытывает значительное воздействие льда, что не всегда доходит до нашего сознания. Ледники сейчас занимают почти 15 млн. км², или около 11% площади суши земного шара. Еще 14% площади суши приходится на долю много-

летнемерзлых грунтов: в Северном полушарии широкий пояс вечной мерзлоты протягивается через Северную Америку и Евразию. Мерзлота там—самый важный компонент природной среды. Зимой большая часть этого широкого пояса, а также значительная часть суши в умеренных широтах покрыты сезонным снегом. В такие периоды свыше половины площади суши на нашей планете имеет снежный покров.

Кроме того, большая часть Мирового океана скована плавучими льдами. Северный Ледовитый океан поистине является замёрзшим океаном: зимой не менее 12 млн. км² его поверхности занимают плавучие льды. В феврале—марте (время максимального распространения снежного покрова на суше в Северном полушарии) плавучие льды вокруг берегов Антарктиды наименее развиты, поскольку на эти месяцы приходится антарктическое лето. Зато зимой в океане вокруг Антарктиды плавучие льды занимают площадь в 20 млн. км², между тем как в это время в Северном Ледовитом океане температуры воды самые высокие и ареал плавучих льдов сокращается. В любое время года около 25% поверхности Мирового океана сковано плавучими льдами.

Значение ледяного покрова Земли постепенно осознается исследователями, работающими в различных отраслях науки. Приблизительно 75% ресурсов пресной воды сконцентрировано в ледниках, преимущественно в Антарктическом ледниковом покрове. Огромные массы льда, развитые в полярных районах, оказывают существенное воздействие на работу глобальной «климатической машины», а также на колебания уровня Мирового океана. Ледники и морские льды подвергаются все более глубокому исследованию, поскольку от этого зависит выяснение многих процессов, определяющих изменения окружающей среды и прогнозирование климатических изменений в различных масштабах. Всего десять лет назад было принято говорить, что наша Земля имеет четыре основные оболочки—атмосферу, или воздушный полог; литосферу, или толщу плотных и рыхлых пород на поверхности планеты; гидросферу, или водную толщу; биосферу, или сферу живых организмов. Теперь авторы руководств по изучению окружающей среды стали выделять также пятую оболочку—криосферу, или сферу замёрзшей воды. Огромное значение льда на планете Земля получило признание не очень давно.

Выше говорилось о глобальной роли льда в нынешнем ледниковом периоде. Но равным образом это положение можно отнести к ледниковым и межледниковым обстановкам, которые господствовали в ледниковые периоды пермско-каменноугольного, позднеордовикского и варангского времени. Все они рассматриваются в последующих главах этой книги.

«Зимы» на нашей планете наступали в геологической истории периодически. Цель настоящей книги—свести воедино все, что

мы знаем о ледниковых периодах, и проанализировать их значение в развивающемся мире с его усложнявшимся разнообразием жизненных форм.

Часто говорят, что человек – продукт нынешнего ледникового периода. Однако, может быть, более древние ледниковые периоды подобным же образом стимулировали развитие растений и животных? Это лишь один из вопросов, на которые мы попытаемся ответить в настоящей книге.

ОЩУЩЕНИЕ ВРЕМЕНИ

Прежде чем создать реальную картину хронологической приуроченности ледниковых периодов и выяснить их значение для развития живых существ, необходимо составить некоторое представление о геологическом времени. В XVIII в. еще было принято считать, что общая продолжительность геологического времени составляет около 6000 лет. Позднее многие ученые пришли к выводу, что для накопления установленных к тому времени толщ осадочных пород требовалось по крайней мере 20 или 30 млн. лет, но даже и по другим критериям возраст Земли редко оценивали более чем в 40 млн. лет. Только благодаря широкому применению радиоизотопных методов датирования в середине текущего столетия была установлена достоверная «абсолютная» хронологическая шкала истории нашей планеты.

В настоящее время возраст Земли обычно оценивают примерно в 4600 млн. лет. Хотя на нашей планете не известны породы такого возраста, метеориты, которые, как полагают, образовались приблизительно одновременно с Землей, были датированы в 4600 млн. лет и такой же возраст имеют самые древние породы Луны. Древнейшие из известных пород Земли, обнаруженные в Гренландии, образовались около 3800 млн. лет назад. Они относятся к самой ранней части докембрийского эона, первого из крупных подразделений геологической истории Земли.

Многие люди еще с трудом осознают масштаб геологического времени. Для малыша, ожидающего обед, 30 мин тянутся долго, и даже взрослые, умеющие довольно реально оценивать время, с трудом представляют себе условия, существовавшие на поверхности Земли более ста лет назад. Несмотря на накопленный жизненный опыт, человек еще невероятно наивен в своих оценках времени. Однако, чтобы выяснить эволюцию нашего дома – планеты Земля, мы должны научиться понимать масштабы геологических эонов, эр, периодов и эпох.

Докембрийский эон охватывал около 85% времени, истекшего после того, как образовалась Земля. Мы еще поразительно мало знаем об истории докембрия, продолжавшегося примерно 4 млрд. лет, но постепенно геологи начинают подразделять этот

весьма длительный эон на меньшие хронологические единицы. Около 600 млн. лет назад помимо одноклеточных стали появляться первые организмы, а в палеозойскую эру происходило постепенное развитие жизненных форм. Около 440 млн. лет назад возникли первые наземные растения, а животные вышли на сушу примерно 45 млн. лет назад.

В мезозойскую эру материки начали перемещаться, приближаясь к их современному положению, и произошли резкие изменения климата. В то время появились динозавры, которые вымерли в конце мелового периода.

В течение следующей, кайнозойской эры, охватывающей последние 65 млн. лет, климат постепенно ухудшался и достиг в этом направлении кульминации в четвертичный ледниковый период. В этот же период возник и *Homo sapiens*, человек современного типа. Поразительный факт: человек, часто считающий себя дитем матери-Земли, существует лишь крохотную частичку геологического времени. Если всю геологическую историю приравнять к 46 годам, то окажется, что возраст человека составляет лишь 4 часа.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЛЕДНИКОВЫХ ПЕРИОДОВ ВО ВРЕМЕНИ

Ледниковые периоды повторялись через довольно равные интервалы геологического времени. Несмотря на различия в оценках продолжительности отдельных ледниковых периодов, последние, вероятно, разделялись интервалами приблизительно в 150 млн. лет. Причины такой ритмичности не ясны, однако эта проблема детально разбирается в гл. 2.

В табл. 1 заметна аномалия: в позднеюрское время, около 150 млн. лет назад, следовало ожидать широкого развития оледенения, но в геологической летописи обнаружены лишь немногочисленные слабо выраженные следы воздействия ледников. Может быть, это значит, что видимая регулярная повторяемость других ледниковых периодов лишь случайна? С другой стороны, это может просто означать, что, несмотря на наличие благоприятных природных предпосылок для наступления юрского ледникового периода, конкретные условия оказались не вполне подходящими для развития ледниковых процессов.

В то время могло произойти некоторое похолодание климата в глобальном масштабе, но вблизи от Южного или Северного полюсов не было крупных массивов суши. Кроме того, значительные части материков были затоплены мелководными морями, что препятствовало разрастанию ледниковых покровов. И наконец, в юре отсутствовал глобальный орогенез (горообразование). Каждый из остальных ледниковых периодов совпадал

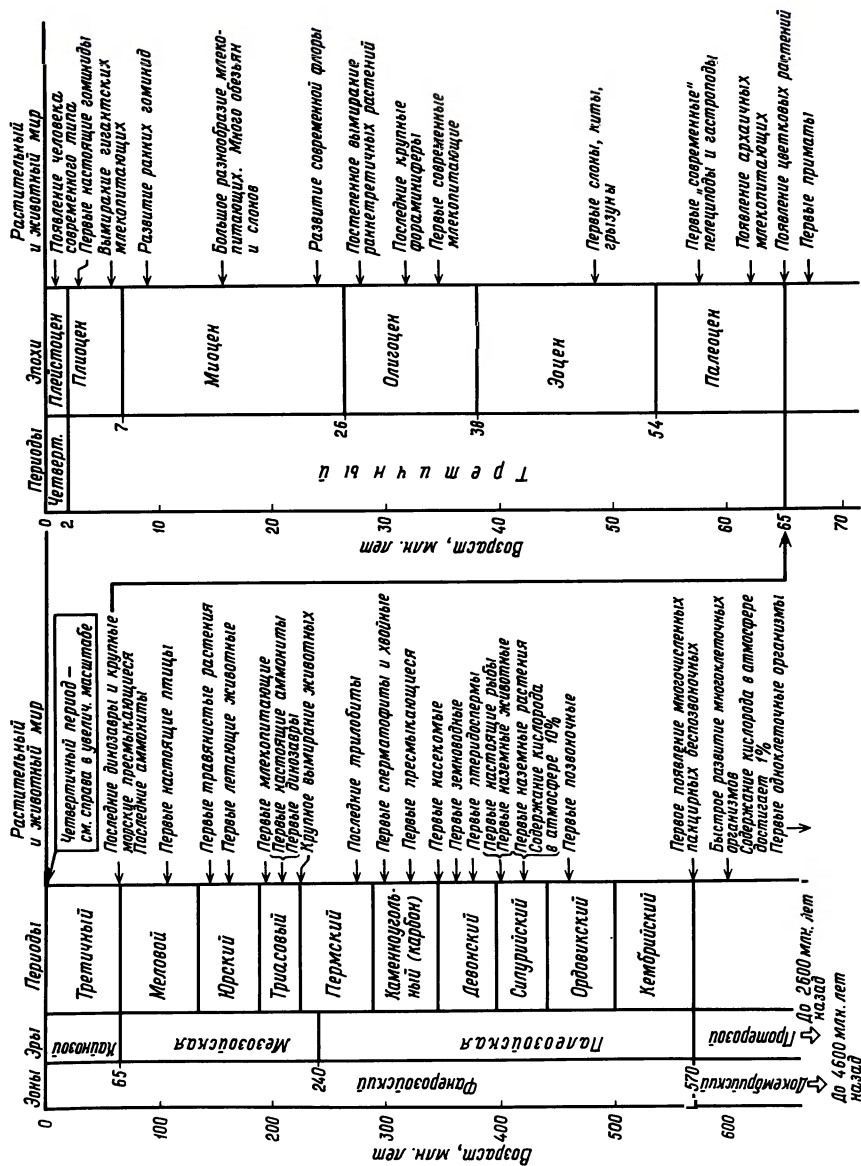


Рис. 9. Шкала геологического времени, составленная преимущественно на основе радиоизотопных определений возраста. В правой части таблицы представлены некоторые важнейшие события в истории развития растений и животных.

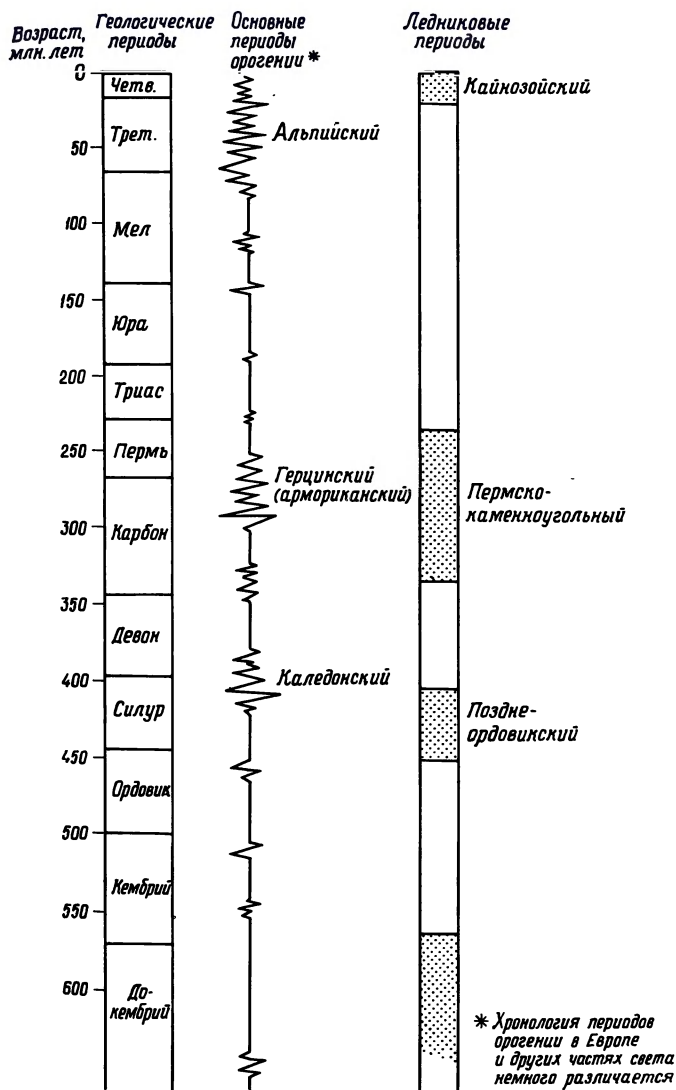


Рис. 10. Распределение периодов горообразования и ледниковых периодов за последние 600 млн. лет.

Хотя основные периоды горообразования на разных материках приходились на различное время, некоторые наиболее выраженные и широко распространявшиеся фазы этих периодов можно проследить на всех материках.

Таблица 1

Распределение ледниковых периодов в геологической истории Земли

Название ледникового периода	Примерный возраст, млн. лет	Примерная продолжительность, млн. лет	Геологический период
Кайнозойский	1	10	Четвертичный и третичный
Мезозойский?	150?	Не известна	Юрский?
Пермско-каменноугольный	300	50?	Пермский и каменноугольный
Позднеордовикский	450	25?	Силурийский и ордовикский
Варангский, или эокембрийский	600	20?	Позднепротерозойский
Стёртский, или инфракембрийский I	750	50?	—
Гнейсёский, или инфракембрийский II	900	50?	Средне- и позднепротерозойский
Гуронский (вероятно, включает два или три ледниковых периода)	2300	200?	Раннепротерозойский

с крупным периодом горообразования, и, хотя здесь трудно разделить причину от следствия, существует определенная связь между сильным поднятием суши и обширным оледенением. Этот вопрос более подробно разбирается в следующей главе.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНОВА

Из предыдущего изложения следует, что понимание древних ледниковых периодов в большой степени зависит от состояния некоторых концепций современной геологии. Приводимый ниже краткий обзор может оказаться полезным для читателей, не знакомых с новыми представлениями, которые преобразили науку о Земле за последние два десятилетия.

Поверхность Земли сложена плотными породами, составляющими земную кору. Под океанами кора обычно имеет мощность около 6 км, тогда как под материками она достигает 30–40 км. Эти два типа коры, океаническая и континентальная, различаются по составу и плотности, но в них обоих много силикатов с высоким содержанием алюминия.

Следующий слой, залегающий под корой, — мантия, ее предполагаемая мощность 2900 км. Она в основном состоит из твердого (но тем не менее подвижного) обогащенного железом и маг-

нием силикатного материала. Верхняя часть мантии вместе с корой образует жесткую оболочку — литосферу.

Центральный слой, или ядро Земли, отличается очень высокой плотностью и находится большей частью в расплавленном состоянии, представляя собой смесь никеля и железа.

Хотя кору и мантию обычно рассматривают как твердые оболочки, они не совсем жесткие. В определенных условиях они деформируются как карамель, вар или лед, т. е. они очень медленно растекаются при постепенно повышающемся давлении, но раскалываются при быстро растущем давлении. Этими двумя свойствами обычно обладают породы, обнажающиеся на поверхности Земли; они могут быть либо смяты в складки, либо разбиты трещинами. Образование складок, или изгиб слоев (пластов) пород, обычно связывается с постепенным давлением изнутри; если давление достигает уровня, при котором порода больше не может деформироваться, происходит образование трещин или разломов и слои пород смещаются вдоль возникшей плоскости разлома. В небольших масштабах эти процессы можно наблюдать в береговых уступах, сложенных деформированными пластами пород. Однако образование складок и разломов происходит и в очень крупных масштабах. Земная кора и мантия постоянно очень медленно перемещаются под воздействием различных сил, проявляющихся в недрах нашей планеты, и эта мобильность приобретает основополагающее значение для понимания размещения и возникновения материков и океанов, горных цепей и плато, впадин и прибрежных низменностей.

Движение мантии предопределяет горизонтальное скольжение огромных участков литосферы по земной поверхности, что со временем вызывает взаимное соприкосновение областей, сложенных разными породами. Такие «плоты» из материала литосферы теперь называют плитами, а тектонические процессы, связанные с их движением, — тектоникой плит. Шесть основных и шесть-семь второстепенных плит в совокупности покрывают всю поверхность Земли. Они состоят из коры и мантии, спаянных воедино.

Выделяют разные типы границ плит. Когда обе плиты удаляются друг от друга, как, например, в середине Атлантического океана, базальтовый материал мантии поднимается к поверхности и образует новую океаническую кору и литосферу. По мере того, как этот материал добавляется к раздвигающимся плитам, последние растаскиваются конвективными течениями мантии, действующими подобно гигантским конвейерам. Этот процесс, получивший название спрединга (или раздвигания океанического дна), ведет к образованию выраженных срединно-океанических хребтов, которые в настоящее время выделены во всех глубоководных океанических бассейнах. Спрединг также способствует расширению океанов и размежеванию материков.



Рис. 11. Карта основных литосферных плит, отражающая современную ситуацию. Показаны также срединно-океанические хребты и горные хребты, образовавшиеся вследствие столкновения плит. 1—направление движения плиты; 2—предполагаемые границы плит; 3—границы плит (преимущественно в зонах срединно-океанических хребтов); 4—разрушающийся край плиты и направление подвига.

Когда две плиты сталкиваются, всегда возникает разрушающийся (или деструктивный) край, отмеченный субдукцией материала одной плиты, который затягивается в нижележащую мантию (откуда он поднялся миллионы лет назад) под другой плитой. Этот материал обычно представлен плотной океанической корой, тогда как более легкая и плавучая континентальная кора деформируется, но не погружается. «Активные» края плит рассматриваемого типа обычно ассоциируются с глубоководными желобами, интенсивной складчатостью в «новых» осадках, горообразованием, вулканической деятельностью и землетрясениями. На границах скользящих относительно друг друга плит могут возникать разломы и происходить землетрясения, но горы и океанические желоба не образуются.

В свете современных теорий спрединга океанического дна и тектоники плит нетрудно объяснить размещение активных вулканов и очагов землетрясений на нашей планете: они чаще всего приурочены к границам плит, где образуется новая кора или где старая кора подвергается субдукции. Карты современного вулканизма и землетрясений необычайно хорошо согласуются с картами границ литосферных плит.

Не возникает также никаких трудностей при объяснении размещения самых низких и самых высоких участков на нашей планете. Глубоководные желоба формируются на активных континентальных окраинах, где происходит погружение края одной

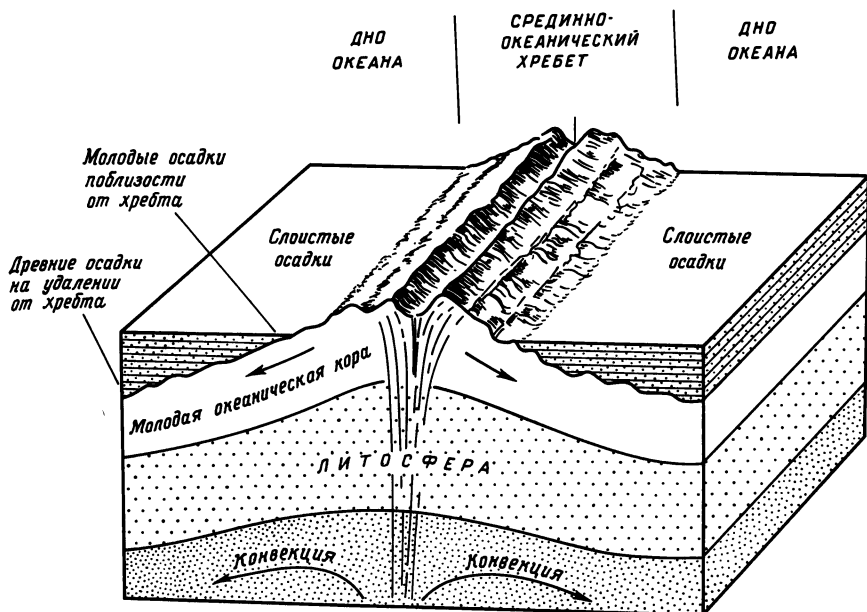
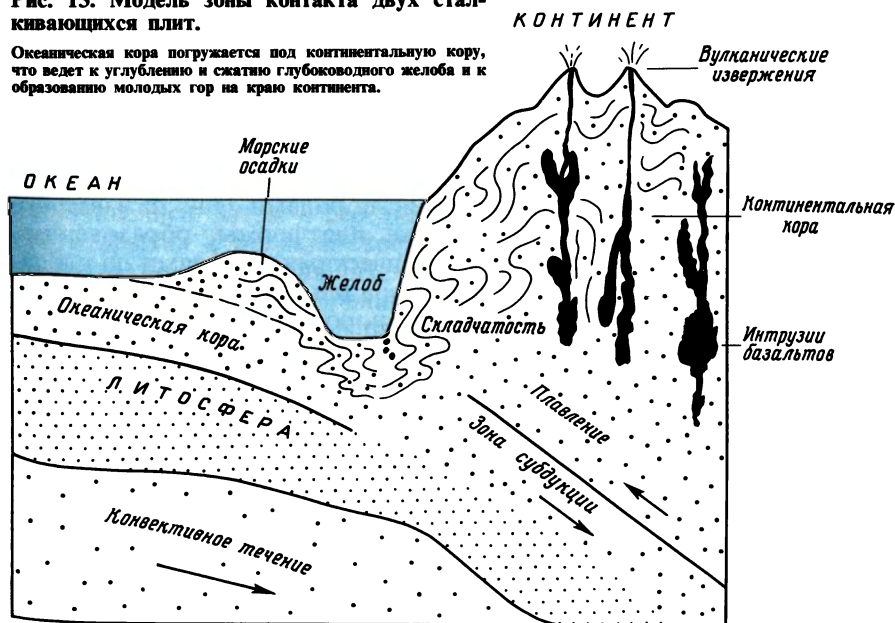


Рис. 12. Упрощенная модель срединно-океанического хребта, показывающая, как образуется новая кора.

Молодые осадки, накапливающиеся на дне океана поблизости от хребта, перемещаются словно по конвейеру.

Рис. 13. Модель зоны контакта двух сталкивающихся плит.

Океаническая кора погружается под континентальную кору, что ведет к углублению и сжатию глубоководного желоба и к образованию молодых гор на краю континента.



плиты под край другой. От нисходящей миграции коры в зоне субдукции в основном зависит углубление желоба, но проявляется и побочное воздействие выжимания, приводящее к значительным деформациям осадков, накапливающихся в желобе. Глубокие впадины, заполненные осадками, обычно называют геосинклиналями; среди них в настоящее время геологи различают несколько типов, но все они в сущности образуются либо на краях сталкивающихся плит, либо в непосредственной близости от таких краев. Горные цепи тоже большей частью возникают вдоль таких зон столкновения в результате сжатия краев континентальных плит. Силы, возникающие при столкновении плит, вполне могут вызывать сжатие и дробление очень мощных толщ древних континентальных пород и значительные поднятия таких горных сооружений, как Скалистые горы, Анды, Гималаи и Альпы. Нарушение залегания древних пород обычно сопровождается интрузивной и экструзивной вулканической деятельностью и интенсивным разломообразованием, сопровождающимся землетрясениями. Некоторые горы сложены смятыми в складки осадками, которые выполняли глубоководные океанические желоба, и каждая фаза горообразования, или орогенеза, приводила к сложному перемешиванию древних и молодых континентальных пород. В редких случаях в горообразующих процессах принимают участие блоки океанической коры. Образовавшиеся горные цепи могут располагаться в основном выше или ниже уровня моря.

С удалением от краев плит устойчивость земной коры сильно возрастает: как на дне океанов, так и на суше распространены древние равнины, плато, денудационные горы и аккумулятивные впадины, которые не подвергаются сильному воздействию тектонических процессов. Во внутренних районах материков располагаются очень древние кратоны; они преимущественно сложены докембрийскими кристаллическими породами (так называемые щиты), но там могут быть также платформы, образованные древними осадочными и метаморфическими породами со следами куполов, сводовых поднятий и впадин на месте древних геосинклиналей. Возраст большинства пород во внутренних частях материков превышает 600 млн. лет.

На дне океанов вдали от срединно-океанических хребтов располагаются обширные выровненные области, известные под названием абиссальных равнин. Здесь происходит постепенное накопление глубоководных океанических осадков. В конечном счете эти осадки будут перемещаться в результате спрединга океанического дна к краям плит, где они будут приведены в соприкосновение с осадочными породами, которые формировались за счет медленной, но устойчивой денудации материков. В то время как океаническая кора переживает повторный цикл при субдукции,

обломки пород, уносимые в сторону моря при эрозии материков водой, ветром и льдом, возвращаются на материки в ходе процесса горообразования.

ПЕРЕМЕЩЕНИЕ МАТЕРИКОВ ВО ВРЕМЕНИ

Из вышеизложенного обзора следует, что конфигурация материков и океанов отнюдь не остается постоянной. Нынешнее распределение материков сложилось примерно за последние 100 млн. лет, с мелового периода. На протяжении предыдущей геологической истории материки многократно создавались, раскалывались и вновь объединялись. Иногда существовали обширные суперконтиненты, простиравшиеся почти от полюса до полюса на многие тысячи километров. В других случаях массивы суши были более раздроблены, и мозаика материков, океанов и морей широко распространялась на поверхности Земли. Там, где материки раскалывались, возникали моря и океаны, занимавшие рифтовые зоны земной коры, там, где материки приходили в соприкосновение, либо сталкивались, либо скользили один относительно другого, формировались горы. В некоторых областях участки океанического дна оказывались погребенными и поглощались подвижной корой, в других областях морские осадки подвергались сжатию и складкообразованию и участвовали в создании гор. Некоторые молодые горы в основном оставались ниже уровня моря, и только их вершины выступали в виде островов. Зато такие горы, как Скалистые или Гималаи, были подняты на тысячи метров над уровнем моря.

Четверть века назад подобные идеи были бы в основном отклонены как «катастрофические», хотя выдающийся провидец Альфред Вегенер привел ряд убедительных доводов в их поддержку еще в 1912 г. На протяжении полувека идеи Вегенера подвергались резкой критике, часто весьма ядовитой, или просто замалчивались. Затем в середине 60-х годов новые стимулирующие открытия в области геофизики способствовали переоценке многократно критиковавшихся и незаслуженно забытых идей Вегенера. Гипотеза перемещения материков неожиданно оказалась приемлемой и составила каркас теорий тектоники плит и спрединга океанического дна, которые произвели революцию в геологии и геофизике. Наконец, появилась всеобъемлющая теория, благодаря которой разрозненные наблюдения, накопленные более чем за столетие во многих отраслях геологии, удалось интерпретировать на последовательной и рациональной основе.

В задачи данной главы не входит детальный разбор представлений о перемещении материков и тектонике плит. Однако, чтобы разобраться в ледниковых периодах, которые имели место в геологической истории Земли, необходимо ознакомиться хотя

бы с некоторыми изменениями в географии нашей планеты за последние два миллиарда лет. Например, мы не можем понять палеогеографию пермско-каменноугольного времени и его ледниковый период, используя карту с современной конфигурацией материков и океанов. Теперь составлены палеогеографические карты пермско-каменноугольного времени и других интересующих нас периодов истории Земли. Эти карты были созданы на основе данных многих дисциплин: стратиграфии, палеонтологии, тектоники, палеоклиматологии, вулканологии, изучения земного магматизма и геоморфологии. Во многих отношениях карты неточны, но это документы, на которые будут впредь опираться все учебники геологии. Они также составляют основу для понимания других глав настоящей книги.

Пять карт, которые мы здесь приводим, показывают те изменения в положении материков, которые можно выявить на основе имеющейся информации. К этим картам можно обращаться при чтении гл. 4–7, но при этом полезно иметь в виду следующие основные положения.

Докембрий (600 млн. лет назад). Карта показывает, что некоторые из нынешних материков можно опознать по их очертаниям даже 600 млн. лет назад. Представленная на карте система сильно рассредоточенных материков отражает положение после раскола «протерозойского суперконтинента», существовавшего в интервале между 2200 и 1200 млн. лет назад. Этот суперконтинент привлекает наше внимание тем, что Африка и Аравия тогда располагались между Южной и Северной Америкой. Во время существования этого суперконтинента имели место по крайней мере два продолжительных ледниковых периода, которые обычно объединяют под названием раннепротерозойского, или гуронского, оледенения. После раскола этого суперконтинента наступил еще один ледниковый период или несколько таких периодов, проявившихся на всех материках, кроме, как это ни странно, Антарктиды. Это холодное время в целом рассматривается как «период самого обширного оледенения в истории Земли», поскольку оно продолжалось почти 600 млн. лет. Следует заметить, что по продолжительности оно эквивалентно всему фанерозою с начала кембрийского периода до наших дней. Принимая во внимание высказанные ранее замечания по поводу ритмичной повторяемости ледниковых периодов, можно поставить вопрос: мог ли один ледниковый период продолжаться 600 млн. лет? Логично предположить, что это была серия ледниковых периодов, и действительно некоторые исследователи по полевым наблюдениям и по радиоизотопным датировкам подразделили его на три самостоятельных ледниковых периода, названные гнейсским, стёртским и варангским. Проблемы докембрийских ледниковых периодов более обстоятельно разбираются Грантом Янгом в гл. 4, но

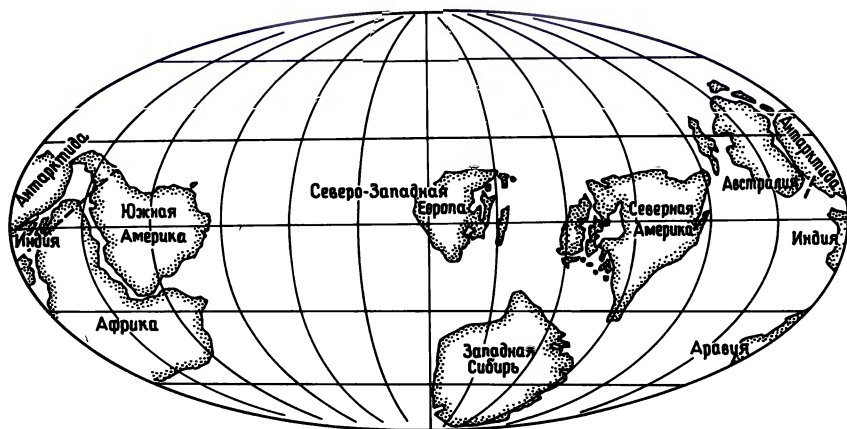


Рис. 14. Палеогеографическая карта позднедокембрийского времени.

здесь надо заметить, что интервал между ледниковыми периодами примерно в 150 млн. лет мог выдерживаться как в докембрийское время, так и в течение последующей истории Земли.

Поздний ордовик (450 млн. лет назад). К позднеордовикскому времени на поверхности земного шара произошли значительные перемещения материковых плит. На западе существовали обособленные друг от друга древние аналоги Северной Америки и Евразии; их разделило древнее «Атлантическое море». На востоке материк объединился в суперконтинент, который обычно называют Гондваной. В его состав входили древние устойчивые «блоки» Африки, Южной Америки, Индии, Антарктиды и Австралии. Для нашего взора Африка и Южная Америка представляются перевернутыми, и позднеордовикский Южный полюс находился на месте нынешней Сахары. Австралия располагалась в умеренных широтах Северного полушария, а Сибирский массив суши отделялся от других материков глубоким проливом. Учитывая подобную конфигурацию материков, мы не должны удивляться представлениям об ордовикском оледенении на территории пустыни Сахары, которое рассматривает Родс Фейрбридж в гл. 5.

Поздний карбон (300 млн. лет назад). К концу каменноугольного периода произошли дальнейшие глубокие изменения в палеогеографии Земли. Тогда существовали всего три крупных континента – Лавразия, состоявшая из нынешних Северной Америки, Гренландии и Европы (к западу от Урала); Ангария, включавшая Китай и Сибирь, и Гондвана, охватывавшая Южную Америку, Африку, Индию, Антарктиду и Австралию. Лавразия находилась

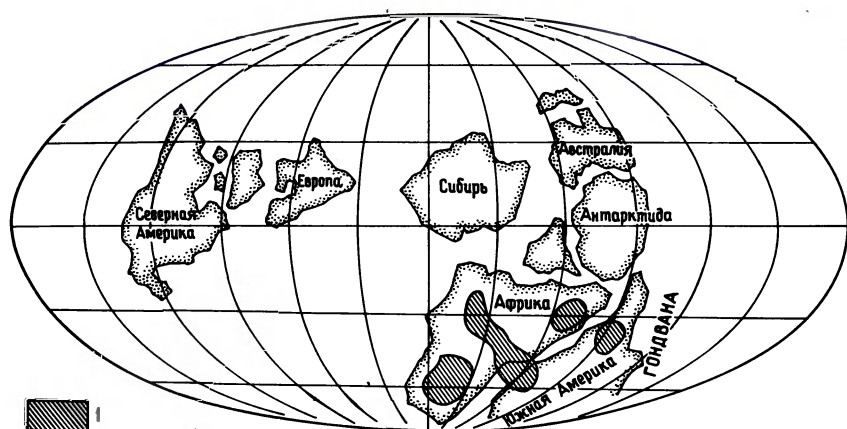


Рис. 15. Палеогеографическая карта позднеордовикского времени.

1 – предполагаемые ледниковые покровы.

в экваториальных широтах, а центр Ангрии – на 60-й параллели северной широты. Гондвана в то время большей частью располагалась в высоких широтах Южного полушария, и этим объясняется наличие нескольких различных центров оледенения в позднекаменноугольное время. Как сказано в гл. 6, материковый ледниковый покров Гондваны, вероятно, разрастался за счет слияния многих небольших ледниковых покровов, крупные массы льда сохранялись также и в начале следующего пермского периода.

Юра (150 млн. лет назад). В юрское время материки стали принимать более привычное для нас положение. В начале триасового периода все основные массивы суши были спаяны в единый колоссальный суперконтинент, который обычно называют Пангеей. Две части этого суперконтинента – Лавразия (на севере) и Гондвана (на юге) – омывались водами большого океана, который мы будем называть Тетисом. Впоследствии, в юрский период, Пангея начала распадаться. Открылся широкий пролив между северным суперконтинентом Лавразией и южным суперконтинентом Гондваной. Значительные части Лавразии были затоплены океаном, а Ангрия отделилась от Северной Америки. Гондвана тоже раскололась: Южная Америка и Африка отделились от Индии, Антарктиды и Австралии. Южный Атлантический и Северный Атлантический океаны еще не сформировались. Никаких свидетельств широкого распространения оледенения в юрское время не установлено. Оба полюса – Северный и Южный – находились в океанических районах. Восточная Ан-

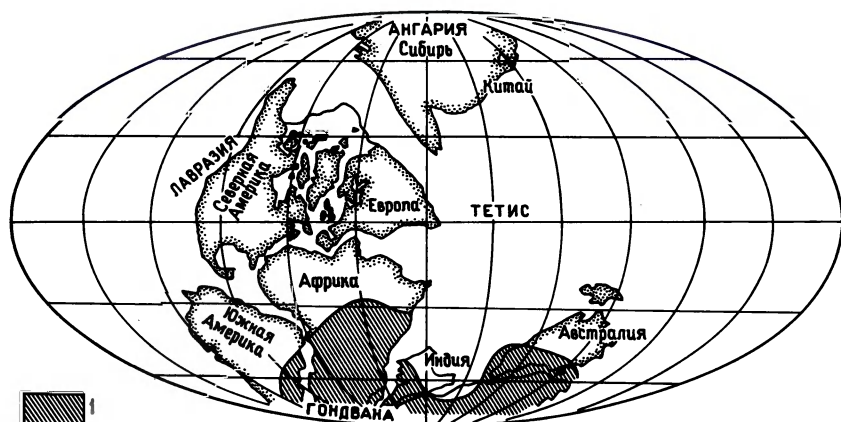


Рис. 16. Палеогеографическая карта позднеледникового периода.

1 — области распространения пермско-каменноугольных ледниковых покровов.

тарктида занимала наиболее северное положение, поэтому, если следы юрского оледенения вообще существуют, их, вероятно, следует искать в юрских породах на территории, ныне занятой Антарктическим ледниковым покровом. В Антарктиде обнаружены юрские тиллиты, но их область сноса не установлена.

Четвертичный период (1 млн. лет назад). К началу четвертичного периода на поверхности земного шара материи занимали положение, близкое к современному. За последние 100 млн. лет Северная и Южная Америка разъединились с Евразией и Африкой, и к концу указанного интервала обе части Америки оказались связанными Панамским перешейком. Антарктида находилась в своем полярном положении, тогда как Африка, Индия и Австралия переместились от нее на разные расстояния к северу. Помимо очень древних Тихого и Индийского океанов за последние 100 млн. лет на Земле появились Северный и Южный Атлантические океаны, Северный Ледовитый океан и Южный океан (вокруг Антарктиды). Афроазиатский суперконтинент — тоже молодое геологическое образование. Похолодание в кайнозойскую эру завершилось четвертичным ледниковым периодом, во время которого периодически распространялись крупные ледниковые покровы в Северной Америке, Скандинавии, Западной Сибири и в некоторых районах Северного Ледовитого океана, Восточной Сибири и Центральной Азии. Два «устойчивых» ледниковых покрова сохраняли свое положение и во время межледниковий ледникового периода. Даже при беглом взгляде на современную карту мира можно признать наличие идеально

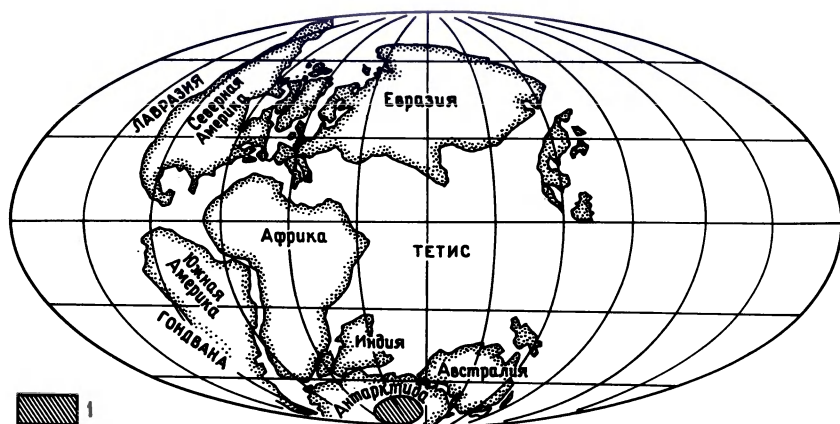


Рис. 17. Палеогеографическая карта юрского времени.

Признаки обширного развития оледенения в геологической летописи отсутствуют. 1 – область вероятного местонахождения следов оледенения.

подходящей обстановки для развития оледенений: в обоих полушариях имеются крупные территории материков, расположенные достаточно близко к полюсам, что способствует разрастанию и сохранению ледниковых покровов.

РАЗВИТИЕ ЖИЗНИ

Было бы, конечно, неразумно полагать, что все основные эволюционные «события» на Земле связаны с ледниковыми периодами, но вряд ли можно отрицать то значительное воздействие, которое оказали эти «зимы нашей планеты» на растительный и животный мир. Например, в течение поздней части докембрийского времени, по-видимому, происходило быстрое развитие многоклеточных организмов, появились формы со скелетными образованиями, которые могут сохраняться в ископаемом состоянии. За несколько миллионов лет брахиоподы, губки, гастроподы и трилобиты претерпели быстрое развитие и освоили обширные части Мирового океана. Этот эволюционный «взрыв» мог быть связан с появлением свободного кислорода в атмосфере. Однако не оказали ли на него стимулирующего влияния быстрые изменения среды во время одного или нескольких ледниковых периодов? В ордовике, во время следующего ледникового периода, похолодание на Земле привело к развитию климатических зон, более или менее сходных с современными. Эти зоны

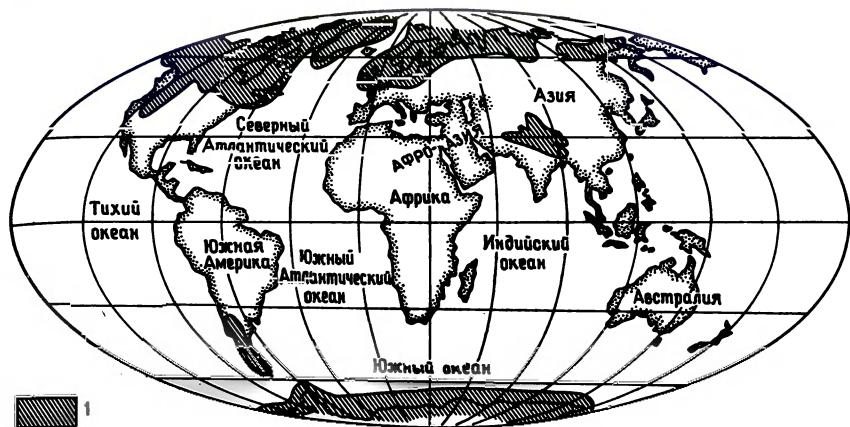


Рис. 18. Географическая карта четвертичного времени.

Показано распространение ледниковых покровов во время типичного оледенения. 1 — основные области распространения ледниковых покровов.

стали уже, чем в предыдущее время, поскольку оледенения всегда сопровождаются резким увеличением разности температур между полярными и экваториальными областями. Произошла вынужденная адаптация морских животных, и в холодных водах полярных морей зародились новые виды. По мере того как уменьшалось число трилобитов, освобождавшиеся экологические ниши осваивались многочисленными новыми видами брахиопод. В силуре, после окончания ледникового периода, произошел «взрыв жизни»: представители многих классов растений и животных вышли на берег и стали осваивать континенты. Около 300 млн. лет назад, в течение пермско-каменноугольного ледникового периода, появилась глоссоптериевая флора Гондваны. По-видимому, быстрое развитие этой флоры было реакцией на похолодание в ледниковый период. Представители глоссоптериевой флоры господствовали в составе растительности южных материков на протяжении более 100 млн. лет. На юрский период приходился еще один этап интенсивного роста многообразия флоры и фауны. Нынешний ледниковый период характеризуется удивительным разнообразием млекопитающих и ускоренной их эволюцией. За последние 10 млн. лет последовательное расширение кайнозойского ледникового покрова и периодическое сужение климатических поясов сопровождалось вымиранием и перераспределением растений и животных в огромных масштабах. Наконец, под влиянием быстрых климатических изменений в четвертичном периоде появился человек, который стал господствовать над другими видами растений и животных нашей планеты.

В предыдущем абзаце освещались лишь некоторые разрозненные положения сложной картины эволюции жизни. Очень многие существенные события этого процесса связаны с интервалами потепления на Земле, и, конечно, их нельзя объяснить как результат влияния ледниковых периодов.

Однако приводимые в учебниках обсуждения проблем эволюции часто вообще не отводят или отводят очень мало места фактору «ледникового стимулирования». Большая часть фактов, свидетельствующих об эволюции растений и животных в геологическом прошлом, установлена в районах, располагавшихся в экваториальных широтах, где климатические условия были относительно постоянны даже в ледниковые периоды. Поэтому в качестве причин эволюции чаще всего рассматривается не климат, а биологические факторы, конкуренция в добыче пищи, космическая радиация, состав атмосферы и т.д. В сущности такие факторы имеют малое отношение к палеогеографии и палеоклиматологии, и действительно часто считают, что климат Земли, некогда установившись, оставался довольно постоянным в течение последних 600 млн. лет.

Зимы нашей планеты показывают, что климат вовсе не отличался постоянством на протяжении геологической истории. Материал настоящей книги демонстрирует, что повторявшиеся ледниковые периоды Земли были сопряжены со значительными климатическими и географическими изменениями, которые по крайней мере в семи разных направлениях стимулировали резкие сдвиги в характере всей среды обитания растений и животных. Каждый ледниковый период должен был сопровождаться следующими событиями:

1. Обширным распространением материковых ледниковых покровов в благоприятных для этого районах высоких и умеренных широт.

2. Обширным оледенением в высоких горах любых широт.

3. Образованием шельфовых ледников в благоприятных обстановках в полярных широтах.

4. Большим распространением плавучих льдов в высоких широтах с движущимися льдинами и айсбергами на обширных территориях Мирового океана (порядка многих миллионов квадратных километров).

5. Широким развитием вечной мерзлоты во многих областях высоких и умеренных широт, где не было ледниковых покровов и небольших ледников.

6. Существенными изменениями атмосферной циркуляции с увеличением температурных градиентов в умеренных широтах, ростом повторяемости штормов в океанах и иссушением внутренних частей материков в тропиках.

7. Изменениями характера циркуляции океанических вод с блокированием и отклонением течений вследствие разрастания ледниковых покровов.

8. Резкими колебаниями уровня моря с амплитудой по меньшей мере 250 м, так как разрастание и разрушение ледниковых покровов периодически сопровождалось изъятием и возвращением воды в Мировой океан.

9. Громадными изменениями в положении и размерах растительных поясов с соответствующими крупными сдвигами в размещении животных.

Эти прямые и косвенные воздействия оледенения, установленные в рамках геологической истории, отличались колоссальными, если не катастрофическими масштабами. Чтобы понять историю Земли и эволюцию форм жизни, необходимо серьезно изучать эти процессы.

ПОИСК ПРИЧИН ИХ УСТАНОВЛЕНИЯ

Брайан Джон

Идея о том, что ледники раньше были более крупными, чем в настоящее время, была выдвинута лишь в середине XIX в. До 1840 г. на взгляды о формировании земной поверхности сильно влияли библейские представления о сотворении мира, а всемирному потопу приписывалась основная роль в создании большинства форм рельефа. В 1654 г. вице-президент Кембриджского университета доктор Джон Лайтфут утверждал, что «небо, и земля... и облака, наполненные влагой, и сам человек были созданы триединым богом 26 октября 4004 г. до н.э. в 9 ч утра». Еще в 1750 г. в христианском мире считалась ересью сама мысль о том, что нашей планете более 6000 лет, и широко проповедовалось мнение, что земная поверхность сохраняет обильные следы всемирного потопа, продолжавшегося сорок дней и сорок ночей. Например, глубокие долины и озерные котловины в горах с этих позиций рассматривались как результат эрозии во время потопа, а многие поверхностные отложения Северной Европы – как следы, оставленные потопом. Различные осадки, как, например, валунные глины, слоистые пески и галечники, называли «наносами» (drift), и этот термин до сих пор сохранился в Западной Европе (для обозначения ледниковых отложений. – *Перев.*). Эратические валуны на поверхности, часто находящиеся в необычных ситуациях: на вершинах холмов и даже на бровках береговых утесов – невозможно было объяснить как результат проявления любого из обычно наблюдаемых процессов, и поэтому их тоже рассматривали как следы мощных потоков во время всемирного потопа.

Эти идеи катастрофизма вызывали немалое беспокойство у некоторых ученых. Еще в середине XVI в. Леонардо да Винчи понял, что не все формы рельефа можно истолковать с позиций библии, а в XVIII в. Джеймс Геттон развил и подробно изложил положения, впоследствии получившие название принципа униформизма. Этот принцип в сущности провозглашает, что как прошлое является ключом для понимания настоящего, так и настоящее является ключом для понимания прошлого. Геттон доказывал, что поверхность Земли постоянно изменяется и что все изменения в деталях можно объяснить как проявления обычных

природных процессов, доступных для наблюдения. Идеи этого ученого находились в прямом противоречии с распространенными в то время представлениями сторонников катастрофизма и соответственно подвергались ожесточенным нападкам. Однако после выхода в свет в 1795 г. книги Геттона «Теория Земли» (Theory of the Earth), оказавшей большое влияние на развитие естествознания и получившей значительную поддержку в трудах Джона Плейфейра и Чарлза Лайеля, позиции катастрофизма резко пошатнулись к середине 1830-х годов. В то время широко распространилось представление о том, что речные долины были выработаны текучими водами, а сами реки устроены так, чтобы обеспечить непрерывное проявление процессов размыва, транспортировки и отложения наносов.

Подошло время и для признания важной роли ледников в формировании рельефа. В 1795 г. Геттон высказал мысль, что в прошлом Альпы покрывались большой массой льда, причем гранитные глыбы и другие эрратические валуны были перенесены на значительные расстояния к горам Юра и в другие местности огромными ледниками, которые затем исчезли. К этому мнению никто не прислушался, хотя крестьяне, жившие в альпийских долинах, принимали такое объяснение как само собой

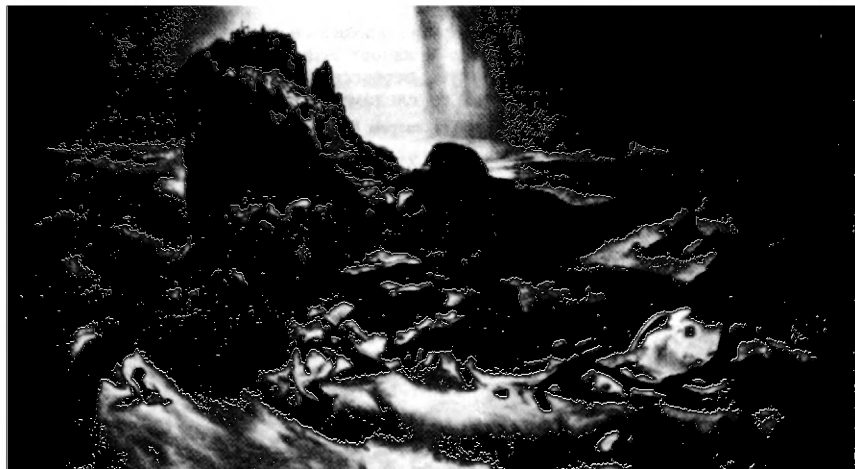


Рис. 19. Образное воспроизведение всемирного потопа на картине Френсиса Денби (1793–1861).

В XVII–XVIII вв. было широко распространено представление о потопах как об основном рельефообразующем факторе.

разумеющееся. В 1821 г. швейцарский гражданский инженер Игнац Венец-Зиттен вернулся к идеям Геттона, а в 1824 г. Йенс Эсмарк независимо выступил с утверждением, что ледники Норвегии некогда были более обширными. В 1829 г. Венец изложил свое мнение о том, что равнины Европы к северу от Альп и, вероятно, вся северная Европа испытали воздействие льда, а в 1834 г. Жан де Шарпантье прочитал доклад, в котором он поддержал взгляды Венеца и привел убедительные доказательства, основанные на полевых наблюдениях.

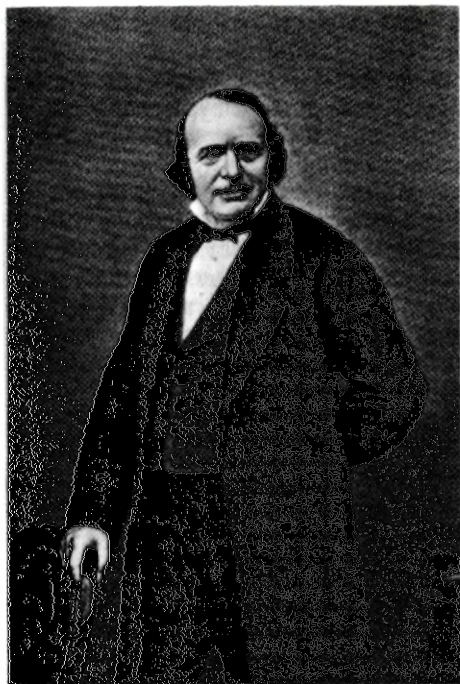
После этого у ледниковой теории появилось много приверженцев. Среди них наиболее влиятельным был Луи Агассис, который выступил с известным докладом о деятельности льда на заседании Гельветического общества в 1837 г. Он был также первым, кто убедительно продемонстрировал существование в прошлом ледников на обширных территориях Великобритании и Северной Америки.

Уильям Бакленд, профессор геологии Оксфордского университета и некогда один из самых видных сторонников идеи о наводнении, убедился в правомочности ледниковой теории применительно к рельефу Англии, и именно он пригласил Агассиса посетить Англию в 1840 г. В октябре того же года газета *Scotsman* поразила своих читателей сообщением о том, что некогда Шотландию покрывал ледник. В британских научных кругах последнее упорное сопротивление идеям Агассиса было

Рис. 20. Типичный эрратический валун, перенесенный ледником и оставленный на обнаженной скальной поверхности со следами ледниковой штриховки.

До появления ледниковой теории считали, что такие валуны были принесены водами во время всемирного потопа.





DISCOVERY OF THE FORMER EXISTENCE OF GLACIERS IN SCOTLAND, ESPECIALLY IN THE HIGHLANDS, BY PROFESSOR AGASSIZ.

Professor Agassiz of Neuchâtel has recently been studying the glaciers of the Alps with great care, and has been led by his investigations to certain bold, novel, and highly interesting conclusions respecting the part which these singular bodies have acted in the physical history of the globe. We were present when he explained his views in the Geological Section of the British Association at Glasgow, and subjoin a short outline of them, drawn up, we believe, under his own eye. To this we are enabled to add a most interesting communication, addressed by him to Professor Jameson, bringing out the important fact, that *he has discovered distinct indications of the ancient existence of glaciers at Ben Nevis, and elsewhere in the Highlands.* There are other geological phenomena which lead us to conclude that the climate of this country at a former, but, geologically speaking, a recent epoch, was much colder than it now is; and that such a state of things is consistent with the course of nature, is shown by the fact that Mr Darwin found glaciers reaching down to the level of the sea on the west coast of Chili, in latitude 46 degrees, that is, 11 degrees nearer the equator than Ben Nevis. The evidence on which M. Agassiz's experience in the Alps has taught him to rely, consists, first, of the striated and smoothed surfaces of the rocks, the direction

Рис. 21. Луи Агассис — один из самых авторитетных «гляциалистов», способствовавший утверждению ледниковой теории в середине XIX в.

Часть статьи из газеты Scotsman от 7 октября 1840 г., где отмечалось, что территория Шотландии покрывалась ледником.

сломлено после публикации двух классических работ Т. Ф. Джеймисона в 1862 г. и Арчибалда Гейки в 1863 г. Приезд Агассиса в США в 1846 г. способствовал ускоренному распространению ледниковой теории в этой стране, и автор солидного «Руководства по геологии» (Manual of Geology, 1863) Дж. Д. Дана активно поддержал многие идеи гляциалистов. Наука о Земле, наконец, освободилась от бремени представлений о всемирном потопе.

Концепция ледниковых периодов, конечно, связана с ледниковой теорией. Пионером этой концепции был профессор лесоводства Бернгарди, который писал в гейдельбергском журнале *Jahrbuch für Mineralogie* за 1832 г. о времени, когда ледник далеко распространялся от северных полярных районов и покрывал часть территории Германии. В 1837 г. Карл Шимпер развил эту заманчивую идею и выделил ледниковый период (Eiszeit) в Швейцарии. В том же году Агассис в своем знаменитом докладе говорил о «великом ледниковом периоде», который был обусловлен изменениями климата и озаменовался распространением об-

ширного ледникового покрова от Северного полюса до Альп, проникавшего даже в Центральную Азию. Вначале он полагал, что этот «ледниковый период» предшествовал поднятию Альп, и только в 1847 г. пришел к выводу, что Альпы существовали до начала оледенения и что древние ледники Северной Европы были изолированы от альпийских ледников.

Идея о ледниковых периодах постепенно завоевывала признание. В 1850-х годах Рамсей в Великобритании и Марло в Швейцарии признали, что в четвертичном периоде четко различались холодные и теплые фазы, и эта идея неоднократно подкреплялась в последующие десятилетия. По мере развития геологической науки стратиграфические исследования позволили установить, что похолодания и потепления отмечались соответствующими периодическими наступаниями и отступаниями ледников. В конце XIX в. и в Европе, и в Северной Америке развернулись продолжительные дискуссии по вопросам таксономической трактовки четвертичного периода и плейстоценовой эпохи, установления возраста границы плиоцена и плейстоцена, определения числа оледенений и межледниковий, которые можно было бы выделить на основе стратиграфического и палеонтологического изучения отложений как в областях древнего оледенения, так и за их пределами. В 1890-х годах Джеймсом Гейки, Т. К. Чемберленом и Т. Левереттом были заложены основы стратиграфической схемы для древнеледниковых районов центра Северной Америки, а в 1909 г. был опубликован один из самых автори-

Таблица 2

Классические схемы оледенений и межледниковий в центре Северной Америки и на севере Альпийской области Европы¹

Северная Америка	Альпы	Климатические подразделения
Висконсин	Вюрм	Оледенение
Сангамон	Рисс – вюрм	Межледниковье
Иллинойс	Рисс	Оледенение
Ярмут	Миндель-рисс	Межледниковье
Канзас	Миндель	Оледенение
Афтон	Гюнц – миндель	Межледниковье
Небраска	Гюнц	Оледенение
	Дунай – гюнц ²	Межледниковье
	Дунай ²	Оледенение

¹ Не следует считать, что подразделения североамериканской и альпийской схем точно совпадали по времени. Некоторые современные исследователи приводят совершенно иные сопоставления указанных оледенений и межледниковий.

² Эти подразделения Пенком и Брюкнером первоначально не вводились.

тетных трудов в области наук о Земле — книга Альбрехта Пенка и Эдварда Брюкнера «Альпы в ледниковые периоды» (*Die Alpen im Eiszeitalter*). Используя данные об ископаемых почвах, речных террасах и скоростях выветривания, эти исследователи установили, что североальпийский район испытал четыре крупных оледенения с тремя промежуточными межледниковьями. Эти оледенения получили следующие названия (от древнего к молодому): гюнцское, миндельское, рисское и вюрмское. Альпийская схема до сих пор сохраняет основополагающее значение для понимания четвертичного периода, хотя и является слишком упрощенной.

Идея о дочетвертичных ледниковых периодах почти столь же стара, как и сама ледниковая теория. Еще в 1850-х годах У.Т. Блендфорд обнаружил древние ледниковые отложения в пермско-каменноугольных толщах тропических районов центральной Индии, а в последующие десятилетия следы воздействия льда были установлены в породах Южной Австралии, провинции Наталь в ЮАР и в южной Бразилии.

К началу XX в. накопилось много сообщений о подобных находках в породах разного возраста из разных климатических зон, и гипотеза о неоднократном повторении периодов глобального похолодания в геологической истории Земли нашла своих сторонников. Одновременно все более утверждалась гипотеза о чередовании оледенений в соответствующих областях, и эти «зимы нашей планеты» теперь надо рассматривать как периоды, имеющие глубокое значение для понимания природных обстановок на земном шаре.

ПРИЧИНЫ ЛЕДНИКОВЫХ ПЕРИОДОВ

Для установления ледникового периода на земном шаре необходимы два основных условия. Для разрастания и сохранения крупных масс льда в областях, где ранее не было оледенения, должно произойти глобальное понижение температуры в таких масштабах, чтобы снег стал одним из основных видов осадков и чтобы, выпав зимой, он не стаял летом. Кроме того, выпадение достаточного количества осадков в течение продолжительного периода должно обеспечить исходный материал для наращивания ледникового льда.

Оба условия кажутся совсем простыми, но при их детальном рассмотрении возникают бесчисленные вопросы. Наиболее принципиальный из них касается механизмов глобального похолодания и продолжительных снегопадов. *Каким образом происходило понижение температур на больших площадях нашей планеты?* Была ли основная причина внешней, связанной с астрономическими или атмосферными факторами? Или планета Земля при-

обрела какую-то внутреннюю неустойчивость, которая обусловила глобальное понижение температур как звено в цепной реакции или механизме обратной связи? Могло ли глобальное похолодание последовать за каким-либо кажущимся совсем незаметным и незначительным событием в атмосфере? Или для климатической машины Земли потребовалась какая-то геологическая или атмосферная катастрофа, чтобы начался цикл похолодания? Ниже в этой главе рассматриваются некоторые причины и «пусковые механизмы», которые были выдвинуты специалистами в области наук о Земле, климатологами и даже астрономами для объяснения повторяемости ледниковых периодов на нашей планете. Некоторые из этих теорий подробнее разбираются в гл. 4–7 в связи с обсуждением причин установления соответствующих ледниковых периодов.

ВНУТРЕННИЕ ПРИЧИНЫ

1. *Перемещение земной коры.* Термин «перемещение коры» был предложен профессором Фредериком Шоттоном для характеристики изменений, происшедших за геологическое время в конфигурации и положении различных массивов суши относительно полюсов Земли. После признания идей Альфреда Вегенера о дрейфе континентов широко распространилось мнение, что и суперконтиненты, и различные обособленные массивы суши передвигались на поверхности Земли, как плоты по воде, еще с ранних этапов докембрийского зона. Как было показано в предыдущей главе, нынешняя конфигурация материковых плит сугубо временная, вовсе не похожая на ту, которая существовала 150 млн. лет назад, и на ту, которая, как предполагают, будет через 150 млн. лет.

Ледниковые покровы могут разрастаться на крупных массивах суши, расположенных в умеренных и высоких широтах, где климат достаточно холодный для интенсивного развития оледенения. Этот процесс может усугубляться под воздействием климатического механизма обратной связи; при этом область холодного климата (и соответствующего образования ледников) будет распространяться и в умеренные широты. Покровное оледенение будет продолжаться до тех пор, пока материк занимает «удобное» положение в отношении преобладания низких температур и достаточного влагообеспечения; когда он перемещается в экваториальные широты (или в некоторых случаях в полярные широты, где для существования ледникового покрова недостаточно твердых осадков) оледенение прекращается.

Здесь уместно отметить, что *полярное* положение не всегда бывает самым подходящим для образования ледникового покрова. Конечно, полярные области холодные, но там также выражена тенденция к сухости. Как видно на примере современных рай-

онов Аляски, северной Гренландии и Сибири, не подвергающихся покровному оледенению, холодные сухие территории, занимающие приполярное положение, вовсе не благоприятны для возникновения крупных ледников. В то же время расположенные значительно южнее горные области, лучше обеспеченные теплом и влагой, оказываются более подходящими для развития оледенения.

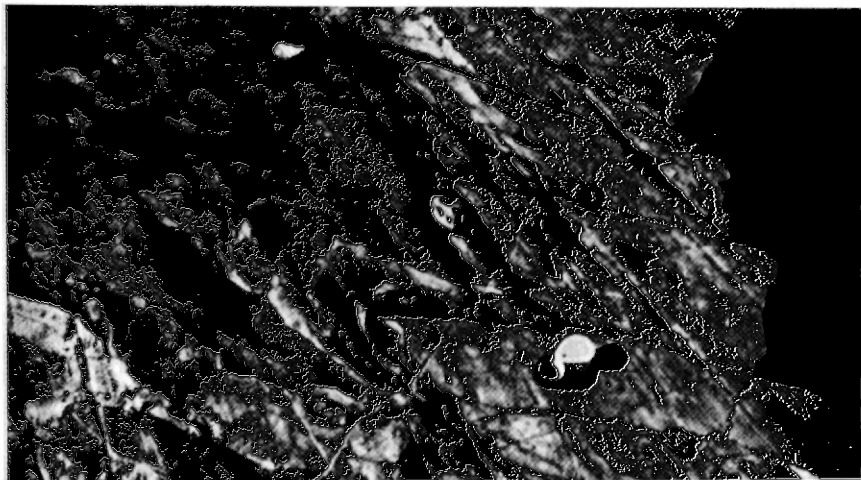
Другой аспект перемещения земной коры состоит в том, что сами полюсы изменяют свое положение в течение геологического времени обычно под влиянием непродолжительных или длительных изменений положения оси Земли. Известно, что положение полюсов менялось на протяжении древних геологических эпох, и, согласно одной теории, нынешний ледниковый период начался вскоре после того, как полюсы Земли заняли свое современное положение в начале плейстоцена. Естественно, смещение полюсов должно изменить положение материков по широте независимо от воздействия тектоники плит, поскольку на некоторых территориях суши появятся благоприятные предпосылки для развития ледниковых покровов.

2. *Горообразование.* При поднятии суши ее поверхность может оказаться выше снеговой линии. Это может весьма существенно повлиять на климат данного района; понижение температур воздуха и увеличение количества осадков будет способствовать распространению снежного покрова не только в самих горах, но и за их пределами. При таких условиях почти наверняка будут формироваться ледники.

Начало нынешнего ледникового периода теперь принято связывать с планетарным похолоданием, происходившим в течение третичного периода, что в свою очередь было обусловлено

Рис. 22. Валунная мостовая, выработанная древним ледником в коренных породах, Ираи, центральная Индия.

Факты такого рода убедили некоторых геологов XIX в. в существовании древних ледниковых периодов.



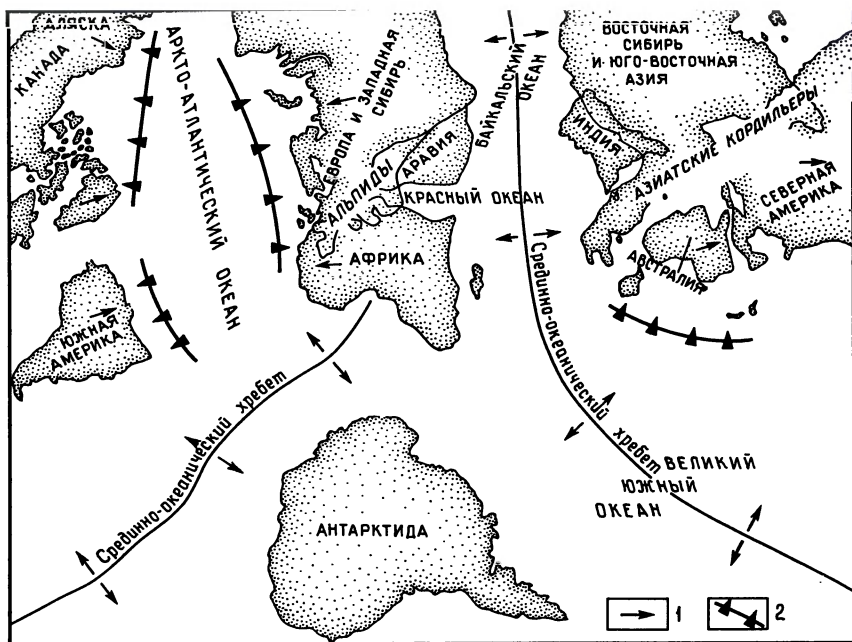


Рис. 23. Предполагаемое размещение литосферных плит 150 млн. лет назад.

1 — направление движения плиты; 2 — разрушающийся край плиты и направление поддвига.

широким распространением горообразования на континентах. В частности, тектонические движения привели к созданию многих новых горных систем, когда материки заняли примерно нынешнее положение на поверхности Земли. За период с плиоцена до середины плейстоцена Альпы были подняты более чем на 2000 м, а Гималаи — на 3000 м. Только в плейстоцене хребт Сьерра-Невада на территории США испытал поднятие, по-видимому, более чем на 2000 м. В гл. 1 высказывалось предположение, что более древним ледниковым периодам также могли предшествовать циклы горообразования, например пермско-каменноугольному ледниковому периоду предшествовал цикл значительного поднятия и горообразования во многих частях света.

В течение периода горообразования главные очаги оледенения первоначально находятся в самих горах, где широко распространяются ледяные шапки, долинные ледники и снежные покровы. Затем ледники спускаются на равнины, где развиваются ледники подножий, ледяные шапки и в конечном счете ледниковые покровы. Пока горный хребт занимает возвышенное положение на тех же широтах, данный тип оледенения сохраняется

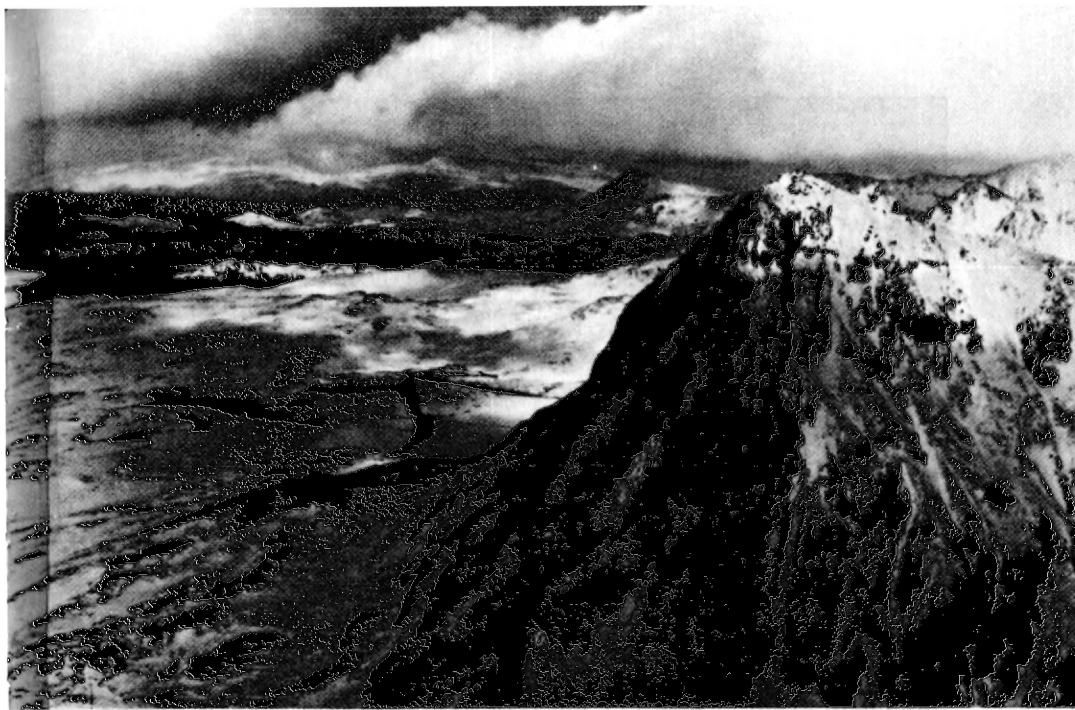


Рис. 24. Расчлененный горный рельеф у побережья Аляски.

Большая часть этого района никогда не испытывала сильного воздействия оледенения, так как из-за недостатка влаги крупные ледники там не могли развиваться.

Рис. 25. Горы с ледниками и снежинками в восточной Гренландии.

Обильные снегопады способствовали развитию и длительному существованию ледников.



за счет обильного выпадения снега на поверхности ледников в горах и на равнинах. Однако если горы со временем будут разрушены и окажутся ниже снеговой линии или если сократится количество осадков, выпадающих в виде снега (может быть, за счет образования суши на месте океана возникнет препятствие для влагонесущих потоков воздуха), то оледенение прекратится.

3. *Расширяющаяся Земля.* Некоторые авторитетные ученые полагают, что постепенное понижение уровня Мирового океана, четко доказанное для третичного периода, по крайней мере частично, является результатом медленного роста окружности земного шара. Согласно этой теории, с увеличением площади поверхности Земли воды Мирового океана распределяются более тонким слоем, что сопровождается общим понижением уровня океана и расширением площади суши. Береговые линии перемещаются в сторону моря, возможно, на многие сотни километров туда, где находятся обширные шельфы материков, что способствует усилению континентальности климата многих частей суши и охлаждению этих территорий, которые больше не испытывают океанического влияния. Кроме того, с расширением площади суши возрастает яркость (или альбедо) земной поверхности, что ведет к потере тепла, связанного с солнечной радиацией, которая в противном случае поглощалась бы океанами. Климат Земли мог достаточно ухудшиться, чтобы начался ледниковый период, подобный тому, в котором мы сейчас живем.

Возникают, однако, сомнения по поводу применимости теории расширяющейся Земли для более древних этапов геологической истории, поскольку эта теория не объясняет многие морские *трансгрессии*, проявлявшиеся в истории Земли.

4. *Суперконтиненты и уровень Мирового океана.* Многие современные геологи и палеонтологи полагают, что образование и распад суперконтинентов оказывали большое влияние на крупные колебания уровня Мирового океана (порядка 500 м и более). Одна из теорий утверждает, что, когда происходит спрединг океанического дна, т.е. когда суперконтиненты раскалываются на части, формируются хребты с активными проявлениями вулканизма, объем которых настолько велик, что они образуют мелководные моря в центральных частях океанических бассейнов. В итоге происходит перераспределение вод океанов, сопровождающееся трансгрессиями на окраинах материков.

Напротив, когда создается суперконтинент, образование срединно-океанических хребтов происходит в небольшом масштабе. Старые хребты погружаются, что вызывает увеличение объема океанических бассейнов с соответствующей регрессией, или понижением уровня океана. Последнее может привести к установлению ледникового периода, так как охлаждение возросшего по площади суперконтинента, особенно если он находится в уме-

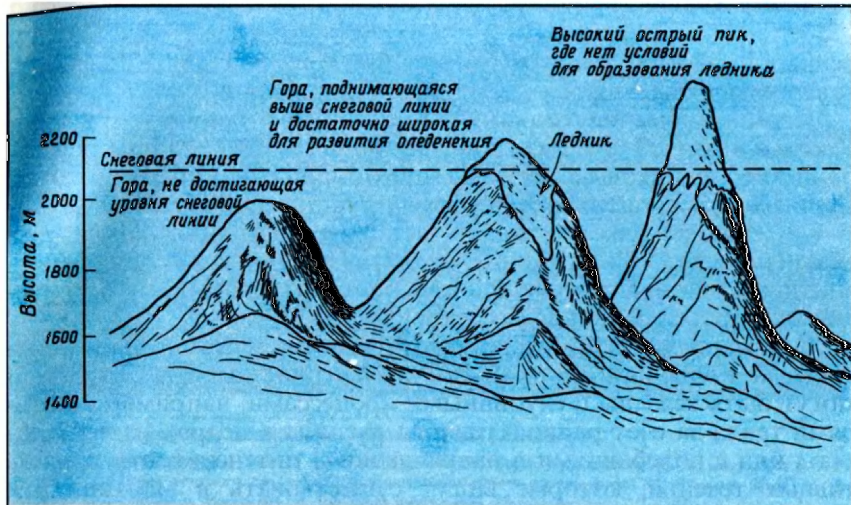
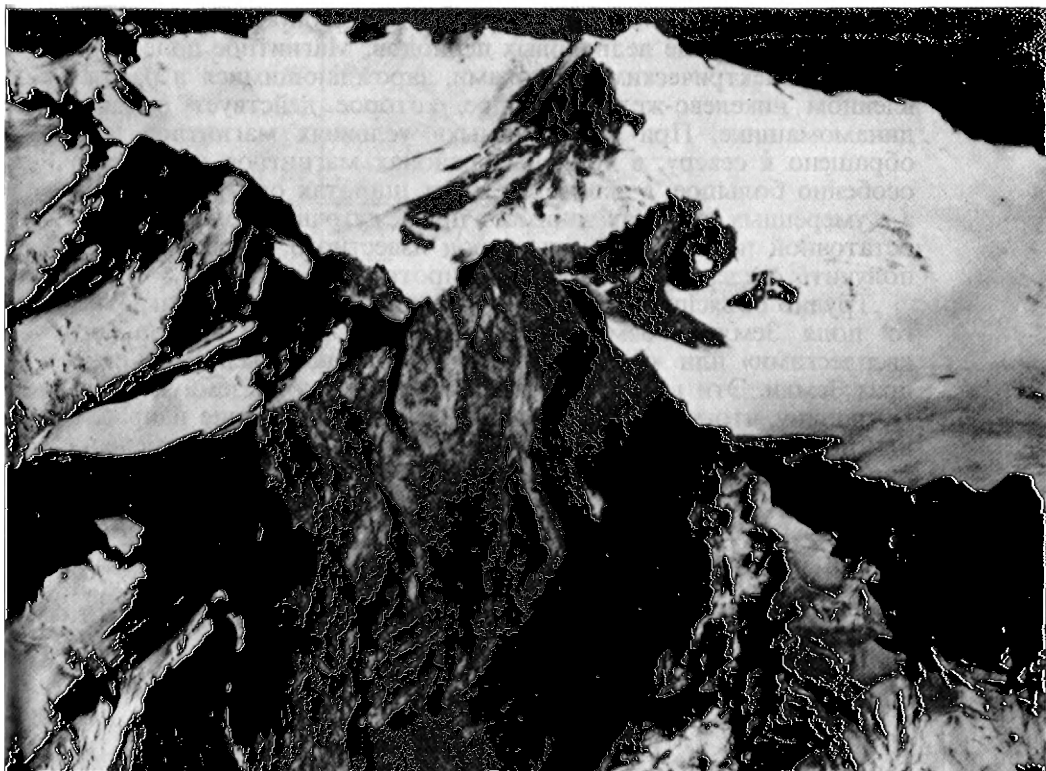


Рис. 26. Снеговая линия в горном районе—линия, выше которой снег сохраняется круглый год.

Если большая часть гор расположена выше снеговой линии, там могут развиваться ледники.

Рис. 27. Один из районов Скалистых гор в Аляске.

Это молодые горы, поднятые выше снеговой линии в недавнее геологическое время. Здесь все еще интенсивно проявляются движения земной коры. Часть горной вершины (в центре снимка) обрушилась в 1964 г. во время Аляскинского землетрясения.



ренных и высоких широтах, может быть достаточным для образования ледяных шапок и ледниковых покровов.

Пермско-каменноугольный ледниковый период совпадал с консолидацией суперконтинента Пангея. Однако позднекембрийские ледниковые периоды приходились на время распада древнего суперконтинента, а ордовикский и кайнозойский ледниковые периоды тоже можно считать синхронными эпохам интенсивного распада материков. Отсюда очевидно, что теория суперконтинентов сама по себе недостаточно объясняет распространение обширных ледниковых покровов.

5. *Изменения в недрах Земли.* Некоторые исследователи выдвигают концепцию о том, что изменения поверхности Земли могут быть связаны с глубинными процессами, например с потерями тепла за счет радиоактивного распада в недрах нашей планеты или с колебаниями в направлении и интенсивности конвективных течений, которые могут существовать в мантии. Эти изменения могли повлиять на геотермический поток тепла (т.е. на скорость передачи тепла через кору Земли к ее поверхности), на интенсивность или повторяемость вулканических извержений и землетрясений, а также на магнитное поле Земли.

Теперь широко признают, что магнитное поле Земли имело определенную связь с климатом, и предполагают, что некоторые изменения направления магнитного поля Земли (т.е. интервалы, когда северная стрелка полюса указывает на юг) совпадали с крупными изменениями климата, которые определяли установление и окончание ледниковых периодов. Магнитное поле определяется электрическими потоками, зарождающимися в расплавленном никелево-железном ядре, которое действует подобно динамомашине. При «нормальных» условиях магнитное поле обращено к северу, в полярных районах магнитное наклонение особенно большое, в экваториальных широтах оно равно нулю, а в умеренных широтах занимает промежуточное положение. По остаточной намагнитченности пород известного возраста можно получить сведения об их «палеоширотном положении».

Трудно объяснить причины изменения направления магнитного поля Земли: возможно, они были вызваны внезапными «всплесками» или «выбросами» расплавленного вещества в недрах Земли. Эти всплески могли так повлиять на земную динамомашину, что могло произойти внезапное изменение направления потока заряженных частиц, или, иными словами, изменение направления магнитного поля Земли.

За последние 2 млрд. лет направление магнитного поля Земли многократно менялось. Только за последние 80 млн. лет это происходило по крайней мере 171 раз, а около 45 млн. лет назад повторяемость этих изменений возросла вдвое и приобрела нынешний темп — пять изменений за 1 млн. лет. В повторяемости

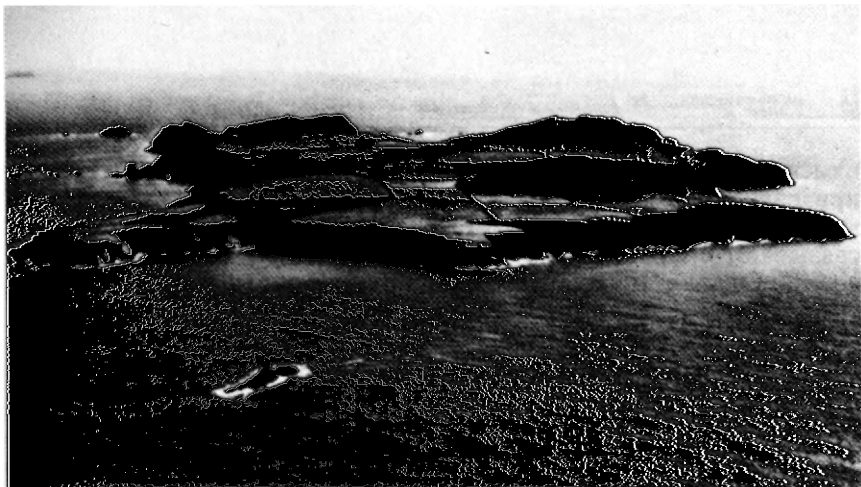
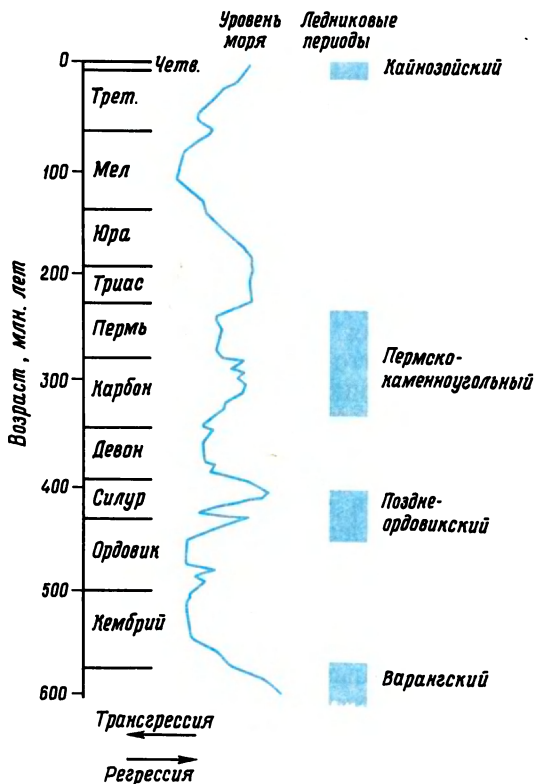


Рис. 28. Признаки понижения уровня моря в кайнозое.

Остров Рамси у побережья Узульса; такие острова типичны для многих периферических океанических районов, где «платформа» морского дна находится выше современного уровня моря. В то время, когда платформа подвергалась абразии, скалистые холмы были небольшими островами.

Рис. 29. Совпадение крупных ледниковых периодов и периодов регрессии моря на земном шаре.

Трудно доказать, что это причинно-следственная зависимость, поскольку в геологической летописи представлено много других регрессивных периодов, не совпадающих во времени с ледниковыми периодами.



изменений направления магнитного поля намечаются некоторые признаки регулярных осцилляций; нередко изменения земного магнетизма в нынешний ледниковый период исследователи связывают с циклическим чередованием оледенений и межледниковий. Однако в больших масштабах геологического времени связь между изменениями направления магнитного поля и ледниковыми периодами еще необходимо убедительно доказать.

ВНЕШНИЕ ПРИЧИНЫ

1. *Астрономические изменения.* Постепенно очень многие исследователи пришли к выводу о зависимости между изменениями климата Земли и наблюдаемыми или предполагаемыми вариациями астрономических факторов. К таким факторам относятся изменения потоков радиации вследствие непостоянства солнечной деятельности, изменения положения планет относительно Солнца, изменения в Галактике и т.д.

В большинстве астрономических теорий изменения климата первостепенная роль отводилась Солнцу. Известный астроном Эпик рассматривал Солнце как звезду, подверженную слабым изменениям, т.е. он признавал непостоянство ее энергетического потока. Поскольку состав Солнца изменяется, меняется и яркость света, и было выдвинуто предположение, что в дочетвертичное время поток солнечной энергии составлял лишь 85% от современной величины. Так как Солнце сжигает свое ядерное топливо, материал его поверхности подвергается конвекции, которая происходит то замедленно, то динамично. Во время замедленных фаз радиация несколько уменьшается, а во время динамичных фаз возрастает. Могут также происходить медленные осцилляции за периоды порядка 250–300 млн. лет вследствие гравитационных нарушений под воздействием других солнечных систем во время их прохождения через Галактику.

Широко признано, что изменения солнечного излучения оказывают глубокое влияние на климат Земли. Выявлено и предположительно намечено много разных закономерных изменений с периодичностью от миллионов лет до менее года. Помимо вышеупомянутых долгопериодных колебаний в специальной литературе рассматривались и многочисленные колебания среднего ранга. Особое значение уделялось циклам солнечного излучения с периодом от 200 000 до 400 000 лет.

Климатологи и астрономы особенно много занимались циклами солнечных пятен, которые наблюдались и измерялись за последние сто лет. Установлены циклы повторяемостью 11, 22 и 44 года, но более крупным ритмам трудно дать научное обоснование. Приводились также веские аргументы в пользу того, что изменения солнечной постоянной (среднего потока радиации

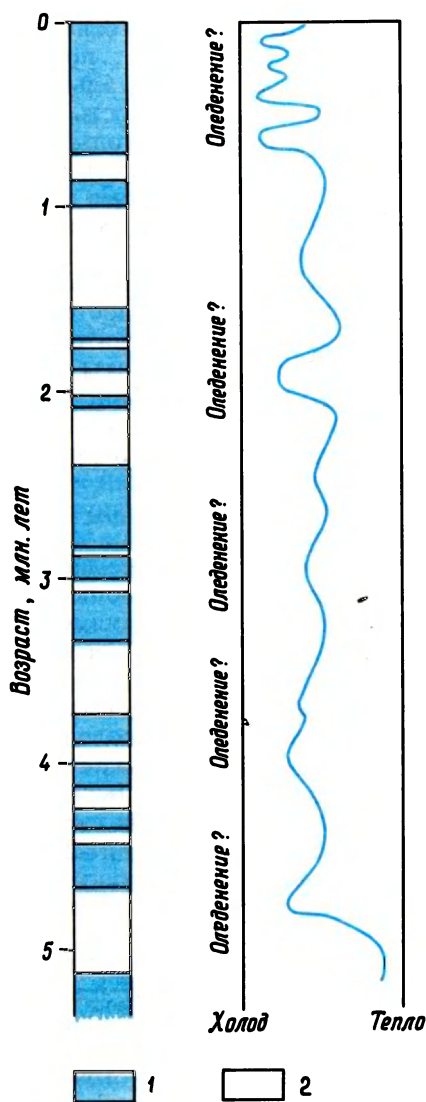


Рис. 30. Изменения направления магнитного поля в нынешнем ледниковом периоде. Можно различить регулярные колебания, которые ассоциировались с изменениями климата, характерными для чередования оледенений и межледниковий.
1 — нормальная полярность; 2 — обратная полярность.

от Солнца), изучавшиеся некоторыми климатологами, могут быть кажущимися, а не реальными. Многие из «наблюдавшихся» изменений, возможно, не существуют, поскольку они укладываются в пределы ошибок инструментальных измерений.

Несмотря на крайнюю ограниченность сведений, имеющихся в нашем распоряжении, за последние годы с помощью ЭВМ неоднократно анализировалась зависимость между солнечным излучением и климатом Земли. Некоторые результаты моделирования показывают, что уменьшения солнечной постоянной на 2–5% было бы достаточно, чтобы началась новая фаза глобального похолодания и роста ледниковых покровов, однако этот прогноз может оказаться не более достоверным, чем данные и зависимости, используемые составителем программы для ЭВМ. Действительно, другие результаты моделирования с помощью ЭВМ указывают, что сокращение солнечной постоянной на 2–5% не приведет к росту ледниковых покровов.

Другая группа теорий ледниковых периодов основывается на изменениях геометрических связей Земли и Солнца. Здесь в качестве основных факторов рассматриваются наклон плоскости эклиптики (т.е. угол между плоскостью орбиты Земли, движущейся вокруг Солнца, и плоскостью земного экватора), прецессия равноденствия (медленно изменяющееся положение точки пересечения плоскости эклиптики с плоскостью экватора) и эксцентриситет земной орбиты (т.е. степень ее отклонения от окружности).

Наиболее значительная работа по выявлению астрономических периодических изменений была проделана югославским геофизиком Миланковичем в 1920-х годах. Впоследствии расчеты других ученых, особенно профессоров Вернекара и Бергера, подтвердили существование следующих ритмов:

изменения прецессии равноденствия: 21 000–25 000 лет,

изменения наклона эклиптики: около 41 000 лет,

изменения эксцентриситета земной орбиты: 90 000–100 000 лет.

Любой из этих факторов независимо от других может привести к небольшим похолоданиям и потеплениям климата Земли, но существенные климатические изменения, с которыми связано установление ледникового периода, вероятно, не могут произойти без одновременного «благоприятного» взаимодействия всех трех факторов. Вычисления, учитывающие совместное проявление этих факторов, показывают, что они должны в большей мере влиять на температурные различия между разными широтами, чем изменения солнечной постоянной. Расчетная шкала изменений температур, по-видимому, довольно близко соответствует предполагаемой шкале изменений температур для оледенений и межледниковий четвертичного периода. Сам Миланкович считал это доказанным и опубликовал цифровые данные, которые

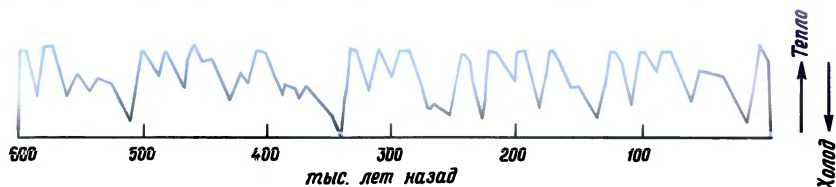


Рис. 31. Кривая изменений солнечной радиации, поступавшей на поверхность Земли за последние 600 000 лет.

Это модификация кривой, рассчитанной Миланковичем, для летних месяцев на 50° с. ш.

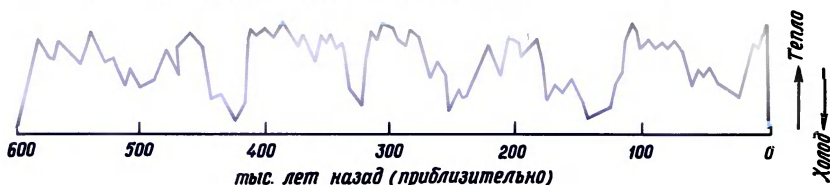


Рис. 32. Изменения концентрации тяжелого изотопа кислорода ^{18}O в ископаемых морских организмах (по Хейсу, Шеклгону, Имбри).

Обратите внимание на приблизительное соответствие «циклам» Миланковича.

пользовались особенно широким признанием за последние 20 лет. Кривая, показанная нами на рис. 31, отражает колебания величин солнечной радиации, поступавшей в атмосферу Земли за последние 600 000 лет. Миланкович построил такую кривую для 65° с. ш., а другие исследователи опубликовали подобные кривые для других широт. Наша кривая составлена для 50° с. ш.

В последние годы «теория Миланковича» получил. большую поддержку по нескольким направлениям. В частности, были опубликованы труды, показывающие, как изменения климатических условий отражаются на глубоководных морских осадках. Содержание тяжелого изотопа кислорода в некоторых морских ископаемых можно связать с количеством льда на земном шаре, и график изменения концентрации тяжелого изотопа кислорода (т.е. смена теплых и холодных фаз) довольно хорошо совпадает с последовательностью теплых и холодных фаз, установленной по данным Миланковича (см. гл. 7). Это, по-видимому, свидетельствует о связи изменений в геометрии элементов земной орбиты с изменениями климата в четвертичный период.

Однако некоторые ученые не убеждены в правомочности прямой корреляции графиков, поскольку при этом не вскрываются подлинные причинно-следственные связи. Высказывают также мнение, что совместный эффект трех астрономических факторов, рассматриваемых Миланковичем, меньше обычных сезонных изменений, ежегодно происходящих на поверхности Земли. Если

это так, то, конечно, подобные астрономические воздействия не в состоянии предопределить начало или окончание ледниковых периодов.

Изменения в Галактике могут быть причинами, по-видимому, регулярной повторяемости ледниковых периодов в масштабе геологической истории. Наша Галактика вращается в пространстве с периодом около 200–250 млн. лет, что сопоставимо с периодом повторяемости «геологических революций» на Земле. По мере того как ветви Галактики пересекают космическое пространство, положение Солнечной системы смещается вверх и вниз относительно плоскости Галактики. Это может вызвать изменения гравитационного поля, межзвездных пыльных шлейфов и солнечных ветров (под воздействием других звезд).

Могут происходить также изменения скорости вращения Земли, и профессор Родс Фейрбридж утверждал, что периоды замедления скорости могут совпадать с ледниковыми периодами. Помимо этого, изменения, происходящие в Галактике, могут, хотя бы частично, объяснить «мерцание» Солнца и повторяющиеся долгопериодные интервалы сокращения излучаемой солнечной энергии.

2. Изменения атмосферы. Характер атмосферы Земли точно соответствует нынешним климатическим условиям. Если он менялся, например изменялось соотношение газов, входящих в состав атмосферы, то весьма вероятно, изменялся и климат. Значительное повышение содержания водяного пара повлияло бы на климат вследствие увеличения облачности, а это в свою очередь привело бы к сокращению количества солнечной энергии, достигающей поверхности Земли. Однако незначительное увеличение содержания водяного пара привело бы к глобальному *повышению* температур, так как возросла бы «теплоудерживающая способность» атмосферы. Вряд ли соотношения атмосферы и климата являются простыми или непосредственными: воздействия климатической машины чрезвычайно сложны и сопровождаются множеством косвенных и побочных эффектов, механизмов обратной связи и т.д. Климатологи только еще начинают постигать некоторые сложные аспекты современного климата, и поэтому неудивительно, что оценки климатов прошлого вызывают оживленные дискуссии.

Во многих теориях климатических изменений подчеркивалось значение концентрации двуокиси углерода CO_2 в атмосфере. При этом внимание концентрировалось главным образом на так называемом «парниковом эффекте», имеющем место тогда, когда на Землю приходит в основном коротковолновая радиация, а отражается длинноволновая. CO_2 поглощает длинноволновую радиацию; при этом тепло задерживается в атмосфере и не возвращается в космос, пока имеется необходимое количество углекис-

лого газа. (Яркий пример такого эффекта представляет собой планета Венера с мощной пеленой облаков: поверхностные породы там докрасна раскаляются за счет собственного тепла, настолько сильно проявляется там парниковый эффект.) Если содержание CO_2 в атмосфере уменьшается, длинноволновая радиация не поглощается в таком объеме и соответственно температура понижается.

Согласно одной авторитетной теории, если концентрация CO_2 в атмосфере уменьшится наполовину, Земля полностью покроется льдом. Другая не менее авторитетная теория утверждает, что уменьшение содержания CO_2 вдвое приведет к понижению температуры на Земле всего на 3°C . Таковы примеры неопределенностей расчетов и прогнозов в науке об атмосфере.

Если бы содержание CO_2 в атмосфере (0,03%) возросло за счет лесных пожаров или вулканической деятельности, климат стал бы теплее. Это стимулировало бы рост растений. Растения стали бы поглощать все больше CO_2 , что в конечном итоге привело бы к сокращению содержания CO_2 в атмосфере и к понижению температуры. Содержание водяного пара в атмосфере уменьшилось бы, и это привело бы к дальнейшему понижению температуры. При более низких температурах замедлился бы рост растений, а во многих районах, некогда покрытых растениями, последние погибли бы. При этом CO_2 возвратится в атмосферу. В свою очередь это повысило бы способность атмосферы задерживать отражаемую от поверхности длинноволновую радиацию, и температура вновь постепенно повысится. Таким образом, происходили бы долгопериодные колебания концентрации CO_2 в атмосфере с регулярно повторяющимися максимумами и минимумами определенной амплитуды. Ход этих колебаний мог бы также указывать на характер изменений температуры Земли, которые бы запаздывали, и продуктивности растений, которые бы запаздывали в еще большей мере. Но из предыдущего изложения следует, что причинно-следственные связи очень трудно установить: круговорот углерода в природе в любом случае, как известно, очень сложен и зависит от растений, животных, вулканических извержений, химического выветривания, связывания карбонатов в горных породах и концентрации углерода в океанах.

За последние годы неоднократно обсуждалась проблема повышения содержания CO_2 в атмосфере за счет сжигания минерального топлива. Некоторые климатологи доказывают, что это вызвало глобальное повышение температуры по крайней мере на 1°C . Однако с этим очень трудно согласиться. Предполагаемое глобальное повышение температуры на 1°C на самом деле может представлять собой ряд региональных повышений температуры на территориях с густой сетью наземных метеорологиче-

ских станций или может быть обусловлено сдвигами в системе атмосферной циркуляции. Другие территории, например находящиеся в океанической зоне Южного полушария, могут испытывать понижение температуры на такую же величину, не зарегистрированное или не выявленное из-за ограниченности числа постоянных метеорологических станций. Даже если в настоящее время происходит незначительное глобальное потепление, трудно доказать, что оно обусловлено загрязнением атмосферы промышленными отходами. В любом случае климат Земли не остается постоянным, и кратковременные колебания на несколько градусов — вероятно, совершенно нормальная особенность нашего природного окружения.

Прочие изменения атмосферы серьезно рассматривались как факторы разрастания и деградации ледяного покрова Земли. Содержание озона в верхних слоях атмосферы, как полагают, обусловлено солнечными вспышками, а также загрязнением промышленными отходами, однако не ясно, насколько велико может быть глобальное похолодание или потепление за счет изменений в слое озона. Вулканические процессы тоже могли влиять на климат, особенно если за короткий промежуток времени происходило много крупных извержений, способствовавших загрязнению атмосферы вулканической пылью. Однако в настоящее время полагают, что влияние вулканических извержений кратковременно, и было показано, что вулканическая пыль редко остается рассеянной в атмосфере свыше семи лет после извержения.

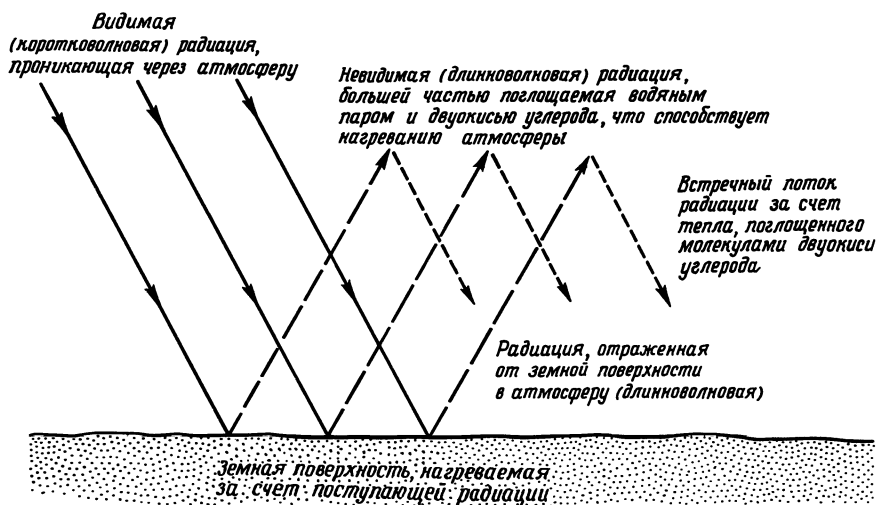


Рис. 33. График, иллюстрирующий «парниковый эффект», при котором атмосфера Земли нагревается благодаря присутствию молекул двуокиси углерода.

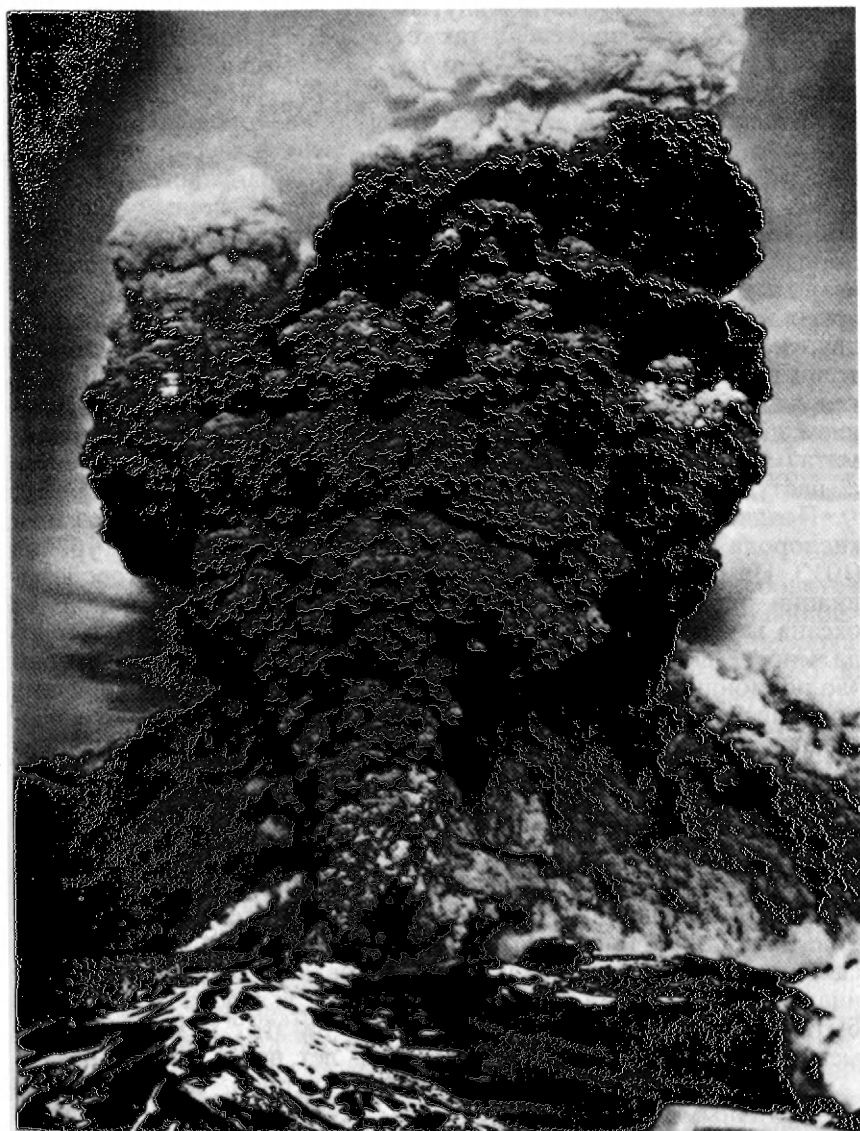


Рис. 34. Крупное вулканическое извержение в мае 1960 г.
Во время этого извержения в атмосферу был выброшен гигантский столб вулканической пыли.

3. *Геохимические изменения.* Существует много теорий по поводу химического состава литосферы, гидросферы и атмосферы, которые могут помочь объяснить повторяемость ледниковых периодов. Подобно вышеупомянутым теориям, они тесно связаны с ролью CO_2 в атмосфере, а также с участием «свободного» кислорода (т.е. не связанного с другими химическими элементами) и с отложением карбонатов.

В настоящее время известно, что доля кислорода в атмосфере в течение геологической истории Земли неравномерно увеличивалась и достигла нынешнего уровня (21%). В раннедокембрийское время в атмосфере присутствовало лишь незначительное количество кислорода, но около 600 млн. лет назад концентрация кислорода составила 1%, и это сопровождалось эволюционным «взрывом» примитивных жизненных форм в океанах. В то же время произошло резкое уменьшение количества атмосферной двуокиси углерода вследствие отложения в океанах мощных толщ карбонатных осадков в виде доломититов (см. гл. 4). Могло ли это изменение состава атмосферы быть связано с усилением циркуляции воздушных масс и общим похолоданием климата? Могла ли «новая» атмосфера иметь какую-то связь с наступлением позднедокембрийских ледниковых периодов?

Позднее, в средне- и позднесилурийское время, содержание кислорода в атмосфере достигло второго критического уровня (10%). На этот раз пагубное воздействие ультрафиолетовой радиации экранировалось настолько, что в поверхностном слое океана могла существовать жизнь. К концу силурийского периода многие формы жизни вышли на сушу и произошел второй эволюционный взрыв. Все это случилось вскоре после окончания ордовикско-силурийского ледникового периода. Мог ли этот ледниковый период быть связан с очередным резким сокращением количества CO_2 в атмосфере или с периодом глобального похолодания?

В каменноугольном периоде, по мнению авторитетных ученых, содержание кислорода в атмосфере было выше современного при соответствующем сокращении количества двуокиси углерода. Большая часть CO_2 осаждалась в океанах в виде карбонатных пород, или известняков; еще большее количество было связано в мощных угленосных свитах, накапливавшихся на окраинах материков. Эта фаза «поглощения» углерода тоже могла быть связана с ледниковым периодом, на этот раз пермско-каменноугольным, начавшимся 300 млн. лет назад.

Наконец, похолодание в третичный период, завершившееся четвертичным ледниковым периодом, по-видимому, следовало за фазой интенсивного отложения карбонатов, в результате которого сформировались толщи меловых (писчий мел) и третичных (кораллы и глубоководные илы) пород. Эта цепная реакция мо-

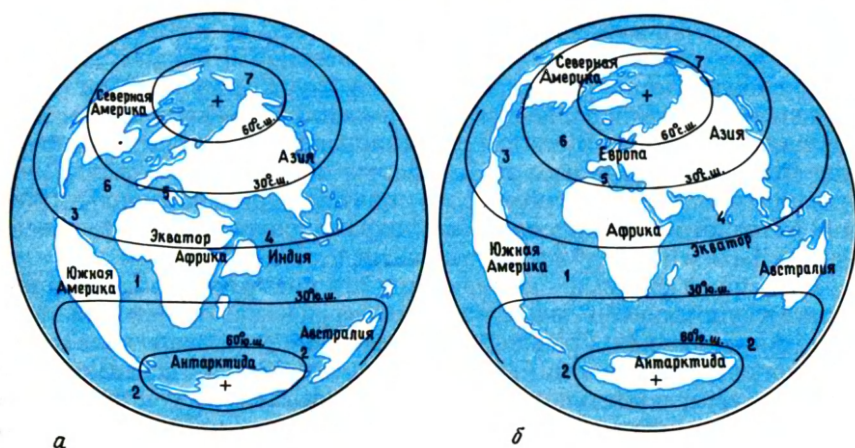


Рис. 35. Некоторые палеогеографические изменения в третичном периоде, повлиявшие на циркуляцию океанических вод.

a – начало третичного периода; *б* – конец третичного периода и четвертичный период.

1 – образование Южного Атлантического океана; 2 – образование Южного океана и Циркумантарктического кольца течений; 3 – замыкание «Панамского залива»; 4 – перемещение Индийского субконтинента; 5 – замыкание Средиземного моря; 6 – образование Северного Атлантического океана; 7 – сужение связи Тихого и Северного Ледовитого океанов.

гла состоять из следующих звеньев: накопление карбонатов в океанах – сокращение концентрации CO_2 в атмосфере – глобальное понижение температуры – установление ледникового периода.

4. *Изменение океанов.* Океаны осуществляют очень строгий контроль над климатом Земли главным образом как огромный резервуар тепла. Океанические течения также способствуют передаче значительных количеств тепла от тропических областей к полярным, в то время как холодные течения, направляющиеся из высоких широт, оказывают охлаждающее воздействие на встречные массивы суши.

В олигоцене (38–26 млн. лет назад) Австралия отделилась от Антарктиды и прервалась сухопутная связь между Южной Америкой и Антарктическим полуостровом. Эти события привели к большому изменению океанической циркуляции в Южном полушарии; впервые океанические течения смогли беспрепятственно передвигаться вокруг Антарктического материка, способствуя перемешиванию вод Тихого, Индийского и Южного Атлантического океанов. Развитие циркумантарктической системы океанических течений и атмосферной циркуляции сократило приток тепла из экваториальных и умеренных широт, и в миоцене Антарктический ледниковый покров разросся до размеров, значительно превышавших современные (см. гл. 7). В третичном периоде произошло постепенное расширение Северной Атлантики,

и это событие оказало большое влияние на циркулирующую океанических вод и климат Земли. Примерно вплоть до 3,5 млн. лет назад не было сухопутной связи между Северной и Южной Америкой, и последующее поднятие Панамского перешейка произвело большие изменения в системе океанической циркуляции в экваториальных широтах. В миоцене и плиоцене прервалась связь между Средиземным морем и Индийским океаном и открылся Гибралтарский пролив. Кроме того, началось образование островов Малайского архипелага, что сильно сократило водообмен между Тихим и Индийским океанами.

Нынешняя система океанических течений установилась в результате упомянутых выше палеогеографических изменений. Вокруг Антарктиды образовался обширный резервуар холодных «придонных вод», и это была не единственная часть океана, где температуры понизились. Вследствие фактического закрытия древнего пролива между Северным Ледовитым и Тихим океанами сократился приток теплых вод из экваториальной зоны и одновременно ограничился отток холодных вод. Кроме того, многие крупные реки Канады и Сибири, текшие к северу, приносили большое количество холодных пресных вод, что уменьшало соленость арктических вод. В конечном итоге произошло быстрое охлаждение океана и создание покрова паковых льдов. Северо-Атлантическое течение, которое прежде несло большую часть своих теплых вод в море Лабрадор, в основном отклонилось к востоку. Это течение перестало оказывать влияние на Гренландию, где стало проявляться противоположное воздействие холодного течения, следовавшего к югу. Около 3–4 млн. лет назад Гренландский ледниковый покров разросся примерно до нынешних размеров.

Современная конфигурация суши и система океанических течений могут существенно измениться в случае изменений уровня моря или поднятия участков морского дна. Одна из теорий ледниковых периодов, выдвинутая Юингом и Донном в 1956 г., строилась на предположении, что незначительное понижение уровня Мирового океана, обусловленное совместным влиянием оледенения и других факторов, могло вызвать такое обмеление Фарерско-Исландского порога (базальтового хребта, простирающегося от Исландии через Северную Атлантику к побережью Норвегии), которое сильно сократило бы приток теплых вод в Арктику. Это в свою очередь могло повлечь за собой похолодание и распространение льдов в Северном Ледовитом океане, поскольку ледниковый период уже начался. Известно, что во время кульминации ледникового периода уровень моря понижается на 100 м или более, и неизбежное образование «сухопутных мостов» в других областях тоже должно было оказать большое влияние на систему океанической циркуляции.

Однако в данной области, как и в других, выявление причинно-следственных связей вызывает большие затруднения. Указывалось, что отмеченные выше изменения в океанах не могут проявиться в течение ледникового периода, пока оледенение определяет изъятие большого количества воды из океанов. Эти изменения следует рассматривать как последствия оледенения, а не причины. С другой стороны, долговременные изменения циркуляции в океанах, по-видимому, были тесно связаны с установлением четвертичного ледникового периода, подобные же изменения могли способствовать наступлению и более древних ледниковых периодов.

Был выдвинут ряд теорий ледниковых периодов, которые строились на предположении, что межледниковые океанические условия сами по себе могли объяснять возникновение оледенений. Одна из таких теорий основана на представлении о свободном от льда Северном Ледовитом океане. В этом случае обильная влага могла переноситься полярными ветрами и выпадать в виде снега в горах и на плато по берегам океана. Ледники, ледяные шапки и ледниковые покровы разрастались, и в конечном итоге похолодание климата со временем привело к замерзанию Северного Ледовитого океана. По мере роста ледниковых покровов Северного полушария до максимальных размеров могло происходить соответствующее понижение уровня Мирового океана, влекущее за собой приток тропических вод в Арктический бассейн. После того как Арктика целиком покрывалась ледяными щитами, шельфовыми и паковыми льдами, там не оставалось океанической влаги для питания ледников в северных полярных районах, и в конце концов ледники быстро таяли. Так и возникновение, и окончание крупного оледенения можно объяснить только на основе «океанических» факторов.

ПОВЕДЕНИЕ ЛЬДА

В последние годы гляциологи и геоморфологи отмечали, что особенности поведения льда, характерной материальной субстанции ледниковых периодов, могут сами по себе определять смены интервалов разрастания и сокращения ледниковых покровов на земном шаре. Подразумевается, что колебания климата, ассоциирующиеся с ледниковыми периодами, могут быть не столько причинами оледенений, сколько их следствиями. Иными словами, разрастание ледяного покрова на Земле вызывает похолодание, а сокращение этого покрова – глобальное потепление. Многим лицам трудно воспринять эти представления, поскольку принято считать, что для объяснения установления ледниковых периодов почти всегда необходимо выявить механизмы изменений климата.

Знание некоторых простых гляциологических фактов может подорвать доверие к «климатологическим» теориям ледниковых периодов. Во-первых, как отмечалось в разделе «Перемещение земной коры», ледники не обязательно лучше всего развиваются в полярных широтах. Наиболее благоприятны для роста ледников вовсе не холодные сухие полярные районы, а прохладные влажные умеренные широты, где выпадает много осадков и где летом достаточно холодно, чтобы хотя бы часть выпавшего за зиму снега сохранялась и накапливалась из года в год. Во-вторых, крупные современные ледники (такие, как Гренландский и Антарктический ледниковые покровы) могут оказывать большое влияние на климат, и нет оснований предполагать, что древние ледники в этом отношении составляли исключение. Большие площади снега и льда с очень высокими значениями альбеда отражают большую часть поступающей радиации обратно в космическое пространство в отличие от темной поверхности, которой присуща тенденция к поглощению тепла. Следовательно, ледниковые покровы сильно охлаждают атмосферу. Часть этого холодного воздуха стекает с поверхности льда, направляясь вдоль выводных ледников и других понижений в виде свирепых нисходящих ветров, которые всегда устрашали полярных исследователей. Эти ветры оказывали охлаждающее воздействие и за пределами самих ледниковых покровов и ледяных шапок, тем самым увеличивая размеры «области охлаждения». Помимо этого крупная масса льда, однажды возникнув, имеет тенденцию блокировать проникающие на нее циклоны и отклонять их в более низкие широты. Это ведет к усилению ветров, выпадению большего количества осадков, а также, вероятно, к понижению средних годовых температур воздуха в умеренных широтах Северного полушария, что в свою очередь создает здесь благоприятную обстановку для разрастания ледников.

Все вышеизложенное вызывает постепенный поворот от «неледникового пути» развития к «ледниковому», где причинно-следственные связи главным образом относятся ко льду и его влиянию на атмосферу.

Возникновение оледенений или установление ледникового периода условно рассматривалось как медленный процесс, при котором потребовались тысячелетия для образования ледниковых покровов со времени их начального появления. Однако некоторые современные теории говорят о почти моментальном переходе от неледниковых условий к ледниковым (см. гл. 7). Одна такая теория приобрела известность под названием теории «снежной лавины». По мнению Найджела Колдера, умеренные широты отличаются неустойчивостью климата с внезапными переходами от относительного тепла к резко нарастающему холоду. Он предположил, что зеленые луга Англии могли подверг-

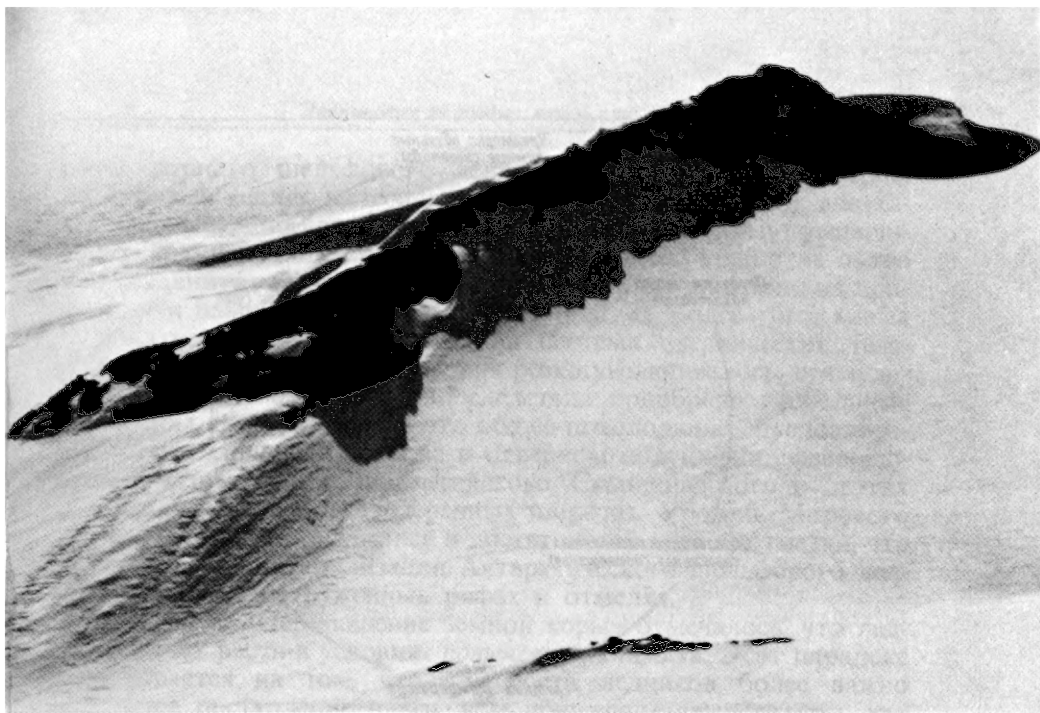


Рис. 36. Белый снег и черные скалы—часть хребта Шеклтона, поднимающаяся над Антарктическим ледниковым покровом.

Снежная поверхность, имеющая высокие значения альбедо, отражает большую часть поступающей солнечной радиации в мировое пространство.

нуться серии суровых снежных зим. Если снежный покров (или его часть) был достаточно мощным и обширным, чтобы сохраниться в течение ряда прохладных летних сезонов, соответственно возросшее альбедо поверхности могло привести к резкому понижению температуры воздуха. Поскольку большее количество осадков выпадало в виде снега, увеличивалась мощность снежного покрова и летние периоды становились столь прохладными и короткими, что темпы абляции намного отставали от темпов аккумуляции. После достижения этого состояния ничто не может приостановить рост мощности снежных полей до образования ледникового льда. Таким образом, оледенение может начаться неожиданно за несколько лет, причем ледники могут развиваться не в далеких снежных горах, а на равнинах и плато умеренных широт ($55-65^{\circ}$ с. ш.).

Поскольку эта идея была высказана популяризатором науки, к ней отнеслись со скептицизмом большинство гляциологов и климатологов, считающих, что энергетический баланс умеренных широт не мог быть нарушен в такой степени, как это предполагает Колдер. В то же время «снежная лавина» гораздо более вероятна в *высоких широтах*, где снежные зимы и прохладные летние сезоны способствуют быстрой аккумуляции сне-



Рис. 37. Положительная обратная связь, которая может проявиться при обильных снегопадах в умеренных широтах (теория «снежной лавины»).

га (арктическая Канада и Лапландия). В начале 1970-х годов обследование поверхности арктической Канады со спутников показало, что некоторые районы Крайнего Севера начали покрываться постоянным снегом, тогда как прежде снежный покров каждое лето таял. Аккумуляция снега не достигла критического уровня, и незначительное потепление в середине 1970-х годов вновь сократило распространение снежного покрова.

Однако внезапные похолодания известны из истории климатов прошлого. Одно из них произошло около 89 500 лет назад во время последнего межледникового, когда температуры на Земле резко понизились в течение менее одного-двух столетий, пока они не стали такими низкими, как во время оледенения. Спустя несколько сотен лет температуры снова повысились. Это климатическое событие, конечно, произошло внезапно и, вероятно, вызвало обширное оледенение. За последние 13 000 лет были другие внезапные, но менее резкие похолодания, и поэтому теорию снежной лавины нельзя сбрасывать со счетов.

Широким распространением пользуется «пульсационная теория» Уилсона, объясняющая поведение льда. В 1964 г. этот ученый предположил, что на краю Антарктического ледникового покрова местами могли периодически происходить пульсации, во время которых от внутренних частей ледникового покрова к побережью переносились огромные массы льда и это вело к созда-

нию крупного шельфового ледника, окаймляющего материк. Шельфовый ледник вытеснял морскую воду, способствуя внезапному повышению уровня моря. При этом также сильно увеличивалась площадь льдов в Южном океане, причем край этих льдов был выдвинут гораздо дальше к северу, чем это показано на приведенном нами космическом снимке (рис. 8). Более того, могла нарушаться циркумантарктическая система океанических течений. Альbedo Южного полушария резко увеличивалось, стимулируя похолодание, которое впоследствии приобрело глобальные масштабы. В свою очередь это общее похолодание обуславливало рост ледникового покрова в Северном полушарии, завершавшийся разрастанием Лаврентийского, Скандинавского и других ледниковых покровов в умеренных широтах. Уровень Мирового океана постепенно опускался и достиг самой низкой отметки, что способствовало стабилизации Антарктического шельфового ледника на ранее погруженных рифах и отмелях.

В разделе «Перемещение земной коры» отмечалось, что ледники могут расти в условиях *потепления* климата. Этот парадокс основывается на том, что для роста ледников более важно обильное поступление влаги, чем понижение температуры, так что влажные прохладные условия более способствуют установлению ледникового покрова, чем холодные сухие условия. Теплые, или межледниковые, условия могут также вызвать пульсацию Антарктического ледникового покрова.

Чтобы понять это положение, надо знать, как распределяются температуры льда в крупном леднике или ледниковом покрове. В целом температуры льда повышаются сверху вниз от поверхности. Если поверхность ледниковых покровов очень холодная (скажем, -30°C), то температура льда на глубине 2000 м будет около -5°C . В этом случае лед будет достаточно холодный, чтобы оставаться примерзшим к ложу. Однако если лед более мощный или если температуры его поверхностного слоя повышаются, то температурный градиент льда в конечном счете изменится так, что температуры льда у ложа будут выше критического уровня. Этот уровень не обязательно равен 0°C , но он соответствует точке плавления при данном давлении льда и может понижаться до $-1,5^{\circ}\text{C}$. Как только достигнута упомянутая точка, может произойти донное таяние ледникового покрова и лед начнет скользить по ложу. Некогда устойчивый ледниковый покров теперь обнаруживает признаки неустойчивости и начинает вести себя, как при пульсации, причем некоторые части ледникового покрова движутся со скоростью, во много раз превышающей обычную. Таким образом, огромные массы льда переносятся к краю покрова, что способствует понижению его поверхности в области, где началась пульсация. Когда мощность льда достаточно уменьшится, температуры придонных слоев

льда снова понизятся и станут ниже точки плавления при данном давлении. Лед опять примерзнет к ложу, и ледниковый покров возвратится в устойчивое состояние. После этого поверхность ледникового покрова начинает медленно нарастать до тех пор, пока через много тысячелетий покров вновь не приобретет мощност и температурные характеристики, необходимые для очередной фазы таяния.

Описанная выше последовательность событий с гляциологической точки зрения весьма вероятна, и некоторые современные гляциологи полагают, что Антарктический ледниковый покров или его части периодически ведут себя, как показано ниже. Такой цикл поведения большей частью не зависит от климата и его изменений, и это может вооружить нас совершенно правдоподобным *гляциологическим* механизмом для объяснения смен оле-

Рис. 38. Конец пульсирующего ледника в западной Гренландии.

Эта фотография позволяет представить в миниатюре обстановку, которая может иметь место при пульсации части Антарктического ледникового покрова.



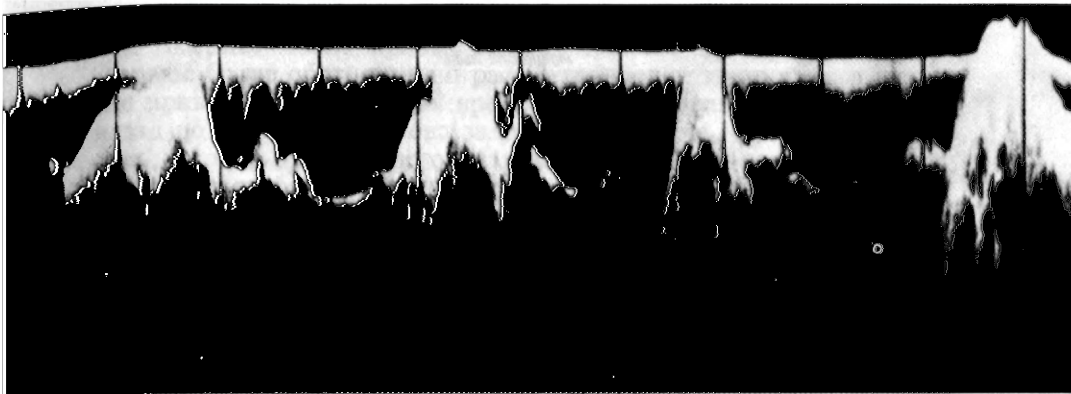


Рис. 39. Профиль, полученный при радиолокационном зондировании части Антарктического ледникового покрова.

Видны погребенные горные хребты и долины, а также поверхность льда. В местах наибольшей мощности льда, приуроченных к крупным трогам, температуры могут быть очень близки к точке плавления.

денений и межледниковий, происходящих в обычный ледниковый период.

С теорией пульсаций ледникового покрова связано немало трудностей. Далеко не самая последняя из них — проблема крупного Антарктического шельфового ледника, который, как предполагают, возник вследствие пульсации ледникового покрова. Каким образом стабилизировался шельфовый ледник на открытом побережье и как он разрушился в конце ледникового периода? Вот вопросы, на которые еще предстоит ответить, и здесь также крайне трудно разделить причины от следствий. Например, является ли разрушение шельфового ледника причиной потепления климата или это следствие повышения температуры и поднятия уровня моря за счет таяния ледниковых покровов Северного полушария?

Какими бы ни оказались ответы на подобные вопросы, в настоящее время накапливаются аргументы, подкрепляющие некоторые положения пульсационной теории, выдвинутой Уилсоном. Известно, что на больших площадях периферической части Антарктиды температуры придонных слоев льда близки к точке плавления при данном давлении, и радиолокационное зондирование показало, что части Западно-Антарктического ледникового покрова, окаймляющего шельфовые ледники Росса и Фильхнера, подстилаются крупными подледниковыми озерами. Коренное ложе в нескольких таких областях расположено ниже уровня моря, и там относительно легко может происходить пульсация ледникового покрова, возможно, даже с его последующим разрушением, если придонный слой воды слишком широко распростра-



Рис. 40. «Цикл ледниковой пульсации», которая может охватить части Антарктического ледникового покрова.

нится или если море проникнет достаточно далеко в глубь суши, чтобы образовались шельфовые ледники в районах, ныне занятых ледниковым покровом. «Резко вогнутый» поперечный профиль части Западно-Антарктического ледникового покрова уже интерпретировался некоторыми авторитетными учеными как свидетельство пульсации, и, по-видимому, в настоящее время поверхность льда снова наращивается перед очередной фазой тая-

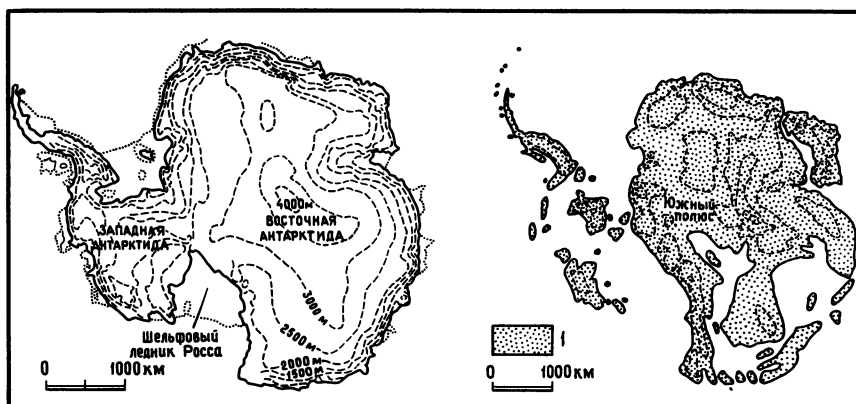


Рис. 41. Гипсометрия поверхности (слева) и ложа (справа) Антарктического ледникового покрова.

Изолинии высот проведены через 500 м. Западная часть ледникового покрова преимущественно залегает на коренных породах ниже уровня моря, и это идеальная ситуация для развития ледниковых пульсаций.
/ — районы, в которых коренные породы ложа находятся выше уровня моря.

ния. Разрушение Лаврентийского ледникового покрова в Северной Америке могло происходить подобным же образом; Джон Эндриус более обстоятельно рассматривает этот процесс в гл. 7, где приведены данные для временного интервала 8000–7000 лет назад по району Гудзонова залива. Здесь вновь, как подчеркивалось в конце предыдущего раздела, зависимость между гляциологическими факторами и уровнем Мирового океана приобретает решающее значение.

ЦЕПНЫЕ РЕАКЦИИ И МЕХАНИЗМЫ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Из предыдущих разделов настоящей главы явствует, что существуют крайне сложные звенья в природной системе, состоящей из атмосферы, гидросферы и криосферы. Воздух, океаны и крупные ледниковые покровы в большой степени связаны между собой, и изменения характера одного из этих звеньев почти наверняка приведут к изменениям двух других. Здесь мы рассматривали: 1) влияние глобального понижения температуры на охлаждение океанов, что приводит к разрастанию ледниковых покровов; 2) влияние изменений океанических течений или положения уровня моря на распределение осадков, что обуславливает рост ледников в некоторых областях; 3) влияние пульсации ледникового покрова на охлаждение атмосферы, что ведет к внезапному повышению уровня моря.

В настоящий момент природная среда подвергается многочисленным цепным реакциям, различающимся по типу, амплитуде и продолжительности. Крупнейшая проблема в области наук о Земле и ее атмосфере — это разграничение цепных реакций между собой и показ причинно-следственных зависимостей, которые проявлялись длительное время. Основной недостаток всех реконструкций изменений природной среды в масштабе геологического времени заключается в том, что мы *располагаем прямыми количественными наблюдениями только за несколько столетий*. Для таких важных факторов, как изменения температуры океанов или баланса массы ледников, мы имеем прямые количественные наблюдения только за несколько десятилетий. Таким образом, даже наиболее совершенная теория ледниковых периодов зависит от допущений и реконструкций, обычно относящихся к периодам, которые предшествовали истории развития человечества. Самая стройная математическая модель ледниковых периодов зависит от вводимых данных, содержащих элемент неопределенности; такие данные неизбежно приходилось использовать даже для временного среза около 18 000 лет назад, детально

изученного в соответствии с проектом CLIMAP¹ (см. гл. 7). Полученные результаты не могут быть лучше использованных исходных источников информации.

С другой стороны, причинно-следственные зависимости гораздо легче выявить для короткого временного интервала. Так, метеорологические исследования позволили выявить ряд вероятных механизмов, обеспечивающих возникновение оледенения или определяющих окончание ледникового периода. Следует иметь в виду следующие важные допущения: 1) даже в рамках короткого интервала изменения климата могут влиять и на океаны, и на ледники и 2) совсем малые климатические изменения могут оказывать продолжительное влияние, особенно на массы льда, находящиеся в критическом состоянии.

Связь между погодными условиями и ростом или убыванием ледников изучалась многими метеорологами и климатологами в нынешнем столетии, особенно профессорами Альманном, Бруксом, Манли, Лэмом и Флоном. За последние десятилетия было предпринято количественное моделирование с анализом метеорологических данных на ЭВМ, что послужило основой для ретроспективных оценок. Три самых значительных проекта, известные под сокращенными обозначениями GARP (Global Atmospheric Research Program – Программа глобального исследования атмосферы), NORPAX (North Pacific Experiment – Северо-Тихоокеанский эксперимент) и CLIMAP, посвящены изучению характера атмосферной циркуляции в масштабах всей Земли или ее полушарий. За последние несколько лет было написано много интересных и содержательных работ о численно обоснованных климатических реконструкциях систем циркуляции атмосферы и океанических вод и об их соотношениях с ледовым покровом Земли 18 000 лет назад. Некоторые результаты этих исследований в настоящее время опубликованы. Реконструкция ледниковых систем, существовавших 18 000 лет назад, рассматривается Джоном Эндрюсом в настоящей книге.

Типичное метеорологическое объяснение наступления ледникового периода может быть следующим. Атмосферная циркуляция в Северном полушарии сменяется устойчивой системой, в которой над североатлантическими областями суши удерживается холодный воздух. Циклоны, отклоняясь, следуют по более южным трассам, а холодный воздух, поступающий из Арктики, способствует увеличению выпадения снега в умеренных широтах. В Лапландии и некоторых районах арктической Канады начинают расти ледники, а затем ледниковые покровы. Океаны ох-

¹ Climate Long Range Investigation, Mapping and Prediction – исследование, картографирование и прогнозирование климата в долгосрочном аспекте.

лаждаются, и паковые льды формируются значительно южнее Северного Ледовитого океана, особенно у северных берегов Атлантического и Тихого океанов. В Атлантике океаническая циркуляция изменяется так, что ослабевает теплое Северо-Атлантическое течение. С ростом масс льда в Северном полушарии усиливается новая система циркуляции атмосферы. Более того, ныне устойчивая система океанических аномалий температуры тоже усиливает породившую ее атмосферную циркуляцию. Ледниковые покровы разрастаются до максимальных размеров, и мир оказывается на заре ледникового периода. Такая последовательность событий описывается как положительная обратная связь, где каждое звено цепной реакции усиливает новое состояние природной обстановки.

Наибольшее затруднение при таком объяснении вызывает поиск механизма окончания ледникового периода после его установления. Ясно, что положительная обратная связь должна где-то прекратиться, если весь мир не покрывается льдом. Некоторые современные ученые полагают, что прочно установившаяся «ледниковая» циркуляция атмосферы когда-то утрачивает свою устойчивость. Здесь может отчасти сказаться воздействие гляциологических факторов, особенно неустойчивые «морские» ледниковые покровы. Когда ледниковые покровы Северного полушария достигают определенного размера и их южные края заходят в умеренные широты, они оказываются слишком крупными, чтобы сохраниться. Их внутренние части не получают твердых осадков (снега), необходимых для их существования, большая часть осадков выпадает вдоль южных и западных краев, где таяние также достигает наибольших размеров. На северных и восточных краях ледниковых покровов вряд ли выпадают какие-либо осадки; Северный Ледовитый океан и северные части Атлантического и Тихого океанов покрыты паковым льдом, так что ветры, проходящие через эти территории, не могут получить влагу, необходимую для образования твердых осадков. При таких обстоятельствах существование ледниковых покровов в умеренных широтах становится невозможным, и происходит катастрофическое таяние. Полярные ледниковые покровы Гренландии и Антарктиды большей частью не затрагиваются этим процессом и сохраняются, тогда как Лаврентийский, Скандинавский и Сибирский ледниковые покровы прекращают свое существование.

Теории, подобные вышеупомянутым, основываются главным образом на широтных или меридиональных изменениях циркуляции атмосферы и океанических вод в умеренных широтах и на их соотношениях с ледниковыми покровами умеренных широт. Северный Ледовитый океан, Антарктический и Гренландский ледниковые покровы играли второстепенную роль, тогда как, со-

гласно другим теориям, они приобретали важное значение. Конечно, еще нет согласия в том, где действительно лежит ключ к пониманию крупных изменений климата: в Южном полярном регионе, Северном полярном регионе или в умеренных широтах Северного полушария.

Свыше 20 лет назад профессор Дж. К. Чарлсуэрт, рассматривая многочисленные теории о причинах ледниковых периодов, был вынужден написать, что они варьируют «от маловероятных до внутренне противоречивых и явно несовершенных». Впоследствии положение еще более запуталось, хотя и произошел сильный сдвиг от «катастрофических» теорий к теориям, основывающимся на обычных изменениях природной обстановки и механизмах обратной связи. Среди этих теорий типичны метеорологические теории с количественными оценками, представляющие собой картографические реконструкции, выполненные при помощи ЭВМ. В то же время некоторые современные теории, рассматривающие почти внезапные переходы от ледниковых условий к межледниковым (и обратно), носят явный отпечаток катастрофизма! Несмотря на умозрительный и противоречивый характер, наиболее правдоподобны «сложные» теории, опирающиеся на учет изменений высот и конфигурации материков, а также количества солнечной энергии, получаемой поверхностью Земли. В последующих главах вновь рассматриваются некоторые из этих теорий применительно к отдельным ледниковым периодам. В конце книги уделяется место самому трудному вопросу, а именно объяснению кажущейся закономерной повторяемости ледниковых периодов в геологической истории с кажущимся закономерным чередованием оледенений и межледниковий в каждом ледниковом периоде. В конечном итоге ритмичность глобальных потеплений и похолоданий позволит выявить и понять реальные причины возникновения ледниковых периодов.

3. ЛЕДНИКИ И ИХ ОКРУЖЕНИЕ

Эдвард Дербишир

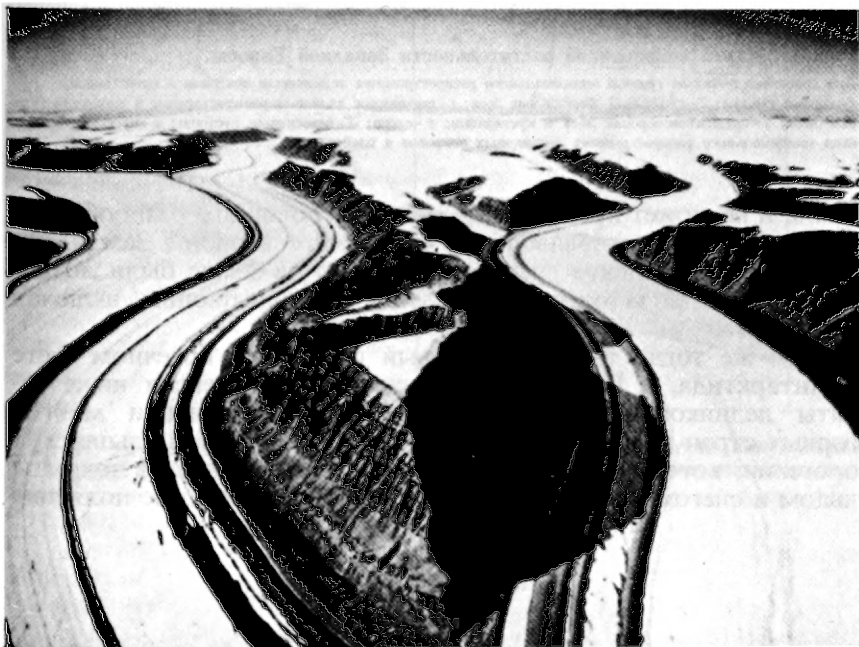
Для большинства людей выражение «ледниковый период» навевает представление о несмягчаемом холоде, о глубоко промерзшей поверхности суши с разреженной растительностью, о регулярном распространении снежного покрова и об обширных ледниковых покровах и ледниках на равнинах и в долинах.

В эту картину вписываются полуголые первобытные люди, охотники на громадных, покрытых шерстью животных. Эти люди обитали в темных и сырых пещерах, где единственным большим удобством был костер.

Хотя этот набросок по сути основан на научных фактах, он вводит в заблуждение, так как отражает лишь экстремальные условия оледенения во внутренних областях северных материков

Рис. 42. Сток льда из внутренних частей Гренландского ледникового покрова к побережью осуществляется по выводным ледникам.

Два крупных выводных ледника четко видны на фотографии.



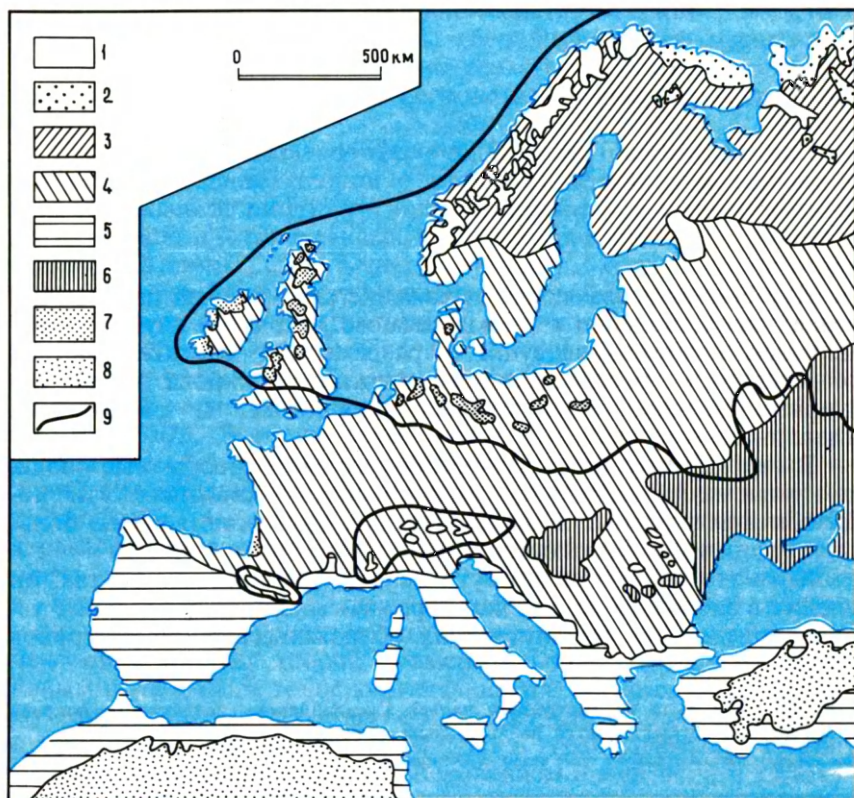


Рис. 43. Карта современной растительности Западной Европы.

Для сравнения показана граница максимального распространения ледниковых покровов в плейстоцене.

1 – горные тундры; 2 – тундры; 3 – бореальные леса; 4 – смешанные хвойно-широколиственные и широколиственные леса; 5 – средиземноморские леса и кустарники; 6 – степи; 7 – вересковые пустоши; 8 – пустыни; 9 – граница максимального распространения ледниковых покровов в плейстоцене.

Земли и не может претендовать на охват большого разнообразия обстановок, существовавших в ледниковые периоды Земли. Он вводит в заблуждение еще и потому, что на Земле были ледниковые периоды задолго до появления млекопитающих, включая и человека.

Что же тогда такое ледниковый период? В конечном счете и Антарктида, и Гренландия в значительной степени ныне заняты ледниковыми покровами и большие площади многих горных стран мира (особенно поднявшихся во время альпийской орогении, которая началась около 65 млн. лет назад) покрыты льдом и снегом, причем некоторые ледники и снежные поля там

достигают внушительных размеров. Как отмечалось в гл. 1, нет сомнений в том, что мы живем в ледниковый период. В то же время наличие форм рельефа и отложений ледникового происхождения в таких пунктах, как Варшава, Берлин, Оксфорд, Голуэй, Сент-Луис, Нью-Йорк и Киев, ясно означает, что настоящее время не соответствует максимуму развития оледенения.

Понятие об оледенениях и межледниковьях освещалось в предыдущей главе. Во время каждого ледникового периода основные оледенения, или ледниковые стадии, чередовались с интервалами более мягких природных обстановок, когда размеры ледников и ледниковых покровов сокращались. Иногда материковые ледниковые покровы уменьшались в объеме, но сохранялись и затем вновь разрастались. Стационарные состояния ледникового края во время его наступания рассматриваются как стадии, а теплые и относительно кратковременные интервалы, совпадавшие с отступанием ледника, описываются как межстадиальные периоды, или межстадиалы. Когда материковые ледниковые покровы полностью исчезали и в бывшей ледниковой зоне на многие тысячелетия устанавливались умеренные условия, наступал межледниковый период.

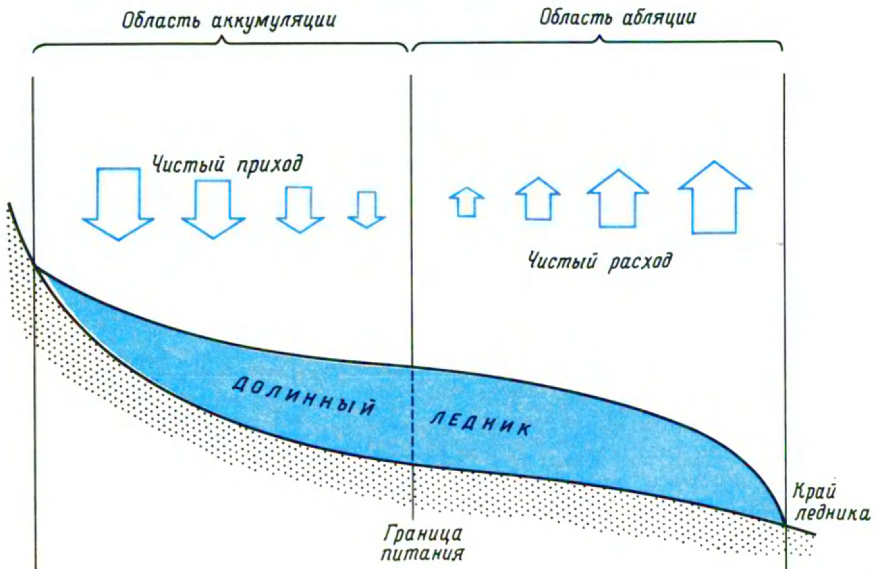


Рис. 44. Упрощенная схема, показывающая соотношения областей аккумуляции и абляции с разделяющей их границей питания на небольшом долинном леднике.

Теперь мы можем ответить на ранее поставленный вопрос. Ледниковый период — это период, во время которого ледниковые покровы хотя бы время от времени занимали равнины в умеренных широтах земного шара. Разрастание и таяние ледниковых покровов, однако, является существенной особенностью ледниковых периодов, имевших четырехчленную систему подразделений, представленных оледенениями, межстадиалами, стадиями и межледниковьями. Ограниченное количество льда на поверхности Земли в настоящее время наряду с наличием густых лесов и лугов на большей части территории, покрывавшейся льдом во время последнего оледенения, — это обстановка, типичная для межледниковья.

ЛЕД НА СУШЕ

Наш основной подход к изучению природы ледниковых периодов прошлого и обстановок на Земле во время этих «зим» сводится к раскрытию воздействия обширных оледенений на

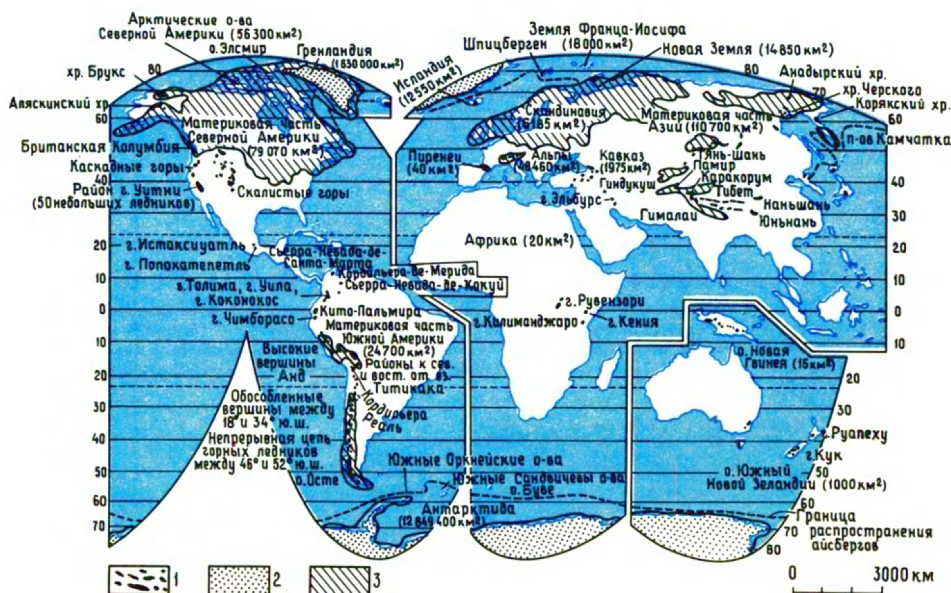


Рис. 45. Современные ледники Земли и плейстоценовые ледниковые покровы.

1 — современные ледники; 2 — современные ледниковые покровы; 3 — плейстоценовые ледниковые покровы.

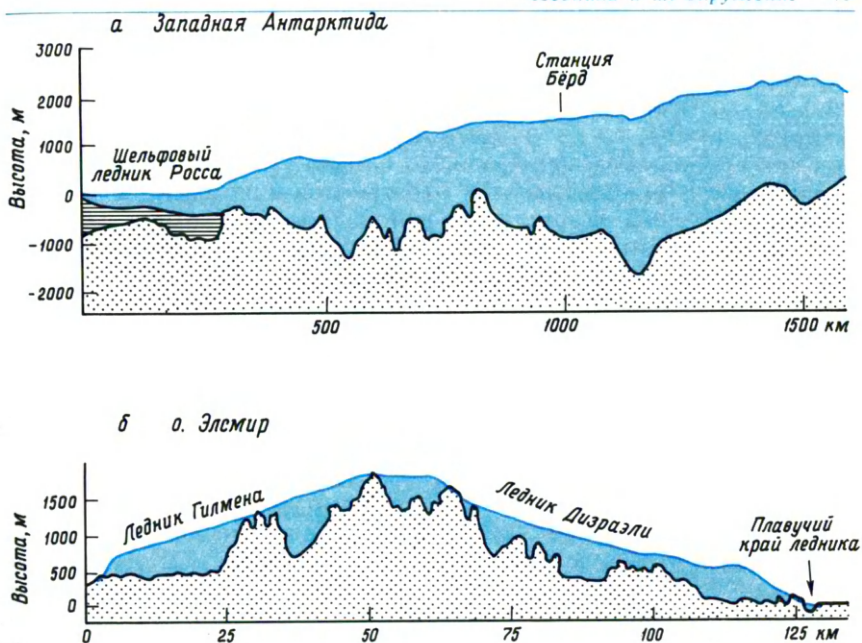


Рис. 46. Горы, погребенные под ледом.

Эти профили ледникового покрова Западной Антарктиды и ледников острова Элсмир показывают, что лед может перекрывать любые формы рельефа.

земную поверхность, покрывавшуюся льдом; следы этого воздействия — формы рельефа, оставшиеся после отступления ледников. Поэтому большую часть этой главы мы отведем рассмотрению особенностей рельефа, свидетельствующих о наличии, характере и степени оледенения в прошлом и о процессах, обусловивших появление этих форм рельефа. Сначала, однако, обратимся к самим ледникам.

Ледники — в большой степени продукт климата. Они главным образом состоят из кристаллического ледникового льда, который образуется, когда выпавший на поверхность снег погребается все более глубоко при последующих снегопадах и преобразуется под давлением вышележащих слоев. Однако ни один ледник не может расти, пока за определенное число лет избыток снега (или аккумуляция) не превысит совокупность потерь за счет таяния, испарения и возгонки льда (процессы абляции). Иными словами, баланс ледника должен быть положительным.

Верхние части большинства ледников имеют в этом смысле положительный баланс, но нижние, краевые зоны — часто отрицательный, т.е. потери объема летом превышают поступление снега, выпавшего зимой. В таком случае верхние части ледника рас-

смаатриваются как область аккумуляции, а нижние – как область абляции. Эти области разделяются границей питания (*equilibrium line*), на которой баланс уравновешен. Относительные размеры областей аккумуляции и абляции – показатель общего *баланса массы* ледника. Изменения общего баланса массы, определяемые климатическими колебаниями, отражаются в изменениях высоты границы питания. В полярных районах ледник может целиком располагаться выше этой границы, тогда как в других климатических условиях она может подниматься очень высоко и находиться в самой верхней части ледника. Ледники, находившиеся длительное время ниже границы питания, становятся застойными, или «мертвыми», и в конечном итоге исчезают.

На ранних стадиях развития оледенения, вероятно, формируются ледники, расположенные в высоких горах материков поблизости от берегов океанов (источники поступления влаги). Некоторым подтверждением этого предположения является нынешнее распределение ледников на земном шаре, но при взгляде на соответствующую карту мы замечаем некоторые исключения. Например, крупные ледниковые покровы Антарктиды и Гренландии целиком окаймлены горами, и даже совсем небольшие ледниковые покровы могут перекрывать по крайней мере более низкие части горных хребтов. Представляется, что если масса льда достаточно велика, чтобы ее можно было рассматривать как ледниковый покров, она в какой-то степени не зависит от рельефа подстилающей поверхности. Она имеет тенденцию походить на большой купол, где лед движется от более высоких частей к более низким, преобразуя подстилающую поверхность и оказывая существенное воздействие на климат всего района.

/ Ледники весьма различаются по размерам и форме. Небольшие округлые или овальные ледники занимают высокие ниши на коренных склонах, называемые карами или цирками. Когда такие ледники разрастаются, они выходят за пределы своих каров и спускаются вниз в виде долинных ледников. Куполовидные ледники на поверхности плато называют ледяными шапками, но, когда они занимают весь район и рельеф их поверхности не зависит от рельефа ледникового ложа, мы называем их ледниковыми покровами. Многие долинные и выводные ледники, начинающиеся от краев ледяных шапок и ледниковых покровов, заканчиваются в озерах или морях. Крупные выводные ледники, оканчивающиеся в море Росса и других заливах Антарктиды, переходят в крупные шельфовые ледники, находящиеся на плаву.

Рис. 47. Долинный ледник в восточной Гренландии, который питается из каров, расположенных в горах, и спускается к прибрежной низменности по трогу, подвергающемуся экзарации. ►





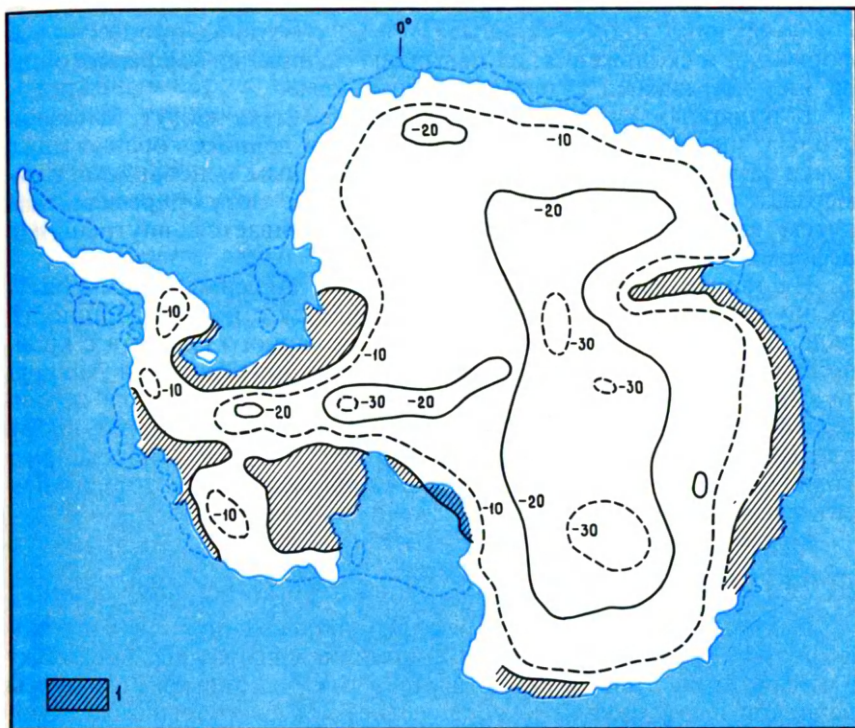


Рис. 49. Карта температур льда ($^{\circ}\text{C}$) в основании Антарктического ледникового покрова.

Там, где температуры достигают точки плавления, лед может скользить по ложу. / — районы предполагаемого донного таяния.

КАК УСТРОЕНЫ ЛЕДНИКИ

Температура имеет важное значение не только для возникновения и роста ледников, но также для направления их движения и образования талых вод. Если ледник расположен на склоне, его внутренняя часть со временем деформируется, причем скорость этого процесса зависит от температуры льда. Ледники также движутся путем скольжения по ложу, если температура на контакте льда и ложа соответствует точке плавления и при этом

Рис. 48. Крупный выводной ледник, отходящий от Гренландского ледникового покрова и оканчивающийся в море.

В верхней части фотоснимка поверхность ледника разбита трещинами. Обратите внимание на вогнутый контур бухты отёла, огромные айсберги и небольшие глыбы льда, откалывающиеся от конца ледника.

образуется тонкая пленка талой воды. Движение горных ледников умеренных широт складывается из сочетания процессов деформации и скольжения; их называют ледниками умеренного типа или «ледниками с теплым основанием».

В полярных районах температуры воздуха могут быть настолько низкими, что температуры льда в леднике гораздо ниже точки замерзания. Такие «ледники с холодным основанием» примерзают к подстилающей поверхности и не могут перемещаться путем скольжения, их движение ограничивается внутренними деформациями.

На таяние льда оказывают влияние и давление, и температура, но так как давление у ложа повышается с ростом мощности льда, ледниковые покровы в условиях полярного климата с крайне низкими средними температурами (как на огромном Антарктическом ледяном плато) могут скользить по ложу, если ледниковый покров достаточно мощный. Таким образом, во время оледенения колебания средних температур воздуха определяют степень участия скольжения в движении ледника, которая зависит как от температуры льда, так и от его мощности.

ДВИЖЕНИЕ ЛЕДНИКОВ

Различия между ледниками и ледниковыми покровами с холодным и теплым основанием принципиально важны, поскольку с этими двумя типами связаны резко различающиеся комплексы ледниковых отложений и форм рельефа. Гляциологические особенности прошлого можно определить при тщательном анализе древнеледникового рельефа.

От степени участия скольжения вдоль ложа в общем движении ледника существенно зависит тип образующегося рельефа. При скольжении ледников происходит абразия подстилающей поверхности коренных пород. Это может показаться невероятным, так как лед обладает меньшей прочностью, чем горные породы, и в любом случае, по теоретическим предположениям, за счет значительного давления льда на поверхность коренных пород образуется промежуточная пленка талой воды. (Это тот же принцип, который действует при катании на коньках: высокое давление между льдом и тонкими лезвиями коньков приводит к моментальному таянию льда с образованием тонкого слоя воды, по которому и движется конькобежец.) Поверхность основания ледника, как правило, недоступна для изучения по очевидным причинам, но по данным немногочисленных непосредственных наблюдений установлено, что основание многих ледников умеренного типа, покрыто слоем тонкозернистого обломочного материала, главным образом глины и алевроита, толщина которого обычно не более 10–20 см. Тонкозернистый

материал часто перемешан с гравием, галькой и даже валунами. Концентрация обломочного материала на поверхности скольжения приводит к абразии как самого обломочного материала, так и коренных пород. Иными словами, обломки пород выполняют функцию стачивающих средств в основании ледника, действуя как гигантский лист наждачной бумаги. В результате постоянного взаимодействия между обломками пород на поверхности самих обломков образуются плоские или сглаженные грани, для

Рис. 50. Основание одного из ледников Исландии (*вверху*) и вытянутая морена (*внизу*), состоящая из алеврита, глины и крупных обломков.

В этой подледниковой полости можно непосредственно наблюдать процессы, происходящие у ложа ледника, тогда как обычно такие наблюдения невозможно осуществить.



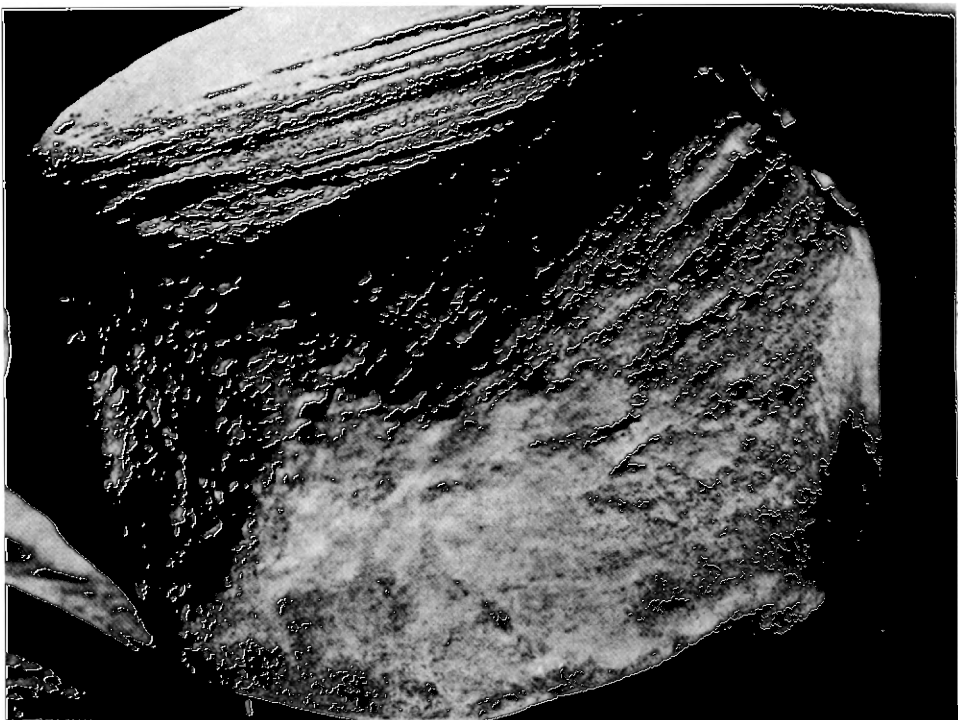
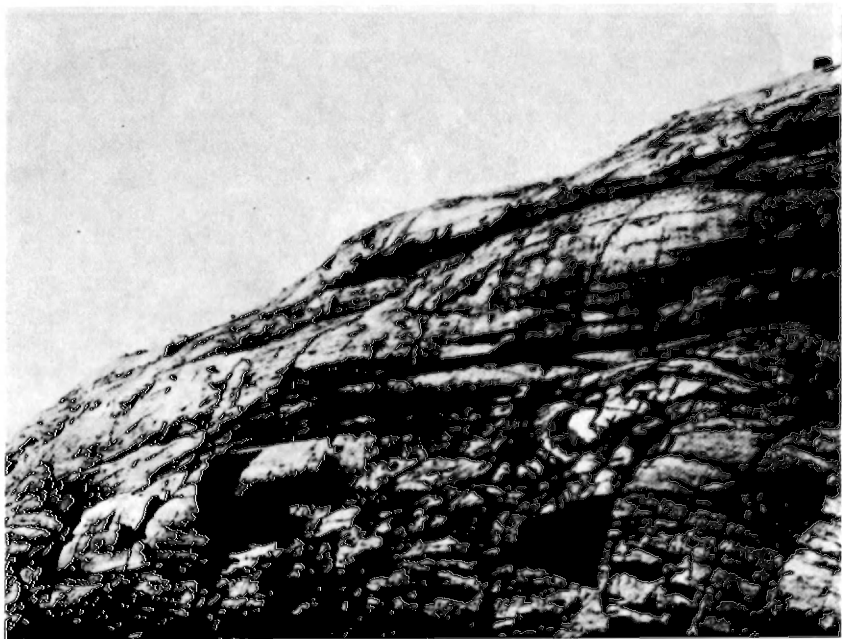


Рис. 51. Ограниченный валун из пермского тиллита (штат Виктория, Австралия) со следами ледниковой штриховки.

Размер по длинной оси 20 см.

Рис. 52. Сглаженная ледником поверхность коренных пород в районе Сёре-Стрём-фьорда (западная Гренландия).

Помимо шлифовки и штриховки поверхности ледник также выпахал несколько крупных глыб, на месте которых остались впадины, выделяющиеся на фотографии по резким теням.



которых типичны также борозды (или штрихи). Мостовые из изборужденных штрихами поверхностей коренных пород весьма типичны для современного и древнего ледникового рельефа, при этом общее направление штрихов указывает на преобладающее направление движения льда.

Под влиянием очень высоких кратковременных концентраций нагрузок частицы породы, примороженные к основанию ледника, могут оставить на поверхности подстилающих пород сеть искривленных концентрических трещин трения. Там, где валуны в основании ледника осуществляют абразию на больших расстояниях, на поверхности породы может образоваться система ледниковых шрамов и борозд, ориентированных по направлению движения льда. Длина большинства этих шрамов измеряется метрами, а в некоторых случаях — даже километрами при ширине в десятки метров. Их поверхности часто покрыты мелкими штрихами и осложнены трещинами трения.

Под ледниками, как известно, происходит также отрыв крупных глыб породы, и это нелегко объяснить, так как по устойчивости даже совсем мягкие породы во много раз превосходят ледниковый лед. Причина, по-видимому, состоит в том, что ледник оказывает высокое давление на часть подстилающей поверхности, тогда как ее другая часть, находящаяся ниже, может испытывать более низкое давление (либо давления там может и не быть). Давление, оказываемое ледником на ложе, может быть уравновешено путем повышения нагрузки в краевой зоне. Со временем возникают трещины, способствующие отрыву глыб породы даже при относительно слабой связи с основанием ледника, к которому они начали примораживаться. При этом процессе (*выпахивание*) образуется характерная форма рельефа — *бараны лбы*, названные так потому, что наблюдателю в XVIII в. серия таких форм показалась похожей на множество париков, смазанных бараньим жиром и заглаженных назад!

Для образования каменных мостовых и бараньих лбов, а также многих других форм рельефа, которые считаются типичными для ледниковой эрозии, или экзарации, необходимо по крайней мере периодическое скольжение ледника по ложу. Некоторые из этих форм мы кратко рассмотрим ниже.

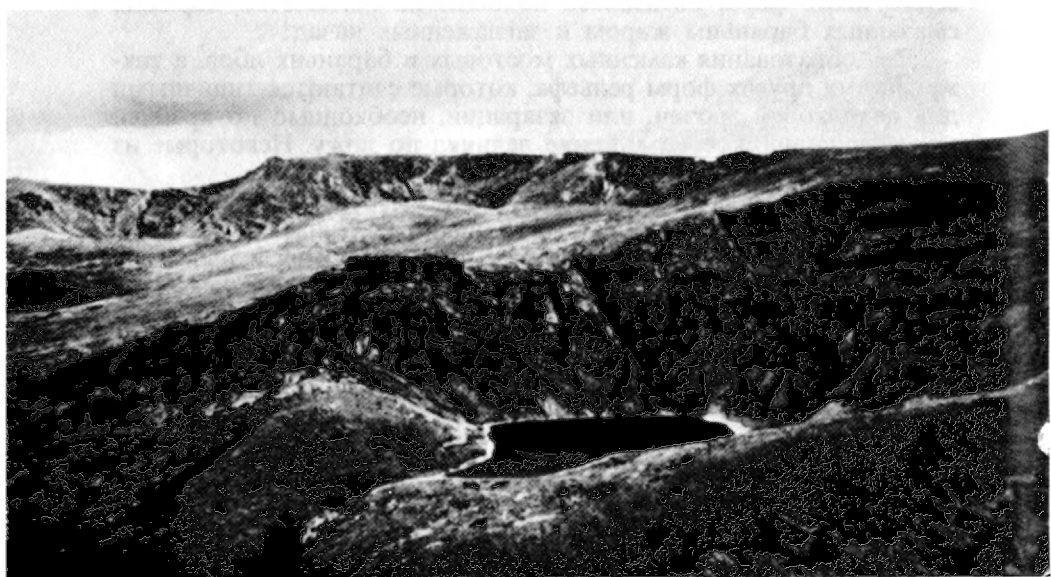
Как мы видели, развитие ледников в умеренных широтах начинается в высоких горах, и там ледники задерживаются дольше всего, когда улучшается климат при переходе к межледниковью. Высокие долины во многих горных районах приобрели характерные размеры и формы в результате продолжительной экзарации.

В верхних частях долин образуются кары, характерные экзарационные формы рельефа гор, подвергавшихся оледенению. Обнаженные верхние части стенки кара под влиянием морозного



Рис. 53. Причудливые бараньи лбы в районе Стокгольмского архипелага, Швеция.
Лед двигался справа налево, производя откалывание глыб от небольшого выступа скальных пород.

Рис. 54. Небольшой кар и каровое озеро на низкогорьях Фолклендских островов.
Обратите внимание на крутые уступы стенки кара и на выложенный передний край, который перекрывается льдом, спускавшимся из кара.



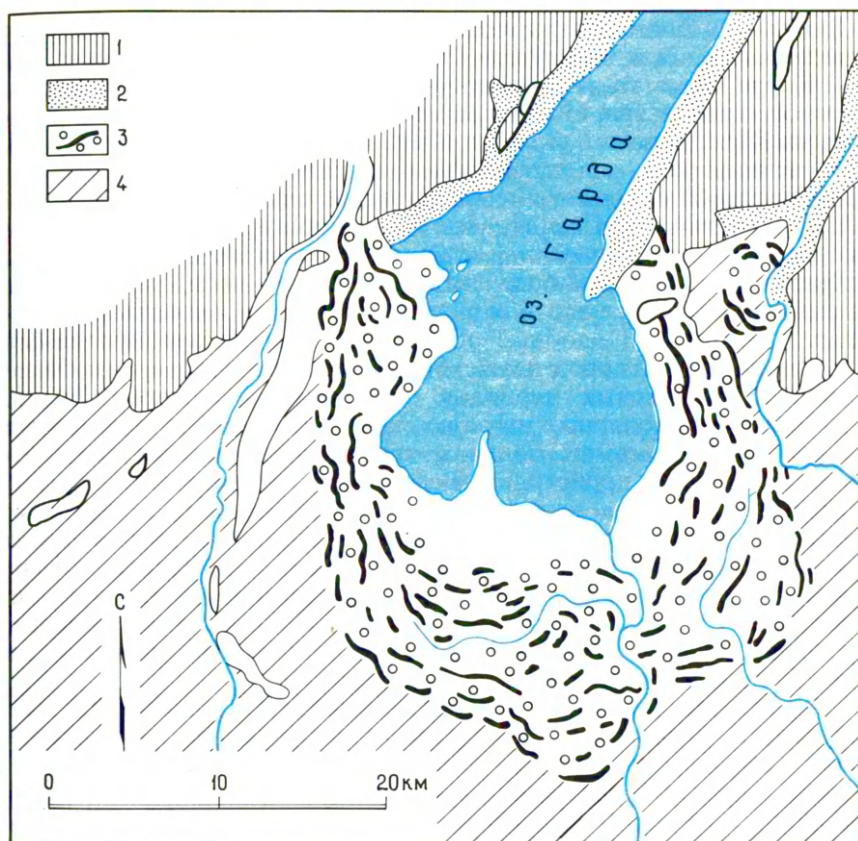


Рис. 55. Озеро Гарда в северной Италии – типичное озеро, расположенное в трое и подпруживавшееся моренной «плотиной».

1 – горы, не покрывавшиеся льдом во время последнего оледенения; 2 – горы, покрывавшиеся льдом; 3 – конечные морены; 4 – аллювиальные отложения.

выветривания приобретают угловатую поверхность, они четко отличаются от сглаженных симметричных форм нижних частей склонов, перекрывавшихся льдом.

Когда ледник движется по долине, он вырабатывает специфическое ложе: типичная речная долина с V-образным профилем превращается в широкую долину с U-образным профилем, характерную для горноледниковых районов.

Способность ледников создавать ложбины путем эрозии прочных пород (переуглубление) проявляется в создании озерных котловин в скальных породах. Такие озера, подпруженные ледниковыми отложениями, типичны для древнеледниковых районов.

Согласно оценкам, 90% естественных озер земного шара – результат оледенения в плейстоцене.

Когда массы льда разрастаются до размеров ледниковых покровов, зона экзарации смещается из гор на нижележащие территории. При наличии мощного и активного ледникового покрова эта зона может распространиться на колоссальные расстояния; два крупнейших плейстоценовых ледниковых покрова – Северо-Американский и Скандинавский – на обширных территориях оставили после себя рельеф, для которого характерны изборозженные и отполированные скальные поверхности, разделенные ложбинами, полностью или почти полностью лишенными рыхлых отложений. Подобные обширные площади эродированных льдом коренных пород также формировались и во время более древних ледниковых периодов геологической истории Земли.

В высоких полярных широтах, где все ледники и ледниковые покровы, кроме самых мощных, приморожены к ложу, скольжения по нему не происходит. Вследствие этого поверхности коренных пород там не подвергаются ледниковому истиранию, а также субаэральному выветриванию. Многие из сравнительно маломощных ледниковых тел на периферии Антарктиды, по-видимому, приморожены к ложу и не оказывают или почти не оказывают экзарационного воздействия. Поэтому в нормальных условиях рельеф может покрываться ледниковым льдом и не иметь признаков значительной переработки.

Если с теоретических позиций ледник может развиваться и не оставлять никаких явных следов в рельефе, то практически такая вероятность весьма невелика вследствие влияния изменений климата и связанных с ними изменений состояния (или режима) ледника, особенно во время его таяния. Многие ледники района пролива Мак-Мердо в Антарктиде, ныне примерзшие к ложу, расположены в окружении типичных ледниковых форм рельефа. Нет сомнений, что в течение продолжительных периодов времени эти ледниковые тела двигались как путем скольжения, так и путем внутренней деформации. Однако это могло происходить несколько миллионов лет назад. Иными словами, хотя в условиях современного климатического режима эти ледники обладают холодным основанием, в прошлом было время, когда их основание было теплым.

Изменение типа движения от скольжения к внутренней деформации может происходить как в пространстве, так и во времени. Переход от тонкой краевой зоны льда, примерзшего к ложу, к мощной внутренней зоне, испытывающей донное скольжение, имеет важное значение независимо от того, продолжается ли этот процесс столетиями, как в полярных районах, или просто происходит каждую зиму, как во многих горных ледниках и ледяных шапках. Он важен, поскольку раскрывает механизм откры-

ва обломков коренных пород в процессе экзарации. Зона высоких давлений может развиваться в той части ледника, где активно скользящий по ложу более мощный лед уступает место скользящему холодному льду в краевой зоне. Давление может оказаться настолько высоким, что сопровождается образованием одной или многих трещин, которые способствуют напознанию более мощного льда на пассивный лед впереди. По этим плоскостям сдвига обломки коренных пород от основания ледника переносятся к его поверхности. Некогда образовавшись, плоскости сдвига способствуют ослаблению внутренних давлений в леднике, так как выстилающий их слой алеврита и глины менее прочен, чем окружающий лед.

В подходящих условиях ледник может выпахивать крупные глыбы породы. Например, там, где часть ледника с холодным основанием поκειται на постоянно мерзлом грунте, связь на этой поверхности может быть сильнее, чем на поверхности, отделяющей мерзлую породу от немерзлой. При поступательном движении ледника давление в коренной породе может ослабеть скорее, чем в леднике. Этот процесс привлекался для объяснения присутствия огромных отторженцев коренных пород в ледниковых отложениях — так называемых «гигантских эрратических глыб».

РЕЛЬЕФООБРАЗУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ЛЕДНИКА

Факторы, влияющие на баланс массы ледника (см. раздел «Лед на суше» в этой главе), воздействуют не только на размещение ледников, но и на степень их активности. В условиях очень сухого полярного климата и в некоторых наиболее высокогорных областях, например в центральном Китае и северном Тибете, ледники могут развиваться, несмотря на относительно малое количество выпадающих твердых осадков, однако темпы абляции там также очень малы. Отмечают, что эти ледники имеют низкий «индекс активности», и их экзарационное воздействие сравнительно мало. Напротив, в условиях морского климата, несмотря на высокие темпы летней абляции, ледники, которые сохраняются благодаря большому количеству зимних твердых осадков, имеют высокий индекс активности и большой потенциал экзарации.

Такие различия важны, так как работа, которую ледник может произвести за определенный период времени, — так называемая рельефообразующая способность ледника, определяемая по экзарации подстилающей поверхности и по транспортировке и последующему отложению обломочного материала, — во многом зависит от давления, оказываемого льдом на ложе, и от скорости его скольжения. Этот показатель достигает наиболь-

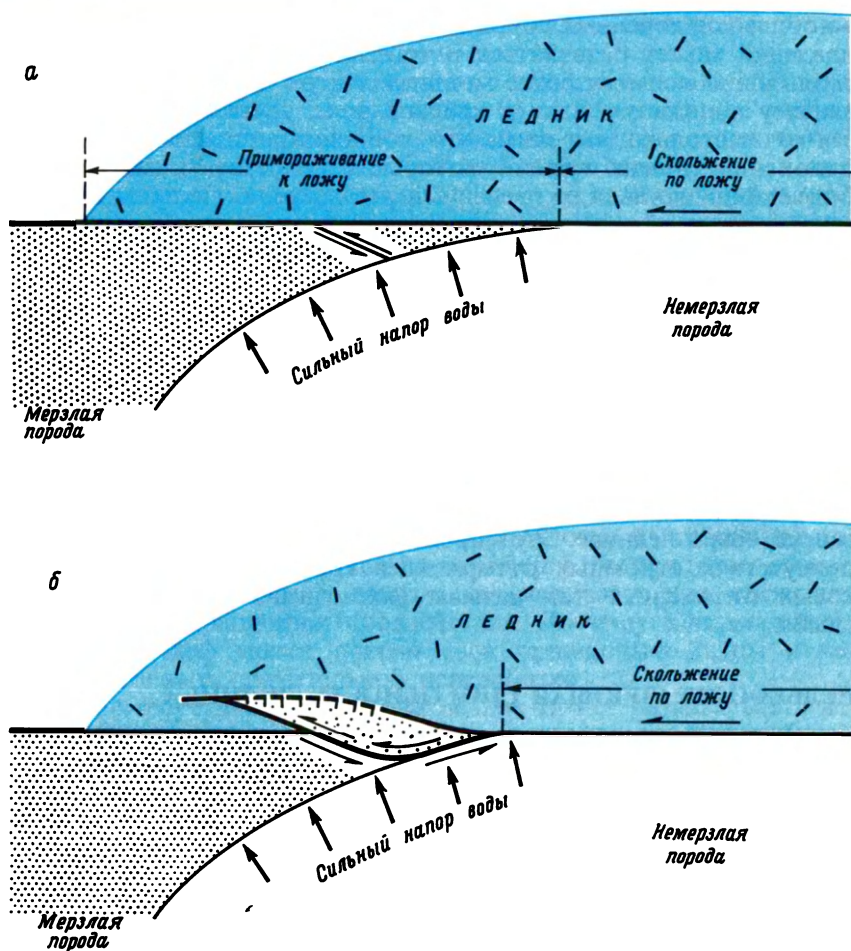


Рис. 56. Схема, показывающая как крупные глыбы породы попадают в основание ледника, примерзшее к ложу.

На контакте «скользящей» и примерзшей к ложу частей основания ледника в породе образуется трещина (а). Движение ледника вместе с сильным напором вод ниже мерзлой породы способствуют отрыву и переносу уплотненной глыбы этой породы (б).

ших значений в ледниках, движение которых преимущественно происходит в виде скольжения по ложу (движение ледников умеренного типа на 80% может осуществляться таким путем). В то же время полярные ледники, примерзшие к ложу, имеют очень низкие показатели рельефообразующей способности. Действительно, скорости скольжения и соответственно рельефообразую-

шая способность ледников умеренного типа, например, в Исландии и Норвегии могут быть выше в 10 раз и более по сравнению с полярными ледниками.

Все это показывает, что скорости, при которых ледники эродуют свое ложе, колеблются в зависимости от температур в основании толщ льда. Темпы экзарации, конечно, нелегко измерить: ведь доступ к ложу современного ледника обычно практически невозможен! Поэтому наши представления о темпах экзарации — всего лишь оценки, полученные с помощью косвенных методов.

Рациональный подход к решению этого вопроса состоит в измерении объема обломков, принесенных потоками талых вод от края ледника. Если мы определим общее количество растворенных, взвешенных и влекомых по дну наносов для всего ледникового бассейна за определенное число лет, то можно определить темп понижения поверхности под воздействием ледника. Другой подход — сравнение вероятной формы поверхности такого элемента рельефа, как долина, до оледенения и в настоящее время. Можно, например, определить объем породы, перенесенной при трансформации V-образной речной долины в типичную U-образную ледниковую долину. Если эту величину разделить на время, в течение которого развивалось оледенение, то мы получим оценку темпов экзарации. Результаты расчетов, полученных с помощью обоих этих методов, колеблются от 0,5 до 5 м за тысячу лет; эти данные характеризуют ледники умеренного типа.

Однако при оценке воздействия полярных ледников с холодным основанием возникает ряд проблем. Значительная часть талых вод, поставляемых этими ледниками, концентрируется на поверхностях коренных пород и в рыхлых отложениях вдоль краев ледников. Некоторые полярные ледники, кроме того, могут поставлять летом значительное количество талых вод за счет стока с поверхности льда. Сопоставление относительно неглубоких каров континентальных и полярных областей с реконструированными доледниковыми поверхностями показывает, что темпы экзарации в таких условиях могут достигать всего 0,05 м за тысячу лет.

Приведенные цифры представляют собой не более чем самые грубые оценки, особенно если вспомнить, что характер основания ледника (холодное и теплое) может неоднократно изменяться на протяжении ледникового периода.

ЛЕДНИКОВАЯ АККУМУЛЯЦИЯ

В ледники поступают обломки коренных пород из многих различных источников. Большая их часть отторгается от ложа ледника и бортов трогов, т.е. от контактов движущегося льда

с коренными породами, но обломки пород также падают на поверхность ледника с крутых склонов долин или с вершин гор, разрушаемых в результате морозного выветривания. Обломки могут переноситься под ледником, внутри его или по его поверхности, прежде чем окончательно отложатся. Под ледником отрыв обломков от ложа возможен, как мы видели, даже если часть основания ледника примерзла к ложу. За определенное время положение критического рубежа на ложе, где скольжение уступает место примерзанию, будет варьировать за счет изменений баланса массы и соответственно характера движения ледника. Маломощные полярные ледники, примерзшие к ложу, содержат очень мало обломочного материала. Их отложения обычно

Рис. 57. Подледниковый поток, вырывающийся из-под основания ледника Франца-Иосифа, Новая Зеландия.



отличаются небольшой мощностью и дисперсностью размещения. Ледники умеренного типа, как мы видели, могут переносить большие массы обломочного материала на своей поверхности. Однако, поскольку у их основания всюду присутствует вода, в толще этих ледников обычно содержится очень мало обломков, и даже в их самой нижней части, несмотря на повышенную концентрацию обломков, общий объем последних невелик. Переходное положение между этими двумя крайними типами занимают субполярные ледники. В их верхних слоях температура льда ниже точки плавления, но в подстилающей толще она выше, и поэтому во внутренних частях ледника движение осуществляется путем скольжения по ложу, а широкая периферическая зона приморожена к ложу.

На Шпицбергене в периферических зонах субполярных ледников содержится много обломочного материала, который скапливается после таяния льда. В связи с этим некоторые исследователи полагают, что ледники субполярного типа оказывают наибольшее экзарационное воздействие на ложе.

Движение крупных ледников, особенно в тех случаях, когда у их основания имеются теплые и холодные зоны, сопровождается нарушением подстилающих коренных пород и рыхлых отложений. В процессе перемещения и взаимодействия частиц происходит их перемалывание и дробление на обломки разной размерности, так что в итоге образуется весьма разнородный материал. В типичном виде он состоит из валунов и гальки, заключенных в тонкий заполнитель из песка, алевроита и глины. Материал приобретает смешанный характер не только по размерам обломков, но и по их минеральному и петрографическому составу. Это *отложенная морена* — основной продукт ледниковой аккумуляции.

Морена может быть отложена под ледником и может вытаивать на его поверхности с последующим медленным оплыванием и образованием довольно неравномерного покрова. Зона концентрации обломочного материала в основании многих ледников может быть разгружена в результате таяния вмещающего льда за счет выделения теплоты трения при скольжении ледника, за счет притока тепла из недр Земли и вследствие повышенного давления. Такие отложения, образовавшиеся при относительно высоких напряжениях, обычно весьма уплотнены.

После вымывания тонкозернистого материала на поверхности отложенной морены концентрируются валуны; во время последующего периода эрозии за счет срезания граней и полировки поверхности валунов может сформироваться валунная мостовая. Она может быть погребена под перекрывающими ледниковыми осадками, и, таким образом, в моренной толще могут сохранить-ся горизонты, отложившиеся в разное время. В моренах четвер-

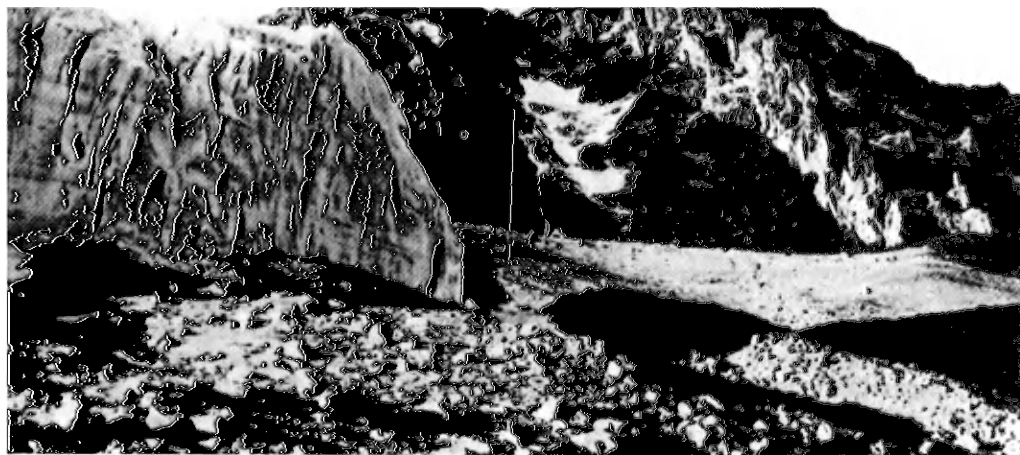


Рис. 58. Мало мощный полярный ледник, содержащий очень мало обломочного материала.

Долина Тейлор, Антарктида.

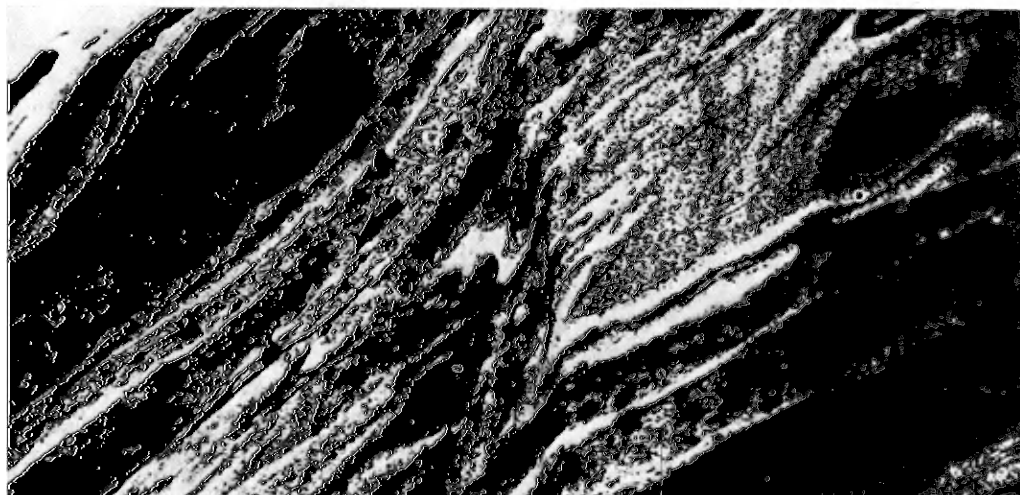


Рис. 59. Часть языка субполярного ледника на Южных Шетландских островах, Антарктика.

Самы здесь местами сильно нарушены и содержат очень много обломочного материала.

Рис. 60. Край одного из ледников Шпицбергена.

Откос фронта талого ледника покрыт обломочным материалом, большая часть которого генетически связана с пещеристыми моренами. Этот материал вытесняет в холм вблизи.



тичного возраста валунные мостовые встречаются редко, но такие образования обнаружены в тиллитах Двейка в ЮАР.

Большая часть морен отлагается при нормальном (атмосферном) давлении. Когда маломощный ледник скользит над углублениями поверхности коренных пород, от его основания отторгается обломочный материал. Постепенно этот материал освобождается от льда, образуя морену вытаивания. Такой же процесс широко проявляется на поверхности ледника у его конца, где обломки медленно опускаются вниз так, что образующаяся морена приобретает довольно рыхлую текстуру по сравнению с мореной, отложенной под ледником. В некоторых очень холодных и сухих обстановках примесь льда в обломочном материале удаляется в процессе возгонки — прямого перехода льда в водяной пар без промежуточной жидкой фазы.

Образование морен вытаивания на наклонных поверхностях льда может сопровождаться скольжением и течением обломочного материала. Постоянный приток талых вод может привести к продолжительному движению обломочного материала в виде разжиженной вязкой массы, которая в окончательно отложенном виде называется натечной мореной. Морены этого типа различаются по плотности и часто приобретают грубослоистую текстуру, так как аккумулируются в виде серии тонких пластов. Рассматриваемый процесс играет особенно важную роль на концах современных субполярных ледников, где широко распространены мощные толщи переслаивающихся натечных морен и морен вытаивания.

Длительное обсуждение проблем интерпретации сложно переслаивающихся морен плейстоценовых оледенений завершилось после того, как стало ясно, что не все морены имеют подледниковое происхождение и что во время одного цикла наступания и отступления ледника может образоваться несколько морен, переслаивающихся с отложениями потоков талых вод. Более того, при изучении морен в умеренных широтах на территории Европы было установлено, что хотя периферические области крупных плейстоценовых ледниковых покровов относились к полярному или субполярному типу, в их центральных областях у основания льда температуры были выше точки плавления.

Уплотненные и сцементированные морены, которые приобрели плотность, свойственную мягким породам типа песчаников, называют тиллитами. Обнаружение тиллитов докембрийского, ордовикского, силурийского, пермского и каменноугольного возраста в разных районах земного шара свидетельствует о неоднократности ледниковых периодов, перемещений полюсов и движений материков (к рассмотрению этих проблем мы вновь обратимся в гл. 4–6). Однако не все тиллиты очень древние. Например, под мореной последнего оледенения Тасмании залегает



Рис. 61. Разрушенная небольшим ледником поверхность коренных пород в северо-западной Исландии.

Такие обломки пород представляют собой основную морену.

Рис. 62. Гравийно-валунная морена плейстоценового возраста в долине реки Арм, Тасмания.



тиллит, который можно непосредственно отнести к позднему плейстоцену, судя по данным спорово-пыльцевого анализа озерных осадков, стратиграфически сопряженных с этим тиллитом.

Широкий диапазон размерности частиц в морене — от валунов до самых тонких глин — отличает ее от большинства других осадков, которые к тому же до некоторой степени лучше сортированы по размерам частиц. Однако не все валунные глины имеют ледниковое происхождение, и в последующих главах можно найти упоминания о жарких спорах по поводу происхождения так называемых «тиллитов» докембрийского и более молодого возраста. Ниже мы приведем несколько примеров.

Древние селевые отложения в значительной степени сходны с моренами даже по содержанию штрихованных валунов; в них обычны текстуры течения, а местами встречаются хорошо отсортированные слои так же, как и в некоторых натечных моренах.

Большие скопления обломочных частиц разных размеров могут образоваться при механическом разрушении пород в неледниковых условиях при низких температурах. Этот материал медленно перемещается вниз по склонам на обширных территориях за счет периодического вспучивания, вызываемого образованием льда в заполненных воздухом порах и полостях в массе породы. В итоге образуется относительно рыхлый структурный грунт, называемый солифлюкционным покровом. В его составе присутствуют довольно крупные угловатые обломки, что придает ему некоторое сходство с моренами вытаивания.

Сползающие или стекающие массы, которые, вероятно, можно спутать с отложенными моренами и солифлюкционными покровами, образуются при разрушении коренных пород и рыхлых отложений в районах землетрясений. Именно этим объясняются прежние утверждения, что в субтропиках на юге центрального Китая плейстоценовые ледники спускались до 350 м над уровнем моря.

Турбидиты — важная и широко распространенная категория осадков, обладающих многими свойствами морен. Турбидитные (мутьевые) потоки — это суспензии, которые благодаря их насыщенности осадочными частицами отличаются гораздо большей плотностью, чем окружающие озерные или морские воды. Вследствие этого они быстро перемещаются по дну озер или морей. Некоторые турбидитные потоки достаточно мощны, чтобы переносить как тонкозернистый материал, так и довольно крупные обломки пород. Тенденция к раннему осаждению более крупных частиц проявляется в накоплении слоев с разными размерами частиц в верхних частях турбидитов; в некоторых турбидитах, однако, сортировка отсутствует, и тогда они еще более напоминают морены, особенно когда их верхние слои размыты.

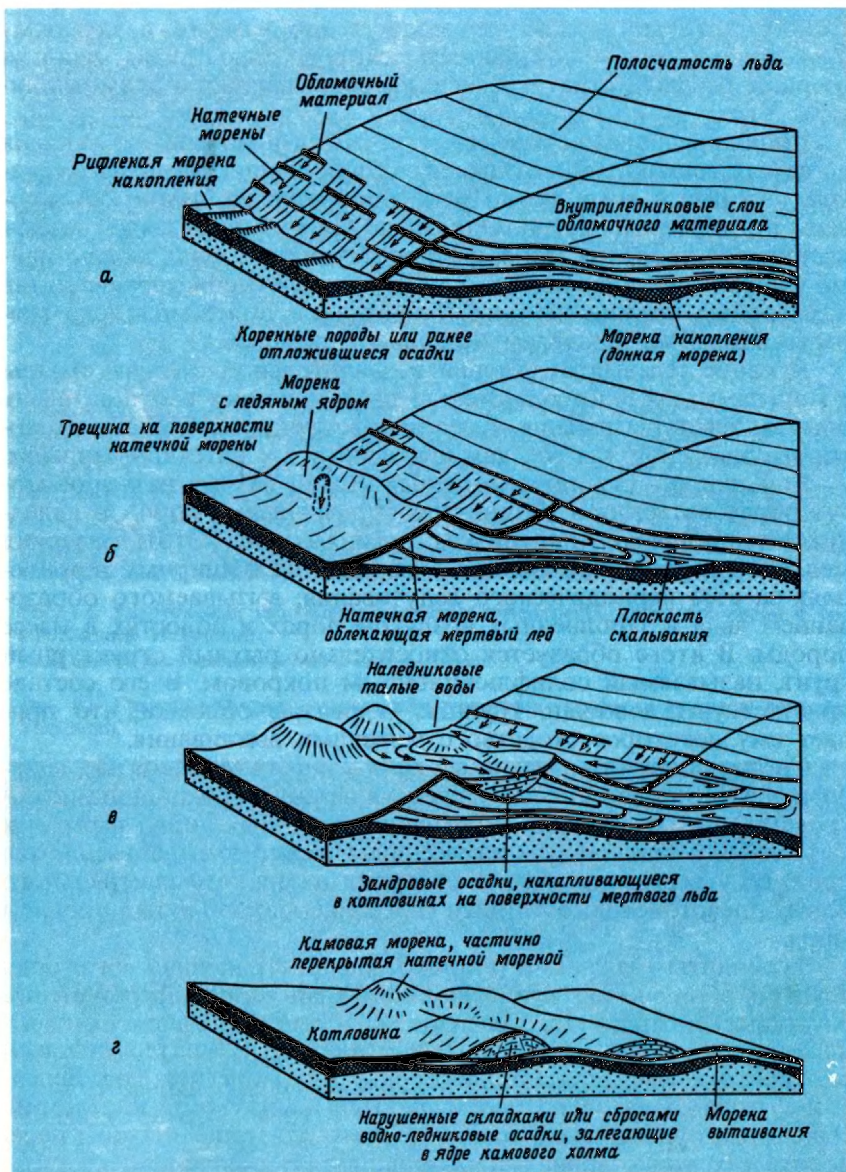


Рис. 63. Образование разных типов морен у края тающего ледника.

Переслаивания морен и водно-ледниковых отложений могут формироваться и при отсутствии ледниковой подвижки.

За морены и тиллиты могут быть приняты также отложения, которые формируются путем осаждения обломочного материала при таянии плавающих льдов. В некоторых районах на дно морей или озер выпадает непрерывный «дождь» обломков самых разных размеров, и в результате могут накапливаться довольно массивные каменистые глины, не имеющие или почти не имеющие признаков осаждения в водной среде. Такие глины, которые могут быть весьма сходны с моренами, отложенными на суше, получили название «субаквальных морен» (waterlain tills). Случайно встречающиеся тонкие прослойки и линзы песка, а также изредка наблюдающаяся сортировка частиц разных размеров служат показателями субаквального происхождения глин.

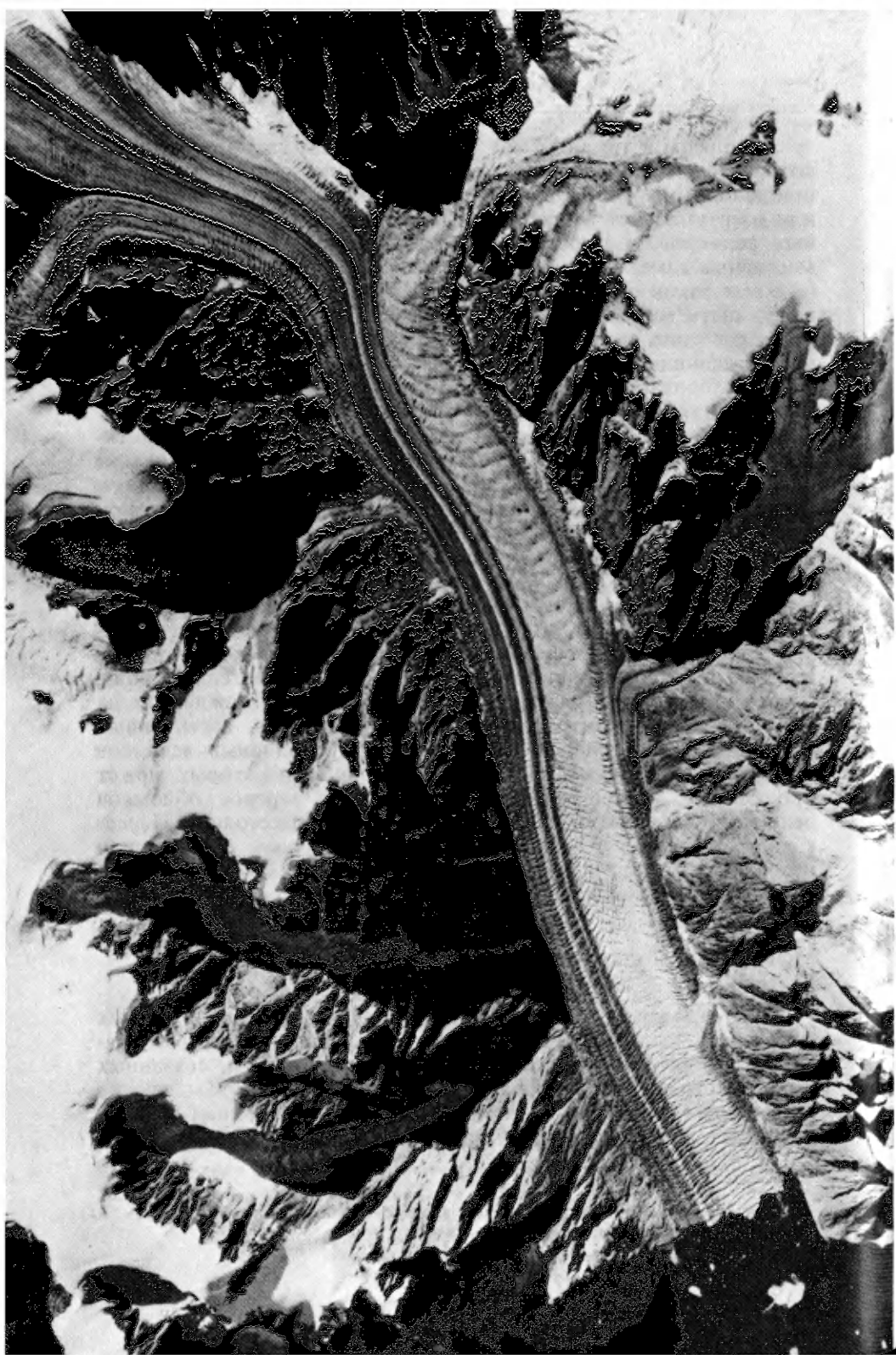
В отложениях такого рода часто присутствуют остатки типичных морских организмов. На дне моря Росса в Антарктике слой материала, выпавшего из основания шельфового ледника, имеет мощность более 360 м. В нем встречаются остатки морских микроорганизмов — фораминифер и диатомей, которые свидетельствуют о соответствующих обстановках периода осадконакопления. Известно, что средняя скорость осадконакопления в этом районе составляла около 40 мм за тысячу лет.

Когда происходит откол края шельфового ледника, образуются огромные айсберги, которые переносятся океаническими течениями на сотни километров. Попадая в более теплую воду, айсберги постепенно тают и обломочные частицы осаждаются на дно. Айсберги, которые откололись от ледников, насыщенных обломочным материалом (например, от субполярных ледников или достаточно мощных полярных ледников, в которых может проявляться донное таяние), осуществляют перенос обломков ледникового происхождения на значительные расстояния. Изредка встречающиеся в морских осадках уплотненные с одной или нескольких сторон и штрихованные валуны могут быть показателями ледово-морской транспортировки.

МОРЕНЫ КАК ЛЕДНИКОВО-АККУМУЛЯТИВНЫЕ ФОРМЫ РЕЛЬЕФА

При отложении морен и связанных с ними осадков ледник формирует четко выраженные формы рельефа, которые тоже называют моренами¹. Выделяют разные типы морен, связанных с различными рельефообразующими процессами. Мы кратко рассмотрим некоторые из этих типов, хотя, конечно, наше описание будет далеко не исчерпывающим.

¹ В английском языке это разные слова: морена как тип отложений — till, а как форма рельефа — moraine. — Прим. перев.



Обломки, покрывающие поверхность ледника, предохраняют ее от солнечного тепла, и это часто приводит к образованию гряды загрязненного льда, известной под названием срединной морены.

Такие гряды расширяются вниз по направлению к концу ледника, и перед ним часто образуются холмы в виде скоплений обломков, имеющие ледяные ядра. По мере таяния этих ледово-каменных холмов перемещение обломочного материала (скольжение, течение) постоянно вызывает обнажение новых поверхностей чистого льда, далее лед тает и весь процесс возобновляется. К тому времени, когда растает весь лед, массы отложенного моренного материала приобретают совершенно беспорядочные формы. Они называются холмистой мореной (*hummocky moraine*).

Форма и текстура некоторых холмистых морен плейстоценового возраста, а также тенденция к ориентировке обломков в определенном направлении свидетельствуют о вжимании насыщенного водой моренного материала в углубления ледникового ложа или в трещины в неподвижном льде. Концентрация моренного и осыпного материала между бортами ледника и крутыми склонами долины может быть достаточно велика для аккумуляции гряд высотой в несколько сотен метров. В этих моренах, называемых боковыми, обломки горных пород часто имеют примерно параллельную ориентировку, что указывает на формирование морены за счет скольжения и стекания материала с поверхности ледника.

Морены, простирающиеся вдоль фронта ледника, называют конечными. Увеличение мощности моренных отложений ниже конца активного ледника (его стационарное положение может поддерживаться ряд лет) стимулирует образование конечных морен путем последовательного накопления. Когда ледник наступает по поверхности ранее сформировавшейся морены, простое перепахивание ее льдом («бульдозерный эффект») часто ведет к формированию так называемых напорных морен (*push moraines*). Другие процессы, приводящие к концентрации моренных отложений в конечно-моренные гряды, включают аккумуляцию моренного материала у края ледника путем простого скольжения и стекания, а также давление ледника на мощные насыщенные водой массы моренного материала и образование небольших конечных морен выжимания (*squeeze-up end moraines*).

Взаимодействие валунов в основании ледника и моренных отложений, накапливающихся под ледником, ведет к перераспреде-

◀ Рис. 64. Полосы срединной морены на поверхности долинного ледника в восточной Гренландии.

Поверхность ледника разбита многочисленными трещинами.

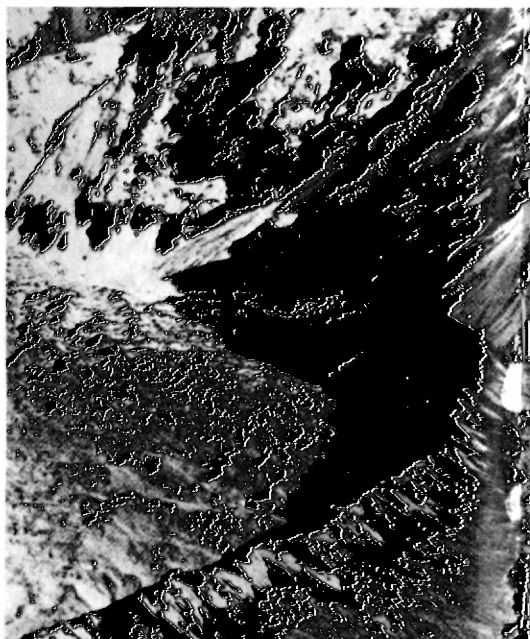
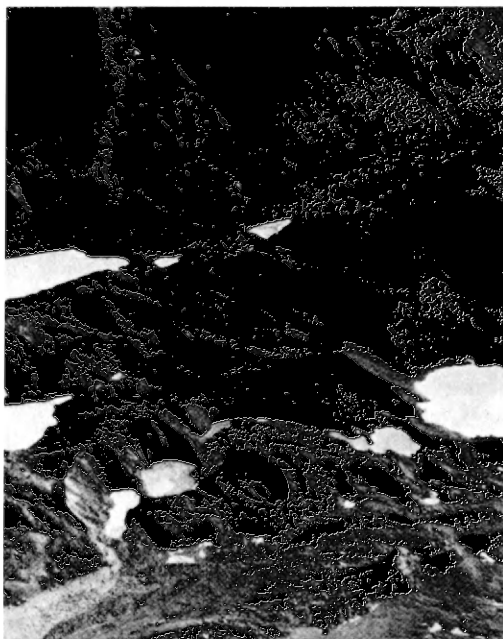
лению материала; при этом часто образуются зоны валунов, ориентированные по направлению движения ледника. Такие скопления валунов перемещаются гораздо медленнее, чем перекрывающий их лед, и, наконец, останавливаются. Ледник движется через это препятствие так, что в основании ледника образуется полость, в которой может концентрироваться моренный материал либо путем отторжения от основания ледника, либо в результате давления льда на близлежащую водонасыщенную морену с частичным отжиманием ее в полость. В итоге, когда ледник отмирает, образуется ряд прямолинейных параллельных гряд, известных под названием рифленых морен. Размеры их колеблются от нескольких десятков сантиметров до нескольких метров в зависимости от размеров обтекаемого льдом препятствия, будь то валуны на ложе ледника или выступы коренных пород типа *бараньих лбов*.

Широко распространены и гораздо более крупные прямолинейные формы в ледниковых отложениях плейстоценового возраста, некоторые из них сохранились от более древних оледенений. Их труднее интерпретировать, поскольку мелкомасштабный процесс образования рифленых морен просто не проявляется, когда имеют место более крупные препятствия, более мощный лед или

Рис. 65. Формы рельефа мертвого льда (включая холмисто-моренные) у тающего края ледника Хукера, Новая Зеландия.

Рис. 66. Крупная боковая морена, отложившаяся при стаивании ледника, перегруженного обломочным материалом.

Ледник Мюллера, Новая Зеландия.



более высокая скорость скольжения. Этот процесс не проявляется, если полость достигает в высоту более нескольких метров, так как пластичность в придонном слое льда возрастает с увеличением мощности ледника, и это ведет к закрытию полостей в его основании. Удлиненные формы, похожие на половинки яйца и известные под названием «друмлины», судя по текстуре морены, образуются в результате послойной аккумуляции под ледником и избирательной эрозии. Последний процесс ясно выражен при формировании таких друмлинов, половина объема которых приходится на долю почти ненарушенных осадков ледниковых озер и потоков, покрытых моренным чехлом.

Рифленые морены и друмлины обычно сочетаются с моренными грядами, которые простираются поперек направления движения льда. Многие из этих гряд по внешнему виду похожи на конечные морены; их ассоциация с друмлинами, четкая закономерность в размещении и распространение на больших территориях наводят на мысль, что они формировались под ледниковыми покровами. Такие гряды, известные в Скандинавии под названием руген-морен, часто «друмлинизированы» и переходят в зоны друмлинов, а затем в рифленые морены. Это свидетельствует о том, что все упомянутые формы образовались под ледником на его ложе; второстепенные составляющие течения льда, ориентированные поперек основного направления, проявлялись в придонных слоях льда и предопределяли возникновение друмлинизированных форм.

Еще один широко распространенный тип морены, сформированной под ледником и ориентированной поперек основного на-

Рис. 67. Конечные морены, формирующиеся при вытаскивании края ледника Хукера, Новая Зеландия.

Морены имеют асимметричное строение; более пологий склон обращен в сторону ледника (справа).

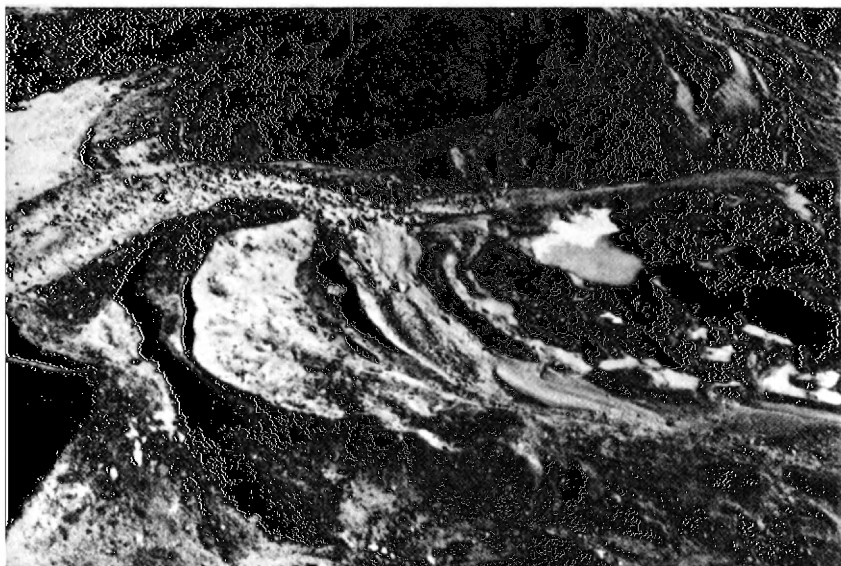




Рис. 68. Небольшие гряды рифленой морены, поднимающиеся из рытвин в основании ледника (на переднем плане).

Ледник Брейдамеркюрёкюдль, юго-восточная Исландия.

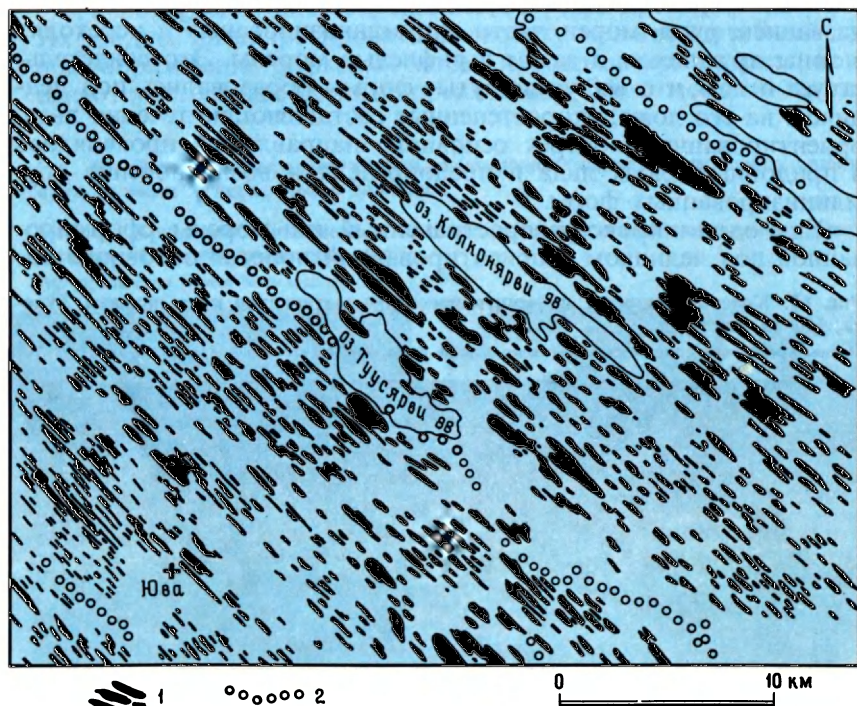


Рис. 69. Часть крупного друмлинного поля в Финляндии.

Друмлины и высокие гряды рифленой морены — четкие индикаторы направления движения льда во время их образования.

1 — друмлины; 2 — озы.

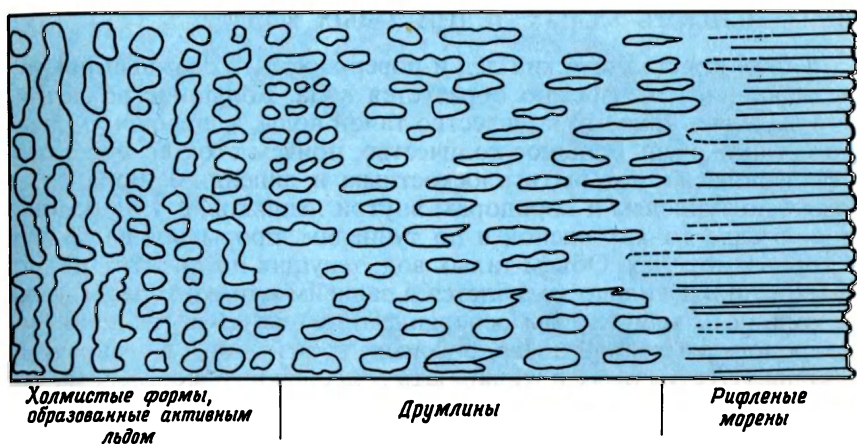


Рис. 70. Схема, на которой показаны соотношения разных форм рельефа, сложенных моренной, в Финляндии.

Ледниковый покров двигался слева направо.

правления движения льда, носит название морен Де Геера. Это относительно невысокие (5–15 м) гряды, сложенные моренной, сортированными песками и галечниками и четко слоистыми озерными или морскими алевролитами и глинами. Морены Де Геера часто приурочены к широким понижениям рельефа. Долгое время они рассматривались как продукт оседания ледниковых покровов в относительно глубоководных условиях. Внутренняя (севшая на грунт) зона плавающего ледникового языка — зона, где морена накапливается и воздымается льдом, образуя гряды. Здесь также образуются трещины растяжения во льду, которые контролируют откол айсбергов от края ледникового покрова. Эти особенности могут объяснить правильное размещение многих полей морен Де Геера. Тот факт, что обширные поля этих морен встречаются, например, в Скандинавии и Канаде, позволяет сделать вывод о преимущественном формировании морен под ледниковыми покровами, у краев которых в застойных водоемах происходил откол айсбергов. Для последнего плейстоценового оледенения морены Де Геера (как в отношении количества гряд, так и в отношении объема отложенного материала) более характерны, чем конечные морены, формировавшиеся у фронтов ледниковых покровов. Иными словами, морены Де Геера представляют ведущий тип ледниково-аккумулятивного процесса, который можно изучить только по реликтовым формам: многие процессы моренонакопления, изучаемые нами на современных ледниках, могли иметь относительно небольшое значение во время плейстоценовых и более древних оледенений.

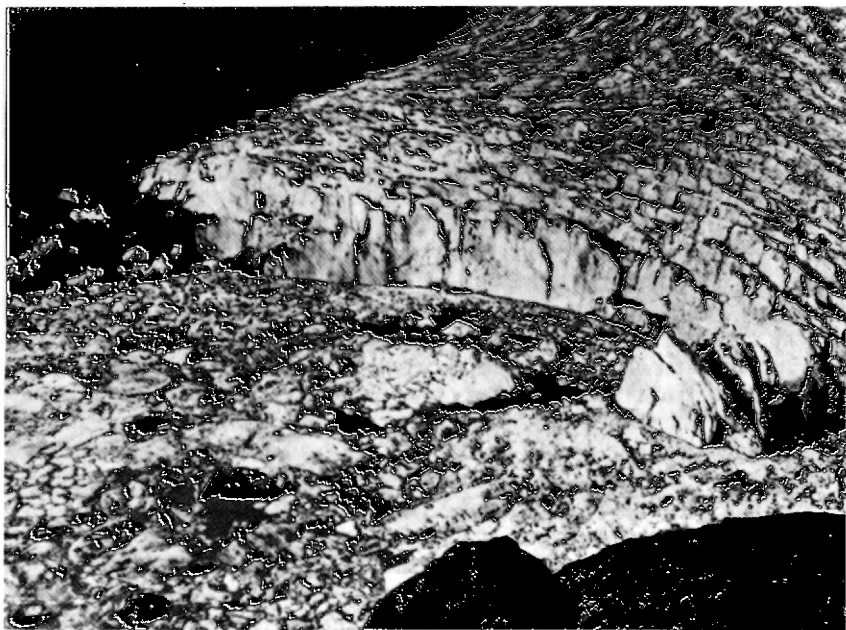
ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ТАЛЫХ ЛЕДНИКОВЫХ ВОД

Когда кристаллический лед и поверхностный снежный покров ледника тают, неизбежно образуется вода. Большинство ледников выделяет какое-то количество талой воды, а ледники умеренного типа — очень большое количество, причем сток по поверхности ледника может быть плоскостным и линейным. Вода течет также по туннелям и коридорам внутри ледников, а у их основания — в виде тонких пленок и по туннелям, прорытым во льду и в горных породах. Объем талых вод, текущих по дренажной системе ледника, сильно колеблется в зависимости от типа ледника (с холодным или теплым основанием), сезона года, наличия водопроницаемых пород (водоносных горизонтов) в основании и количества твердых и жидких атмосферных осадков. Кроме того, глубокие котловины ложа очень мощных полярных ледников могут вмещать воды подледниковых озер.

Фронтальные части субполярных ледников, примерзшие к ложу, могут препятствовать выводу подледниковых вод, при этом

Рис. 71. Айсберги, образующиеся при отёле ледникового края в озере.

Ледник Брайдамеркюрёкюдль, юго-восточная Исландия. Размеры откалывающихся глыб льда определяются трещинами. Возможно, под водой в подобных условиях формируются морены Де Геера.



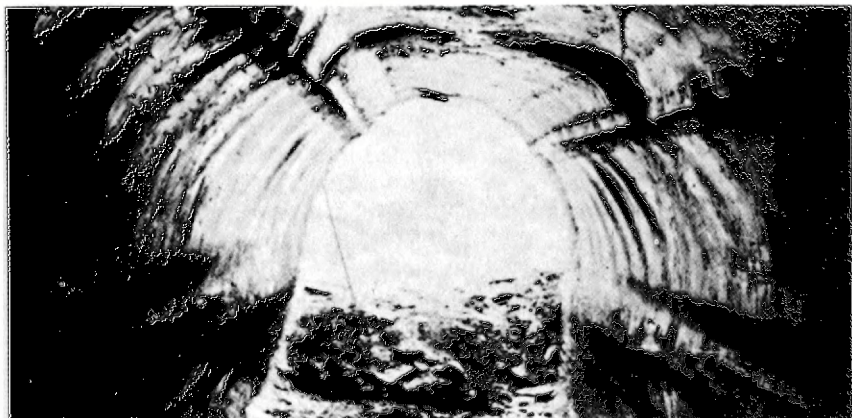


Рис. 72. Замечательный туннель в леднике Вереншёлля, Шпицберген.
Ледяные стены сглажены и отполированы тальми водами, некогда наполнявшими туннель.

Рис. 73. Крупный поток талых вод, выходящий из основания ледника Калдалоун, северо-западная Исландия.

Поток характеризуется сильным турбулентным течением и очень высоким содержанием взвешенных и влекомых по дну наносов.

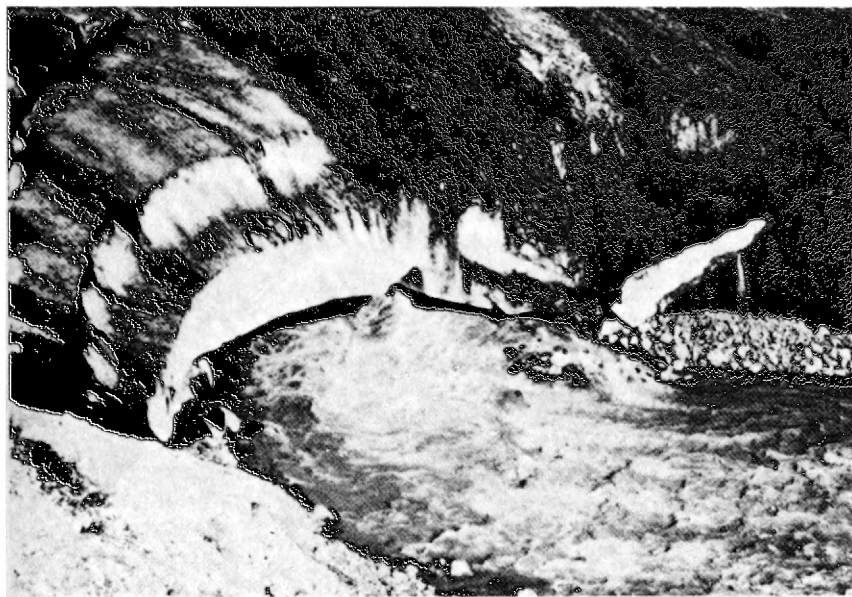




Рис. 74. Мощный поток с силой вырывается из-под одного из исландских ледников.

Выброс талых вод происходит под высоким давлением.

Рис. 75. Пример воздействия талых ледниковых вод на рельеф.

Ложбина, заполненная талыми водами, выработана в прибрежном районе Уэльса. Такие ложбины часто образуются, когда талые воды текут в направлении, противоположном уклону поверхности, под высоким давлением.



напор воды возрастает до тех пор, пока не произойдет прорыв в форме мощного потока воды. Иногда вода запечатывается в коридорах и больших подледниковых полостях, а также скапливается в крупных ледниково-подпрудных озерах. В случае очень быстрого таяния — например, при подледниковом вулканическом извержении, очень быстрой подвижке ледника (пульсации) или если ледниковый язык, подпирающий озеро, окажется на плаву — может произойти внезапный прорыв воды. Катастрофические ледниковые паводки (в Исландии их называют «йёкюдль-лёупами») могут достичь колоссальных размеров, скажем 25–100 тыс. м³/с, и произвести очень быстрый размыв и транспортировку большого количества материала.

Регулярный вынос большого количества подледниковых вод и вод из ледниково-подпрудных озер стимулирует выработку ложбин стока талых вод в коренных породах. Наличие таких ложбин под современными ледниками трудно наблюдать, но они в изобилии встречаются на многих территориях, покрывавшихся ледниками в плейстоцене. Первичный уклон поверхности ледникового ложа — относительно несущественный фактор при определении направления стока талых вод: подледниковые ложбины стока ориентированы по направлению уклона поверхности льда, на которой они образовались, т.е. из районов более высокого давления (более мощный лед) к районам более низкого давления (менее мощный лед). В итоге складывалась весьма устойчивая региональная система стока, зависевшая от общего характера абляции. Иногда ложбины глубоко врезаны в коренные породы благодаря стоку талых вод, направленному *вверх* по коридорам диаметром свыше 100 м. Ложбины, врезаемые в склон, сложенный коренными породами, где они контактировали с краем водонепроницаемого льда, могли отличаться постоянным уклоном и положением. После таяния ледника большая часть ложбин стока талых вод оказывается в ряду аномальных форм рельефа — таких форм, которые нельзя объяснить воздействием обычных агентов, создавших данный рельеф. Эти ложбины отличаются крутыми склонами, их широкие днища сухие или иногда заняты крохотными речками, явно не соответствующими размерам ложбин.

В некоторых районах большая масса отложений ледниковой эпохи действительно связана с транспортировкой и осаждением талыми ледниковыми водами, особенно во время отступания ледников. Скорость оседания частиц горных пород в воде колеблется в зависимости от их размеров и удельного веса, от температуры воды и скорости течения. Поэтому осадки, отложившиеся в воде, отличаются слоистостью или сортировкой.

Формы рельефа, образованные за счет аккумуляции песков и галечников у края ледника (на контакте со льдом), могут быть



Рис. 76. Взаимно параллельные гряды, сформированные у края таявшего плейстоценового покрова в центральной части полуострова Унгава, Канада.

О размерах гряд можно судить по высоте хвойных деревьев.

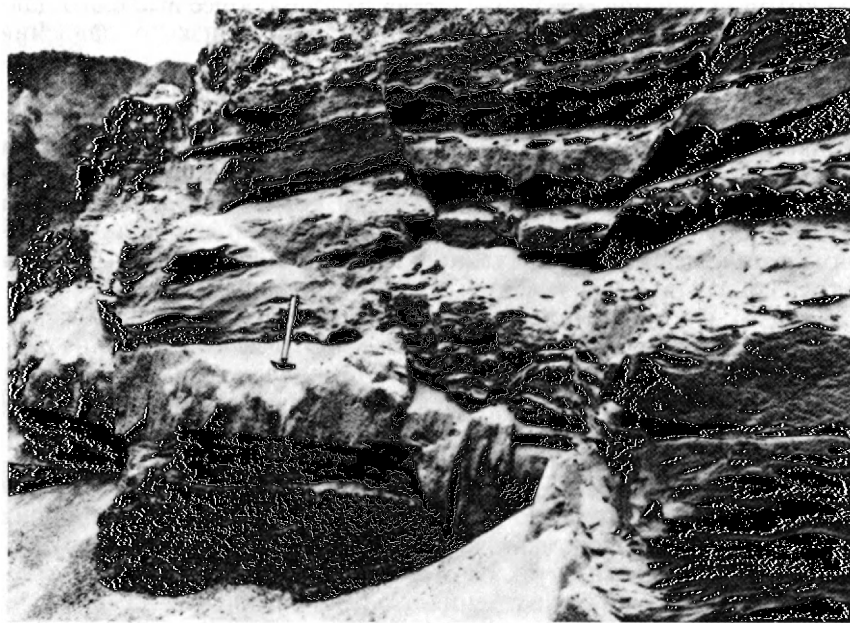


Рис. 77. Нарушенные сбросами слои песка и гальки в разрезе каменной террасы, которая образовалась в конце последнего оледенения на западе Уэльса.

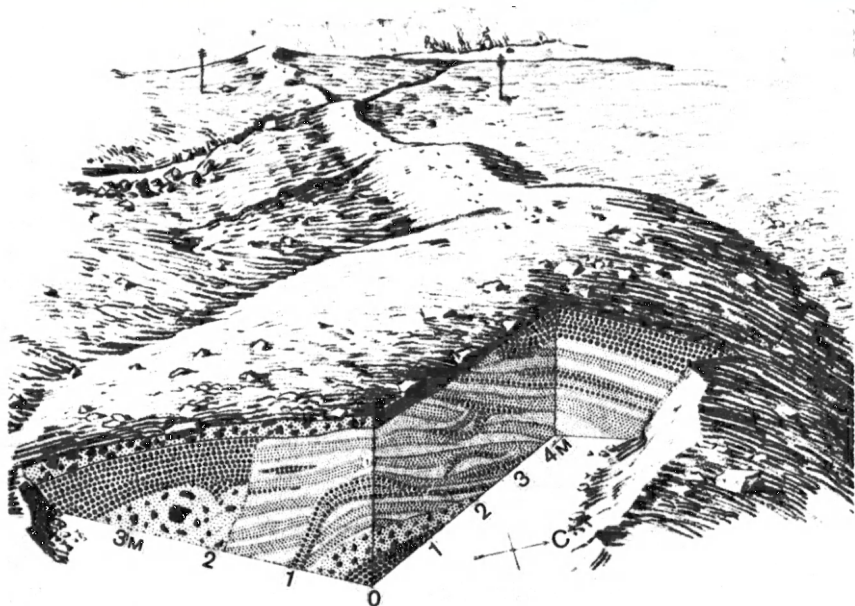


Рис. 78. Схема строения извилистой озовой гряды в центральной части Швеции. Видно, что гряда состоит из чередующихся песчаных и галечных слоев, облекающих ядро из морены.

весьма различными. Массы материала, отложенные в углах между бортом долины и краем ледника, слагают камовые террасы. Там, где водно-ледниковые осадки накапливаются на мертвом льду, вследствие неравномерной скорости таяния льда происходит оползание и обрушивание осадочного материала в полости, в результате чего формируются галечниковые конусы, короткие гряды и небольшие плато, известные под общим названием «камы». Потоки, устремляющиеся по ложбинам на поверхности ледника или по туннелям в толще льда или у его основания, переносят большие массы песка и гальки. Когда они в конечном итоге вследствие таяния ледника откладываются на поверхности суши, образуются отчетливые извилистые или спрямленные гряды, называемые озами. Они располагаются приблизительно по уклону поверхности льда, и поэтому группы озов могут служить важными показателями направления движения льда.

Более тонкие частицы (алеврит, глина) могут оставаться во взвешенном состоянии в потоках талых вод, даже когда сток сильно ослабевает, но крупная галька и валуны обычно переносятся только довольно бурными потоками. Уплотненные и несколько угловатые обломки ледникового происхождения быстро приобретают хорошо окатанную форму при волочении по дну

потока и при механическом взаимодействии обломков. В результате этих процессов создается водно-ледниковая равнина (или зандр), в которой более грубый материал подстилает более тонкие осадки; она прорезана постоянно меняющими свое положение системами неглубоких, но широких ложбин стока талых вод. При удалении мелкозернистого материала вследствие инфильтрации вод или дефляции обнажается поверхность, преимущественно сложенная валунами. Ископаемые зандры обнаружены в разных частях света, характеризующихся ныне теплым климатом. В Сахаре их рассматривают как следы оледенения, имевшего место в ордовикский период.

Рис. 79. Зандровые отложения на дне долины ниже ледника Тасмана, Новая Зеландия.



Поскольку форма обломков ледникового происхождения и штриховка на них могут претерпеть изменения при механических воздействиях во время переноса тальными водами, невозможно определенно доказать, что толщи осадков, похожих на зандровые, отлагались тальными ледниковыми водами. Дефицит алевроитов и глин и обилие крупной гальки и валунов – недостаточные признаки, поскольку сходные осадки накапливаются и в предгорьях молодых растущих гор, например на юго-западе США и на равнинах Старой Кастилии в Испании.

Когда потоки талых вод впадают в озеро или море, их скорость уменьшается и отлагаются осадки. Сначала выпадают более крупные и тяжелые частицы, затем последовательно все более мелкие. Пески и галечники концентрируются, образуя дельту, а алевроиты и глины остаются в воде во взвешенном состоянии.

Сезонный цикл замерзания и таяния ледника может отразиться в пульсационном накоплении осадков, приносимых потоками талых ледниковых вод в озеро или океан летом. Более грубые песчаные компоненты осаждаются сравнительно быстро, но алевроиты и глины – гораздо медленнее, и лишь очень тонкий слой их

Рис. 80. Гигантский дронстон, обнажившийся при отливе на берегу пролива Скорс-бисунн, восточная Гренландия.

Этот камень упал на дно при таянии айсберга и отчасти занесен более молодыми морскими осадками.



может накопиться перед песчаным слоем следующего лета. Эти серии чередующихся грубых и тонких слоев называют ритмитами, и там, где они четко образуют годовые пары, их называют ленточными отложениями. Ледниковые ритмиты накапливались в солоноватых и пресных водоемах, принимавших сток талых ледниковых вод. Когда ледник отступал от водоема, утрачивался строго сезонный ритм осадконакопления, которое приобретало более непрерывный характер. Подсчеты ритмичных слоев ленточных отложений позволили установить хронологию убывания последнего ледникового покрова в Скандинавии и на востоке Северной Америки. Этот геохронологический метод предшествовал внедрению радиоуглеродного датирования.

Подобное использование ритмитов, однако, далеко не прямой путь. Усиленное поступление осадочного материала может происходить в любой сезон года (например, в «бабье лето»). Другая проблема для исследователей ледниковых периодов связана с присутствием ритмитов в толщах пород неледникового происхождения. Следовательно, ритмиты вовсе не всегда имеют ленточный характер, и равным образом их происхождение не всегда ледниковое. В чем же заключаются доказательства ледникового происхождения ритмитов? Состав обломочных частиц должен

Рис. 81. Результат морозного выветривания – разрушение эвратического валуна поблизости от ледника Брейдамеркюрёкюдль, юго-восточная Исландия.

Валуны были отложены льдом около 100 лет назад.



быть разнообразным, так же как и в моренах и тиллитах; кроме того, средние размеры частиц здесь более крупные, песчаные зерна часто более остроугольные, а мощности пар сезонных слоев обычно больше, чем в неледниковых ритмитах.

Обычное доказательство ледниковой природы ритмитов – наличие дропстонов. Обломки пород размерности валунов и гальки быстро падают на дно озера или моря, отрываясь от шельфовых ледников или айсбергов. Они могут залегать вертикально в мягких алевроитах и глинах, но могут быть и наклонены. Эти крупные обломки нарушают залегание нижележащих осадков, но постепенно перекрываются тонкозернистыми осадками в процессе их последующего накопления. В противоположность ледниковым ритмитам дропстоны не обязательно откладываются поблизости от края ледника.

ПОДЗЕМНЫЙ ЛЕД

Свидетельства ледникового периода обнаруживаются не только на территориях, которые непосредственно покрывались ледниками. Разрастание крупных ледниковых покровов на суше

Рис. 82. Крупная линза льда, обнажающаяся в обрыве на берегу бухты Мак-Кинли, северная Канада.

Чехол из песков и алевроитов был приподнят в результате роста линзы льда.



ограничивалось под влиянием низких температур, вызывавших примораживание периферических зон к ложу, в сочетании с малым количеством выпадавшего снега; однако и за пределами ледниковых покровов климат был крайне суровый. В условиях сухой и ветреной погоды более континентальных районов перед краем ледникового покрова снежный покров был прерывистым и обнаженные грунты подвергались воздействию мороза и ветра, что сопровождалось сносом мелкозернистого материала.

Во времена максимального развития оледенений такие приледниковые, или перигляциальные, районы испытывали целый ряд изменений вследствие глубокого промерзания пород и приобретали сходство с современными полярными пустынями. Типичными процессами там были разрушение поверхностных отложений в связи с замерзанием, растрескивание их вследствие роста ледяных клиньев и дефляция мелкозернистого материала. Даже в районах, которым теперь присущи морские и умеренные климатические условия (например, в Западной Европе и на востоке США), обнаружены следы проявления перечисленных выше процессов во время последнего плейстоценового оледенения.

В зоне вечной мерзлоты подземный лед играет важную роль в осадконакоплении и формировании рельефа. Этот лед по своей кристаллической структуре существенно отличается от ледникового льда.

В высоких широтах, там, где породы постоянно мерзлые до глубины нескольких сотен метров, массы или линзы льда создают ряд уникальных форм рельефа. Пласты подземного льда могут нарушать поверхность обширных территорий, и при вытаивании этого льда образуется особый тип западинного, или кратерного, рельефа, называемый термокарстом.

Небольшие линзы льда, нарастая, могут вспучивать слои поверхностных отложений, и возникают такие типичные формы рельефа, как гидролакколиты («палса» в Лапландии, «пинго» в Канаде и Гренландии). Последние представляют собой формы весьма внушительных размеров: в районе дельты реки Маккензи некоторые из них имеют высоту более 50 м и диаметр — более 600 м. Когда ледяные ядра начинают вытаивать, пинго похожи на миниатюрные вулканы, часто с небольшими «кратерными озерами» в привершинных частях.

Как отмечалось в гл. 1, в областях вечной мерзлоты четко выделяются зоны структурных грунтов с крупными полигональными образованиями, покрывающими сотни квадратных километров. Эти образования возникают при разрастании ледяных клиньев, которые достигают 3–4 м в поперечнике на поверхности и, сужаясь, проникают на глубину свыше 10 м. Эти клинья часто не обнажаются, но иногда их можно увидеть по берегам боль-



Рис. 83. Каменные кольца, сформировавшиеся поблизости от края ледяной шапки в северо-западной Исландии.

В этом районе нет вечной мерзлоты, но тем не менее широко распространены структурные грунты.

ших рек: в обнажениях по берегам некоторых сибирских рек ледяные клинья размещены на равных расстояниях друг от друга, они выделяются как огромные белые мраморные колонны среди более темных алевроитов и илов, в основном слагающих берега рек. По мере разрастания ледяные клинья обычно нарушают залегание контактирующих с ними осадков, оказывая достаточное давление, чтобы вызвать изгибание осадочных пластов и поднятие поверхности. Когда клинья тают, их место заполняется более молодыми осадками, при этом часто сохраняется форма клиньев и нарушения в залегании смежных пластов. Поэтому «ископаемые ледяные клинья» стали очень хорошими показателями условий вечной мерзлоты; эти образования найдены в отложениях различных четвертичных оледенений, а также более древних ледниковых периодов.

Среди прочих следов вечной мерзлоты выделяют так называемые инволюции (сильно нарушенные осадки с мелкими сжатыми складками и другими особенностями); мелкохолмистые ландшафты; каменные полосы, кольца и полигоны, которые мо-

гут формироваться без участия ледяных клиньев; наконец, склоновые отложения, нарушенные при оползании по влажной, но льдистой поверхности вечной мерзлоты в летние месяцы.

В сухих областях за пределами многих ледниковых покровов мелкозернистый материал избирательно уносится с обнаженной поверхности ледниковых отложений периодически дующими сильными ветрами. Песчаные зерна, перемещаясь всего на несколько сантиметров, могут эродировать поверхность более мягких пород, создавать грани на поверхности скальных пород и полировать их, а затем накапливаться в виде песчаных покровов, дюн и сглаженных удлиненных гряд («китовых спин»). Более мелкозернистый материал — алеврит (иногда также с примесью глинистых частиц в виде агрегатов алевритовой размерности) поднимается в воздух и может переноситься ветром на сотни и даже тысячи километров. Он может накапливаться в виде однородной толщи значительной мощности, в которой преобладают такие минералы, как кварц, полевой шпат и слюда. Этот своеобразный осадок называют лёссом. В Европе лёссы плейстоценового возраста известны в широком поясе, расположенном параллельно краю древнего скандинавского ледникового покрова, от которого поступала большая часть алевритового материала. Сходные условия были в Северной Америке. Хотя лёссонакоплению в этих поясах благоприятствовала сухая обстановка и особенно сухие холодные ветры, которые могли легко поднимать и транспортировать частицы, трудно согласиться с теми, кто полагает, что частицы, слагающие лёсс, — продукт ледникового истирания. Так, хотя большая часть весьма мощных лёссов Китая, вероятно, накапливалась в холодных сухих условиях во время плейстоценовых оледенений, немалая доля материала была принесена из пустыни Гоби, о чем свидетельствуют данные минералогического анализа и уменьшение среднего размера частиц по направлению к юго-востоку. Лёссы более древнего возраста, чем плейстоценовый, достоверно не установлены. Однако, если бы даже их присутствие и удалось наверняка доказать, проблема сопоставления с определенными оледенениями оказалась бы гораздо более сложной, чем для плейстоценовых лёссов.

Не все перигляциальные обстановки относятся к типу полярных пустынь. Условия морского климата, в которых воздействие мороза имеет первостепенное значение, отличаются повышенной влажностью и большим количеством осадков, выпадающих в виде снега и дождя. При этом может быть широко распространена растительность, хотя и приземистая, и значительно развито химическое выветривание коренных пород и рыхлых отложений. Такие условия в настоящее время преобладают, например, в северной части полуострова Лабрадор, на Аляске и местами в Исландии. Господствующий рельефообразующий

процесс — медленное перемещение продуктов морозного выветривания вниз по склонам в виде тонких покровов и языков каменисто-глинистого материала в увлажненном состоянии. Широко распространены формировавшиеся подобным образом плейстоценовые рыхлые отложения; этот процесс имел место и во время более древних оледенений.

ПЛАВУЧИЙ ЛЕД

Теперь нам известно, что глубокое воздействие оледенений сказывалось на суше в районах, расположенных в высоких и умеренных широтах. Однако не следует забывать, что во время оледенений в большом количестве формировались плавучие льды. Они покрывали обширные пространства Мирового океана и быстро разносились, что способствовало переносу и отложению ледникового материала иногда за тысячи километров от края ближайшего ледника. Это влияло на климат Земли, о чем говорилось в предыдущей главе.

Многие ледники и ледниковые покровы оканчиваются в озерах или морях, что иллюстрируется рис. 71 и 84. Там, где глубина водоемов примерно сопоставима с мощностью льда, край ледника может всплыть, поскольку по удельному весу лед легче воды вследствие содержащихся в нем пузырьков воздуха и солей. Обширные ледниковые лопасти и языки, находящиеся на плаву, известны во многих районах современного оледенения, особенно по краям крупных ледниковых покровов Гренландии и Антарктиды. Иногда они приурочены к открытым берегам, как в Антарктиде, но гораздо чаще встречаются в глубоких фьордах, например, на Шпицбергене и в Западной Гренландии. В таких ситуациях край ледника представляет собой находящийся на плаву отвесный ледяной уступ. Он испытывает воздействие приливов и течений, и от него часто откалываются небольшие глыбы льда. Кроме того, отрываются и крупные глыбы, образуя айсберги, которые далеко уносятся ветрами и течениями.

Шельфовые ледники — это плавучие ледниковые покровы. Они встречаются в больших прибрежных заливах высоких широт, и их лед образуется преимущественно из выпадающего снега. Части этих ледников, приращенные к суше, получают питание от крупных выводных ледников, как в случае шельфового ледника Росса, представляющего собой находящееся на плаву продолжение Антарктического ледникового покрова. Площадь этого ледника составляет 803 000 км². Большими размерами отличаются также шельфовые ледники Ронне, Ларсена и Фильхнера.

Все шельфовые ледники характеризуются незначительным уклоном поверхности, их высоты уменьшаются от 80–100 м в местах приращения к матерiku до 30 м у внешнего края. Мощ-



ность льда может достигать 200 м, и свободный край обычно представляет собой отвесный ледяной уступ.

Подобно находящимся на плаву языкам ледников, края шельфовых ледников тоже подвергаются воздействию приливов и течений, вызывающих напряжения в толще льда. В результате возникают трещины, и обширные плиты льда периодически откалываются и уплывают в Южный океан. Эти плосковершинные столовые айсберги, которые достигают в длину более 100 км, а в ширину — более 40 км, иногда существуют в океане в высоких широтах в течение многих десятилетий. Они сильно отличаются от обычных айсбергов ледникового происхождения.

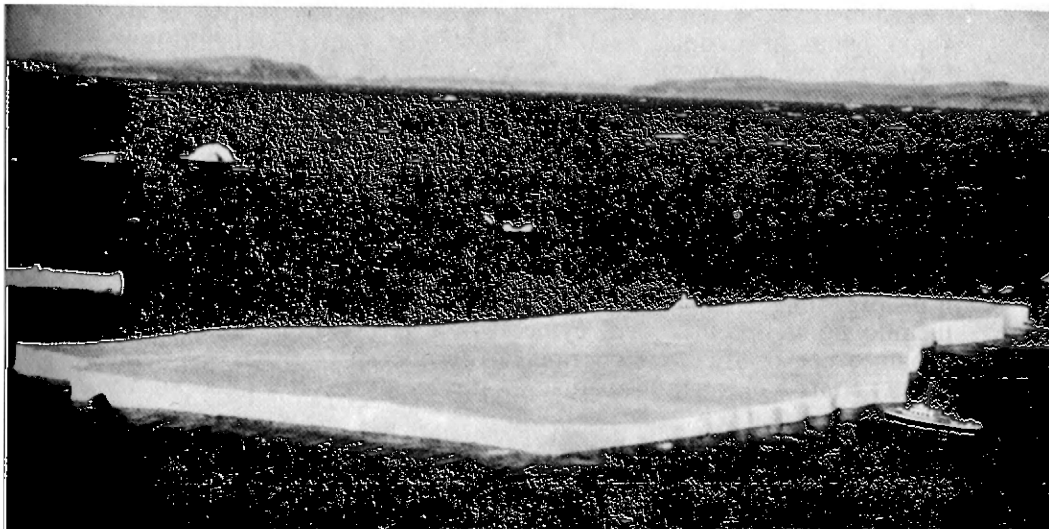
Иногда шельфовые ледники играют важную роль в отложении обломочного материала ледникового происхождения. Большая масса таких обломков, приуроченных к находящейся на плаву части шельфового ледника, освобождается вследствие донного таяния, причем формирующиеся осадки характеризуются некоторым разнообразием фациального состава (включая ритмиты) и многочисленными текстурами течения (турбидиты). В ледниках с основанием, примороженным к ложу, осадконакопления в сущности не происходит. В результате откола столовых айсбергов от обширных шельфовых ледников происходит накопление мощных слоистых ледово-морских «мореноподобных» осадков (см. раздел этой главы «Деятельность талых ледниковых вод»). Этот процесс

◀ **Рис. 84.** От плавучего конца крупного выводного ледника в Гренландии откалываются большие айсберги.

Многие из них прибывают к ледяным полям, образующимся зимой при замерзании поверхностных слоев морской воды.

Рис. 85. Крупный столовый айсберг в заливе Мелвилл, Гренландия.

Его длина более 1 км, а высота обрывистого края около 25 м. По сравнению с этим айсбергом ледокол «Вестунд» кажется крошкой.



протекает довольно медленно во внешней части зоны распространения айсбергов, так что образуются рассеянные линзы и катящи мореноподобного материала, а иногда просто отдельные эрратические валуны. Тем не менее за длительное время субаквальная аккумуляция обломочного материала, поставляемого шельфовыми ледниками и айсбергами, приводит к формированию довольно однородной серии осадков на очень больших площадях морского дна.

Паковый лед — это лед, сформировавшийся непосредственно в результате замерзания поверхности моря. Как отмечалось в начале гл. 1, паковый лед покрывает обширные территории в Антарктиде и Арктике, где он не только формируется и ежегодно наращивает мощность, но также подвергается расчленению под влиянием ветров и течений. Новообразованный за год лед редко имеет мощность более 20 см, но за ряд лет старый лед может достичь мощности до 4 м и более. Когда паковый лед расчленяется на отдельные льдины, в поясе паковых льдов могут появиться трещины и широкие разводья; когда же льдины сбиваются ветром и течениями, в результате столкновения краев льдин могут образоваться «гряды выдавливания» из битого льда, возвышающиеся над поверхностью пакового поля на 10 м и более. Выступы битого льда могут отходить от основания пакового льда в глубину вод. Старый паковый лед имеет хаотически расчлененную поверхность вследствие неоднократного растрескивания, столкновения, преобразования и подтаивания старых и новых льдин.

Паковый лед может самым различным образом повлиять на побережье, особенно если льдины прибывают с моря штормами. В то же время этот тип льда не оказывает большого влияния на донные морские осадки, так как он почти не содержит обломков горных пород. Его основное воздействие на окружающую среду состоит в том, что он ограничивает прохождение света в океанические воды, поэтому для районов паковых полей характерны лишь некоторые виды фораминифер и других групп организмов, приспособившихся к этой обстановке. Следовательно, в древних донных морских осадках, содержащих остатки таких организмов, можно обнаружить признаки присутствия паковых льдов в период седиментации.

КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ МОРЯ

Увеличение площади ледниковых покровов на материках и разрастание горных ледников до ледяных шапок ведут к повышению доли пресных вод, существующих в форме льда (в настоящее время эта доля составляет свыше 80%). В итоге общий объем воды в океанах сокращается и их уровень повсеместно по-

нижается. Эффект этого процесса может быть колоссальным: по многочисленным оценкам, уровень Мирового океана во время последнего плейстоценового оледенения располагался примерно на 120 м ниже, чем теперь (эта проблема подробно рассматривается в гл. 7). При этом резко изменялась география побережий земного шара: обширные участки шельфа осушались (южная часть Северного моря, Арафурское море и Персидский залив). Это в свою очередь влияло на климат окраин материков. Как отмечается в последней главе, чем дальше от моря находится данная местность, тем больше там температурные колебания, причем количество и распределение осадков также изменяются. Все это оказывает воздействие и на рельеф.

Нетрудно сообразить, что столь упрощенная схема зависимости между ростом ледниковых покровов и колебаниями уровня моря, вероятно, осложняется за счет других факторов. Важнейшими из них, возможно, являются упругость и вязкость коры и мантии Земли. Концентрация нагрузок в тех местах, где находятся ледник, океан или озеро, вызывает прогибание коры непо-

Рис. 86. Морской лед в море Беллинсгаузена.

Ледокол пытается расчистить проход между двумя «старыми» ледяными полями. Этот проход сковывается «молодым» льдом.

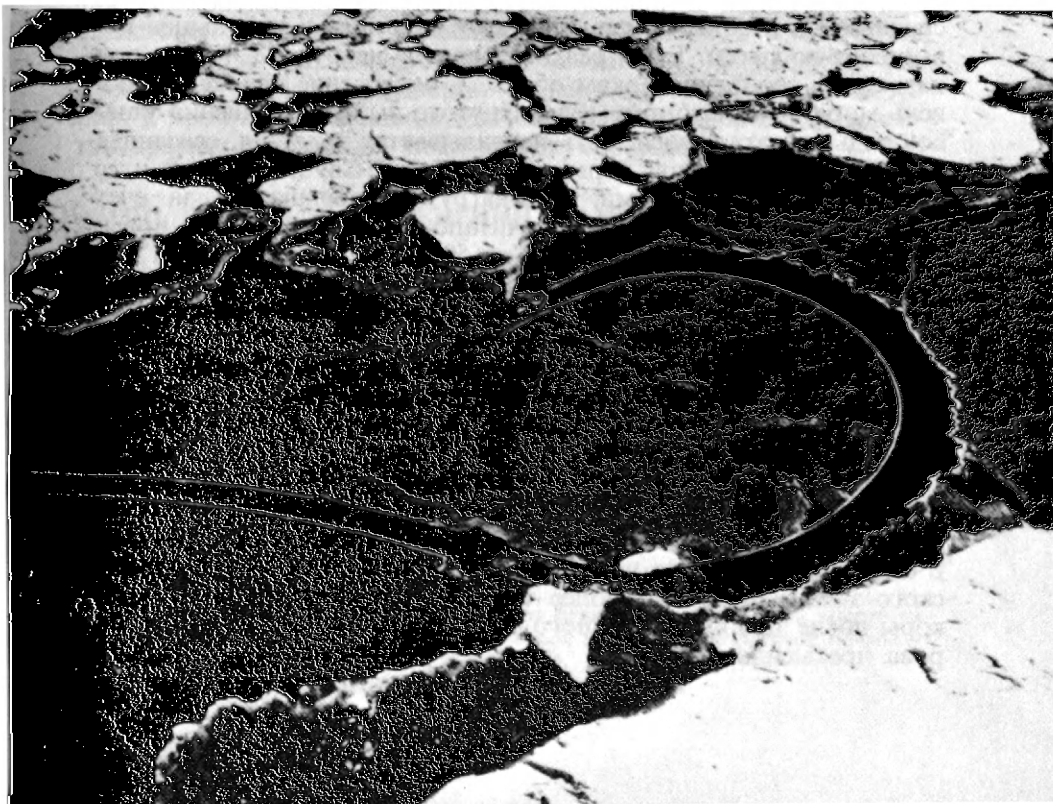




Рис. 87. Древние береговые линии озера на острове Южная Георгия.

Когда территория освобождается от ледникового покрова, под влиянием изостатических движений происходит поднятие, которое четко маркируется береговыми линиями.

средственню в области, где действует нагрузка, и небольшое повышение по краям. Такая реакция коры на нагрузки известна под названием изостазии. Таким образом, оледенение влияет на уровень моря не только путем упомянутого выше сокращения запасов воды, на эту зависимость накладывается и другая, связанная с прогибанием земной коры под ледниковыми покровами и ее поднятием под океанами, где нагрузка сокращается за счет уменьшения объема воды. Подсчитано, что существенное повышение уровня Мирового океана на 50-60 м в случае таяния нынешнего Антарктического ледникового покрова сократится на $\frac{1}{3}$ за счет прогибания земной коры, вызванного дополнительной водной нагрузкой. Местные проявления подобного процесса можно проследить в районах, которые в прошлом были заняты морями и озерами, а теперь подняты; прогибание достигало наибольших величин в центральных частях древних водоемов, а наименьших – на периферии.

Даже совсем небольшие ледниковые покровы вызывают соответствующую изостатическую реакцию. С тех пор как в конце последнего оледенения исчез Скандинавский ледниковый покров, в ответ на устранение нагрузки земная кора в районе Ботнического залива поднялась более чем на 300 м, а поднятие земной коры после таяния небольшого Шотландского ледникового покрова превысило 14 м.

Исследователям ледниковых периодов необходимо учитывать взаимодействие этих трех факторов. Последовательность типов или фаций морских осадков (грубые галечники и валунники штирмовых побережий, пески зоны осушки, затем алевриты и, наконец, на больших глубинах тонкие илы) нарушается вследствие взаимного наложения или частичного размыва, когда уровень моря повышается или, напротив, понижается. При понижении уровня моря понижается и базис эрозии, что стимулирует глубокое врезание речных долин и частичный вынос эстуарных и пойменных осадков, при этом остаются парные террасы¹, например наблюдаемые в низовьях Рейна, Темзы и многих других рек Европы. Прибрежно-морские осадки накапливаются за пределами воздействия приливов. При повышении уровня моря низовья рек затапливаются, при этом отлагаются эстуарные и морские глины, алевриты и пески. На низменных берегах накапливаются осадки болот и маршей и усиливается торфообразование. Наряду с формированием толщи сложно переслаивающихся осадков в условиях колебаний уровня моря происходит также размыв, сортировка и перераспределение отложений предыдущего оледенения. Бурение на низменных берегах таких морей, как Северное, выявило впечатляющую картину взаимодействия моря, рек, ледников, ветра и мороза как факторов осадконакопления на протяжении нескольких оледенений и межледниковий плейстоцена. Изучение колебаний уровня моря в плейстоцене дает очень ценную информацию о механизме охлаждения и потепления в каждом полушарии. Однако методы изучения морских и прибрежных осадков для определения природы и развития древних оледенений пока еще не совершенны.

ЖИЗНЬ ВО ВРЕМЯ ОЛЕДЕНЕНИЙ И МЕЖЛЕДНИКОВИЙ

Разрастание и таяние ледниковых покровов и ледников под влиянием климатических изменений оказывают глубокое воздействие на наземные и морские организмы. Миграция и вымирание — вот две очевидные реакции растений и животных на внезапное ухудшение природной обстановки. Третья возможная реакция — физиологическая адаптация, ведущая к возникновению новых видов, — проявлялась в четвертичный период лишь у отдельных групп животных (например, у некоторых небольших млекопитающих), что почти наверняка объясняется относительной непродолжительностью этого периода.

¹ Парные террасы (paired terraces) располагаются на одинаковой высоте на разных сторонах долины и представляют собой следы одновозрастной поймы.—
Прим. перев.

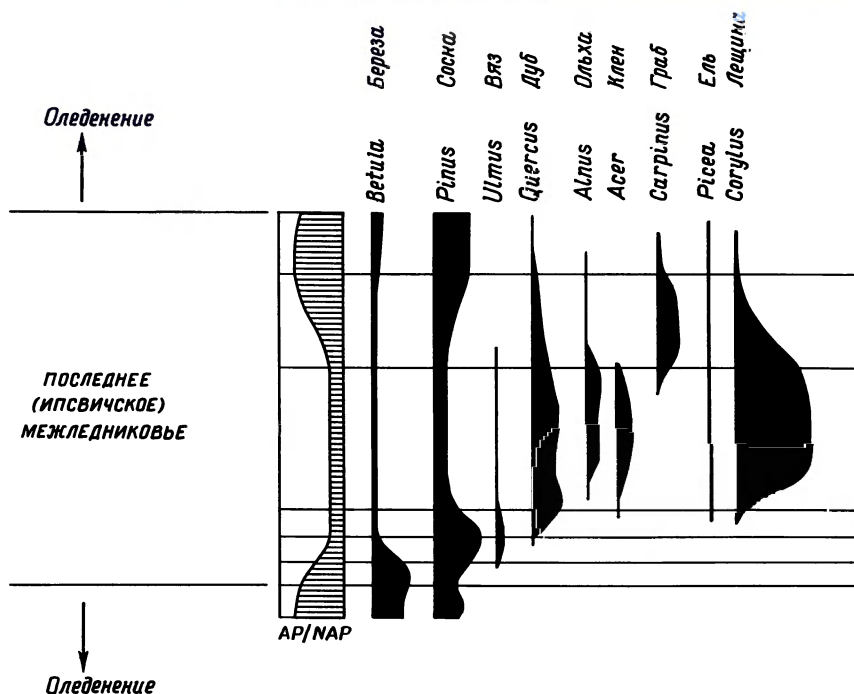


Рис. 88. Пыльцевая диаграмма отложений последнего межледникового в восточной Англии.

Показано типичное для межледникового распределение содержания пыльцы. В левой части диаграммы (горизонтальная штриховка) представлено соотношение пыльцы древесных пород (AP) и пыльцы травянистых растений и кустарничков (NAP). Следует отметить, что во время климатического оптимума межледникового преобладает пыльца древесных пород.

Способность многих видов мигрировать во время переходов от оледенений к межледниковьям была установлена благодаря находкам некоторых ископаемых. Пыльца растений, как выяснилось, является основным источником информации об изменении растительного покрова в прошлом; относительное содержание разных видов пыльцевых зерен – крайне чувствительный показатель соотношений тепла и влаги. Сохранившиеся ветки, листья, кора и семена растений часто подтверждают данные пыльцевого анализа. Ископаемые кости таких теплолюбивых животных, как бегемот, были обнаружены в плейстоценовых межледниковых отложениях центральной Англии, тогда как остатки скелетов таких крупных, как мамонт, и таких мелких, как лемминг, приурочены к ледниковым и перигляциальным осадкам. Остатки нескольких типов жуков, которые в настоящее время обитают в Северной Сибири, были найдены в отложениях последнего оледенения в Западной Европе.

Колебания прохладных и теплых условий устанавливаются также по морским организмам. О понижении температуры воды на шельфе Средиземного моря и у западных берегов Европы свидетельствует относительно быстрое увеличение доли северных видов моллюсков, что использовалось при проведении границы плиоцена и плейстоцена.

Организмы, населяющие глубоководные районы океанов, тоже реагируют на изменения природных обстановок, связанные с разрастанием и таянием ледниковых покровов. Особенно показательны такие мелкие организмы, как фораминиферы. Сравнивая долю числа теплолюбивых видов от общего числа видов, мы получаем чувствительный показатель изменений температуры вод океана. Некоторые виды фораминифер изменяют формы раковин: в более теплых условиях раковины закручены вправо, в более холодных — влево, что можно использовать как показатель адаптации к температурным условиям, а не как признак миграции или вымирания.

Как подчеркивалось в гл. 1, оледенение на Земле, когда бы оно ни происходило, вызывает глубокие изменения в распределении жизни на суше и в море. Для иллюстрации этого положения можно использовать некоторые примеры взаимоотношений, существовавших в плейстоцене, хотя можно полагать, что сходные соотношения существовали во время всех ледниковых периодов, установленных в геологической истории Земли.

Ледниковая зона во время холодных интервалов плейстоцена сильно расширялась и достигала в Северном полушарии 50° с.ш. (а в Северной Америке даже 40° с.ш.) против 77° с.ш. в настоящее время. За пределами ледниковой зоны субполярная или перигляциальная зона тундрово-степной растительности проникала в центральную Италию, отесняя вечнозеленые средиземноморские леса в узкую полосу между 37 и 35° с.ш.

Но это простое смещение зон в сторону экватора не могло бы произойти, если бы соответственно не менялся энергетический и водный баланс всей Земли. Динамика атмосферы такова, что в зоне наибольшего нагревания над экватором воздушные массы поднимаются, что компенсируется опусканием воздушных масс над пустынями, и в итоге огромная тепловая машина атмосферы (перенос тепла от областей поднятия воздуха к областям его опускания) уравнивается. В этом балансе, однако, произошел коренной сдвиг, когда области полярного холода распространились на место нынешних теплых умеренных и даже субтропических областей. События, происходившие в тропических широтах, нелегко интерпретировать.

Удержание столь большого количества влаги в крупных ледниковых покровах в глобальном масштабе, сопровождавшееся понижением уровня Мирового океана, действительно увеличило раз-

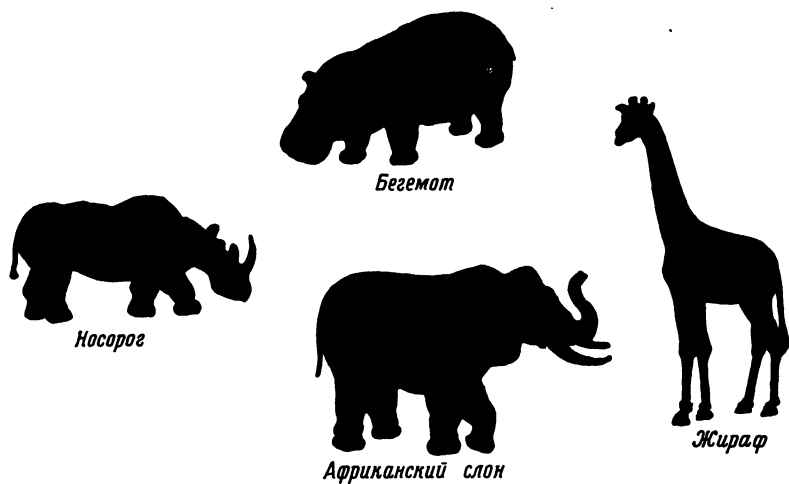


Рис. 89. Животные, пережившие ледниковый период в тропическом поясе.

Таким животным, как слон, жираф, носорог и бегемот, удалось пережить самые холодные интервалы кайнозойского ледникового периода, поскольку в тропиках изменения температур проявлялись в наименьшей степени.

Рис. 90. Череп и часть туловища мамонта, обнаруженные на берегу реки Березовка в Сибири в 1902 г.



меры материков, и последние стали более аридными. Песчаные дюны эпохи максимального развития оледенения были обнаружены ниже современного уровня моря, и обширные дюнные поля, вероятно, распространялись на обращенной к экватору стороне пояса субтропических пустынь, но на обращенной к полюсу стороне этого пояса, судя по высокому уровню воды в озерах, существовали более влажные условия.

В то время как температуры во всех зонах земного шара были несколько ниже современных, степень похолодания колебалась от места к месту: Атмосфера над Западной Европой была, вероятно, на $7-8^{\circ}\text{C}$, над тропиками—на 4°C , а над экваториальным дождевым лесом—не более чем на $1-2^{\circ}\text{C}$ холоднее, чем в настоящее время. Столь незначительные изменения в экваториальных лесных областях мало влияли на процессы на суше и вовсе не отражались на жизни растений и животных; в экваториальной зоне сохранялись доплейстоценовые условия; там существовали последние убежища крупных третичных животных и растений. Такие древние животные, как слоны, львы и жирафы, смогли выжить в экваториальных областях Старого Света и сохранились там до настоящего времени.

Далее к северу ситуация осложнялась. Области современных пустынь и саванн были несколько уже или смещались в сторону экватора. Во время оледенений уровни воды в озерах были ниже, чем в настоящее время, но в начале послеледникового времени занимали гораздо более высокое положение, о чем свидетельствуют древние береговые линии озера Чад, озер Восточной Африки и запада Северной Америки и Каспийского моря.

В тропической и субтропической зонах ледниковые периоды в некоторой степени совпадали с так называемыми плювиальными (дождливыми) периодами, отличавшимися выпадением большего количества осадков и большим увлажнением, но проводить прямую корреляцию этих периодов—большое упрощение. Плювиальные интервалы не могли продолжаться в течение всего времени, пока на северных материках имело место оледенение, и в целом могли быть более короткими и чаще повторяющимися. Их связь с оледенениями нельзя считать общепризнанной.

Как мы видели, леса средиземноморского типа смещались к югу, надвигаясь на пустыни Северного полушария, но сама средиземноморская зона во время максимума оледенения была, вероятно, суше, чем в настоящее время. К северу от этой зоны (примерно к северу от 45° с. ш.) климат был более холодным, но менее влажным, и текстурный анализ осадков и почв свидетельствует о широком распространении полярных (перигляциальных.—*Перев.*) пустынь.

Еще одним фактором, усложнившим ситуацию во время оледенений нынешнего ледникового периода, являются географиче-

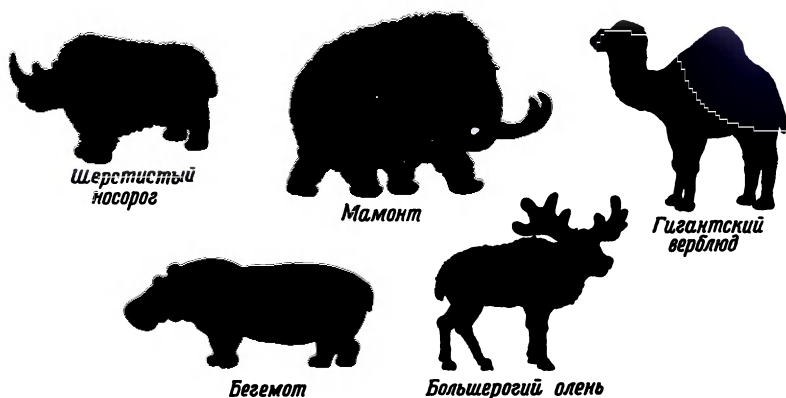


Рис. 91. Животные, вымершие в ледниковый период в умеренных и высоких широтах.

Такие животные, как мамонт, большерогий олень и саблезубый тигр, вымерли, поскольку они не смогли приспособиться к сильно изменившимся условиям во время оледенений.

ские особенности материков. В Северной Америке, где горные хребты простираются с севера на юг, а центральные равнины открыты с севера и обширны, растения, мигрировавшие к югу в связи с распространением ледниковых покровов, не встречали существенных препятствий. Между тем в Европе положение было совершенно иным, поскольку Альпийская область в целом вытянута с востока на запад и при наступлении ледниковых покровов к югу зона миграции растений и животных последовательно сужалась. Более того, долинные ледники Пиренеев и Альп местами сливались, образуя ледниковые покровы (на предгорных наклонных равнинах и плато.—*Перев.*), вследствие чего популяции многих видов растений и животных в Центральной Европе были обречены на вымирание; большое число видов, существовавших в Европе в третичное время, не пережило плейстоцен, хотя в Северной Америке они выжили (хорошо известный пример—магнолия). Другой результат—большее видовое разнообразие растений на южных окраинах Европы (например, в юго-восточной Франции) по сравнению с ограниченным числом видов в лесных районах Северной Европы. Следует обратить внимание и на необычные ареалы некоторых растений и животных. Некоторые виды вереска на Британских островах, например, встречаются только на крайнем западе Ирландии, а на материке их можно обнаружить в западных Пиренеях.

Рассматривая виды растений и животных и их ареалы, мы должны вновь обратиться к последствиям колебаний уровня моря. В плейстоцене при низких уровнях Мирового океана расстоя-

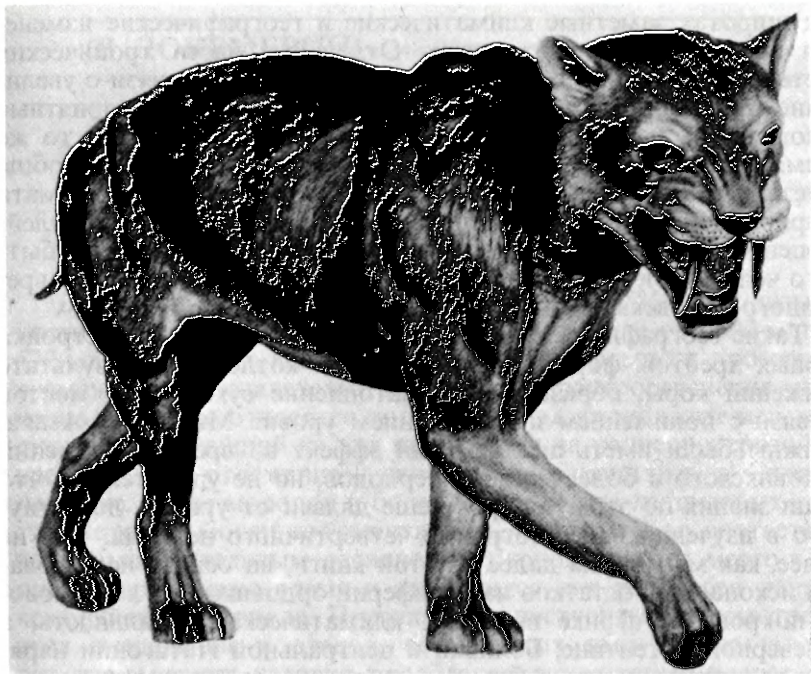


Рис. 92. Саблезубый кот (реконструкция).

Этот хищник, живший в четвертичный ледниковый период, вымер перед окончанием последнего оледенения.

ние между Азией и Австралией неоднократно сокращалось на $\frac{2}{3}$ и сильно расширялся сухопутный мост между Азией и Африкой в районе Суэца. При этом условия миграции животных были наиболее благоприятны во время пльвиалов, когда в таких районах, как Суэц, зоны пустынь сужались. Среди мигрантов был и человек. Заметим, что такие крупные животные Азии, как слон и тигр, встречаются также на небольших островах Малайского архипелага.

При обсуждении влияния ледниковых периодов мы стремились сосредоточиться на плейстоценовом ледниковом периоде. Это вполне закономерно, так как он самый молодой и наиболее изученный. Индивидуальные особенности ледниковых периодов Земли, включая и плейстоценовый, будут рассматриваться более подробно в последующих главах книги, однако здесь уместно кратко осветить влияние плейстоценового оледенения на жизнь с точки зрения современных представлений.

Хотя ледниковые покровы в плейстоцене никогда не проникали в тропики, глобальные нарушения водного и теплового баланса были таковы, что в периоды наступания ледников в высо-

ких широтах заметные климатические и географические изменения проявлялись и в тропиках. Отдельные части тропических пустынь становились более обитаемыми, так как в связи с увеличением площади пастбищ и мест для водопоя неблагоприятные условия этих районов намного изменялись к лучшему. В то же время некоторые океанические барьеры сокращались или вообще исчезали. На этом калейдоскопическом фоне изменений климата и природной среды впервые появились предки человека. В плейстоценовый ледниковый период происходило развитие первобытного человека, и в течение этого периода он превратился в современного человека.

Такие географические изменения, как поднятие и перестройка горных хребтов, формирование озерных котловин в результате движений коры, образование и затопление сухопутных мостов в связи с понижением и повышением уровня Мирового океана, должны были иметь аналогичный эффект во время оледенений ордовикского и более древних периодов, но не удивительно, что наши знания по этому вопросу еще далеки от уровня, достигнутого в изучении палеогеографии четвертичного периода. Тем не менее, как мы узнаем далее из этой книги, на основе исследования ископаемых остатков на периферии ордовикского ледникового покрова в Африке выявлена климатическая зональность, а в Северной Аргентине, Боливии и центральной Патагонии наряду с соответствующими бассейнами осадконакопления, вмещающими ледниковые и другие фации, установлены горные хребты, относящиеся ко времени пермско-каменноугольного оледенения.

Большинство авторитетных ученых теперь признают, что в нынешний ледниковый период ход эволюции сильно изменился. Поэтому логично предполагать, что древние ледниковые периоды тоже оказывали сходное воздействие на развитие растений и животных, на структуру и распространение их сообществ и на вымирание видов, которые не могли мигрировать или приспособиться к низким температурам и изменениям окружающей среды. Некоторые положения, выдвинутые в предыдущих главах, сохраняют здесь свое значение, а в последующих главах мы снова остановимся на колоссальном значении ледниковых периодов для развития жизни на нашей планете.

4. ДРЕВНЕЙШИЕ ЛЕДНИКОВЫЕ ПЕРИОДЫ

(В ДОКЕМБРИИ)

Грант Янг

Докембрийский зон охватывал примерно 85% продолжительности геологической истории Земли в интервале от 4600 млн. до 570 млн. лет назад. На протяжении этого огромного промежутка времени четкие свидетельства широкого распространения оледенения на Земле относятся только к двум продолжительным периодам. Древнейший из них приходился на раннепротерозойское время, и его отложения лучше всего сохранились в Северной Америке. Более молодой и более длинный ряд ледниковых событий, которые могли соответствовать, а могли и не соответствовать самостоятельным ледниковым периодам, имел место в позднепротерозойское время и завершился как раз перед началом кембрийского периода. Прежде чем приступить к рассмотрению этих оледенений и следов, оставленных ими на Земле, надо вкратце выяснить условия, преобладавшие на нашей планете в те далекие времена ее истории.

ДРЕВНИЕ ПРИРОДНЫЕ ОБСТАНОВКИ И ГОРНЫЕ ПОРОДЫ

Докембрийский мир был бы для нас во многом непривычным. Прежде всего мы не могли бы в нем жить, так как атмосфера тогда содержала лишь незначительное количество кислорода. Большую часть этого времени, по крайней мере на протяжении ранней части докембрия, солнце было скрыто за плотной пеленой облаков. Бесперывно лил дождь, может быть, миллионы лет подряд. Повсеместно происходили извержения вулканов с излияниями лавы. Когда возникли земная кора и атмосфера, образовался и океан. Первоначально это действительно был «Мировой океан», покрывавший буквально всю земную кору. Возможно, когда на некоторых территориях накопились лава и другие вулканические образования большой мощности, появились первые континенты. Горы, котловины и плато могли быть созданы первичными тектоническими силами. Горные породы разрушались первозданными процессами выветривания, которые довольно сильно отличались от современных. Поверхность суши подвергалась воздействию силы тяжести, ветра, воды, а в полярных и высокогорных районах – также и льда. Постепенно

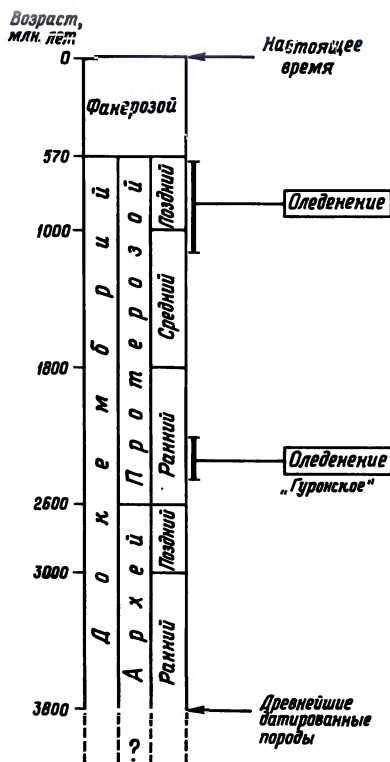


Рис. 93. Некоторые основные подразделения геологического времени.

Обратите внимание на большую продолжительность докембрия. Указан приблизительный возраст докембрийских ледниковых периодов.

в рельефе вырабатывались долины и склоны гор, и обломки пород переносились из возвышенных районов и отлагались главным образом на дне озер и океана.

Насколько нам известно, в море не было жизни. На суше не было растений и животных. Миллионы квадратных километров были заняты безжизненными ландшафтами – волнистыми просторствами, сложенными вулканическими породами, с рассредоточенными озерами; песчаными пустынями; кратерами вулканов; хаотическими нагромождениями лавы. Раздавались только звуки, рожденные неживой природой – извержениями вулканов, камнепадами и лавинами, а также раскаты грома, порывы ветра, непрерывная мелодия дождей и журчание речных вод. На берегах морей слышались звуки волн, разбивавшихся об утесы.

Природная обстановка докембрия отнюдь не поразила бы нас своим гостеприимством.

ВЕРОЯТНОСТЬ РАЗВИТИЯ ОЛЕДЕНЕНИЯ В АРХЕЕ

Согласно радиологическим определениям возраста, древнейшие породы сформировались около 3800 млн. лет назад, но, как упоминалось в гл. 1, учитывая возраст метеоритов, возраст Земли оценивают примерно в 4600 млн. лет.

Значительная часть ранней истории Земли овеяна тайной, так как во многих районах самые древние породы так сильно изменены, что трудно говорить об условиях их формирования. Большинство геологов рассматривают эти древние породы как архейские. Некоторые исследователи подразделяют архей на две части; породы более молодой части в некоторых районах отличаются хорошей сохранностью. Поздний архей широко представлен вулканическими породами, которые благодаря зеленому цвету (главным образом из-за присутствия минерала хлорита) называют зеленокаменными.

Лавы в составе архейских зеленокаменных пород обычно обладают подушечной отдельностью; эти выпуклые массы пород образовались при быстром охлаждении внешнего покрова расплавленной лавы на контакте с водой. Покров расширялся наружу и вверх под давлением нижележащей расплавленной лавы. Подобные текстуры встречаются исключительно в лавах, формирующихся под водой, и это — важное доказательство присутствия воды на Земле в архейское время. Такие «подушечные лавы» весьма характерны для позднего архея, но встречаются также в некоторых породах западной Гренландии, самых древних на Земле.

Другие свидетельства обилия воды на очень ранней стадии истории Земли сводятся к наличию слоистых осадочных пород. Такие породы образуются двумя путями: при химическом осаждении из веществ, растворенных в воде, и при формировании «кластических» отложений из частиц, принесенных реками и потоками и затем отложенных либо в речных долинах, либо в более крупных непроточных водоемах — озерах и морях. Как химические, так и кластические осадки рассматриваемой эры указывают на обилие воды в то время, так что потенциальный резерв для развития крупного оледенения, вероятно, сохранялся на протяжении большей части архейского времени.

Неясными остаются причины отсутствия ледниковых отложений в большинстве древних толщ, равно как и предпосылки для развития самого оледенения. Возможно, что тогда была недостаточно велика поверхность суши, благоприятной для формирования материковых ледниковых покровов. Если большая часть мировых океанов образовалась на раннем этапе истории Земли и земная кора первоначально была менее мощной, то большая часть коры могла испытать погружение. В этом случае любые

полярные «ледяные шапки» должны были состоять из плавучих морских льдов, они могли развиваться и исчезать, не оставляя никаких следов, поскольку такие льды не эродируют поверхность суши. Если в архее земная кора, по крайней мере местами, была менее мощной, а недра Земли – более раскаленными, то кора могла испытывать гораздо более быстрые и распространявшиеся на большие площади движения с образованием складок и сбросов, чем это имеет место в наше время. Эти виды движений и связанная с ними вулканическая деятельность могли оказать столь глубокое влияние на осадки, что любые потенциальные показатели древнего климата могли быть скрыты.

Помимо отсутствия отложений, свидетельствующих об оледенении, в архейских породах вообще очень мало признаков особых климатических условий. Предполагалось, что поверхность Земли тогда в целом была теплее, в частности, за счет более интенсивного теплового потока, обусловленного радиоактивным распадом в недрах Земли. Другое предположение сводилось к тому, что из-за более плотной атмосферы климат нашей планеты был довольно одинаковый от полюсов до экватора. Опять-таки, если в атмосфере присутствовало большое количество двуокиси углерода и вряд ли содержался кислород, как отмечалось в гл. 1, это могло препятствовать развитию оледенения. Все это, однако, лишь допущения: определенные доказательства широкого распространения оледенения в архейское время отсутствуют.

НАЧАЛО ПРОТЕРОЗОЯ

Переход от архея к протерозою во многих частях земного шара ознаменовался глубокими изменениями характера земной коры. Эти изменения происходили не одновременно во всех районах и, вероятно, приходились на временной интервал примерно от 3000 млн. до 2600 млн. лет. Они наиболее заметно прослеживаются в осадочных породах. Одно из свойств нижнепротерозойских осадочных толщ – широкое распространение мощных пачек медленно накапливавшихся, хорошо перемытых и отсортированных песков, которые в результате литификации превратились в ортокварциты. Их описывают как «чистые» песчаники, поскольку они белые и состоят почти исключительно из устойчивого минерала – кварца (двуокись кремния SiO_2). Подобные отложения свидетельствуют, что на протяжении длительных периодов геологической истории кора оставалась относительно неподвижной, хотя постепенно происходило ее оседание под влиянием нагрузки в виде осадков. Такие условия в течение большей части архея существовали относительно редко.

Предполагают, что в раннем протерозое (2600–1800 млн. лет назад) произошли также значительные изменения в атмосфере Земли. Находки минералов пирита (сульфид железа FeS_2) и уранинита (окись урана UO_2) в виде окатанных зерен со следами речного переноса в основании нижнепротерозойских толщ во многих частях земного шара интерпретировались как признак отсутствия значительного количества свободного кислорода в атмосфере того времени (см. гл. 2). Вышеупомянутые минералы легко окисляются и в современных условиях не перенесли бы транспортировку подобного рода. Считают, что они сформировались в уникальных условиях атмосферы и коры, которые больше никогда не повторялись в истории Земли.

Многие геологи полагают, что большая часть кислорода в атмосфере Земли образовалась биологическим путем. Главное геологическое доказательство – интенсивное формирование «строматолитов» в раннем протерозое. Строматолиты – это особый вид осадочных пород, возникших при совместном воздействии организмов (примитивных растений, например водорослей, наряду с бактериями) и обычных процессов седиментации. В результате образовалась тонкослоистая порода, отличающаяся большим разнообразием форм залегания: от горизонтально залегающих слоев до клубневидных наростов. Считают, что тонкая слоистость формировалась в периоды быстрого роста клеток, что способствовало накоплению слоев, обогащенных органическим веществом. Эти периоды чередовались с периодами относительно пониженной деятельности организмов, когда основной процесс сводился к захвату осадочных частиц (обычно карбонатов) клеточной тканью. Имеются свидетельства того, что организмы активно способствовали осаждению карбонатных минералов. Большинство строматолитов (но не все они) залегает в карбонатных породах – известняках и доломититах.

В пользу того, что строматолиты в основном имеют органическое происхождение, отчасти свидетельствует открытие в них органических клеток, которые почти неотличимы от клеток синезеленых водорослей, существующих до сих пор. Такие организмы осуществляют фотосинтез: они поглощают двуокись углерода CO_2 , и в ходе их жизнедеятельности образуется кислород O_2 .

Некоторые строматолиты известны в архейских породах, но впервые они получают широкое распространение в верхних слоях нижнепротерозойских толщ (около 2000 млн. лет назад). Роль строматолитов в образовании кислорода подтверждает тот факт, что примерно в то же самое время впервые появляются интенсивно окрашенные красноцветные породы.

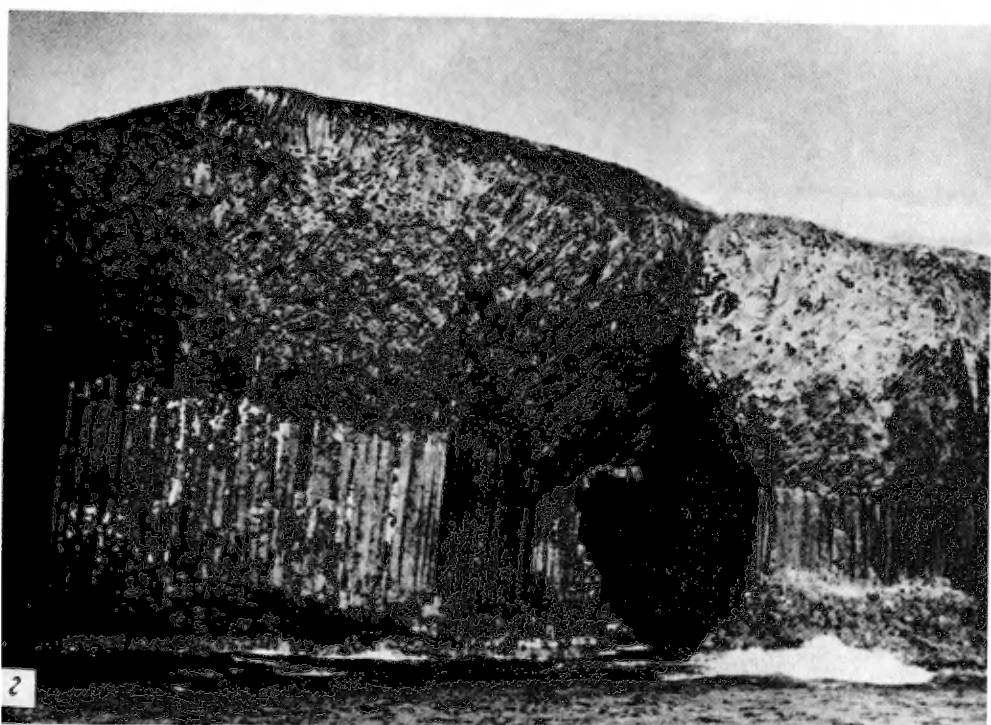
Красноцветные породы – это осадочные породы красного цвета. Своей окраской они обязаны главным образом присутствию



Рис. 94. Первозданные ландшафты, аналогичные тем, которые могли существовать на Земле в докембрии.

а – ландшафт обнаженных скал и озер (Норвегия); *б* – ландшафт песчаной пустыни (пустыня Чалби, северная Кения); *в* – вулканический ландшафт (острова Галапагос); *г* – прибрежный ландшафт в области распространения столчатых базальтов (остров Стаффа, западная Шотландия).





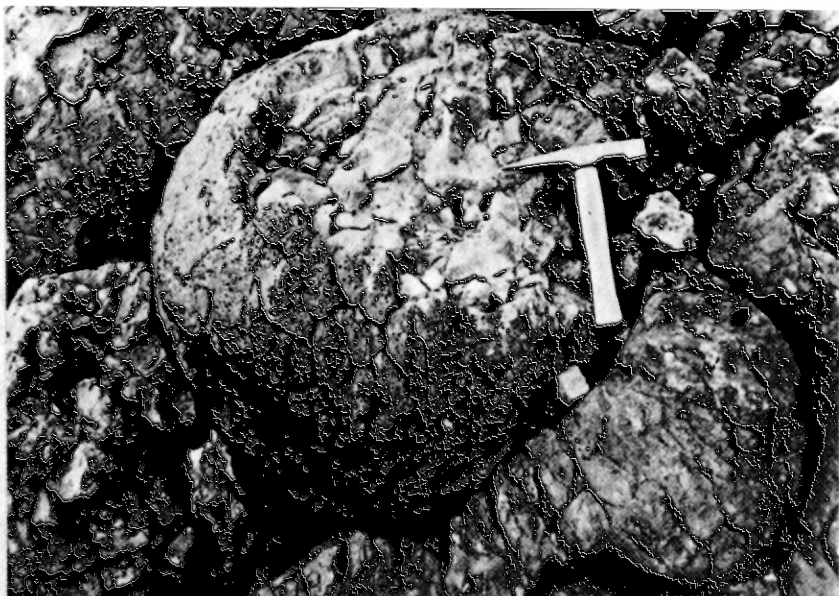


Рис. 95. Подушечная лава, типичная для архейских зеленокаменных пород.
 Такие лавы образуются при подводных вулканических извержениях.

Рис. 96. Скованная льдом поверхность Северного Ледовитого океана.

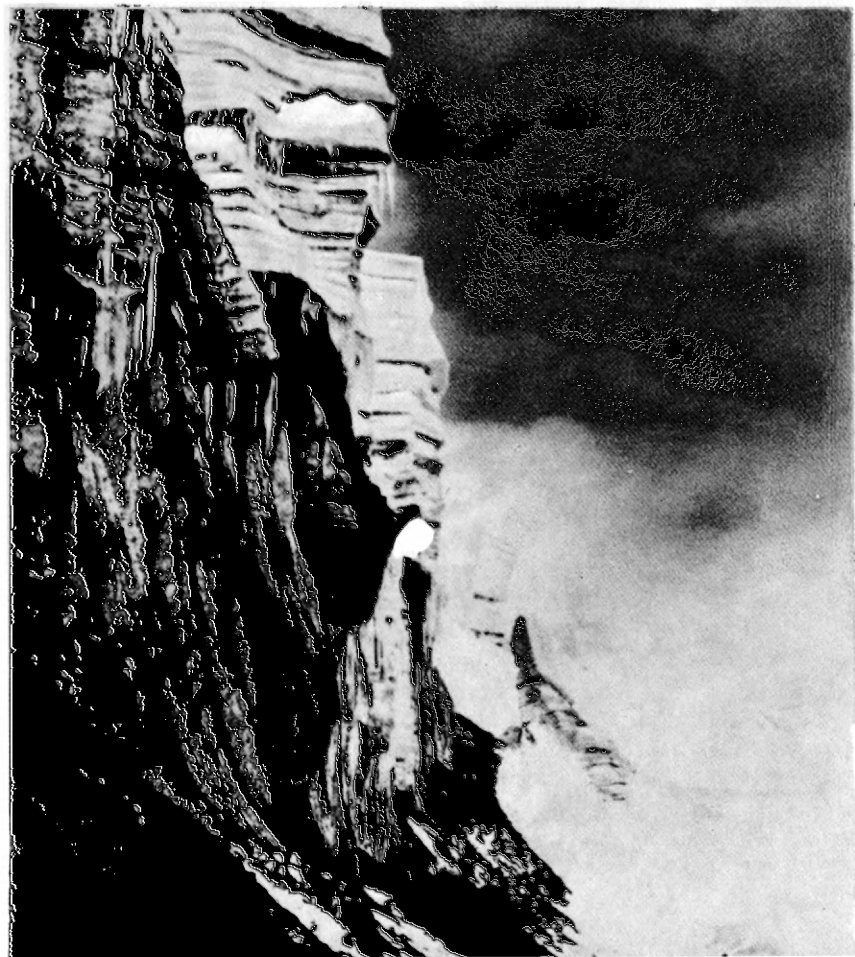
Так же могли выглядеть самые древние ледяные шапки на Земле, когда в архее в полярных областях не было суши.



тонкорассеянной окиси железа (гематит). Существуют разные представления по поводу способа формирования красноцветных пород, но большинство ученых признают, что это результат окисления минералов, содержащих железо. Некоторые полагают, что красный цвет появляется в осадке вскоре после отложения; другие считают, что окисление происходит на более ранней стадии, в почвах, которые затем переносятся и отлагаются в виде красноцветных осадков. Окисление железа в таких широких масштабах принимается как свидетельство присутствия свободного кислорода в атмосфере. Кислород мог образоваться в результате фотосинтеза сине-зелеными водорослями, формировавшими строматолиты.

Рис. 97. Огонь и лед.

Эти крутые обрывы в одном из вулканических районов Исландии состоят из чередующихся слоев вулканического пепла и льда. Такие формы рельефа могли быть распространены во время древнейших оледенений на Земле.



Другой важный процесс, относящийся к тому же времени, — массовое отложение мелководных железистых кварцитов. Это хемогенные осадочные породы с высоким содержанием железа (не менее 15%.—*Перев.*). Мы рассмотрим их ниже.

ДРЕВНЕЙШИЙ ЛЕДНИКОВЫЙ ПЕРИОД

В обстановке значительных изменений, подобных упомянутому выше, на Земле происходило накопление первых ледниковых отложений. Нижнепротерозойские породы в районе озера Гурон, Канада, содержат наиболее весомые свидетельства этого

Рис. 98. Модель докембрийского ледникового покрова (?).

Ледяная шапка в районе северного полюса планеты Марс, возможно образовавшаяся в условиях, довольно сходных с теми, которые были на Земле во время древнейших материковых оледенений.



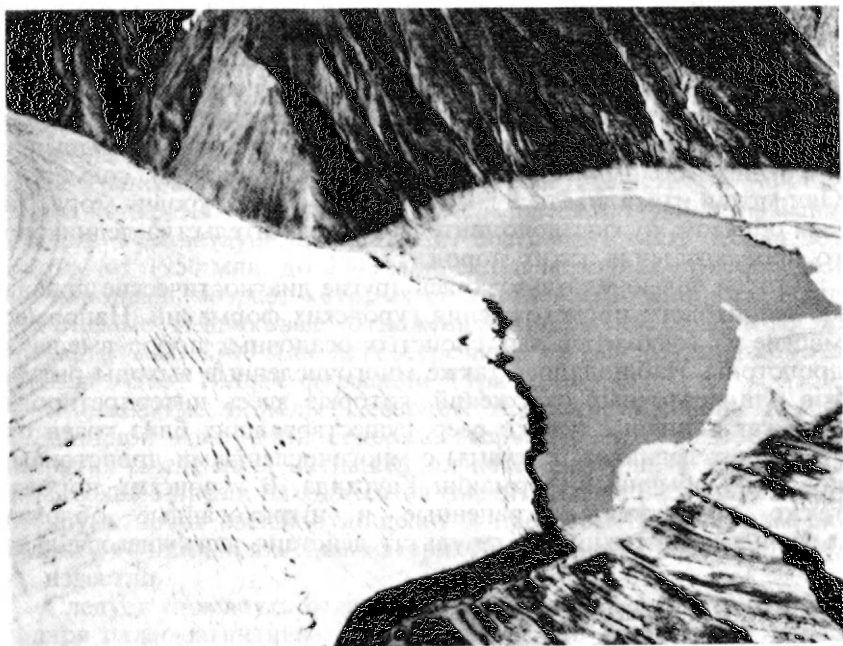


Рис. 99. Перспективный аэрофотоснимок приледникового озера в восточной Гренландии.

Некоторые ритмы, обнаруженные в формации Гауганда, вполне могли накапливаться в такой обстановке.

древнего оледенения. Эти осадочные породы мощностью около 12 000 м включают три мощные толщи (формации), которым приписывают ледниковое происхождение.

Учитывая мощности и продолжительность накопления, каждая из этих формаций может соответствовать самостоятельному ледниковому периоду; тем не менее обычно в совокупности их относят к «гуронскому оледенению». Две более древние ледниковые формации не очень широко распространены, но более молодая формация Гауганда представлена на территории площадью около 120 000 км² (вероятно, первоначально она была еще шире развита).

Аргументы в пользу ледникового происхождения пород формации Гауганда более убедительны, чем в случае двух более молодых формаций. Наиболее заметная особенность этих толщ — их сходство с моренами, отложенными плейстоценовыми ледниками: они состоят из обломков пород, отличающихся разной формой и разными размерами и поступивших из разных источников, имеют мелкозернистый неслоистый заполнитель, первоначально

состоявший из частиц песка, алеврита и глины (см. раздел «Ледниковая аккумуляция» в гл. 3). Используя критерии, описанные в гл. 3, породы, видимо, можно охарактеризовать как типичные тиллиты, но они могли не обязательно образоваться благодаря ледниковым процессам. Например, они могут представлять собой оползневые или склоновые массы, в которых заполнитель и крупные обломки перемещались вниз по склону совместно. Они могли накапливаться как выше, так и ниже уровня моря. Таким образом, нужны дополнительные доказательства ледникового происхождения таких пород.

С этой целью использовались другие диагностические признаки ледникового происхождения гуронских формаций. Например, многие из тонкозернистых слоистых осадочных пород вмещают дропстоны. Наблюдались также многочисленные выходы ритмитов или ленточных отложений, которые здесь интерпретировались как типичные осадки озер, существовавших близ краев отступавших ледников. Ритмиты с многочисленными дропстонами довольно обычны в формации Гауганда. В гуронских породах также обнаружены огненные и штрихованные обломки и скальные поверхности – результат действия движущегося льда.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ОЛЕДЕНЕНИЯ

Теперь мы можем сказать, что в нижнепротерозойских породах южной части Канадского щита, по-видимому, имеются следы по крайней мере трех периодов наступания и отступления ледников. Считают, что отложения самого молодого из них, имевшего место около 2300 млн. лет назад, гораздо более широко распространены по сравнению с отложениями двух предыдущих. Допуская ледниковое происхождение этих пород, уместно задать вопрос: «Как широко распространялось раннепротерозойское оледенение?»

Отложения, по возрасту и характеру сходные с тиллитами гуронской толщи, обнаружены в нескольких районах Северной Америки. Разрозненные находки ледниковых отложений широко представлены на территории, удаленной примерно на 2000 км к северо-западу и юго-западу от выходов гуронских пород. Детальное изучение осадочных пород помогло установить направления их переноса. Главное направление, по-видимому, было радиальное, т.е. предполагается, что ледниковые осадки отлагались вдоль краев материкового ледникового покрова. В целом предполагаемый ледниковый покров занимал большую часть Канадского щита, но осадки сохранились только на его периферии в котловинах, впоследствии испытавших погружение. Если такая интерпретация верна и выходы упомянутых нижнепротерозойских пород действительно указывают на существование леднико-

вого покрова в высоких широтах на территории Северной Америки, уместно задать вопрос: «Существовал ли другой ледниковый покров на противоположной стороне земного шара?»

С этой целью был предпринят поиск ледниковых отложений сопоставимого возраста на других материках. Наиболее похожими на ледниковые отложения являются раннепротерозойские породы Трансваальской супергруппы на востоке Южной Африки. Более конкретно ледниковые породы здесь получили название «тиллит Грикватаун». Этот тиллит составляет часть толщи возрастом от 1950 млн. до 2340 млн. лет и перекрыт вулканическими породами, возраст которых составляет 2200 млн. лет. Предполагаемые ледниковые отложения приблизительно того же возраста (2000–2300 млн. лет) встречаются в Северо-Западной Австралии. Это – тиллит формации Тури-Крик.

Упомянутые породы Северной Америки, Южной Африки и Западной Австралии содержат первые веские свидетельства развития оледенения на нашей планете. Названные три района в настоящее время находятся на значительном расстоянии друг от друга, но их взаимоотношения в прошлом не выяснены, поскольку точное положение материков в раннем протерозое пока не известно.

Следует упомянуть о данных, которые удалось получить благодаря палеомагнитным исследованиям. По магнитному наклону

Рис. 100. Тиллит гуронской серии нижнего палеозоя (возраст около 2300 млн. лет) на северном берегу озера Гурон (провинция Онтарио, Канада).

Обратите внимание на крупные обломки разного состава, разделенные мелкозернистым материалом.

Рис. 101. Тонкослоистые осадочные породы, образовавшиеся в приледниковом озере около 2300 млн. лет назад.

Каждый тонкий слой, по-видимому, накапливался в течение года. В верхнем левом углу видны крупные камни. Это дрипстоны, вероятно занесенные в озеро айсбергами, которые затем растаяли, а их каменный материал осел на дно.

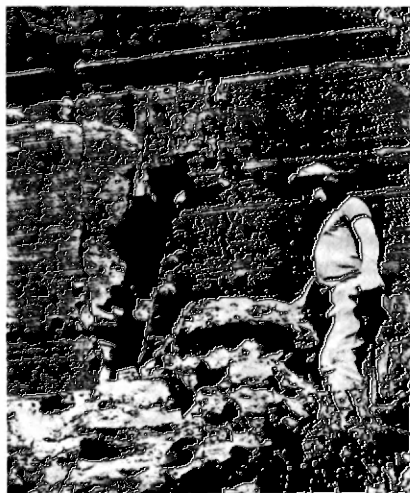




Рис. 102. Вероятное распределение материков в раннем протерозое (около 2300 млн. лет назад).

Черными точками обозначены местонахождения нижнепротерозойских ледниковых отложений. Пунктирной линией показан ареал предполагаемого ледникового покрова в Северной Америке. Стрелки указывают на радиальный перенос осадков в то время. Нижнепротерозойские ледниковые отложения обнаружены также в Южной Африке и Западной Австралии.

нению в гуронских породах было вычислено, что вероятный центр оледенения примерно находился на палеошироте 60° . Иными словами, это был центр типичного ледникового покрова умеренных широт.

Согласно одним реконструкциям положения материков в прошлом, Антарктида находилась поблизости от Северной Америки, а по другим – близ Южной Америки. Из-за этих расхождений пока невозможно решить вопрос о распространении нижнепротерозойских ледниковых отложений на земном шаре. Тем не менее одна из гипотез сводится к существованию двух главных центров оледенения. Один из них находился в Северной Америке, другой – в Южной Африке и Западной Австралии (ко-

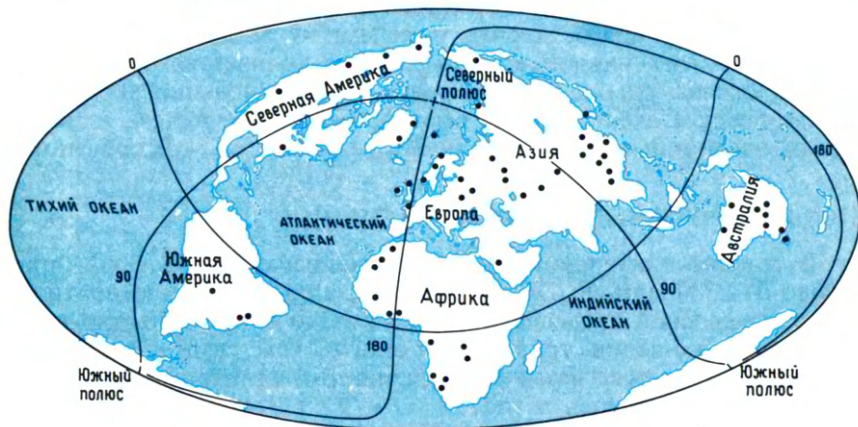


Рис. 103. Карта земного шара, показывающая широкое распространение верхнепротерозойских ледниковых отложений (черные точки).

торые тогда могли располагаться совсем рядом). Возможно, к этим двум районам в раннем протерозое и были приурочены ледниковые покровы, типичные для умеренных широт, хотя в настоящее время на этот счет пока еще нет достаточно полных палеомагнитных данных.

Довольно достоверно установлено, что некоторые части поверхности Земли были заняты ледниками примерно 2300 млн. лет назад. Не выяснено, существовало ли тогда оледенение материкового типа или эти ледники были связаны с процессами горообразования, которые последовали за утолщением некоторых участков земной коры в конце архея. В любом случае эти ледники появились после периода глубоких изменений земной коры, атмосферы и океанов. Возможно, самым важным из этих изменений (в отношении оледенения) была стабилизация континентальной коры путем утолщения ее крупных сегментов. Континентальная кора была достаточно мощной и была поднята на большую высоту, что определяло значительное развитие оледенения.

Важное изменение состава атмосферы и гидросферы произошло примерно одновременно с главным «гуронским» оледенением. Это — первое появление свободного кислорода в атмосфере, вероятно связанное с осуществляющими фотосинтез сине-зелеными водорослями, которые в раннем протерозое в изобилии росли на недавно стабилизированных континентальных платформах и шельфах. Об этом свидетельствует также появление около 2000 млн. лет назад обогащенных железом хемогенных осадочных пород. Как известно, железо относительно нерастворимо при наличии большого количества свободного кислорода (на это

указывает отсутствие растворенного железа в современных океанах и концентрация остаточного железа во многих современных почвах), но этот элемент мог в большом количестве присутствовать в океанах раннего протерозоя. Проникновение кислорода в атмосферу и океаны могло вызвать осаждение железа в масштабах, невиданных ни до, ни после раннепротерозойской эпохи.

ПОЗДНЕПРОТЕРОЗОЙСКИЕ ОЛЕДЕНЕНИЯ

В течение длительного периода геологической истории, примерно от 2300 млн. до 1000 млн. лет назад, не было или почти не было проявлений оледенения на Земле. Это обстоятельство в некотором отношении труднее объяснить, чем сами оледенения, имея в виду прежде всего периодичность ледниковых периодов, о которой говорилось в гл. 1.

Однако поздний этап протерозоя насыщен свидетельствами развития оледенения. Даже если сделать скидку на разное положение материков, трудно доказать, что все ледниковые отложения могли тогда сформироваться в высоких и умеренных широтах. Были предложены некоторые гипотезы, объясняющие распространение этих ледниковых отложений, однако, прежде чем обсудить эту проблему, надо критически рассмотреть некоторые из аргументов, подтверждающих и отрицающих позднепротерозойское оледенение.

Убедительные полевые данные о развитии этого оледенения действительно обнаружены на всех материках. Приводимое ниже краткое описание ограничивается материалами по двум районам — Шотландии и северо-западной Канаде. Эти районы были выбраны потому, что обстановки накопления предполагаемых ледниковых осадков в них резко различались.

Верхнепротерозойские ледниковые отложения встречаются в полосе, которая пересекает центральную Шотландию с северо-востока на юго-запад и продолжается в том же направлении в северо-западную Ирландию. Эти породы относятся к Дальредской толще, в верхней части которой обнаружены ископаемые, указывающие на раннекембрийский возраст. В крайних западных выходах дальредских пород в Шотландии на острове Айлей и особенно на некоторых небольших островах, известных под названием Гарвеллак, обнажаются хорошо сохранившиеся ледниковые отложения. Они составляют тиллитовую формацию Порт-Аскейг, которая была исключительно детально описана Спенсером, высказавшимся в пользу ее ледникового происхождения.

Тиллитовая формация Порт-Аскейг имеет общую мощность до 870 м и вмещает 47 микститовых горизонтов, интерпретируемых как тиллиты. Формация подстилается и перекрывается карбонатными отложениями. Отдельные горизонты микститов

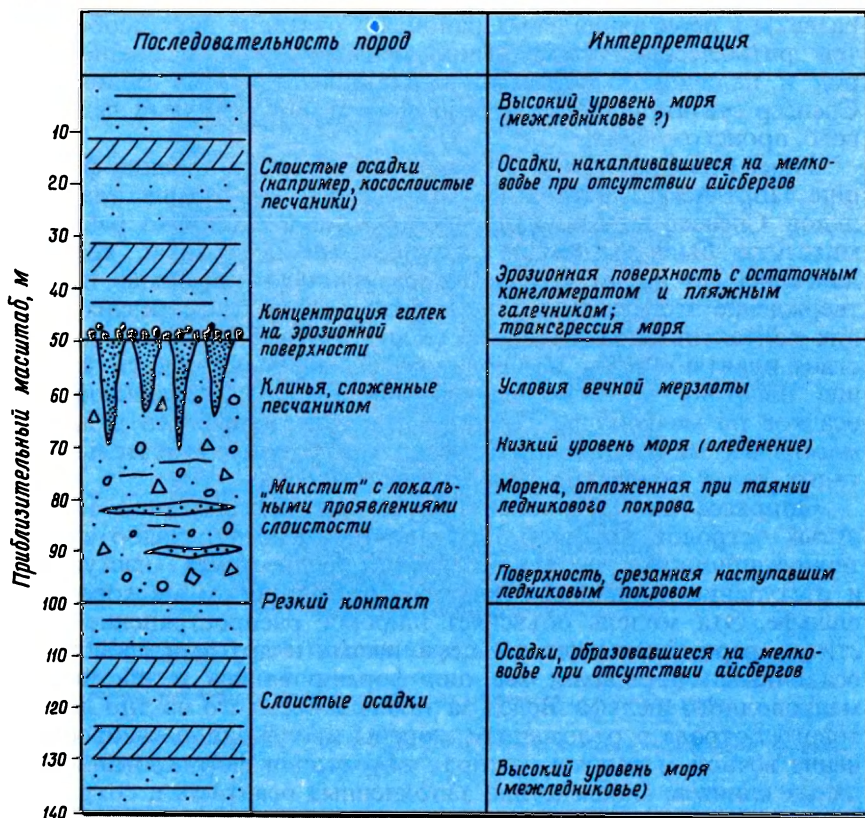


Рис. 104. Последовательность осадконакопления, типичная для ледниково-морских циклов в тиллитах Порт-Аскейг.

Каждый цикл можно представить как ледниково-межледниковый; в тиллитах можно выделить не менее 17 таких циклов.

разделяются алевролитами, песчаниками, конгломератами и доломититами, которые, вероятно, отлагались в субаквальной среде. К полевым данным, приведенным Спенсером в качестве свидетельств ледникового происхождения формации Порт-Аскейг, относятся ее большая мощность и широкое распространение. Спенсер ссылался также на частые находки эвратических обломков в микститах, причем эти обломки явно были принесены в область осадконакопления, вероятно, льдом издалека. Кроме того, Спенсер отметил наличие крупных полигональных трещин в кровле некоторых микситовых горизонтов. Эти трещины заполнены песчаниками и конгломератами и рассматриваются как древние аналоги ледяных клиньев, которые в настоящее время

развиты в перигляциальных районах. Сочетание двух особенностей – ритмического переслаивания мелкозернистых осадочных пород и наличия обособленно залегающих крупных обломков – Спенсер считал наиболее определенными показателями ледникового происхождения.

Ранее большинство исследователей интерпретировали формацию Порт-Аскейг и сходные тиллиты как отложения плавучих льдов. Спенсер выдвинул предположение, что широко развитые микститы были отложены ледниковыми покровами, которые двигались по дну устойчивой абразионной платформы. В подтверждение этой гипотезы он ссылаясь на наличие резких нижних контактов слоистых пачек с микститами (в случае воздействия плавучих льдов наблюдалось бы перемежающееся залегание пластов), а также на формирование переслаивающихся осадков на мелководье. Прерывистое залегание слоев в других массивных микститах он объяснял как результат деятельности талых вод у основания ледникового покрова.

Опираясь на материалы, полученные при изучении упомянутых островов западной Шотландии, Спенсер разработал интерпретационную модель, которая предполагает наступание и отступление ледниковых покровов на обширном мелководном шельфе. Эта модель объясняет широкое распространение микститов, переслаивающихся с песчаниками и другими слоистыми осадочными породами; все они формировались в обстановке мелководного шельфа. Вслед за таянием осевшего на дно ледникового покрова и отложением морены происходило распространение вечной мерзлоты, которая обусловила формирование ледяных клиньев, впоследствии заполненных осадками и сохранившихся в верхних частях многих микститовых горизонтов. Повышение уровня моря, следовавшее за таянием ледников, вновь вызывало отложение слоистых морских осадков. Таким образом Спенсер доказывал, что в процессе накопления тиллитов формации Порт-Аскейг льды наступали 17 раз, причем каждое наступание составляло ледниковый период значительной длительности и сложности.

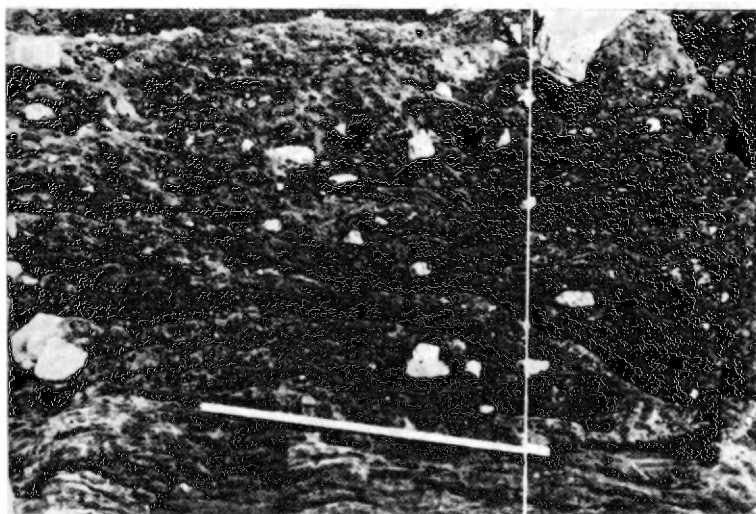
В противоположность ледниковым отложениям дальредской толщи Шотландии во многих районах верхнепротерозойские ледниковые отложения накапливались и сохранились там, где четко проявилась сбросовая тектоника, синхронная осадконакоплению, которая иногда рассматривается как признак начинавшегося раскола материков. В западной части Северной Америки она известна в нескольких районах. Ниже кратко описывается один из таких районов, расположенный близ северной оконечности Кордильерского складчатого пояса.

Тектоническая обстановка в этом районе, по-видимому, резко отличалась от обстановки, установленной Спенсером для перио-



Рис. 105. Микстит из толщи тиллитов Порт-Аскейг, Гарвеллакс, Шотландия. Эти отложения вмещают эратические гранитные валуны, а также обломки доломитов, часть которых подверглась полному выветриванию, о чем свидетельствуют углубления на поверхности породы.

Рис. 106. Неслоистый микстит из толщи Порт-Аскейг с многочисленными эратическими валунами гранитов и доломитов.



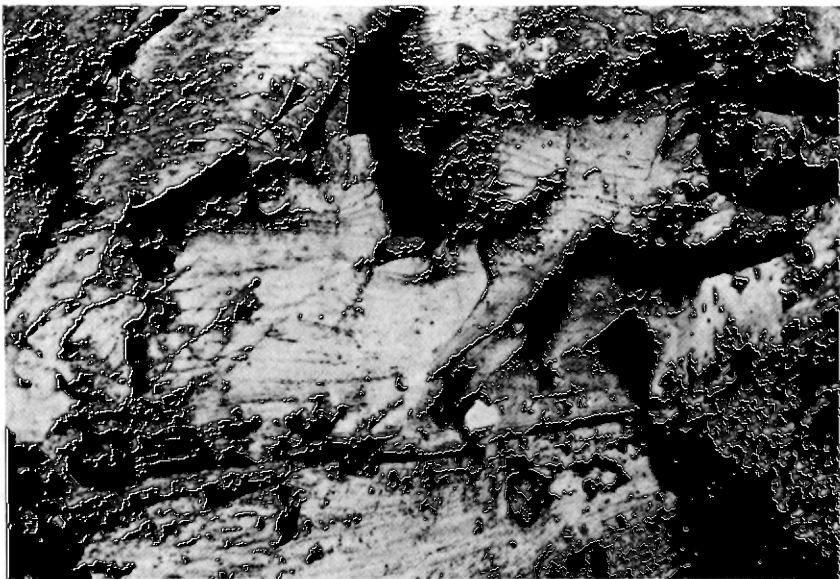
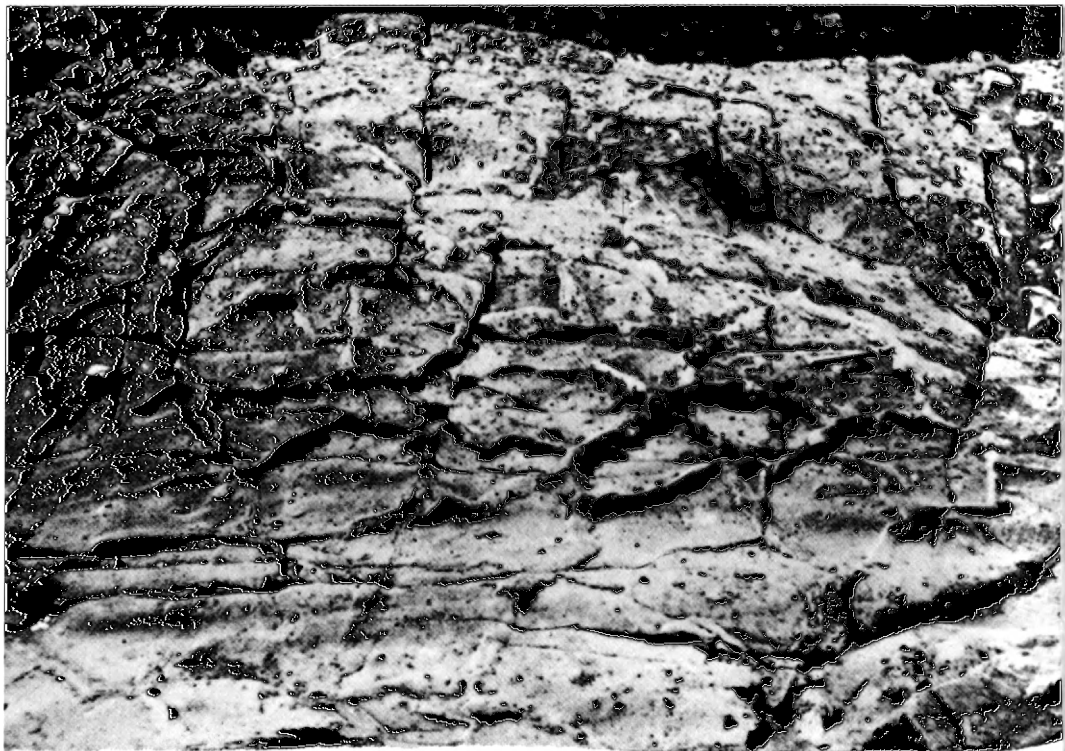


Рис. 107. Ленточные алевролиты в толще Порт-Аскейг.

Они откладывались в водной среде и вмещают дронстоны разных типов, принесенные плавучими льдами.

Рис. 108. Клинья, сложенные песчаником, в верхней части одного из микститовых слоев толщи Порт-Аскейг.



да накопления верхнепротерозойских ледниковых осадков в Шотландии. Осадконакопление здесь, вероятно, происходило в узком вытянутом грабене, где образование сбросов происходило как до, так и во время седиментации. Рассматриваемые породы составляют часть группы Рапитан. Нижние горизонты представлены главным образом темно-красными алевролитами и красновато-серыми песчаниками с отдельными слоями конгломератов. Четко установлено, что некоторые из этих слоистых осадочных пород транспортировались в погружающийся осадочный бассейн турбулентными течениями и связанными с ними агентами. Имеются свидетельства эпизодического сползания осадков по склонам, обусловленного помимо прочих причин землетрясениями и движениями вдоль разломов. Эти в целом тонкослоистые осадочные породы вмещают разрозненные крупные обломки, многие из которых, видимо, падали вниз. Скорее всего они были принесены в бассейн осадконакопления айсбергами или находившимися на плаву шельфовыми ледниками, и это предположение подтверждается наличием обломков со штриховкой. Темно-красный цвет этих пород обусловлен присутствием тонкорассеянного гематита (окиси железа), а в некоторых участках в кровле встречаются железистые кварциты; последние также вмещают дробстоны и, вероятно, формировались во время оледенения.

Вышележащее подразделение группы Рапитан — мощная толща темно-красных, светло-желтых и зеленых микститов. Во многих местах они переслаиваются с алевролитами и песчаниками, которые, судя по текстурным признакам, отлагались водными потоками. Поэтому вполне возможно, что конгломераты и микститы формировались в морской среде. Наличие нескольких разнородных горизонтов микститов свидетельствует о том, что шельфовые ледники или плавучий ледниковый покров наступали несколько раз. Глубина моря, однако, не известна. Некоторые осадочные слои, сильно смятые в складки, указывают на оползание на неустойчивом склоне. О влиянии оледенения свидетельствует присутствие штриховки и борозд на поверхности галек.

Выше этой толщи залегают мощные темно-серые глины с прослоями алевроитов и песков. Имеются некоторые указания, что в отложении этой серии осадков принимали участие турбидитные течения. Нет прямых свидетельств воздействия оледенения на накопление темно-серых глин, но по характеру осадков можно говорить о прогибании бассейна. Повышение уровня моря, возможно, было реакцией на таяние ледников, которые существовали во время отложения двух нижележащих серий осадков.

Эти два примера служат свидетельством в пользу развития оледенения в позднем протерозое и показывают, каким различным могло быть влияние оледенения на осадки. Набор обста-

новок осадконакопления можно было бы расширить, если привлечь типичные отложения позднепротерозойского материкового оледенения Северо-Западной Африки.

Материалы по Шотландии интерпретируются как свидетельство позднепротерозойского оледенения на устойчивом шельфе, тогда как в западной части Северной Америки, судя по характеру отложений, имели место типичные условия ледниково-морской аккумуляции в ограниченном сбросами погружающемся морском бассейне. Следы древнего оледенения обнаруживают явную приуроченность к быстро погружавшимся морским бассейнам, потому что накапливавшиеся в них осадки имели больше шансов сохраниться, чем осадки, формировавшиеся в континентальных или даже мелководных морских обстановках.

ПРОБЛЕМЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Хотя большинство геологов, изучавших верхнепротерозойские осадки, допускают существование широко распространенного оледенения, некоторые авторитетные ученые, например Схермерхорн, доказывают, что многие так называемые «ледниковые» признаки лучше объясняются иным путем. Было много споров по поводу подлинного значения таких следов оледенения, как тиллиты, дропстоны, моренные катыши, штрихованные эрратические обломки и сглаженные поверхности коренных пород.

Тиллиты уже рассматривались в предыдущей главе, и мы лишь упомянем о разных способах их возможного образования. Схермерхорн лишь немногие верхнепротерозойские тиллиты считал подлинными. Он предполагал, что в некоторых случаях перемещение материала (включая крупные глыбы) вниз по склонам могли вызвать землетрясения. Крупные глыбы могут даже нести следы царапин от взаимного трения и тем самым внешне напоминать обломки, отлагавшиеся ледниками. Другой способ образования отложений, по внешнему виду сходных с ледниковыми, — течение и оползание масс осадков по подводному склону. Иногда на таких склонах встречаются крупные камни, которые, попадая в оползневые отложения, могут придавать им мореноподобный облик. Там, где под влиянием землетрясений или какого-либо другого нарушения осадок поднимается, словно шлейф, в окружающей воде, насыщенная этим материалом вода вследствие большей плотности устремляется вниз даже по пологому склону в виде турбидитных течений. Материал, отложенный таким течением, обычно изменяется от грубого у подошвы до мелкого у кровли, поскольку крупные частицы выпадают в осадок раньше, чем мелкие. Такие отложения могут также вмещать камни и по внешнему виду напоминать некоторые разновидности ледниковых отложений.

Возникали дискуссии и по поводу происхождения дропстонов в осадочных породах докембрийского возраста. Обычно их объясняют как результат ледового разноса, но даже камни, выпавшие из плавучего льда, не обязательно свидетельствуют о присутствии ледников, так как лед, образующийся при замерзании прибрежных вод озера или моря, может содержать в основании крупные обломки. Когда такой лед раскалывается на части и подвергается разносу под влиянием ветров и приливов, содержащиеся в нем камни могут вытаять и погрузиться в слоистые осадки на дне водоема. В более молодых осадках, накапливавшихся после появления крупных животных и растений, присутствие подобных камней можно объяснить как результат переноса животными или перемещения корнями деревьев или других растений. Не исключено, что такие камни могли быть выброшены при извержении вулканов. В этом случае, однако, преобладали бы обломки вулканических пород. Ни одно из этих предположений не объясняет исключительного обилия дропстонов разного состава в докембрийских породах, и остается лишь заключить, что тогда действительно присутствовал ледниковый лед.

В некоторых докембрийских отложениях содержатся моренные катыши, похожие на дропстоны, но обычно меньших размеров. Как правило, они состоят из мелкозернистого алевритового материала, который интерпретируется как моренный. Он мог формироваться в ледниках или поблизости от них несколькими различными способами, особенно там, где морены «перемыть» и эродированы тальми водами или подвергались воздействию волн на побережье. Моренные катыши, выпавшие из айсбергов, известны у побережья Аляски, причем их обычно рассматривали как хорошее свидетельство присутствия ледникового льда. Такие находки есть в нижнепротерозойской формации Гауганда и верхнепротерозойских ледниковых отложениях северо-западной части Канады. Однако они служат надежными показателями развития оледенения, только если они действительно представлены моренным материалом.

Еще одна особенность состоит в том, что трудно объяснить иначе, как на основе ледниковой теории, наличие штриховки и шрамов на эрозионных поверхностях, на которых залегают некоторые предполагаемые верхнепротерозойские ледниковые отложения. Такие поверхности в верхнепротерозойских породах были найдены в разных частях света. Высказывалось мнение, что изборожденные поверхности могли быть развиты под селями, но в этом случае они не были бы слишком обширными; гораздо убедительнее объяснять формирование многих таких поверхностей как результат воздействия экзарации.

Штрихованные валуны тоже встречаются во многих из описанных выше отложений, и снова такие находки пытались объяс-



Рис. 109. Верхнепротерозойские породы с признаками штриховки, южная Швеция. Поверхность этих ледниковых пород перекрыта кембрийскими отложениями.

нять воздействием неледниковых процессов. Некоторые штрихованные обломки могут образоваться при движении селей. В складчатых слоях штрихи (царапины) могли появиться после отложения осадка; складкообразование в породах могло вызвать движения между камнями и заполнителем, и такие движения в исключительных ситуациях могут привести к возникновению царапин на поверхности камней.

Однако камни со следами ледниковой штриховки довольно легко опознать. Царапины там обычно развиты на уплощенной или абрадированной поверхности и следуют в нескольких взаимно пересекающихся направлениях. Особое значение придается находкам следов штриховки на небольших обломках прочных пород, так как подобные обломки редко встречаются в таких неледниковых осадках, как селевые.

Геологи обсуждали также значение полигональных образований, которые встречаются на верхних поверхностях отдельных микститовых горизонтов формации Порт-Аскейг в Шотландии и в кровле пород позднепротерозойского «ледникового периода» в Северо-Западной Африке. Как указывалось в предыдущей главе, такие образования обычно рассматриваются как результат сжатия грунта в исключительно холодных условиях. Такая ин-

терпретация более надежна, если удастся выявить следы ледяных клиньев. В то же время доказывалось, что структурный грунт может возникнуть при иссушении, когда лужи высыхают до дна, а клинья могут формироваться путем концентрации солей в жарких пустынных областях. Однако аргументы в пользу существования многолетней мерзлоты представляются убедительными, если структурные грунты широко распространены и ассоциируются с тиллитами и другими свидетельствами холодного климата.

Геологи обратили внимание на тесную связь между доломитами (породами, состоящими главным образом из карбонатного минерала доломита) и предполагаемыми ледниковыми отложениями. В некоторых случаях слои доломититов непосредственно залегают на предполагаемых тиллитах. Это усложняет ситуацию, потому что в современных условиях доломитит, как известно, формируется только в условиях довольно теплого климата, например в районе Персидского залива и Западной Австралии. Иногда доломититы имеют тонкую слоистость, как в ленточных осадках, и могут даже вмещать дропстоны. Одно из возможных объяснений этого состоит в том, что доломититы образовались в результате осаждения мелких частиц доломита, вынесенных ледником при разрушении более древних толщ, сложенных доломититами. Доломититы, ассоциирующиеся с тиллитами, в соответствии с таким объяснением формировались в процессе повторной седиментации в более холодных условиях, тогда как первичный доломитит накапливался в условиях жаркого климата.

Если же некоторые из доломититов, ассоциирующихся с ледниковыми фациями, представляют собой «первичные» осадки, тогда мы должны или признать весьма специфические обстановки (различия в составе атмосферы?) при накоплении доломититов в условиях холодного климата или отвергнуть ледниковое происхождение рассматриваемых пород.

Подобные аргументы использовались для объяснения присутствия в разных частях света обогащенных железом осадочных пород, ассоциирующихся с предполагаемыми позднепротерозойскими ледниковыми фациями. Железистые кварциты — уязвимое место в аргументации тех, кто доказывает существование резкого изменения атмосферы около 2000 млн. лет назад, когда впервые появился свободный кислород. Если это было так, то избыток железа в древнем океане, который должен был бы осадиться примерно в то же время, никогда не восполнился бы из-за нерастворимости железа в условиях обилия кислорода. Как же в таком случае объяснить железистые кварциты, которые часто тесно связаны с позднепротерозойскими ледниковыми периодами? Доказывали, что такие обогащенные железом осадочные по-



Рис. 110. Обломок верхнепротерозойского тиллита из северо-западной Канады. На его поверхности видна ледниковая штриховка.

роды должны были формироваться в тропических условиях, поскольку в настоящее время в таких районах образуются красноцветные обогащенные железом осадочные почвы (латериты). Верхнепротерозойские железистые кварциты представляют собой не почвы, а, по-видимому, хемогенные осадки, отлагавшиеся в морской среде. Однако даже если бы железо накапливалось как нерастворимый материал в почвах в условиях окисления, не ясно, каков был механизм его растворения, переноса и осаждения.

Хорошо известно, что железо — постоянный компонент ряда лав и других магматических пород, которые формируются на дне океана. Такие породы особенно широко распространены в срединно-океанических хребтах, крупных подводных горных цепях, которые, как мы видели в гл. 1, представляют собой районы образования новой коры из материала подстилающей мантии. Породы срединно-океанических хребтов находятся в условиях более высоких температур, чем породы других частей дна океанов, и, вероятно, приурочены к районам, где большие массы морской воды циркулируют через основные магматические породы. Недавние наблюдения и исследования на срединно-океанических хребтах показали, что в подобных условиях такие химические вещества, как железо и кремнезем, растворимы в нагретой морской воде. Эти вещества переходят в осадок, когда нагретая обогащенная железом морская вода перемешивается с обычной морской водой.

Такой механизм, вероятно, объясняет происхождение железистых кварцитов, связанных со многими верхнепротерозойскими ледниковыми отложениями. Роль ледникового льда могла состоять в следующем. Когда ледник достигает уровня моря, он утоняется и распространяется в сторону моря вследствие уменьшения трения о ложе. Таким образом может образоваться шельфовый ледник, находящийся на плаву. Холодные плотные воды из-под основания шельфового ледника поступают в более глубокие части бассейна, где они вытесняют обогащенные железом и кремнеземом воды, которые при этом поднимаются вверх и текут к берегу. Перемешивание с холодными подледниковыми водами могло вызвать осаждение железа и кремнезема, т. е. образование железистых кварцитов. Последние, как полагают, формируются в условиях, очень близких к тем, которые существуют в зонах срединно-океанических хребтов. Это, вероятно, могло происходить в небольших океанических бассейнах, по размерам сопоставимых с морем Баффина, в которое спускаются ледники.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ОЛЕДЕНЕНИЙ

Приняв, что совокупность доступных фактов подкрепляет концепцию о развитии оледенения в позднем протерозое, попытаемся выяснить причину столь широкого распространения этого оледенения.

Прежде всего возникает мысль, что Земля тогда пережила один весьма продолжительный ледниковый период, когда покровы льда достигали даже тропических широт. Эта мысль весьма заманчива, так как с этих позиций ледниковые отложения, примерно одновременно сформировавшиеся на всем земном шаре, можно использовать для корреляции докембрийских пород.

В фанерозойских породах, которые начинаются с кембрия, корреляции большей частью базируются на ископаемых и допускается, что находки определенного комплекса ископаемых служат показателем возраста вмещающих пород. Зато в докембрийских породах, где нет или очень мало ископаемых, корреляцию исключительно трудно осуществить.

С увеличением числа определений абсолютного возраста позднепротерозойских ледниковых отложений выяснилось, что они вовсе не относятся к единому временному срезу. Их возраст изменяется в диапазоне от более 1 млрд. лет примерно до 570 млн. лет (последнюю дату обычно принимают за начало кембрия). Как сообщалось в гл. 1, в списках имеющихся к настоящему времени датировок выделяются определенные диапазоны концентрации цифр, показывающие, что большая часть ледниковых отложений сформировалась около 600 млн. лет назад, но некоторые из них — около 750 млн. лет назад и около 900–950 млн. лет назад. Таким образом, следует отказаться от представления о едином широко распространенном и в геологическом отношении внезапно ледниковом периоде, который можно было бы использовать в качестве показателя возраста верхнепротерозойских пород. С большей вероятностью можно предположить существование трех позднепротерозойских ледниковых периодов. Как обычно бывает в геологии, ситуация оказывается более сложной, чем казалось с первого взгляда.

В гл. 2 отмечалось, что позднепротерозойские оледенения могли наступить под влиянием так называемого «антипарникового эффекта», т. е. под влиянием потери CO_2 из атмосферы как раз перед началом оледенения. Такое предположение возникло потому, что во многих районах ледниковые отложения непосредственно перекрывают мощные толщи карбонатных пород — известняков и доломитов. Образование таких карбонатных пород должно было сопровождаться изъятием значительного количества CO_2 из атмосферы: при этом возросла бы доля солнечной радиации, отражаемой от земной поверхности, что вызвало бы глобальное понижение температур. Эта идея, однако, тоже воспринимается с оговорками, так как над ледниковыми отложениями карбонатные породы тоже широко распространены, а в геологической летописи есть много примеров накопления карбонатных пород на обширных площадях вне всякой связи с оледенением.

Было выдвинуто другое объяснение широкого распространения верхнепротерозойских ледниковых отложений и того факта, что некоторые из этих отложений, по-видимому, формировались в тропических широтах. Оно основывается на изменчивости положения оси вращения Земли по отношению к плоскости, в которой планеты вращаются вокруг Солнца. Было вычислено, что ес-

ли ось вращения Земли наклонена под углом более 54° , то годовое количество энергии, получаемой от Солнца, в высоких широтах будет больше, чем в низких. Таким образом, если угол наклона постепенно увеличивается от 0 до 90° , то при определенных условиях, способствующих возникновению оледенения (например, уменьшение общего потока солнечной энергии), ледниковые обстановки сместились бы из высоких широт в низкие. Эта изящная, но умозрительная гипотеза объяснила бы местонахождение некоторых ледниковых отложений в низких широтах, но, как отмечалось выше, большая часть палеомагнитных данных об оледенении в низких широтах вызывает сомнение.

Широкое распространение оледенения в позднем протерозое также связывалось с быстрым перемещением материков, во время которого последние последовательно «двигались» через области полярных широт и подвергались оледенению. В соответствии с этой гипотезой ледниковые отложения должны были иметь разный возраст на различных материках и поэтому оказываются непригодными для корреляции вмещающих их толщ. При наличии надежных палеомагнитных данных, относящихся к рассматриваемым тиллитам, было бы легче сделать выбор между этой гипотезой и концепцией глобального распространения оледенения. Как сообщалось в гл. 2, крутое наклонение «заключенного» в породах магнетизма показывает, что осадконакопление происходило в высоких палеоширотах, а намагниченность, близкая к горизонтальной, — признак осадконакопления поблизости от экватора. Первоначально считали, что такого рода исследования подтверждают представления об оледенении в низких широтах, но последующие работы, по крайней мере в отдельных случаях, показали, что магнитная история древних пород более сложная, чем предполагалось ранее. В некоторых из этих пород было обнаружено несколько магнитных направлений, а некоторые из них, рассматривавшиеся первоначально как отложения тропических районов, теперь интерпретируются как сформировавшиеся в высоких палеоширотах.

Наиболее приемлемой альтернативой гипотезы глобального оледенения является идея о том, что так называемые ледниковые отложения позднего протерозоя контролировались особым типом горообразовательного процесса, связанного с раздроблением древнейших материков, и это могло ознаменовать становление тектоники плит. В последние годы было затрачено много усилий, чтобы выяснить, можно ли применить концепцию тектоники плит и спрединга океанического дна к породам возрастом свыше 570 млн. лет. Некоторые исследователи полагали, что процессы, связанные с тектоникой плит, включая образование и замыкание древних океанов, начались с архейского времени, т.е. более 2600 млн. лет назад. Другие считали, что процесс раз-

дробления материков начался немного позднее, тогда как третьи высказывали мнение, что подобное раздробление началось около 800–900 млн. лет назад. Распад древних материковых массивов, вероятно начавшийся над наиболее нагретыми частями мантии, по-видимому, сопровождался поднятием окраин вновь сформированных океанических бассейнов. Такая обстановка идеально подходит для развития гравитационных отложений, которые внешне весьма похожи на ледниковые отложения.

Ситуация впоследствии могла осложняться формированием горных ледников на поднятых окраинах океанических бассейнов: в умеренных и высоких широтах такие ледники спускались к морю и их отложения могли сохраняться в небольших океанических бассейнах наряду с оползновыми отложениями и турбидитами, связанными с землетрясениями и сбросовой тектоникой.

Как отмечал Схермерхорн, многие из так называемых ледниковых отложений позднего протерозоя сохранились на краях подобных бассейнов, контролируемых разломами. В соответствии с этой идеей наиболее важным фактором было горообразование, а не установление суровых климатических условий (см. раздел «Горообразование» в гл. 2). Во многих районах, однако, имеются явные доказательства обширного накопления ледниковых отложений в позднем протерозое, что, возможно, сопровождалось оползновыми процессами и движением масс обломочного материала по склонам. Хотя в некоторых областях формирование этих отложений происходило под воздействием горных ледников, остается мало сомнений в том, что во время каждого ледникового периода позднего протерозоя также широко распространялись материковые ледниковые покровы.

До сих пор окончательно не решен вопрос о характере и происхождении ледниковых отложений позднего протерозоя. Прежние представления о едином материковом оледенении глобального масштаба оказались несостоятельными. С появлением новых палеомагнитных данных и радиоизотопных определений возраста, вероятно, увеличится количество аргументов, свидетельствующих о существовании по крайней мере трех самостоятельных ледниковых периодов. Установление этих периодов, вероятно, стимулировалось вертикальными движениями земной коры (способствовавшими развитию горного оледенения) и горизонтальными движениями материков (благодаря которым различные материки последовательно перемещались в высокие и умеренные широты). Таким образом, в нашем распоряжении имеются весьма обширные данные об оледенении в позднем протерозое. Развитию оледенений тогда благоприятствовали особые условия горообразования в сочетании с быстрым перемещением материков, но основной причиной каждого периода экспансии льдов, вероятно, было глобальное похолодание.

5. СЛЕДЫ ОЛЕДЕНЕНИЯ В ПУСТЫНЕ:

ОРДОВИК

Родс Фейрбридж

Существование ордовикского ледникового периода было доказано лишь в 1970-х годах главным образом потому, что большая часть фактов была получена в отдаленных тропических районах, геологическое изучение которых еще только начиналось. Этот ледниковый период характеризовался значительной продолжительностью (возможно, около 25 млн. лет), и его следы сохранились на обширной территории древнего суперконтинента Гондвана. Так же как и во время ледниковых периодов докембрия, ордовикские ледниковые покровы, вероятно, частично имели материковый, а частично — морской характер, и есть факты, указывающие на то, что по крайней мере один из краев ледникового покрова был весьма неустойчивым в гляциологическом отношении. Продолжается быстрое накопление полевых данных, и наверняка в ближайшие 10 лет наши схематические представления об этом ледниковом периоде будут уточнены и, возможно, существенно изменятся.

Ордовикский мир сильно отличался от современного. Как упоминалось в гл. 1, ордовикский период, продолжавшийся в интервале от 500 млн. до 440 млн. лет назад, был временем, когда материки, включавшие ряд кратонов (областей докембрийских щитов), были весьма рассредоточены и их очертания резко отличались от контуров современных частей света. Однако мы знаем, что древние кратоны Северной Америки, Европы и Сибири находились в тропических или субтропических областях, а часть суперконтинента Гондвана тоже располагалась в тропиках. Около Северного полюса, по-видимому, не было суши, но в Южном полушарии большая часть Гондваны располагалась в высоких широтах. Значительная часть территории выше 60° ю. ш. была занята сушей, и в результате дрейфа материков Южный полюс перемещался из района нынешней Северо-Западной Африки в кембрии через Сахару почти до бассейна Конго в позднем ордовике. В силуре суперконтинент продолжал перемещаться через южные полярные районы.

В ордовикский период большие площади континентальных окраин были затоплены мелководными морями, и там происходил ряд четко выраженных морских трансгрессий и регрессий.

Многие осадочные породы – известняки, песчаники, алевролиты и глинистые сланцы – имеют морское происхождение и богаты ископаемыми. Отмечаются также конгломераты и крупнозернистые песчаники с известковым цементом. В более глубоких водах формировались такие породы, как аргиллиты, алевроитовые известняки и черные сланцы. В ордовике весьма активно проявлялся спрединг океанического дна и на краях древних кратонов постепенно развивались геосинклинали. При столкновениях краев плит создавались горные хребты и местами интенсивно проявлялась вулканическая деятельность.

В течение ордовика, вероятно, активизировалась эрозия поверхности суши, так как в то время не было наземной растительности, ослабляющей влияние стока поверхностных вод. Кроме того, происходило быстрое выветривание обнаженных пород и интенсивный вынос продуктов выветривания и рыхлых осадков мириадами потоков и рек.

В некоторых областях, например во внутриконтинентальных частях «древней Сибири» и австралийской части Гондваны, климат был теплый и сухой, что способствовало формированию красноцветных пород и эвапоритов. В высоких же широтах во время похолодания, которое достигло кульминации в ордовикский ледниковый период, во внутриконтинентальных районах, по-видимому, существовала вечная мерзлота. В морях умеренных и высоких широт температуры воды понизились настолько, что стало невозможным существование большинства таких организмов, как граптолиты, которые прежде в обилии распространялись в этих районах. Примерно около 480 млн. лет назад произошло существенное похолодание климата Земли и начался ордовикский ледниковый период.

СХОДИМОСТЬ ДОКАЗАТЕЛЬСТВ

Открытие ордовикского ледникового периода – одно из самых ярких событий в новейшей истории наук о Земле. Оно опирается на сходимость доказательств, собранных тремя совершенно независимыми путями.

Первый из них связан с долгопериодной повторяемостью геологических событий. Эта проблема уже обсуждалась в гл. 2, где рассматривалась кажущаяся закономерной повторяемость ледниковых периодов в геологической истории. Учитывая это положение, а также то обстоятельство, что зимы планеты, видимо, составляли не более 10% всего геологического времени, в 1950-х годах обратили внимание на отсутствие признаков существования ледникового периода в середине интервала между эокембрием (около 650–700 млн. лет назад) и пермско-каменноугольным временем (около 250–300 млн. лет назад). Я привлек вни-

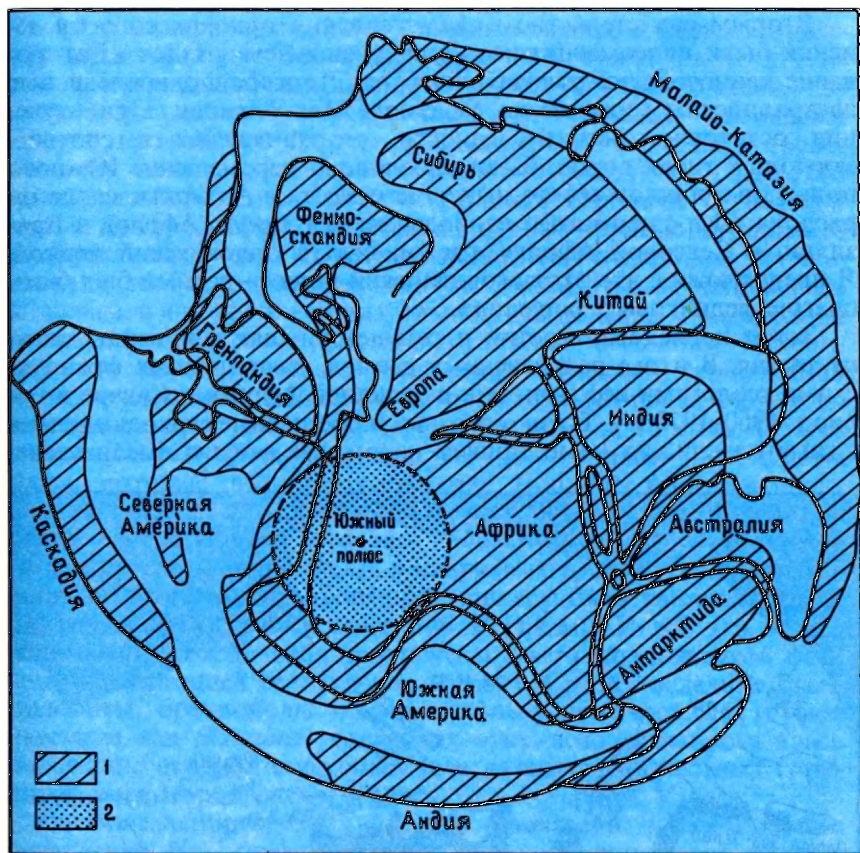


Рис. 111. Малоизвестная реконструкция ордовикской Пангеи, составленная Грабау и опубликованная в Китае в 1940 г.

Большое научное значение имеет тот факт, что Грабау составил эту палеогеографическую модель по данным изучения ископаемых и стратиграфии. Ясно видно, что в то время Западная Африка была холодной областью, а южные материк соединялись между собой. Данные о палеомагнетизме и теория тектоники плит появились лишь спустя несколько десятилетий.

1 — основные области суши; 2 — район предполагаемого ледникового покрова.

мание к рассматриваемому пробелу и наметил приблизительное положение цикла оледенения еще в 1960 г. Почти одновременно или даже раньше¹ советский ученый Г.Ф. Лунгерсгаузен высказал независимо от меня аналогичное предположение.

¹ Лунгерсгаузен Г. Ф. Периодические изменения климата и великие оледенения Земли (некоторые проблемы исторической палеогеографии и абсолютной геохронологии). — Советская геология, 1957, № 59. — Прим. перев.

Вторым свидетельством существования ордовикского оледенения были палеомагнитные исследования (см. раздел «Датирование кайнозойских отложений» в гл. 7), особенно проведенные австралийским геофизиком Майклом Мак-Элхинни. При изучении остаточной намагниченности, сохранившейся в соответствующих типах пород, было прослежено перемещение Южного полюса в прошлом от его нынешнего места в Антарктиде, где он располагался с пермского периода, через Южную Африку и Бразилию к Северной Африке, где он был в ордовикский период. Я предположил, что этот «гондванский полюс» должен был быть очагом ледниковых формаций.

Затем последовал третий и решающий шаг в истории этого открытия. В итоге разрозненных съемок, выполненных французскими геологами-нефтяниками в Западной Африке и Сахаре в период 1960–1970 гг., были сделаны любопытные находки слоев с гигантскими валунами, причем некоторые валуны имели следы

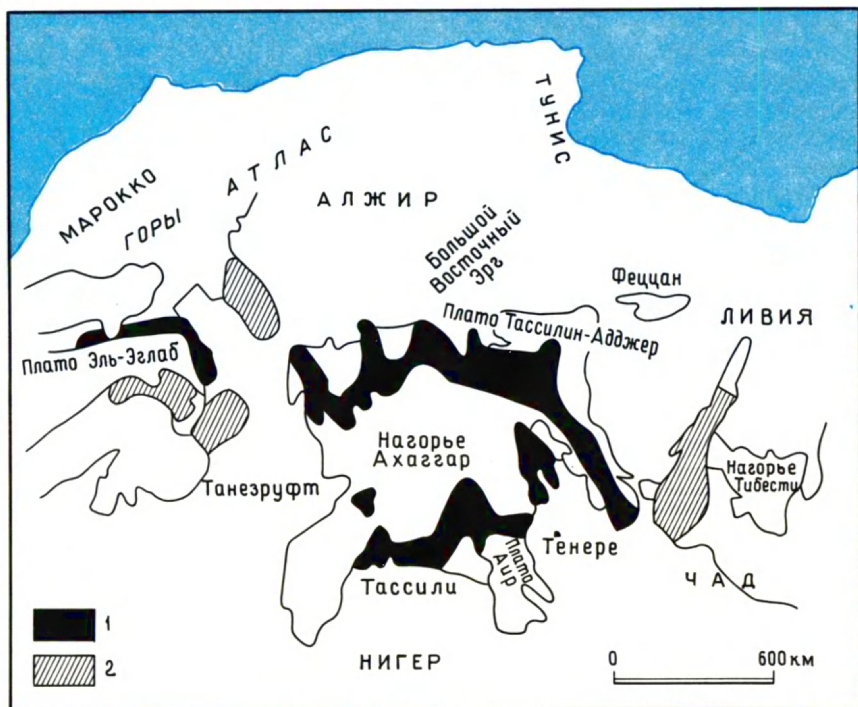


Рис. 112. Карта Северо-Западной Африки.

Показаны области, в которых французские геологи-нефтяники в 1960–1970 гг. обнаружили следы ордовикского оледенения.

1 — области детальных полевых исследований; 2 — рекогносцировочные съемки.

ледниковой штриховки. Далее в южном Алжире, к востоку от нагорья Ахаггар, Серж Бёф и его коллеги из Французского института нефти обнаружили длинный ряд гигантских рытвин, которые оказались не перекрытыми движущимися песчаными дюнами центральной Сахары. Убедившись в ледниковом происхождении этих образований сотрудники института совместно с алжирскими геологами пригласили международную группу экспертов по проблемам оледенения, чтобы продемонстрировать обнаруженные формы. В течение нескольких недель мы путешествовали по Сахаре, передвигаясь по сухим руслам, поднимаясь на холмы и проводя аэровизуальные наблюдения с небольшой высоты. Наконец, мы подошли к гигантским рытвинам. Выяснилось, что они отмечены небольшими шрамами серповидной формы, очень похожими на те, которые образуются за счет сильного трения, производимого перекачиваемыми гальками у основания современных ледников. Там наблюдались исполиновые котлы, которые возникают за счет мощной турбулентности в подледниковых потоках, а также валунные слои с обломками пород, принесенными за сотни километров от их источников, и обширные формации желтых кварцевых песков, типичных для зандровых отложений, сформировавшихся близ тающих ледников, как, например, в современной Исландии. И все эти веские свидетельства оледенения приурочены к верхнеордовикской формации, содержащей остатки ископаемых. Среди последних были трилобиты, брахиоподы и своеобразные вертикальные трубки, известные как *Skolithos*; коллекция этих ископаемых оказалась необычайно сходной с ископаемыми из хорошо известных горизонтов позднеордовикского возраста в северном Уэльсе.

На приехавших ученых все это произвело ошеломляющее впечатление. Нам предоставилась возможность увидеть под палящим солнцем Сахары явные следы гигантского оледенения точно известного возраста, которое произошло как раз в том интервале, где оно предсказывалось по палеомагнитным данным. Наши французские хозяева были подготовлены к такому открытию. В нашем вещевом фургоне был холодильник, из которого, словно по мановению волшебной палочки, была извлечена бутылка превосходного сильно охлажденного шампанского, и мы распили ее за здоровье открывателей и гостей и за ордовикский ледниковый период.

ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ

К 1970 г. было сформулировано заключение, что здесь в самом сердце самой жаркой пустыни мира, примерно в 25° к северу от экватора, действительно имеются бесспорные свидетельства крупного материкового оледенения. Теперь геологи ста-

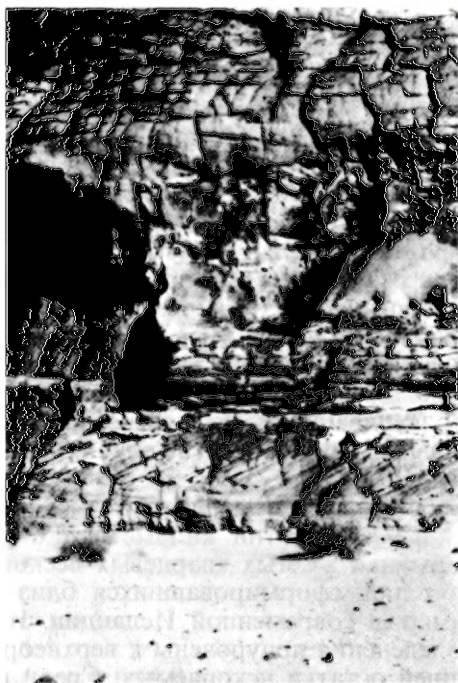


Рис. 113. Часть верхнеордовикской ледниковой толщи в пустыне Сахара.

В середине толщи виден несложный тиллит с белыми эвратическими глыбами. Нижележащие косослоистые отложения – песчаники, накопившиеся на шельфе, а выше лежащие массивные породы со сложной системой трещин – древние водно-ледниковые пески, образовавшиеся во время деградации оледенения.

ли выяснять отличительные особенности ордовикского ледникового периода. Они также стали интересоваться гляциологическими характеристиками ордовикского льда, а также распространением и продолжительностью этого оледенения.

Вероятно, особенно поразительным было то, что главные свидетельства оледенения поступили из центральной части области обширного докембрийского щита, более чем на 1000 км удаленной от края любой древней или современной плиты. Подстилающее «основание», сложенное докембрийскими гнейсами, кристаллическими сланцами и гранитами, представляет собой выположенную поверхность древнего пенеплена, которая несогласно перекрывается почти горизонтально лежащими ордовикскими осадочными породами, главным образом песчаниками. Несогласие часто маркируется слоем ярко-красного гематита мощностью до нескольких сантиметров. Мог ли он быть реликтом докембрийской или кембрийской почвы? В настоящее время сильно обогащенные железом почвы строго приурочены к влажной тропической зоне.

Ознакомление с обширной территорией Западно-Африканского щита позволило установить, что перекрывающие ордовикские песчаники не отличаются горизонтальным залеганием. Они образуют широкие купола и впадины радиусом около 500–1000 км и высотой до 3000–5000 м. Наклон пластов обычно почти незаметен, однако там, где происходило относительно недавнее разломообразование, пласты могут быть наклонены под крутыми углами. Названные разломы большей частью унаследованы от докембрийских линейментов, в этой части Африки преимущественно ориентированных с севера на юг. Они весьма отчетливо различаются на космических снимках этой открытой территории, лишенной почвенно-растительного покрова. По отдельным разломам могли происходить повторные движения в течение последнего миллиона лет, и благодаря этому сформировались каналы, по которым из мантии к поверхности поднимались базальтовые расплавы. Среди этих очагов вулканизма наиболее внушительных размеров достигает сводовое поднятие Тибести, но группы очагов меньших масштабов имеются на нагорье Ахаггар, плато Аир и в других областях.

Плоская поверхность доордовикского пенеплена имела решающее значение для выяснения истинной природы ордовикских ледников. Некоторые авторы высказывают такие замечания: «В

Рис. 114. Характерные выходы песчаных ордовикских тиллитов в центральной Сахаре к востоку от нагорья Ахаггар и к югу от Джанета в Алжире.



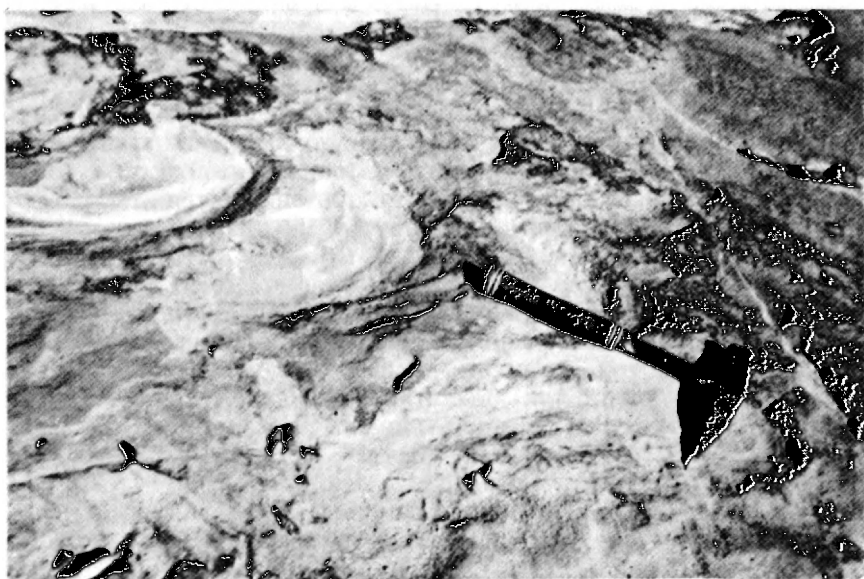


Рис. 115. Линейные штрихи и борозды, оставленные на поверхности подстилающих песчаников ордовикским льдом, который двигался с юга на север, южный Алжир.

Такие борозды прослеживаются на сотни километров, кроме участков, где они перекрыты песками пустынь.

Рис. 116. Серповидные выемки, созданные мощными потоками талых вод подо льдом (в условиях высокого гидравлического давления).

Такие формы известны в некоторых районах Швеции, они представляют собой следы воздействия Скандинавского ледникового покрова во время последнего оледенения.



настоящее время в тропических широтах много высокогорных ледников. Ваши африканские данные просто показывают, что Ахаггар в то время был поднят». Однако поверхность пенеплена в районе Ахаггара образует лишь пологосводное поднятие. Если бы там располагался высокий горный хребет, мы находили бы много конгломератов, а также мощные толщи других осадков. На самом деле там нет признаков ни мощной аккумуляции осадков, ни смешения разных типов осадков.

Истинный характер ледниковых отложений, обнаруженных в Сахаре, вызвал споры. После публикации новых данных в 1970 г. один из критиков писал, что все мы введены в заблуждение находками валунов гранитов и других пород дальнего заноса в так называемых тиллитах. В действительности эти отложения якобы надо относить к «микститам» (смешанным несортированным осадочным породам) или к «диамиктитам» (то же самое, но с большим разнообразием фаций); оба термина точнее характеризуют тип формации, не навязывая какого-то особого способа образования. В соответствии с определением и описанием, приведенными в гл. 3, «тиллит» представляет собой древнюю литифицированную «морену», а морена определяется как порода специфически ледникового происхождения, содержащая обломочный материал всех размерностей, включая гальки и валуны, залегающие именно так, как они были отложены на ложе ледника. Доктор Л. Схермерхорн, выдающийся голландский специалист, имеющий большой опыт исследований в различных регионах мира, предположил, что подобные смешанные обломочные породы могли быть созданы гигантскими оползнями (см. гл. 4). Это выглядело бы правдоподобно, но ведь не на площади в тысячи километров! И там, где затем образовалась почти удручающе плоская поверхность!

Я имел продолжительную и полезную переписку с доктором Схермерхорном, который опубликовал обстоятельные и резкие критические статьи о ледниковых теориях. За эту критику все мы должны его благодарить, так как она позволила нам подготовиться к защите нашей концепции и взглянуть с других позиций на некоторые положения, представлявшиеся бесспорными. Решающее значение среди аргументов Схермерхорна (применимых, как мы видели, и к докембрийским, и к ордовикским оледенениям) придавалось большому диапазону широт районов, где были найдены так называемые ледниковые отложения независимо от механизма перемещения материков (тектоника плит или миграция полюсов). В определенных областях – не в центральной Сахаре, но, например, в Марокко – есть известняки, которые содержат обитавшие в теплых морях ископаемые, отложившиеся рядом с ледниковыми осадками. Доктор Джордж Уильямс из Мельбурна, Австралия, объясняет этот парадокс изменениями

положения оси вращения Земли за длительные периоды времени. Угол наклона Земли не может быстро измениться, но в масштабе геологического времени он, конечно, не оставался постоянным. Каждая из планет имеет разный наклон, и известные речные долины на Марсе наверняка могли образоваться в прошлом, когда наклон планеты благоприятствовал сезонному таянию льда. Увеличение наклона оси вращения Земли также обострило бы сезонный характер климата, при этом теплые летние сезоны чередовались бы с холодными зимами в большом диапазоне широт. Эта стимулирующая теория получила энергичную поддержку со стороны палеоботаников, которые в своих исследованиях показали, что в некоторые интервалы истории Земли тропические растения могли расселяться гораздо шире (ближе к полюсам), даже с учетом всех перемещений, обусловленных тектоникой плит (за последние 200 млн. лет они довольно хорошо известны).

Особенностью ордовикских ледниковых отложений – их преимущественно песчаный состав. Типичные морены Великобритании, ФРГ и Северной Америки представлены «валунными глинами». Вязкий голубовато-серый материал таких валунных глин со временем приобретает сланцеватость, но в африканских отложениях обнаружено лишь небольшое количество сланцеватых пластов. Действительно, области, где во время отступления льдов протекали потоки талых вод, которые отлагали водно-ледниковые осадки, – это обширные зандры (см. гл. 3), хорошо известные на равнине Мидленд в Великобритании, на Северо-Европейской равнине и в поясе, пересекающем территорию США от Небраски до Лонг-Айленда и мыса Код. Но эти зандры сложены не мореной. Подлинными ордовикскими тиллитами состоят главным образом из валунов и гальки, рассеянных в песчаниках или алевролитах. Почему же многие из этих отложений имеют такой песчаный характер?

Ответить на этот вопрос можно с позиций палеогеографа. Мы должны представить себе характер раннеордовикского рельефа в Африке перед наступанием ледника. Большая часть Западной Африки еще раньше испытала варангское, или эокембрийское, оледенение. Какие следы остались в рельефе после деградации этого оледенения? Конечно, там должны были остаться обширные зандры. Затем кембрийские и последующие ордовикские моря затопили сушу, создав обстановки широкого шельфа, где набегавшие волны переносили рыхлые пески, перераспределяя их на обширных песчаных берегах и подводных песчаных склонах. Некоторые из этих шельфовых песчаников прекрасно сохранились, и теперь можно ясно выявить признаки, типичные для интенсивного воздействия волновых процессов и течений на шельфе. Раньше французские исследователи не на-

ходили в них ископаемых и считали, что эти песчаники отлагались в поймах рек. С расширением и углублением представлений по седиментологии эти текстуры напластования были диагностированы как морские, а не речные, и благодаря более детальным исследованиям было получено много полезных сведений.

Прежде всего — и это особенно важно — выяснилось, что в некоторых тонких слоях сланцеватых глин прекрасно сохранились ископаемые — трилобиты и брахиоподы, весьма сходные с формами, найденными в карадокских сериях позднего ордовика Великобритании. В большинстве мест на мелководье раковины этих организмов были бы разбиты под сильным воздействием волн. В составе нашей группы экспертов был профессор Тюбингенского университета, ФРГ, Адольф Зайлахер, известный знаток фауны трилобитов. Он хорошо разбирается в отпечатках трилобитов (известных под названием *Cruziana*) и в случае их хорошей сохранности может различать отдельные виды. Во время последующих поездок он обнаружил следы трилобитов на всей площади Северной Африки.

Далее во многих местах на поверхности песчаников исключительно хорошо сохранились знаки ряби и текстуры, обусловленные течениями. В одном месте я обнаружил предполагаемые следы водорослей. Крупные многоклеточные наземные растения тогда еще не существовали, но морское мелководье было весьма благоприятным в экологическом отношении для развития растений.

Таким образом, можно сделать вывод, что мелководные песчаные формации были широко распространены на территории Северной Африки в позднем ордовике. Ледниковые покровы могли надвигаться на шельфы, как это происходит в настоящее время в Западной Антарктиде, а не на материковые равнины, что было свойственно для Северной Европы и Северной Америки в плейстоцене.

ДВИЖЕНИЕ ЛЬДА

Наибольший интерес вызывает предполагаемое направление движения льда в Северной Африке. Оно происходило с юга, т.е. со стороны нынешнего экватора. Древние льды могли двигаться несколькими путями.

При взгляде на карту восточной части современной Антарктиды можно заметить, что материковый лед движется к побережью по системам разветвленных долин. В Северной Африке ордовикские палеодолины сходились к северу или северо-западу. Подобно современным долинам, заполненным льдом, они обычно достигали 1000 м в поперечнике, а их глубина составляла 100–300 м. Почти полвека назад геологи указали на существова-

ние в Северной Африке своеобразных ущелий в песчаниках кембрия и ордовика; эти формы неоднократно расчищались, а затем заполнялись более молодыми отложениями. Во французской литературе для обозначения этого процесса применяется термин *gavinement*¹. Некоторые глубокие долины, вероятно, представляют собой настоящие трогги, выработанные ледниковой эрозией. Однако большая часть их, по-видимому, была сформирована бурными водными потоками.

Каково же было воздействие этих гигантских потоков? Вернемся снова к модели плейстоценового оледенения, описанной в гл. 3 (см. раздел «Деятельность талых ледниковых вод»). Влияние ледяной нагрузки в ордовике, естественно, способствовало прогибанию земной коры в области, где лед формировался на суше. Периферическое положение по отношению к этой чашевидной зоне погружения занимала предледниковая зона изостатического поднятия. Во время таяния льдов после их широкого распространения (таких циклов наступания и убывания льдов было много) на внешнем краю центральной области погружения формировались системы озер, которые с одной стороны подпружились краем отступавшего ледникового покрова, а с другой — предледниковой зоной изостатического поднятия. После окончательного таяния льдов на месте центральной зоны погружения земная кора поднималась, и это сопровождалось ее опусканием на месте предледниковой зоны поднятия. При этом происходил быстрый спуск озер. Формировавшиеся потоки прорезали свои русла в бывшей предледниковой зоне изостатического поднятия, и эти формы приобретали облик глубоких ущелий. При последующем повышении уровня океана они могли превращаться в заливы и выполняться осадками.

В общем можно сказать, что выработанные льдом палеодолины и ущелья, сформированные в ходе только что описанного нами процесса, обычно радиально расходились от древних центров оледенения. Все было бы понятно, если бы эти центры оледенения симметрично располагались вокруг полюсов, но ситуация оказалась отнюдь не столь простой. В предыдущих главах было показано, что снег (и лед) обычно накапливается в местах, определяемых метеорологическими закономерностями. Благоприятные ситуации возникают там, где влажный воздух с океанов встречается на своем пути холодный полярный фронт; такие места, видимо, довольно удалены от полюса, который часто является центром «ледяной пустыни». Потоки льда обычно радиально растекаются от центров ледниковых покровов, и при

¹ В переводе «образование ущелий и теснин», может означать также вообще «размыв». — *Прим. перев.*

этом иногда можно обнаружить, что лед движется как раз *по направлению* к полюсу. Однако, опираясь на статистические данные, правильнее будет сказать, что движение льда в общем происходит от полюсов. Таким образом, чтобы правильно интерпретировать эти явления, необходимы дополнительные наблюдения.

Для реконструкции направлений движения древних ледников могут быть полезны детальные полевые исследования. Сюда входит тщательное изучение поверхности коренных пород, подвергавшейся ледниковой обработке. Последняя проявилась в образовании холмистых форм, включая бараньи лбы, описанные в гл. 3. В Сахаре, так же как и в других местах, эти холмы, выработанные в плотных породах, часто имеют асимметричное строение: они сглажены и выположены со стороны, откуда надвигались льды, и раздроблены с противоположной стороны. Сама поверхность коренных пород обычно изборозжена тонкой штриховкой, причем отдельные штрихи начинаются с резкого углубления и выклиниваются к концу в зависимости от того, где режущая галька была удалена. Местами встречаются серии борозд движения, ряды врезанных шрамов, которые выклиниваются по направлению движения льда. Хорошими показателями служат также серии небольших трещин серповидной формы. В некоторых районах, обследованных во время экспедиции 1970 г., были обнаружены рифленые морены; подобно изборозженным шрамам и штриховкой поверхности коренных пород, они представляют собой очевидные свидетельства движения древних льдов в определенном направлении.

Когда лед повторно надвигался на твердые коренные породы, он стремился содрать рыхлый покров и привести свою форму в соответствие с устойчивым ложем. Что происходит, когда лед наступает по шельфу, выстланному рыхлым песком? Можно было бы ожидать, что произойдет выпаживание глубоких палеодолин, но на плоских внутренних равнинах Сахары лед, по-видимому, весьма равномерно двигался в условиях песчаного ландшафта. В таких областях лед оставляет длинные взаимно параллельные борозды, которые иногда можно проследить на огромных расстояниях. Борозды обычно имеют размеры в поперечнике 50 см на 2 м и осложняются более мелкими грядами и ложбинами. Подстилающие песчаники вовсе не нарушены, и можно убедиться в том, что при наступании льда грунты, вероятно, были скованы вечной мерзлотой. Когда лед наступал, трение под ним создавало тонкую пленку талой воды, как при катании на коньках (см. раздел «Движение ледников» в гл. 3). На внутренних поверхностях борозд различимы крохотные знаки ряби, ориентированные поперечно или под острыми углами к направлению движения льда. Подобные формы в других местах не обнаружены, но они могут наверняка присутствовать.



Рис. 117. Небольшие тундровые кратеры из илистого материала, образованные при сезонном оттаивании верхнего слоя мерзлоты, восточная Гренландия.

Длина линейки около 30 см. Такие формы микрорельефа, возможно, имеют такое же происхождение, как и «тундровые кратеры» Сахары.

Один из французских геоморфологов Пьер Роньон, изучавший Алжир, обнаружил интересные системы радиальных разломов, заполненных песком. По его мнению, прежде на их месте находились такие же трещины, которые характерны для областей вечной мерзлоты в Арктике. Некоторые трещины могут быть следами древних ледяных клиньев, и часть нашей группы была убеждена в присутствии структурных грунтов на поверхности. Роньон также показал нам зоны округлых углублений, напоминающих неглубокие котловины, вырытые тальми водами в мерзлом грунте под ледником. Доктор Андерс Рапп, специалист из университета города Упсала, Швеция, признал их сходство с формами, которые образовались во время таяния Скандинавского ледникового покрова в четвертичный период.

В арктических районах Канады и сибирской тундре с вечной мерзлотой и ее последующим таянием связан ряд специфических форм. Одна из простейших форм — так называемый «тундровый кратер», небольшое углубление, в котором тающий подземный лед создал источник, прикрытый песком, похожий на миниатюрный вулкан. Пьер Роньон показал нам десятки таких форм в Сахаре. Их средний диаметр колеблется от 1 до 5 м, а глубина достигает 2 м. Многие из них прекрасно сохранились; возможно, они извергали воду, а затем были быстро погребены. В против-

Рис. 118. Косослоистые ордовикские песчаники, сформированные на задровых равнинах к востоку от нагорья Ахаггар, Алжир.



ном случае они могут быстро замерзнуть в условиях вечной мерзлоты. Там, где эродированы поверхностные слои, питающие каналы этих «песчаных вулканов» четко выражены в виде вертикальных столбиков диаметром 20–30 см из однородного кварцевого песчаника. Такие явления не характерны для обычных горизонтально слоистых осадков. Мне представляется (хотя это и трудно доказать), что большие скопления рассматриваемых форм в осадочных породах возникали перед наступавшим ледником благодаря давлению, которое он оказывал на насыщенные водой песчаные формации.

Так же как и четвертичные ледники, повторно наступавшие на территории, ранее подвергавшейся оледенению, ордовикский ледниковый покров обычно отличался плавным движением. Тем не менее местами он мог нарушить текстуры подстилающих формаций. В одних случаях эти нарушения принимали форму миниа-торных складок и разломов, а в других — подстилающие (ранее горизонтально залегавшие) пласты были разбиты на крупные блоки, которые нагромождались один на другой, последовательно выступая, подобно черепицам на крыше. Некоторые складчатые формы могут указывать на деформацию немерзлых грунтов перекрывающим льдом, тогда как разломы можно рассматривать как результат раскалывания мерзлых пород за счет деформаций, вызванных напряжениями подо льдом (см. гл. 3). В таком случае ордовикский ледниковый покров мог, хотя бы отчасти, иметь в основании температуры ниже точки плавления.

Во время отступления ледникового покрова в Северной Африке перед его краем формировались обширные зандры точно так же, как впоследствии во время четвертичных оледенений в северных странах. Поверхность этих зандров осложнена песчаными холмами и грядами, которые представляют собой древние береговые линии и бары и пересечены ложбинами потоков талых вод. На месте этих ложбин позже возникли извилистые долины, которые можно проследить на плоских поверхностях африканских плато, но любопытно отметить, что в настоящее время рельеф обращенный. Бывшие речные галечники и пески впоследствии были сцементированы отлагавшимся из грунтовых вод кремнеземом. Это закрепило пески, придав им прочность кварцита. Во время продолжительных эпох выветривания и эрозии другие участки песчаной равнины подверглись разрушению, тогда как древние русла стали выделяться в виде гряд на фоне более низкой поверхности. В некоторых местах можно видеть, что осадки более молодых приледниковых потоков секут более древние осадки. Картина необычайно наглядная; лучше всего ее наблюдать сверху, когда самолет летит на небольшой высоте, что позволяет оценить общие палеогеографические особенности водно-ледниковой равнины, созданной потоками талых вод.

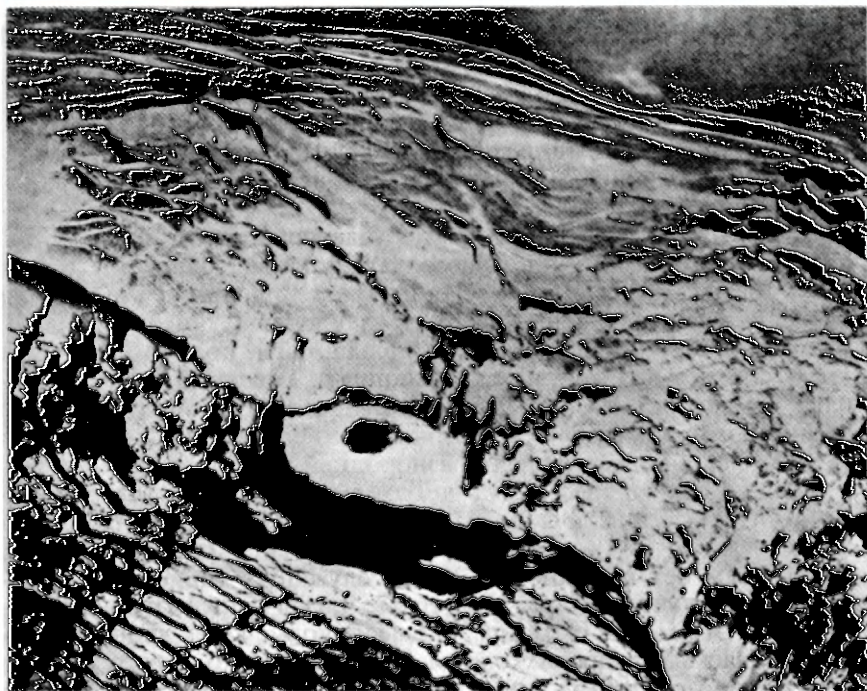


Рис. 119. Вид на кальдеру Гримсвети на ледяной шапке Ватнайёкюдль, Исландия.

Эта кальдера, маркируемая по понижению на поверхности льда, связана с подледниковой вулканической деятельностью. Подобные формы рельефа могли быть представлены на поверхности ордовикского ледникового покрова Сахары.

В некоторых местах выражены лабиринты длинных извилистых гряд, простирающихся к северу. На поверхности они имеют форму железнодорожных насыпей и сложены косо-слоистыми песчаниками. Иногда залегание песчаников на бортах гряды нарушено оползнями так же, как на склонах современных озов. Большая часть этих гряд, вероятно, представляет собой настоящие озы, сформированные под ледником тальми водами, которые текли от отступавшего края ледника на север. Это, видимо, подтверждается присутствием дельт на северных концах некоторых гряд: вероятнее всего, они сформировались, когда потоки талых вод утратили свою транспортирующую способность, достигнув выходов из ледниковых туннелей. Здесь снова мы видим близкое сходство с концами современных ледников, где потоки талых вод вырываются из гротов.

Одно из самых впечатляющих ледниковых явлений наблюдается в современной Исландии, когда происходит извержение вулкана *под* ледяной шапкой Ватнайёкюдль. При этом лед ис-

ключительно быстро тает, что вызывает катастрофический паводок. Сходные процессы происходят в северной Японии и на Камчатке. Как отмечалось в гл. 3, для обозначения катастрофического паводка применяется исландский термин «йёкюдльхлёуп». В 1934 г. во время подледникового вулканического извержения йёкюдльхлёуп длился всего восемь дней, а сток оценивался в 15 км^3 .

К востоку от нагорья Ахаггар участники экспедиции 1970 г. имели возможность увидеть несколько замечательных кольцевых структур диаметром до 1 км. На их краях ордовикские песчаники были круто взброшены вверх и наклонены под углом 45° . В большинстве случаев середина кольца была полностью занята движущимися песками, перекрывающими коренные породы. Однако внутри одного кольца было заметно небольшое поднятие с выходами темного мелкозернистого базальта, окруженного мелкообломочной брекчий – разнородной смесью плотно сплавленных обломков песчаника и базальта (типичная порода исландских йёкюдльхлёупов). Мы не отвергали вероятность, что кольцевые структуры представляют собой метеоритные кратеры, однако там нет конусов дробления, служащих типичными показателями сильного удара. Некоторые члены нашей группы полагали, что это могли быть древние ледниковые котловины или даже ископаемые гидролакколиты (пинго). Однако в этом случае невозможно объяснить присутствие базальта и брекчий. Доктор Роберт Диц, специалист по этим «астрономическим» вопросам, исследовал все известные находки подобных форм в Алжире и пришел к выводу, что гипотеза подледникового извержения наиболее правдоподобна.

ПОЛЯРНОЕ МОРЕ

В Алжире к северу от плато Тассилин-Ахаггар, где обнаружены прекрасные обнажения, ордовикские породы полого погружаются в обширную впадину. Мощность песчаников увеличивается, и, очевидно, в то время там располагался морской бассейн с обилием плавучих льдов. Отложения этой впадины хорошо изучены благодаря интенсивному бурению на нефть. В известном нефтеносном районе Хасси-Мессауд коллекторами являются ордовикские ледниковые песчаники. Пористость песчаников на глубине высокая, но из-за наличия глубоко врезаемых долин, заполненных осадками, эксплуатация месторождений затрудняется. Ордовикские ледниковые песчаники, насколько нам известно, – единственные формации, служащие первичными коллекторами этого нефтеносного района.

Материковый ледниковый покров вырабатывает длинные параллельные борозды. Даже в палеодолинах ледниковые языки не

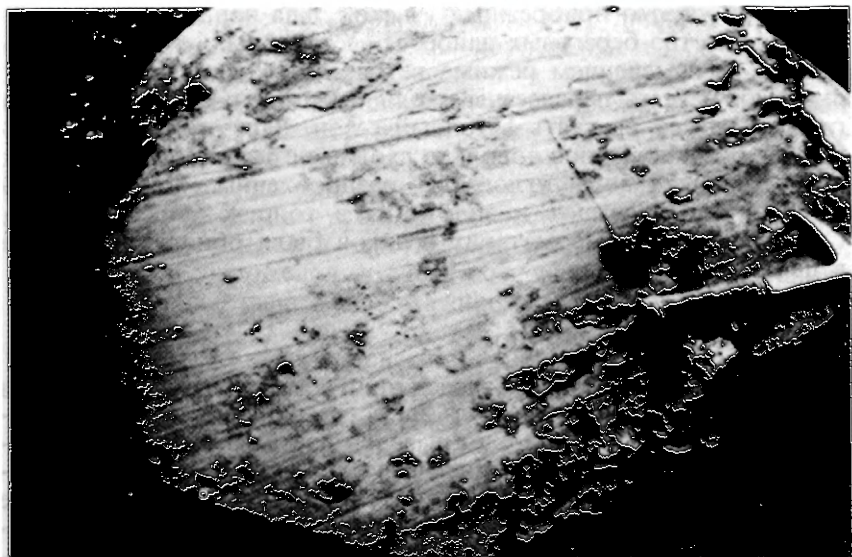


Рис. 120. Штрихованная эрратическая глыба, оставленная во время деградации оледенения, Казим, северная часть Саудовской Аравии.

В этом районе лед двигался с юго-запада на северо-восток.

могут огибать резких выступов. Местами мы находим мелкие параллельные борозды со случайным «отклонением», иногда они на протяжении менее одного метра поворачивают на 90° . Это явные следы плавучего льда — пакового льда или айсбергов, которые испытывали резкие отклонения под влиянием изменяющихся ветров или морских течений. Так же как эксперт по почеркам может удостоверить подлинность документа, так и геолог, знакомый со следами воздействия плавучих льдов, может расшифровать особенности древних льдов в Сахаре.

Обычно при движении айсбергов подводная часть глубоко выступает вниз от поверхности моря. Когда этот выступ задевает поверхность шельфа, образуются длинные глубокие борозды неправильной формы, пока айсберг не остановится и не погрузится в нижележащие осадки при вращении под влиянием ветра и течений. Роньон показал нам область интенсивно смятых и дислоцированных осадков, обусловленных как раз таким вращательным движением. Скорее всего, это следы воздействия севшего на мель айсберга.

С деятельностью плавучих льдов связано возникновение «отпечатков льда». Они наблюдаются там, где морской лед формировался у берега. Но вследствие колебаний уровня моря при приливах и отливах и изменений нагрузки под действием ветров

и течений на этот прибрежный участок льда попадает колоссальное количество береговых наносов: песка, гальки и других материалов. С изменением режима ветра или течений глыбы этого льда могут быть перенесены вдоль берега или в сторону моря, где лед может растаять в теплый сезон. В результате накапливаются осадки, внешне довольно сходные с тиллитом, хотя часто обломки в них более угловатые, раздробленные под действием мороза; они залегают в виде линз в толщах морских пород. Своеобразные примеры таких осадков были обнаружены также в центральной Сахаре.

ЛЕДНИКОВЫЙ МАТЕРИК

После международной экспедиции в Алжир многие геологи иными глазами стали смотреть на встречающиеся в других местах необычные валунные слои и знаки размыва. Следы ордовикского оледенения теперь выявлены от Сьерра-Леоне, на западном берегу тропической Африки, до Марокко, на северо-западе этого материка, и Эфиопии — на востоке, далее в Йемене, на другой стороне Красного моря, и совсем недавно в Саудовской Аравии. Если это был единый материк, то по своим размерам он превосходил современную Антарктиду, а если массивы суши в ордовике были рассредоточены, то общая площадь оледенения была еще больше. Современная Антарктида занимает почти 14 млн. км², что вдвое превышает площадь США. А ордовикский ледниковый покров распространялся по крайней мере более чем на 20 млн. км².

На этой обширной и большей частью почти плоской территории по аналогии с четвертичными оледенениями Северного полушария должны были иметь место несколько различных ледниковых покровов. Во время главных стадий оледенения эти ледниковые покровы, вероятно, соединялись. Должны были существовать и обширные площади «ледяных пустынь», так как потоки влажного теплого воздуха не могли проникать далеко в глубь этого громадного массива суши, занимавшего большую часть Гондваны. Некоторые из этих «ледяных пустынь» на самом деле, возможно, представляли собой обширные пространства с маломощным покровом снега, поскольку там не хватало влаги для развития ледниковых покровов. В других внутренних районах обширные площади были скованы вечной мерзлотой, особенно в местах, разделявших основные ледниковые покровы.

В некоторых периферических районах Гондваны ледниковые формации, вероятно, имели морское происхождение. Точнее, края материковых ледниковых покровов располагались неподалеку, но сохранившиеся формации были отложены на шельфе материка. Наглядным примером являются ледниковые отложения Сьер-

ра-Леоне, изученные Таккером и Ридом, сотрудниками университета этой страны. Эти отложения коррелируются со сходными отложениями Сенегала и Гвинеи и в основном состоят из слоистых алевролитов мощностью около 150 м; наличие сезонно-чередующихся слоев грубых и тонких осадков указывает на замерзание морей на полгода. Так же как в докембрийских ледниковых отложениях, там встречаются дронстоны, перенесенные плавучими льдами и сгруженные в относительно глубоких водах. Наблюдаются ущелья и заполненные осадками ложбины. Под ледниковыми отложениями залегают косослоистые песчаники точно такого же типа, как в Алжире, удаленном на 3000 км от Сьерра-Леоне.

Первый отчет об ордовикских ледниковых отложениях представили работавшие в Мавритании французские геологи Сужи и Лекорш в 1963 г. Главным образом благодаря исследованиям Детомба следы ледникового периода были широко выявлены в горах Антиатлас в Марокко. Броннер и Сужи обнаружили их далее к югу на территории бывшей Испанской Сахары. Затем на другом конце Сахары следы оледенения были опознаны Бёфом и его коллегами в районе Эннеди на границе Чада и Судана. В 1971 г. Доу, Бейт и Хайлу приписали предположительно позднеордовикский возраст ледниковым отложениям Эфиопии. Затем следы ордовикского оледенения были установлены по другую сторону от Красного моря, в Йемене. Совсем недавно, в 1978 г., прекрасно сохранившиеся верхнеордовикские тиллиты были описаны Мак-Клнором в Саудовской Аравии на расстоянии свыше 6000 км от Сьерра-Леоне, причем там найдены карадокские трилобиты, *Cruziana*, *Skolithos*, глубокие ложбины, заполненные осадками, и другие признаки оледенения.

Ордовикские породы отсутствуют в Центральной Африке и вновь появляются в ЮАР и Намибии. В живописных обнажениях на склонах Столовой горы у Кейптауна вскрывается толща прибрежно-морских, а также лагунных песчаников и сланцев мощностью 750 м, которая покоится на пенепленизированном докембрийском основании и в свою очередь перекрыта тиллитом, отнесенным к формации Пакхёйс. В 1967 г. Руст сообщил о находке там поверхности с ледниковой штриховкой, а также сезонно-слоистых (ленточных) отложений приледникового озера. Там же обнаружены ископаемые морские водоросли и брахиоподы. Эти формации были давно известны, но их ошибочно относили к девону. Ископаемые, хотя и не столь показательные, как в Северной Африке, указывают на ашгильский (конец ордовика), а не на карадокский возраст. Так как в то время магнитный полюс перемещался к югу, нет особых оснований говорить, что тиллит Пакхёйс был образован тем же самым ледниковым покровом, что и сахарские тиллиты. Однако, как



Рис. 121. Области, в которых были найдены следы ордовикского оледенения.

Конфигурация массивов суши в ордовике сильно отличалась от современной. В целом территория, покрывавшаяся льдом, по площади значительно превышала нынешнюю Антарктиду. Вероятно, в ордовике было много центров оледенения так же, как в Северном полушарии во время последнего оледенения. Самостоятельные центры оледенения существовали в Западной Африке, Намибии, Бразилии и Северо-Восточной Африке.

1 — океаны; 2 — следы оледенения.

Рис. 122. Так мог выглядеть край ледникового покрова в Восточной Африке.

На этом плановом аэрофотоснимке за пределами края Гренландского ледникового покрова видны обнаженные скалы, зоны мощной аккумуляции моренного материала, озерные котловины, заполненные талыми ледниковыми водами, и обширные области развития водно-ледниковых отложений.





указывалось выше, в столь продолжительный ледниковый период, когда льды так широко распространялись, можно найти следы нескольких ледниковых покровов и нескольких оледенений. Расстояние от Кейптауна до Марокко составляет 6000 км.

За пределами Африки есть выходы верхнеордовикских валунных горизонтов (названных «диамиктитами»), которые хуже сохранились, но тоже содержат следы, указывающие на развитие оледенения. Каждый из этих районов – Новая Шотландия, Бостон (США), Испания, Сардиния и Франция – по-видимому, до образования рифтов и спрединга океанического дна причленялся к Северной Африке. Чтобы полностью убедиться в существовании этих связей, необходимо провести дальнейшее изучение всех этих местонахождений.

В ордовикское время Южная Америка также причленялась к Африке, и, естественно, там можно предполагать наличие ледниковых формаций. Во время недавнего путешествия в Бразилию я смог проверить это предположение благодаря любезной помощи профессора университета г. Сан-Паулу Роша-Кампоса. Формация Тромбетас в Амазонском бассейне наверняка имеет ледниковое происхождение, но ее возраст лишь условно определен как ордовикский. Затем в Боливии в районах Альтиплано и Субандина выделяется формация Канканири, но ее возраст тоже установлен лишь ориентировочно. Поэтому в настоящее время целесообразно говорить, что Южная Америка, вероятно, подвергалась оледенению в позднем ордовике, но факты нуждаются в более тщательном изучении.

Необходимо сделать оговорку по поводу обычно констатируемого силурийского оледенения в Африке и Южной Америке, а иногда даже в Западной Европе. Эти сообщения поступают, в частности, от французских и южноамериканских геологов, которые еще совсем недавно не выделяли ордовик как самостоятельный период; для них это был ранний силур, или зосилур. Вполне возможно поэтому, что описанное в литературе «силурийское оледенение» просто то же самое, что теперь называют «ордовикским ледниковым периодом».

ИСТОРИЯ ЛЕДНИКОВОГО ПЕРИОДА

Хотя мы располагаем наблюдениями, накопленными лишь за десять лет, были сделаны попытки выяснить основные события ордовикского ледникового периода. Я указывал в начале этой

◀ **Рис. 123.** Такими могли быть края ледникового покрова в Северо-Западной Африке и Намибии в некоторые интервалы ордовикского оледенения.

На этом плановом аэрофотоснимке части острова Аделейд, Антарктика, виден край ледникового покрова, сидящий на грунте, и многочисленные крупные айсберги, откальвающиеся от этого края. В таких условиях происходит главным образом накопление ледниково-морских осадков, разносимых плавучими льдами.

главы, что область воздействия льда медленно перемещалась через Южный полюс, хотя в действительности полюс «мигрировал» из Северной Африки в бассейн Конго и оттуда на территорию Намибии. В позднем ордовике Южный полюс располагался к юго-западу от Сахары, и это было во время кульминации ледникового периода (около 450 млн. лет назад).

Из информации, относящейся к позднему ордовику всего земного шара, известно, что в то время происходил ряд быстрых морских трансгрессий и регрессий, что могло быть связано с чередованием межледниковий и оледенений. Данные по Сахаре показывают, что в ордовике, вероятно, было не менее трех (а возможно, гораздо больше) наступаний и отступаний льда, но не известно, были ли они сопоставимы с оледенениями и межледниковьями или просто относились к стадиям и межстадиям в данном районе. Последовательность типичного цикла следующая: эродированная ледником поверхность с бороздами (в основании), базальный тиллит, ледниково-морские отложения с дробными и, наконец (у кровли), алевролиты, песчаники и конгломераты, которые, судя по характеру материала, могли быть отложены потоками талых ледниковых вод. Местами в песчаниках выделяются слои с гигантской рябью, что указывает на очень большой расход воды, т.е. потоки отличались высокими скоростями или обилием транспортируемого материала. Поверхность, сложенная песчаниками и конгломератами, местами, видимо, испытывала влияние вечной мерзлоты (см. раздел этой главы «Движение льда»). Вероятная климатическая интерпретация одного из таких циклов приводится ниже:

Кровля

6. *Криогенные формы.* Развитие вечной мерзлоты на поверхности. Похолодание, ведущее к следующему оледенению.

5. *Поднятие поверхности суши.* Дальнейшее убывание ледникового покрова. Межледниковье?

4. *Осадки, принесенные водами.* Мелководное море (возможно, в условиях поднятия суши в то время, когда ледник тает и соответственно нагрузка льда уменьшается). Крупные зандры перед краем ледника.

3. *Ледниково-морские отложения.* Распад ледникового покрова. Трансгрессия моря. Возможно, в то время существовали шельфовые ледники и паковые льды.

2. *Базальный тиллит.* Отложения ледникового покрова (вскоре после максимума оледенения).

1. *Эродированная ледником поверхность.* Наступание ледника, иногда ледникового покрова, имевшего пленку воды в основании. Снос межледниковых или межстадиальных отложений?

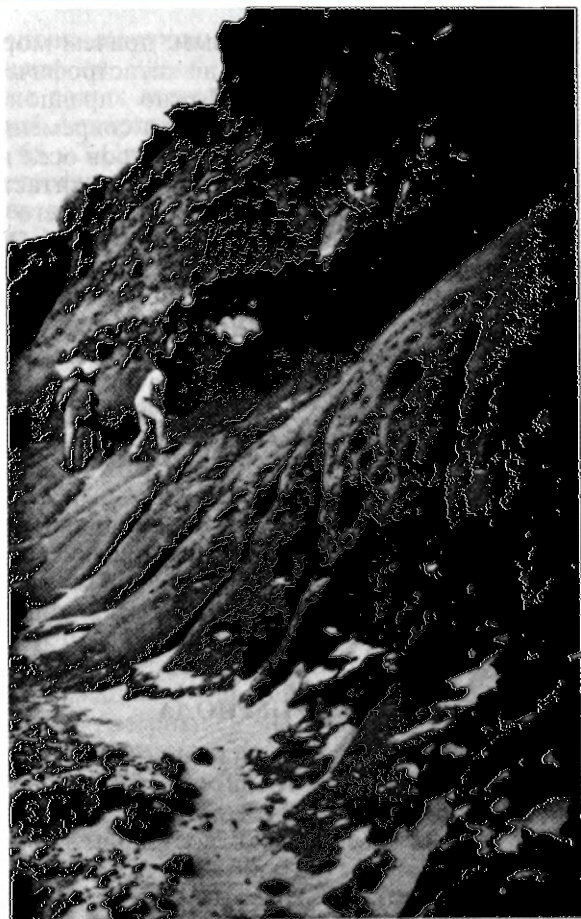


Рис. 124. Выходы нескольких горизонтов позднеордовикских тиллитов в уступе, расположенном восточнее нагорья Ахаггар, Алжир.

Эти горизонты, вероятно, маркируют неоднократные интервалы разрастания и убывания ледникового покрова в данном районе.

Основание (обычно морские песчаники со знаками ряби, косой слоистостью, следами организмов и свидетельствами сильных приливных течений).

Эта последовательность отложений и событий, конечно, весьма сходна с той, которая отмечалась в разделе гл. 4 «Позднепротерозойские оледенения» для времени формирования тиллитов Порт-Аскейг в Шотландии. По-видимому, в ордовике Северной Африки, так же как в докембрии Шотландии, ледни-

ковый покров был весьма неустойчивым, причем морские трансгрессии сопровождали быстрое, если не катастрофическое убывание края ледникового покрова. Можно предположить, что обстановка в то время весьма походила на современные условия в Западной Антарктиде, где ледниковый покров осел на дно ниже уровня моря и где вполне может произойти катастрофическое таяние и ледникового покрова, и обрамляющих его шельфовых ледников. Как далее в этой книге описывает Джон Эндрюс, распад Лаврентийского и Скандинавского ледниковых покровов в нынешний ледниковый период, по-видимому, происходил точно таким же образом.

Из вышеизложенного можно сделать следующие выводы, относящиеся к особенностям истории ордовикского ледникового периода и гляциологическим характеристикам его ледниковых покровов:

а. Вероятно, было не менее трех, а, возможно, даже 20 оледенений, разделявшихся межледниковьями.

б. Северо-западный край Сахарского ледникового покрова, вероятно, почти везде имел в основании пленку воды.

в. Северо-западный край был неустойчивым, «морским», отличавшимся катастрофическим распадом ледниковых покровов и шельфовых ледников.

ОКОНЧАНИЕ ЛЕДНИКОВОГО ПЕРИОДА

Для исследователей ледниковых периодов представляет глубокий интерес конец ледникового интервала. В центральной Сахаре структурное положение необычайно устойчивое, рельеф почти плоский и нет особых возможностей для тектонических нарушений. Широко распространенные тиллиты, борозды и водно-ледниковые пески четко перекрыты силурийскими сланцами, которые образовались во время трансгрессии моря. Эти силурийские слои, сходные с одновозрастными горизонтами центрального Уэльса, имеют морское происхождение, содержат много остатков ископаемых и непосредственно подстилаются ледниковыми формациями без следов сколько-нибудь продолжительного перерыва. Заслуживает внимания тот факт, что силурийские слои представлены сланцами, а не песчаниками. Силурийское море быстро распространилось на большую часть Северной Африки во время одной огромной трансгрессии. Сланцы образовались из глин, а глинистые частицы поступают в открытые районы океана во взвешенном состоянии: если бы море постепенно наступало на берега, оно размыло бы мягкие ледниковые пески и переотложило их в новых береговых и мелко-водных формациях.

Такая крупная трансгрессия, вероятно, сопровождалась вне-

запным повышением уровня моря по крайней мере на 300 м, но, возможно, даже на 500 м. Трудно объяснить такое повышение только за счет талых ледниковых вод. (Если бы растаял весь лед в современной Антарктиде, уровень Мирового океана повысился бы всего на 65 м.) Следовательно, должно было иметь место какое-то катастрофическое событие. Поскольку это еще не доказано, мне пришла в голову идея, что эксцентрическая нагрузка льда на кору Земли и ее последующее перераспределение в форме воды могли привести к внезапному изменению положения полярной оси, что отразилось бы на форме земного шара. Внезапное перемещение полюса по направлению к экваториальной выпуклости вызвало бы мгновенное повышение уровня океана. По расчетам смещение полюса всего лишь на 1° повысило бы уровень океана у экваториальной выпуклости на 375 м, что как раз подходит для объяснения крупной послеледниковой трансгрессии.

Судя по известным нам фактическим данным, после ордовикского ледникового периода в Северной Африке не проявлялось воздействие ледников, за исключением четвертичных горных ледников Атласа. По палеомагнитным данным, «гондванский» полюс быстро мигрировал к югу и в пермский период достиг Антарктиды, которая тогда еще причленялась к Южной Африке.

Некоторые следы предполагаемых силурийских и девонских ледниковых формаций были найдены в различных районах на востоке Южной Америки и на западном побережье Южной Африки, но эта информация недостаточно обоснована и, видимо, не указывает на развитие каких-либо крупных оледенений. Однако тогда могли существовать горные ледники, сохранявшиеся в благоприятных условиях спустя несколько миллионов лет после того, как растаяли крупные материковые ледниковые покровы на равнинах.

После таяния ордовикских ледниковых покровов на Земле воцарился длительный интервал мягкого климата. Он завершился через 150 млн. лет, когда наступила очередная «зима нашей планеты» и распространились ледники пермско-каменноугольного ледникового периода.

6. ВЕЛИКИЙ ПЕРМСКО-КАМЕННОУГОЛЬНЫЙ ЛЕДНИКОВЫЙ ПЕРИОД

Брайан Джон

В конце палеозойской эры природа Земли испытала глубокие изменения. Поверхность суши к тому времени была широко освоена растениями и животными, и именно тогда продолжительное и интенсивное оледенение наложило глубокий отпечаток на облик суперконтинента Гондвана. В течение каменноугольного периода на земном шаре происходило постепенное похолодание, достигшее кульминации около 300 млн. лет назад, когда широко распространились ледниковые покровы, вечная мерзлота (в обоих полушариях), шельфовые ледники и плавающие льды. Одновременно происходило постепенное понижение уровня Мирового океана. В ряде областей под влиянием тектонических поднятий проявилась регрессия моря; не исключена также ее связь с образованием ледниковых покровов в Южном полушарии.

Воздействие пермско-каменноугольного ледникового периода ощущалось даже в экваториальных районах и было более значительным, чем полагают многие геологи и палеонтологи.

Простой иллюстрацией этого положения служат результаты изучения осадков, накапливавшихся на краях океанических бассейнов. В средне- и позднекаменноугольное время неоднократно происходили быстрые трансгрессии и регрессии, влиявшие на ход осадконакопления в мелководных морях земного шара. Эти довольно значительные колебания уровня моря, возможно, имели гляциоизостатическую природу (см. гл. 3) и совпадали с интервалами роста и разрушения покровов льда в соответствующие стадии ледникового периода. Во многих толщах осадочных пород, вмещающих горизонты угля (например, в Северной Америке и в Западной Европе), выражены «циклотемы», или ритмически повторяющиеся последовательности напластования таких пород, как известняки, сланцы, песчаники и угли. Вполне вероятно, что эти циклотемы были связаны с колебаниями уровня моря, являвшимися следствиями пульсаций ледниковых покровов.

Каждая циклотема представляет собой последовательность напластования до девяти различных типов пород. На территории США нижние горизонты часто имеют неморское происхождение, что особенно относится к горизонтам угля, отложившимся в условиях близости к уровню моря. Над углями залегают известня-



Рис. 125. Суперконтинент Пангея в пермско-каменноугольное время.

На западе близ экватора произошло объединение двух древних суперконтинентов — Лавразии и Гондваны, на востоке они разделялись морем Тетис.

ки и сланцы, указывающие, по-видимому, на быстрое погружение; они сменяются породами, накапливавшимися в дельтах рек или поблизости от них. Осадки болот (торф) и заболоченных лесов, которые впоследствии уплотнились и превратились в горизонты угля, маркируют примерное положение уровня моря непосредственно перед каждым этапом погружения. Кровля горизонта угля и ее контакт с вышележащими сланцами или известняками — показатель «кульминации» циклотемы.

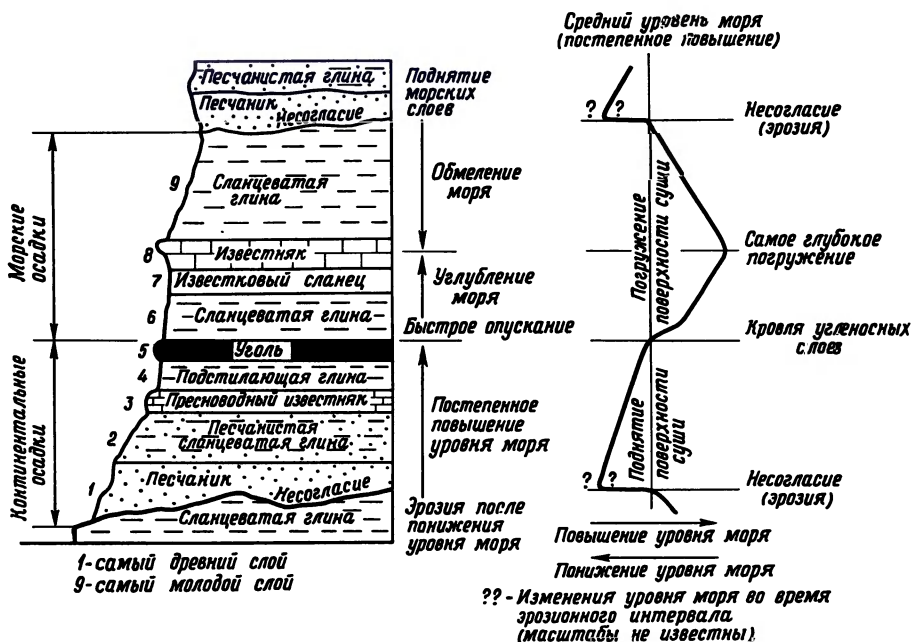


Рис. 126. Типичная циклотема в каменноугольных отложениях Северной Америки. На графике в правой части рисунка показана связь различных пластов с колебаниями уровня моря.

В пенсильванских толщах на территории США (накапливавшихся в течение примерно 40 млн. лет) насчитывается около 100 циклов седиментации. Зная о резких колебаниях уровня моря во время нынешнего ледникового периода, вполне можно признать, что большинство циклотем могло быть в общем связано с ростом и разрушением ледниковых покровов Гондваны и, в частности, с повторявшимися пульсациями этих покровов.

ПЕРМСКО-КАМЕННОУГОЛЬНЫЙ МИР

Прежде чем обратиться к свидетельствам существования пермско-каменноугольного ледникового периода, целесообразно взглянуть на глобальный фон, на котором развивалось это продолжительное оледенение. Как указывалось в гл. 1, каменноугольный период (который охватывал интервал от 345 млн. до 280 млн. лет назад) был временем «сосредоточения» материков. В начале этого периода четко выделялись три массива суши, на которых было представлено большинство климатических зон той эпохи. Система этих зон, вероятно, не особенно сильно отлича-

лась от существующей в настоящее время, хотя температуры на земном шаре в целом были несколько ниже. В отличие от современных условий на размещение климатических зон тогда влияли большая концентрация суши в умеренных и высоких широтах Южного полушария и ограниченное распространение суши к северу от экватора. Температурные различия между полярными районами и тропиками могли быть значительно более резкими, чем в настоящее время.

В Северном полушарии материк Ангария располагался главным образом в умеренных широтах, хотя часть его находилась севернее 75° с.ш. Первоначально Ангария отделялась морским проливом от Лавразии, значительно более крупного массива суши, занимавшего обширную территорию от 15° ю.ш. до 40° с.ш. Этот материк, включавший ряд прибрежных островов, объединял большую часть современной Северной Америки (кроме Кордильер, которые тогда еще не сформировались), Гренландию и Европу. Гондвана, крупнейший из трех древних суперконтинентов, протягивалась почти от экватора до южных полярных районов. Практически вся Антарктида с некоторыми частями Южной Америки, Южной Африки, Индии и Австралии находилась южнее 55° ю.ш., т.е. в широтах, наиболее благоприятных для развития оледенения. В позднекаменноугольное время Ангария сомкнулась с Лавразией, и разделявший их в прошлом залив перестал существовать. По мере того как Лавразия перемещалась по часовой стрелке, два суперконтинента постепенно объединялись по линии Уральских гор. К середине пермского периода от Северного полюса до Южного простирался единый суперконтинент. Он получил название «Пангея». Этот массив суши, имевший форму полумесяца, просуществовал почти 100 млн. лет, пока не распался в юрский период. Остальная часть поверхности нашей планеты была занята единым океаном, часть которого — Тетис — проникала в глубь суперконтинента.

Пермско-каменноугольный мир сильно отличался от современного, хотя уже тогда существовали ясно выраженные климатические зоны. В океанах обитало множество разнообразных растений, но поверхность суши большей частью была обнажена, по крайней мере в раннекаменноугольное время. По мере того как массивы суши перемещались, формируя единую Пангею, древние геосинклинали вовлекались в поднятие и на их месте образовались горы, а многие морские бассейны перестали существовать. Перестройка системы океанических течений привела к существенным изменениям обстановки в разных частях Мирового океана. Во многих областях, удаленных от новообразованных горных хребтов, вследствие постепенного поднятия суши из-под уровня моря вышли широкие полосы шельфов, или прибрежных платформ, обрамлявших материки.

В благоприятных местах продолжалась колонизация суши растениями, которая особенно быстрыми темпами шла в девонский период. Там росли обширные леса из древовидных папоротников, лепидодендронов, хвощей и папоротниковидных семенных растений (птеридоспермов). Встречались и некоторые примитивные голосеменные древесные растения, похожие на сосну, а особи некоторых видов лепидодендронов и птеридоспермов достигали в высоту более 30 м. Постепенно древние формы древовидных папоротников сменялись более развитыми формами папоротниковидных семенных и голосеменных растений. Конец каменноугольного периода характеризовался обилием и многообразием настоящих хвойных.

Обширные болота и прибрежные тропические леса отличались интенсивным торфонакоплением, и впоследствии на их месте сформировались залежи угля. Однако в целом, по-видимому, жаркие влажные условия тропиков не везде способствовали торфонакоплению: разложение растительных остатков, вероятно, происходило слишком быстро для образования очень мощных залежей торфа. Верхнекаменноугольные и пермские угольные пласты, по-видимому, накапливались в умеренных и высоких широтах обоих полушарий. Некоторые пермские угленосные слои действительно ассоциируются с тиллитами и вмещают стволы деревьев с выраженными годовичными кольцами, что свидетельствует о медленном росте в обстановке, сходной с существующей в настоящее время на сфагновых болотах или в зоне северных бореальных лесов Канады или Сибири.

Во многих областях наземная растительность была гораздо менее обильной. На большей части Гондваны многие миллионы лет преобладали ледниковые и перигляциальные условия, и перед краем льда расстилались полярные пустыни и обширные пространства, покрытые тундровой растительностью. Глоссоптериевая флора Гондваны тщательно изучалась; в ее составе, по-видимому, господствовали виды растений, приспособленных к условиям холодного климата. Эта флора была широко распространена практически на всей территории Гондваны, и ее следы были обнаружены в каменноугольных и особенно пермских породах во многих местах в области развития ледниковых покровов того времени и даже далеко за ее пределами. В некоторых областях экваториального пояса пустынные условия сохранялись до пермского периода; найденные там дюнные песчаники, грубозернистые конгломераты и слои эвапоритов указывают на существование поверхности суши, большей частью лишенной растительного покрова. В некоторых областях умеренных широт поверхность тоже, видимо, была пустынной; выпадавшие осадки там быстро стекали по поверхности, особенно в районах новообразованных горных хребтов и поднятых платформ, подвергав-

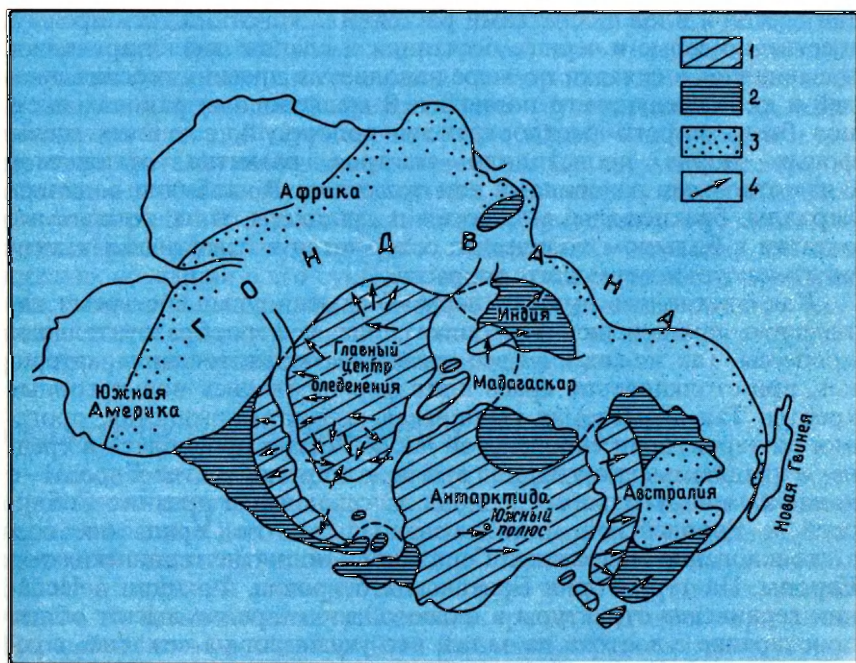


Рис. 127. Пермско-каменноугольное оледенение Гондваны.

Не все территории суши покрывались льдом одновременно: Южная Америка и Южная Африка — в первую очередь, Восточная Антарктида и Австралия — в последнюю. В районах распространения ископаемых папоротникообразных рода *Glossopteris* трансгрессия моря происходила неоднократно. 1 — области распространения ледниковых покровов; 2 — прочие области оледенения; 3 — районы распространения ископаемых папоротникообразных рода *Glossopteris*; 4 — направления движения льда.

шихся воздействию различных денудационных процессов. Мирады потоков и рек осуществляли перенос обломков горных пород. Мощные толщ конгломератов и песчаников, в том числе грубозернистых, отлагались в котловинах и долинах, а также вдоль берегов материков.

Около 300 млн. лет назад условия в океанах в общих чертах, вероятно, походили на современные. Существовали илистые моря, обрамленные дельтами и болотами. Существовали моря, подвергавшиеся воздействию паковых льдов; на их дне постепенно накапливались ледово-морские осадки. В тропических областях имелись обширные акватории с чистой теплой водой; такая среда идеально подходила для образования коралловых и водорослевых рифов и ракушечных отмелей. Местами в мелководных заливах тропических морей скорость испарения была настолько велика, что на дне отлагались эвапориты. В более глубоководных районах океанов, в желобах, накапливались мощные тол-

щи песков и илов с остатками растений и животных; эти преимущественно серые и черные песчаники и сланцы дислоцировались и сминались в складки по мере заполнения древних геосинклиналей и их последующего поднятия. В мелководных районах океанов были широко распространены водоросли, в теплых шельфовых морях происходило быстрое развитие организмов с известковыми раковинами или скелетами. В изобилии водились кораллы, брахиоподы, моллюски и криноиды, и их ископаемые остатки в большом количестве содержатся в известняках каменноугольного и пермского возраста.

Как отмечалось выше, в пермско-каменноугольное время интенсивно проявлялись тектоника плит и горообразовательные процессы. Так же как и во все времена «сосредоточения» материков, при столкновении краев плит формировались новые горные хребты. Так называемая герцинская, или армориканская, орогения на территории европейской части России проявилась в средне- и позднекаменноугольное время, а в других частях Европы – в конце каменноугольного периода. Столкновение древних Сибирской и Европейской плит вызвало поднятие Уральских гор, а столкновение Лавразии с Гондваной – поднятие герцинских гор Европы. На территории Британских островов, Франции и Испании герцинские структуры в палеозойских породах имеют общее простирание с востока на запад, что указывает на «сжатие» с севера и юга. В Северной Америке на стыке Лавразии с северо-западным краем Гондваны сформировался новый горный хребет. Древняя геосинклиналь, простиравшаяся от Ньюфаундленда и Новой Шотландии к юго-западу до Аппалачских гор и далее к Техасу и Нью-Мексико, была заполнена осадками, которые затем были интенсивно смяты в складки и подняты. На этом контакте плит было несколько «вспышек» горообразования; главную фазу поднятия обычно называют аппалачской, или аллеганской, орогенией. Деформация пород и создание высоких гор, вероятно, достигли наибольшего развития в ранне- и среднепермское время. Складки и разломы формировались также в ходе горообразования вдоль океанских окраин Пангеи. Например, многократные поднятия имели место в позднем палеозое вдоль восточного края Южной Америки, а в середине пермского периода произошло поднятие вдоль северного края Тетиса.

Образование крупных горных цепей в пермско-каменноугольное время имело ряд важных последствий. В первую очередь вдоль краев многих плит широко проявились вулканические извержения и излияния лавы. Во-вторых, в связи с похолоданием климата по окончании девонского периода в умеренных и даже в экваториальных горных областях сложились благоприятные условия для накопления снега и образования ледников. Вероятно, изменилась и система атмосферной циркуляции. На вершинах

и склонах вновь образовавшихся гор возросли темпы денудации поверхности. Вполне возможно, что все эти изменения способствовали усилению похолодания в пермско-каменноугольный ледниковый период. «Сосредоточение» суперконтинентов, концентрация большой территории суши в Южном полушарии и изменение системы океанических течений тоже весьма благоприятствовали глобальному похолоданию. Если еще остаются неясности в природе «пусковых механизмов», приведших к возникновению пермско-каменноугольного ледникового периода, то нет никаких сомнений в его существовании и интенсивности проявления. Многочисленные геологические данные подтверждают развитие этого продолжительного оледенения, которое можно уверенно считать «великим ледниковым периодом».

СВИДЕТЕЛЬСТВА ЛЕДНИКОВОГО ПЕРИОДА

Некоторые из веских свидетельств пермско-каменноугольного оледенения получены в южной части Южной Америки. Вполне вероятно, еще в девоне на нагорьях Боливии и Аргентины существовали альпийские ледники, но после похолодания около 345 млн. лет назад размеры ледников во многих районах увеличились. В Боливии четко различают три ледниковых горизонта. Первый и, возможно, второй из них имеют раннекаменноугольный возраст; тиллиты такого же возраста известны и в Аргентине. Ледниковые отложения Боливии, видимо, накапливались на суше, но в Патагонии и западной Аргентине условия их седиментации трудно выяснить. Лоуренс Фрейкс и Джон Кроуэлл, изучавшие пермско-каменноугольные ледниковые отложения более тщательно, чем другие геологи, трактуют их частично как ледниково-морские осадки, а частично как продукты переотложения под влиянием эрозионных и морских процессов. В любом случае эти породы явно свидетельствуют о широком развитии оледенения на протяжении не менее 2600 км с севера на юг. Возможно, большинство ледников возникло в горах и спускалось к востоку в предгорья в виде ледников подножий и к западу в широкие заливы и фьорды в виде находившихся на плаву ледниковых языков и шельфовых ледников.

Ледниковые образования бассейна Параны в Бразилии совершенно иные, местами мощность ледниковых горизонтов там достигает 1600 м. В этом бассейне сохранились многие классические свидетельства оледенений, включая тиллиты, штрихованные скальные поверхности, троговые долины, ледниково-морские отложения с дропстонами, ограненные гальки, бараньи лбы и озы. В западных районах, где ледниковые отложения выходят на поверхность вдоль края Анд, выражены признаки их переработки, но в других местах толщи ледниковых осадков залегают *in situ*



Рис. 128. Ледниковые отложения и направления движения льда, установленные по штриховке и другим следам, в Юго-Западной Африке и на востоке Южной Америки.

В пермско-каменноугольное время эти материка соединялись между собой. Цифрами обозначены мощности ледниковых отложений (в метрах). 1 – мощные ледниковые отложения; 2 – направления движения льда.

и прекрасно сохранились. Так называемые слои Итараре в бассейне Параны в южной Бразилии формировались главным образом на суше, и местами различают шесть самостоятельных горизонтов тиллитов. Некоторые районы бассейна Параны в пермско-каменноугольное время периодически погружались ниже уровня моря, и там горизонты ледниково-морских осадков переслаиваются с настоящими тиллитами.

Ледниковые отложения южной Бразилии, видимо, относятся к весьма продолжительному интервалу между 320 млн. и 270 млн. лет назад. В течение этого периода, длившегося около 50 млн. лет, было, по-видимому, не менее 17 циклов, каждый из которых включал оледенение и межледниковье. Однако наибольшее распространение ледникового покрова в бассейне Параны происходило около 280 млн. лет назад, и предполагают, что это оледенение продолжалось не более 5 млн. лет.

У ледникового покрова, определявшего характер оледенения восточных районов Южной Америки, центральная область, не-

сомненно, находилась где-то за пределами нынешнего побережья. Направление движения льда можно установить по штрихованным скальным мостовым, веерам разноса эрратических валунов, складкам и надвигам в осадках, подстилающих ледниковые отложения. Вся совокупность фактов показывает, что потоки льда направлялись с востока на запад.

До признания гипотезы Вегенера о перемещении материков было трудно объяснить эти факты, но при взгляде на карту Гондваны в пермско-каменноугольное время вполне уместно предположить, что льды, покрывавшие Бразилию и Уругвай, двигались из какого-то центра в Южной Африке. Эта гипотеза

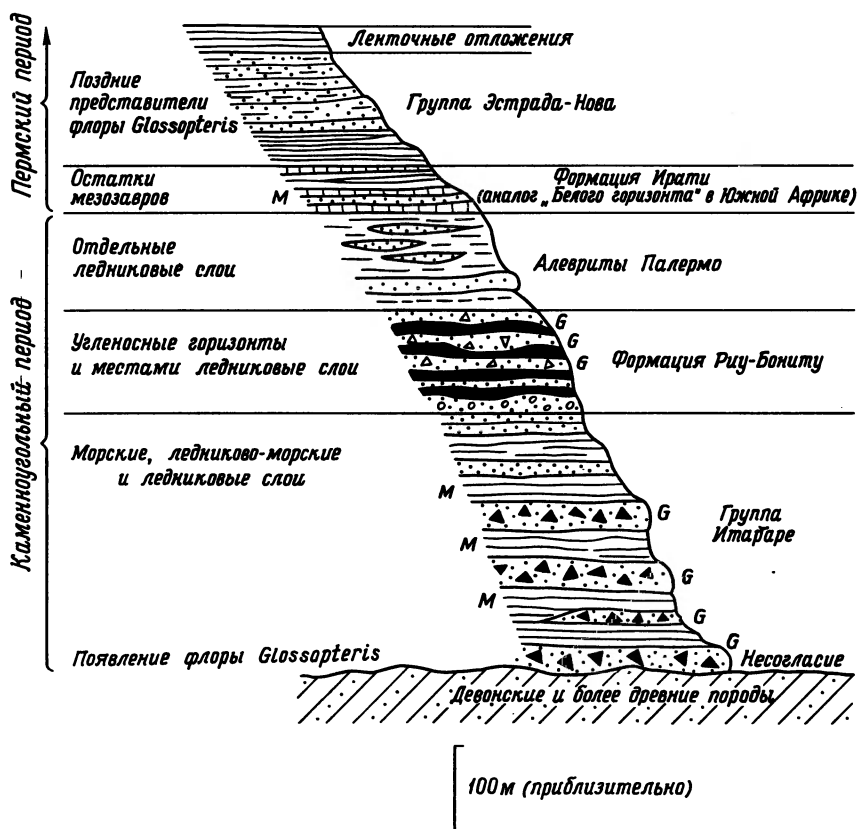


Рис. 129. Обобщенная стратиграфическая схема каменноугольных и нижнепермских формаций в одном из районов южной Бразилии.

Большая часть следов оледенения приурочена к породам группы Итапаре. М — морские слои; Г — ледниковые слои.

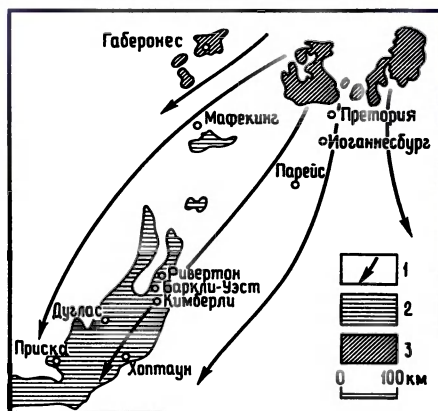


Рис. 130. Направления движения льда в одном из районов Южной Африки, установленные по разносу бушвелдских гранитов.

Некоторые эрратические валуны присутствуют в тиллите Двейка в юго-западной части этого района. 1 — направления движения льда; 2 — тиллит Двейка и ассоциирующиеся с ним породы; 3 — бушвелдские граниты.

подтверждается многочисленными и разнообразными полевыми наблюдениями. Например, бразильские тиллиты вмещают эрратические глыбы специфически окрашенных кварцитов, доломитов и кремнистых сланцев, которые не известны в коренном залегании на территории этой страны. Но зато эти эрратические образования *присутствуют* в тиллитах Намибии, и в некоторых случаях там же находятся их коренные источники. Ледниковые отложения Намибии довольно рассредоточены и большей частью сохранились в древних долинах. С другой стороны, имеются многочисленные аргументы в пользу широкого развития ледниковой эрозии в виде бараньих лбов, штрихованных скальных мостовых и штрихованных бортов долин. Эти формы также свидетельствуют о направлении движения льда с востока на запад.

Наиболее правильное истолкование этих фактов, собранных по обе стороны от Южной Атлантики, сводится к тому, что в прошлом территория Намибии подвергалась интенсивной экзарации под воздействием ледникового покрова, характеризовавшегося донным таянием. Этот покров переносил обломочный материал далее к западу на территорию нынешней Южной Америки. Переслаивание тиллитов и ледниково-морских осадков четко указывает на то, что западная часть ледникового покрова имела неустойчивый морской характер подобно современному Западно-Антарктическому ледниковому покрову (см. гл. 7).

Двейкские тиллиты в Южной Африке и на Мадагаскаре впервые были описаны в 1909 г., и с тех пор их пермско-камен-

ноугольный возраст и ледниковое происхождение пользуются широким признанием. Древние тиллиты и другие ледниковые отложения покоятся в основании системы Карру или несколько выше и выходят на поверхность в ряде пунктов, рассредоточенных на обширной территории, которая простиралась с запада на восток более чем на 1600 км и с севера на юг — на 1200 км. Мощност тиллитов возрастала в южном направлении, намного превышая 1000 м в Малом (Южном) Карру. С тиллитами связаны штрихованные мостовые, троговые долины, заполненные ледниковыми отложениями, водно-ледниковые слои, ледниково-морские и морские горизонты, которые содержат ископаемых раннепермского возраста. Морские горизонты обнаружены большей частью в Намибии и Капской провинции, но в Натале и Трансваале слои определенно континентальные; Трансвааль, вероятно, был одним из главных горных очагов распространения льдов.

В Капской провинции серия Двейка подразделяется следующим образом:

Верхние глинистые сланцы	220 м	Ранняя пермь
Тиллиты	830 м	Поздний карбон
Нижние глинистые сланцы	250 м	Средний и поздний карбон

Нижние сланцы имеют характерный светло-зеленый цвет и вмещают некоторых ископаемых. В тиллитах большей частью нет ископаемых, но в некоторых горизонтах имеются отпечатки *Gangamopteris*, одного из типичных холодовыносливых растений позднекаменноугольного возраста. Верхние сланцы всегда имеют типичный серо-зеленый цвет и часто содержат остатки глоссоптериевой флоры. В них выделяется маркирующий карбонатный «белый горизонт», вмещающий остатки водной рептилии *Mesosaurus*. Толща верхних сланцев имеет пермский возраст и связывается с окончанием двейкского оледенения.

За пределами Капской провинции тиллиты серии Двейка, как правило, залегают между морскими горизонтами. Например, в Натале ледниковые отложения непосредственно перекрывают обработанные ледником мостовые, которые секут слоистость более древних пород. Эти мостовые, имеющие четко выраженные штрихи, борозды и серповидные выемки, видимо, подвергались глубокой экзарации под влиянием перекрывавшего льда. Местами сохранились бараньи лбы, а на плато Кап — величественные трог, что убедительно свидетельствует о мощной экзарации. Тиллиты повсеместно содержат ограненные и штрихованные валуны и гальки, многие из которых ориентированы по направлению движения льда. Детальный анализ текстуры тиллитов также показал, что мелкие удлиненные обломки вытянуты по направле-

нию движения льда. Большая часть обломков в тиллитах имеет местное происхождение, но есть некоторое количество эрратических обломков дальнего заноса, а в некоторых случаях каменный материал был явно захвачен из более древних ледниковых отложений во время последующих подвижек ледников.

В общем представлены три разных типа ледниковых отложений: массивные неслоистые тиллиты континентального происхождения, слоистые тиллиты с дропстонами и морскими ископаемыми и ленточные слои с дропстонами, по-видимому накопивавшиеся в озерах. В последние годы стали признавать также наличие очень широко распространенных водно-ледниковых горизонтов, или горизонтов, образовавшихся в результате «переработки» древних ледниковых отложений межледниковыми и послеледниковыми реками.

События двойского оледенения еще во многих деталях не выяснены, и факты, установленные в разных частях Южной Африки, часто оказываются противоречивыми. В Намибии обнаружены явные свидетельства двух фаз оледенения с промежуточным неледниковым интервалом, но в других местностях имеются признаки по крайней мере четырех основных ледниковых циклов (каждый из них включал наступание и отступление ледников). Поскольку пермско-каменноугольный ледниковый период на этой территории, по-видимому, продолжался не менее 20 млн. лет и в течение данного периода положение Южного полюса изменялось, возникают сложности в определении возраста отдельных оледенений и межледниковий и в установлении направлений движения льда. Южноафриканский геолог Александр Дю Тойт, много лет изучавший двойские ледниковые отложения, предполагал существование следующих четырех крупных очагов оледенения (от самого древнего к самому молодому): Намаленд (меридиональный поток), Грикваленд (радиальный поток), Трансвааль (вероятно, радиальный поток) и Наталь северо-восточный – юго-западный поток).

Почти наверняка был также поток льда из района, расположенного за пределами побережья Капской провинции; лед двигался оттуда одно время с запада на восток, а также с юго-запада на северо-восток. На побережье Наталья есть признаки, указывающие, что лед направлялся к берегу из района, расположенного восточнее, и мы уже видели, что лед из Намибии тек к западу, проникая в бассейн реки Параны и другие районы Уругвая и Бразилии. Направления движения льда исключительно трудно объяснить с позиций современного распределения массивов суши в Южном полушарии. Но при взгляде на карту консолидированных материков Гондваны (рис. 127) ситуация проясняется. Оледенение Южной Африки можно правильно истолковать только в том случае, если рассматривать эту территорию вместе с ее

пермско-каменноугольным «окружением» – южной частью Южной Америки, Фолклендскими островами, Западной Антарктидой и Мадагаскаром.

Ледниковые отложения пермско-каменноугольного возраста известны в Австралии с 1859 г.; постепенно полевые исследования выявили, что оледенение охватывало большую часть этого материка. В число установленных следов оледенения входят трог, бараньи лбы, штрихованные скальные мостовые, тиллиты, ледниково-морские горизонты, дропстоны и рассредоточенные эрратические обломки. Наличие этих следов объяснялось воздействием горных ледников и одного или нескольких ледниковых покровов, широко распространявшихся на равнинах Южной Австралии.

По-видимому, оледенение началось более 300 млн. лет назад в горах Тасмании и Юго-Восточной Австралии; предполагают, что эти горы были большей частью разрушены под воздействием ледниковых и иных процессов к концу каменноугольного периода. В самом начале пермского периода материковое оледенение началось также в западной и юго-восточной частях Австралии, и, судя по широкому распространению мощных тиллитов, видимо, большая часть Южной Австралии покрывалась льдом не менее трех раз. Влияние оледенения ощущалось даже в таком отдаленном северном районе, как северный Квинсленд, о чем свидетельствуют находки эрратических валунов и дропстонов в ледниково-морских осадках. Конечно, шельфовые ледники и обширные поля плавучих льдов с айсбергами распространялись далеко к северу от северных краев самих ледниковых покровов. Примерно около 270 млн. лет назад последний ледниковый покров распался, но следы оледенения имеются и в более молодых отложениях, что указывает на присутствие льдов (возможно, ледяных шапок и ледников в горах) вплоть до 250 млн. лет назад.

Лед, покрывавший Южную Австралию, видимо, двигался с юга, и при взгляде на карту пермско-каменноугольной Гондваны ясно, что основной центр оледенения находился в Антарктиде. Давно высказывалось предположение о присутствии пермско-каменноугольных ледниковых отложений в Антарктиде, но только в 1960 г. там были обнаружены прямые подтверждения распространения древнего оледенения. Тиллиты пермско-каменноугольного возраста были найдены во всей цепи Трансантарктических гор, в горах Элсуэрт в Западной Антарктиде и даже на нунатаках, возвышающихся над современным ледниковым покровом на Земле Королевы Мод и в других районах. В южной части Земли Виктории мощность тиллитов редко превышает 40 м, но в хребте Королевы Александры в горах Хорлик наблюдаются выходы тиллитов мощностью до 400 м. В горах Пенса-

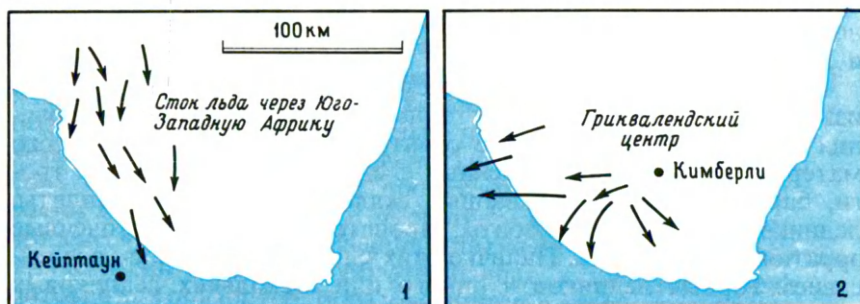


Рис. 131. Направления движения льда в отдельные фазы пермско-каменноугольного оледенения в Южной Африке.

кола обнаружен тиллит мощностью не менее 600 м, а в хребте Элсуэрт конгломерат Уайтаут (почти наверняка ледникового происхождения) имеет мощность до 900 м. Эти толщи по мощности сопоставимы с ледниковыми отложениями Южной Америки и Южной Африки и имеют признаки продолжительного и неоднократного оледенения.

Судя по ископаемым остаткам *Glossopteris* и других растений, оледенение Антарктиды развивалось в интервале от 290 млн. до 270 млн. лет назад, а изучение тиллитов в горах Хорлик показало, что было не менее пяти циклов, каждый из которых включал оледенение и межледниковье. Имеющиеся в настоящее время свидетельства направлений движения льда противоречивы: в Трансантарктических горах лед, видимо, двигался от Земли Виктории в район моря Уэдделла, но имеются также следы движения льда к современному Южному полюсу и в противоположном направлении. Центр ледникового покрова, вероятно, находился на Земле Уилкса; признаки радиального растекания льда из этого центра установлены в Трансантарктических горах, на Тасмании, в юго-западной и юго-восточной частях Австралии. По мере проведения дальнейших исследований в прибрежных районах Восточной Антарктиды и на различных группах нунатаков особенности пермско-каменноугольного оледенения постепенно станут более ясными.

Талчирское оледенение в Индии было первым установленным пермско-каменноугольным оледенением; свидетельства этого оледенения в центральной Индии были описаны еще в 1859 г. Теперь во многих районах Индии и Пакистана обнаружены разнообразные следы оледенения, включая ледниковые скальные мо-



Рис. 131. (Продолжение)

Перемещение льда в сторону нынешней суши, показанное на схеме 4, могло происходить одновременно с движением льда из Трансваала, представленным на схеме 3.

стовые, мощные валунные слои, тиллиты и ледниково-морские горизонты. Местами мощность тиллитов превышает 250 м.

В ледниковый период северный край субконтинента был частью южного побережья Тетиса, и это единственный район, где были найдены «неконтинентальные» ледниковые отложения. На северо-западе, северо-востоке и востоке располагались горные области, к которым, видимо, были приурочены центры оледенения и основные ареалы экзарации. Из этих центров от крупных ледяных шапок во всех направлениях ответвлялись выводные и предгорные ледники, что определило широкое распространение морен и водно-ледниковых осадков. Вдоль древней береговой линии на севере ледники покрывали широкую полосу низменности и временами спускались в море. Отложения этого района содержат ряд прослоев морских осадков, которые могли образоваться при повышении уровня моря во время межледниковий. Однако эти данные еще трудно уверенно интерпретировать.

Оледенение в Индии, по-видимому, охватывало интервал между 310 млн. лет и 270 млн. лет назад, причем наибольшего распространения льды достигли примерно 280 млн. лет назад. Основные области оледенения, описанные в литературе, были, вероятно, областями ледниковой аккумуляции. Однако есть признаки движения льда к северу через горные районы центральной Индии, и весьма возможно, что южные районы субконтинента тоже покрывались льдом. Скорее всего, льды радиально растекались от основного Гондванского ледникового покрова. Было не менее трех крупных самостоятельных оледенений, и окончательная деградация льдов на востоке и севере произошла очень бы-

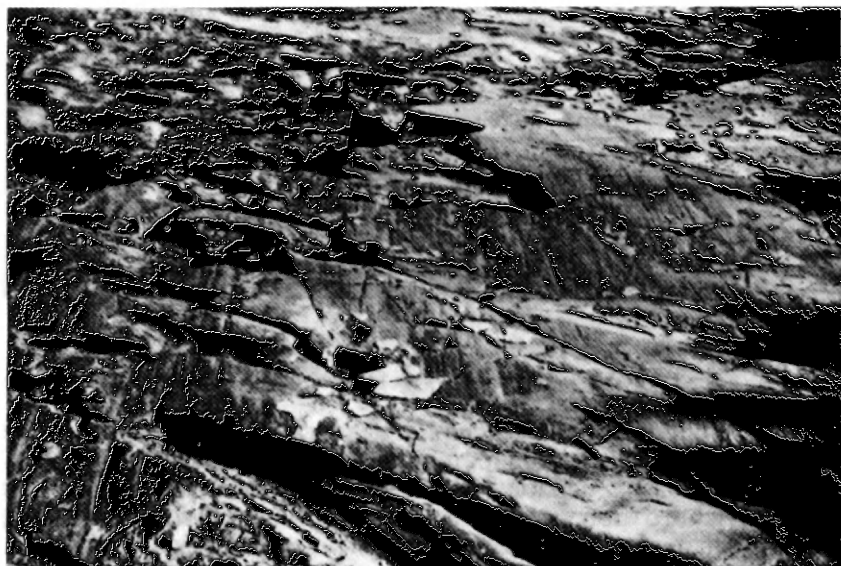


Рис. 132. Сглаженная штрихованная поверхность коренных пород (мостовая) в Иране (центральная Индия).

Хорошо видно направление движения льда в пермско-каменноугольный ледниковый период.

стро, хотя и сопровождалась небольшими осцилляциями. Как отмечалось выше в настоящей книге, «катастрофическое» разрушение, видимо, было характерно для краевых частей ледникового покрова в приморских районах.

Признаки оледенения были обнаружены во многих других районах Северного и Южного полушарий. Например, в Южном полушарии тиллит Двейка встречается на Мадагаскаре, и ледниковые отложения предположительно пермско-каменноугольного возраста к северу от Южной Африки представлены в бассейне Конго и в Эфиопии. На Фолклендских островах ледниковая толща, известная под названием Лафонского тиллита, залегает в основании гондванских пород. На Восточном Фолкленде его мощность достигает 850 м, а на Западном Фолкленде выделены другие фации тиллитов (которые тем не менее в общем имеют тот же возраст). Судя по литологическим характеристикам и составу ископаемых, эти тиллиты очень тесно связаны с ледниковыми отложениями и Южной Америки и Южной Африки.

В Северном полушарии известно локальное местонахождение каменного «микстита» в штате Массачусетс, США. Он интерпре-

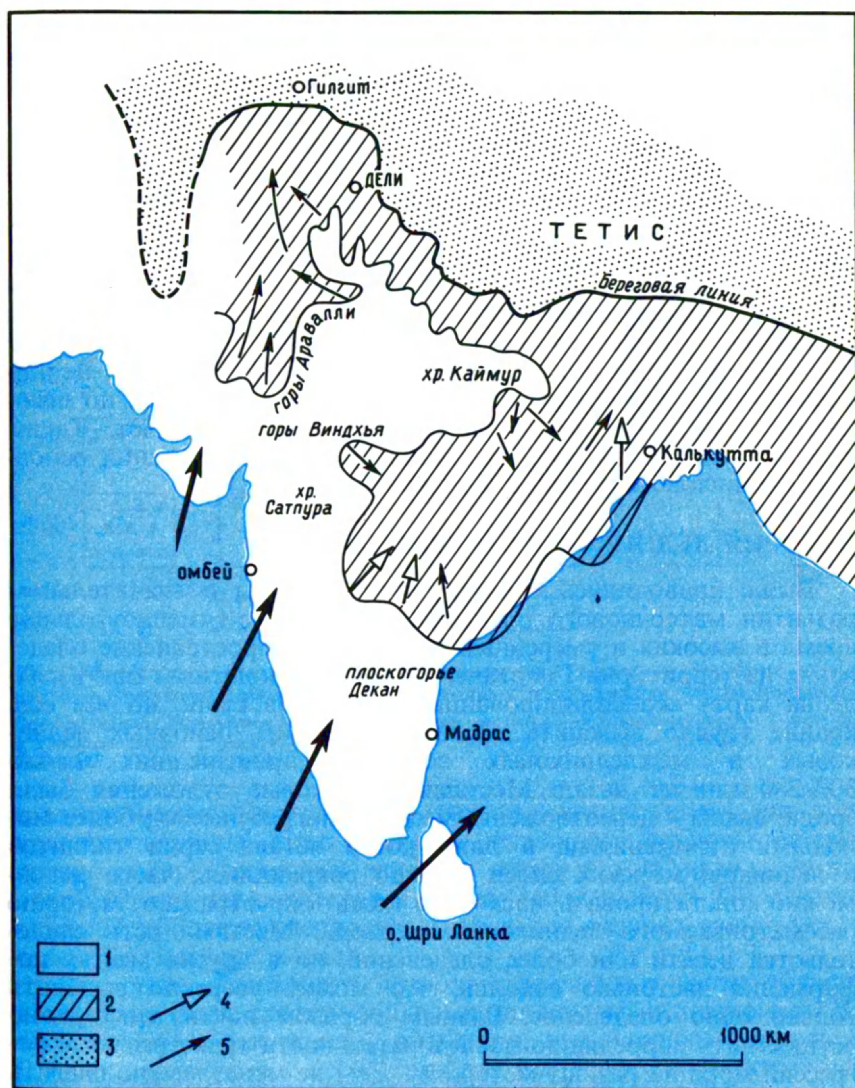


Рис. 133. Следы пермско-каменноугольного оледенения в Индии.

В то время к западу от Индии находился Мадагаскар, а к востоку — Антарктида. 1 — экскарация и разнос льда в горных районах; 2 — основные области ледниковой аккумуляции; 3 — моря; 4 — ледниковая штриховка; 5 — разнос эрратических валунов.

тировался как пермско-каменноугольный тиллит. Однако другие факты, основанные на изучении типов осадков и ископаемых пермско-каменноугольного периода, показывают, что восточные районы США тогда находились в тропиках; если эти отложения действительно имеют ледниковое происхождение, то они, вероятно, формировались в локальных условиях гор.

Гораздо более убедительные свидетельства развития оледенения обнаружены в северо-восточной части Сибири. В рассматриваемый период этот район находился поблизости от Северного полюса и ледниковые или перигляциальные обстановки там были весьма сходны с условиями, имевшими место на противоположном конце Земли. За последнее десятилетие были найдены ледниковые отложения на берегу реки Омолон, к востоку от Верхоянских гор и к северо-востоку от Охотского моря. Ледниковые горизонты встречаются в морской толще и, судя по ископаемым остаткам, имеют возраст около 250 млн. лет. Таким образом, они, по-видимому, немного моложе отложений основного ледникового периода Гондваны.

ИСТОРИЯ ЛЕДНИКОВОГО ПЕРИОДА

Выше приводились многочисленные факты о значительном развитии материкового оледенения в пермско-каменноугольное время в высоких и умеренных широтах. Распространение оледенения на территории Гондваны становится понятным при взгляде на карту «консолидированных» массивов суши, но все еще крайне трудно выяснить последовательность основных ледниковых и межледниковых событий, происшедших около 300–280 млн. лет назад. Местами ледниковые отложения были эродированы и переотложены, местами погребены под более молодыми отложениями, и даже когда четкие серии тиллитов и ледниково-морских слоев хорошо сохранились, часто невозможно констатировать, насколько полно они отражают историю рассматриваемого ледникового периода. Местами есть свидетельства десяти или более оледенений, но в других местах информация настолько неполна, что можно уверенно выделить только одно оледенение. Равным образом почти невозможно осуществить корреляцию последовательности трансгрессий и регрессий моря на разных материках. Тем не менее можно сделать предварительные выводы по поводу размещения льдов и общего хода событий ледникового периода.

В целом временной диапазон ледникового периода, вероятно, охватывал около 100 млн. лет, хотя сюда входит и длительный ранний период разрастания ледников и продолжительный поздний период таяния льдов, когда ледники, вероятно, оставались лишь в областях высоких широт и в высоких горах. Теперь

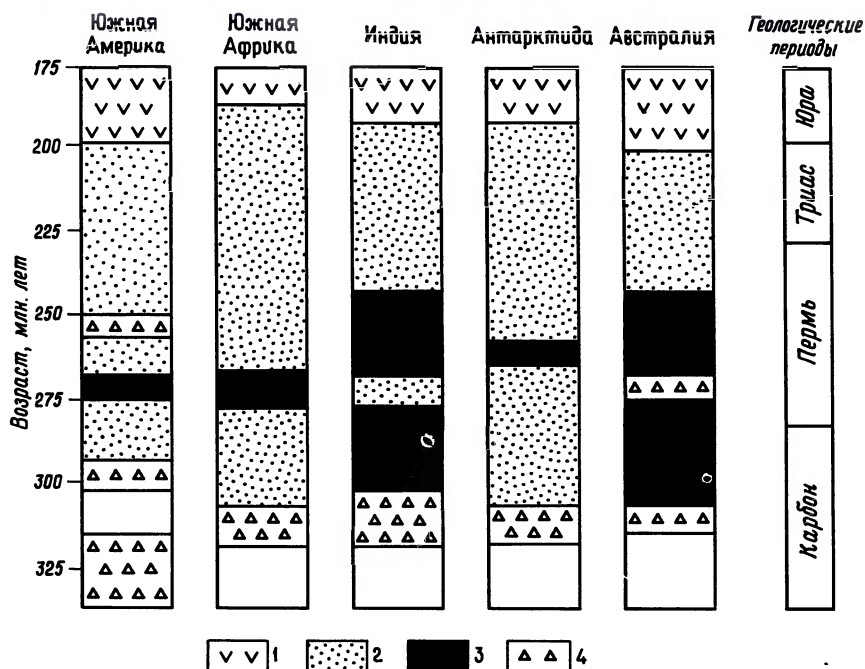


Рис. 134. Колонки, на которых в обобщенном виде выделены основные ледниковые и связанные с ними горизонты в толщах пород разных частей Гондваны. Основной интервал формирования тиллитов—300–280 млн. лет назад. 1—вулканические породы; 2—песчаники и глинистые сланцы; 3—угли и связанные с ними отложения; 4—ледниковые горизонты (в основном тиллиты).

имеются веские свидетельства, указывающие на то, что пик ледникового периода, когда огромные ледниковые покровы неоднократно распространялись далеко к северу (до 35° ю.ш.), длился около 40 млн. лет в интервале между 310 млн. лет и 270 млн. лет назад. Наибольшее распространение льдов, видимо, имело место около 280 млн. лет назад.

Во время ледникового периода центральные части области оледенения были заняты мощными ледниковыми покровами. Во время главных оледенений, возможно, эти покровы сливались. В таких периферических областях, как, например, Юго-Восточная Австралия, северная Индия и горы Южной Америки, существовали крупные самостоятельные ледяные шапки и ледяные поля с выводными и предгорными ледниками, спускавшимися на соседние равнины.

По мере того как Гондвана медленно перемещалась относительно Южного полюса, соответственно сдвигались и основные центры оледенения. На основе палеомагнитных данных и иско-

паемых из тиллитов и генетически связанных с ними осадков можно наметить такую пространственно-временную последовательность центров оледенения: самый ранний – Южная Америка и Намибия, более поздний – Южная Африка, Мадагаскар и Индия, самый поздний – Антарктида и Австралия. Несомненно, Южная Африка оставалась очагом оледенения наиболее длительное время, и именно там найдены наиболее убедительные свидетельства существенной экзарации.

Край Гондванского ледникового покрова большей своей частью располагался в море. Выше отмечалось, что во всех основных районах развития пермско-каменноугольных ледниковых покровов обнаружены ледниково-морские осадки. Даже там, где эти осадки встречаются редко или отсутствуют, отмечено переслаивание тиллитов, морских сланцев и песчаников, что свидетельствует о сложных соотношениях моря и края ледникового покрова. Ледниковый покров или группа ледниковых покровов, покрывавшие площадь, более чем вдвое превышавшую современную Антарктиду, несомненно оказывали большое влияние на уровень моря (см. гл. 3), и можно предполагать, что разрастание и таяние ледниковых покровов во время оледенений и межледниковий сопровождались колебаниями уровня моря не менее чем на 150 м, а возможно, даже на 250 м. Должны были также проявляться изостатические поднятия и опускания, приводившие к еще более сложным колебаниям уровня моря вдоль берегов суперконтинента Гондвана.

Большие площади пермско-каменноугольных ледниковых покровов могли в основании иметь температуры выше точки плавления льда. Мощные пачки тиллитов во многих областях указывают, что там имели место длительные периоды интенсивной экзарации, сопровождавшейся ледниковой аккумуляцией в крупных масштабах. Поскольку тиллиты южной Бразилии и Уругвая местами имеют мощность свыше 1000 м, ледниковые процессы могли быть особенно интенсивными в таких частях Гондваны, как Намибия и бассейн Параны; эта территория, судя по другим данным, отчасти располагалась ниже уровня моря в ледниковый период (так же, как в каждый из других ледниковых периодов, по аналогии с нынешней Западной Антарктидой). Здесь, может быть, еще более, чем на краях других ледниковых покровов, катастрофический распад ледникового щита и крупные пульсации ледников были вполне нормальными явлениями ледникового периода.

Если идея о морских пермско-каменноугольных ледниковых покровах верна, то из нее вытекает, что в течение ледникового периода часто происходили пульсации, сопровождавшиеся быстрыми повышениями уровня моря. Площадь их проявления по крайней мере соответствовала современному Антарктическому

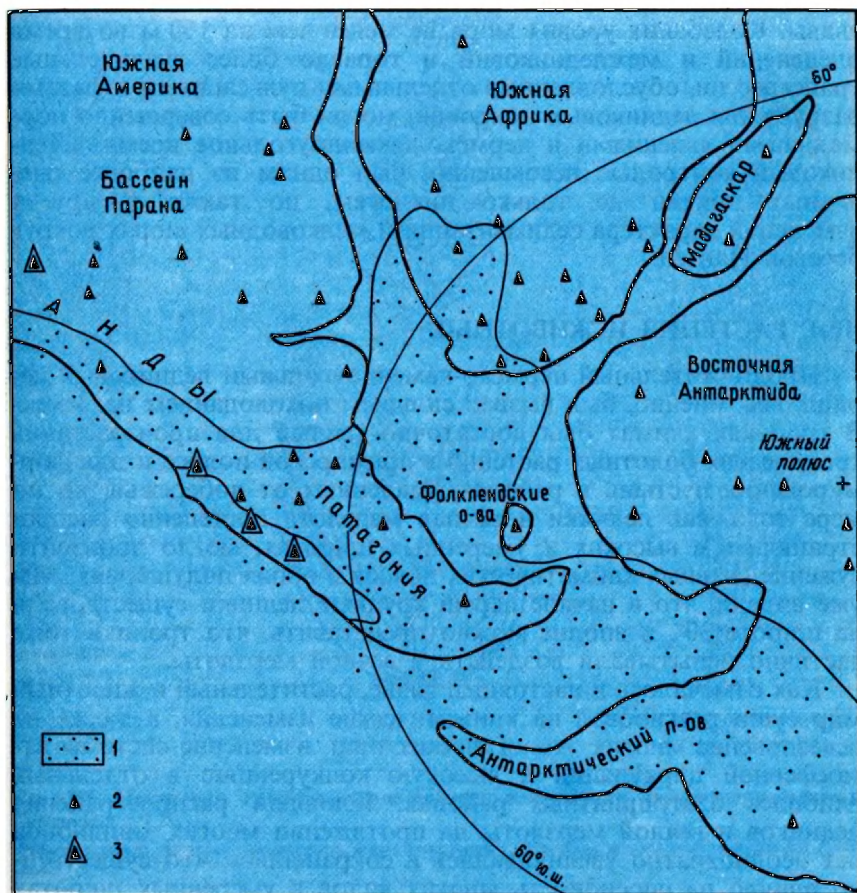


Рис. 135. Возможное положение «морской» части Гондванского ледникового покрова.

В пределах большей части схемы основание ледникового покрова располагалось на уровне моря или ниже его, что определяло неустойчивость покрова. 1 — территория, часто располагавшаяся ниже уровня моря; 2 — тиллиты и другие ледниковые отложения; 3 — следы горного оледенения.

ледниковому покрову. Было подсчитано, что в результате быстрого разрушения этого ледникового покрова уровень моря повысится примерно на 50 м¹. Возможно, подобные повышения уровня моря сопровождали и отдельные пульсации пермско-каменноугольного ледникового покрова. Это снова приводит нас к проблеме циклотем в угленосных свитах средне- и позднекаменноугольного возраста, о чем упоминалось в начале этой

¹ В оригинале ошибочно указано 5 м.—Прим. перев.

главы. Колебания уровня моря не менее чем на 150 м во время оледенений и межледниковий и гораздо более значительные трансгрессии, обусловленные отдельными пульсациями и фазами разрушения ледниковых покровов, могли быть совершенно нормальными явлениями в пермско-каменноугольное время. «Ледниковый контроль», несомненно, был одним из наиболее очевидных причин не только циклотем, но также и других изменений характера седиментации в мелководных морях вокруг берегов Пангеи.

ЛЕД, РАСТЕНИЯ И ЖИВОТНЫЕ

Продолжительный пермско-каменноугольный ледниковый период, несомненно, был вызван сильным похолоданием на Земле. В тропиках климат был достаточно теплый для произрастания тропических болотных растений в приморской полосе и для формирования пустынь в районах, удаленных от побережья, но по мере того, как ледники и вечная мерзлота постепенно распространялись в высоких и умеренных широтах, могло произойти сужение главных климатических поясов в обоих полушариях. Мы уже видели, что в начале перми крупные ледники существовали на широте 30°, и вполне можно представить, что тропики тоже частично испытывали воздействие вечной мерзлоты.

Как отмечалось в настоящей главе, растительный и животный мир суши реагировал на климатические изменения, а также на исчезновение многих экологических ниш, изменение системы атмосферной циркуляции и высокую конкуренцию в отдельных наиболее благоприятных районах. Площади распространения ледников и вечной мерзлоты на протяжении многих миллионов лет неоднократно увеличивались и сокращались, что существенно влияло на способность многих видов в умеренных широтах восстанавливать свои ареалы.

В морях и океанах растениям и животным приходилось испытывать значительные колебания температуры, прозрачности и солености воды, обусловленные поступлением талых вод и ледниковых осадков. В связи с «сосредоточением» материков в обширный суперконтинент Пангея изменилась система океанических течений, что повлекло за собой сдвиги в характере океанических вод и в балансе вещества и энергии во многих сообществах растений и животных. Резкие повышения и понижения уровня моря во время межледниковий и оледенений предопределяли периодические затопления и осушения обширных площадей шельфовых морей.

Принимая во внимание эти факты, можно вполне обоснованно утверждать, что оледенение оказывало разностороннее и глубокое воздействие на растения и животных. В чем конкретно

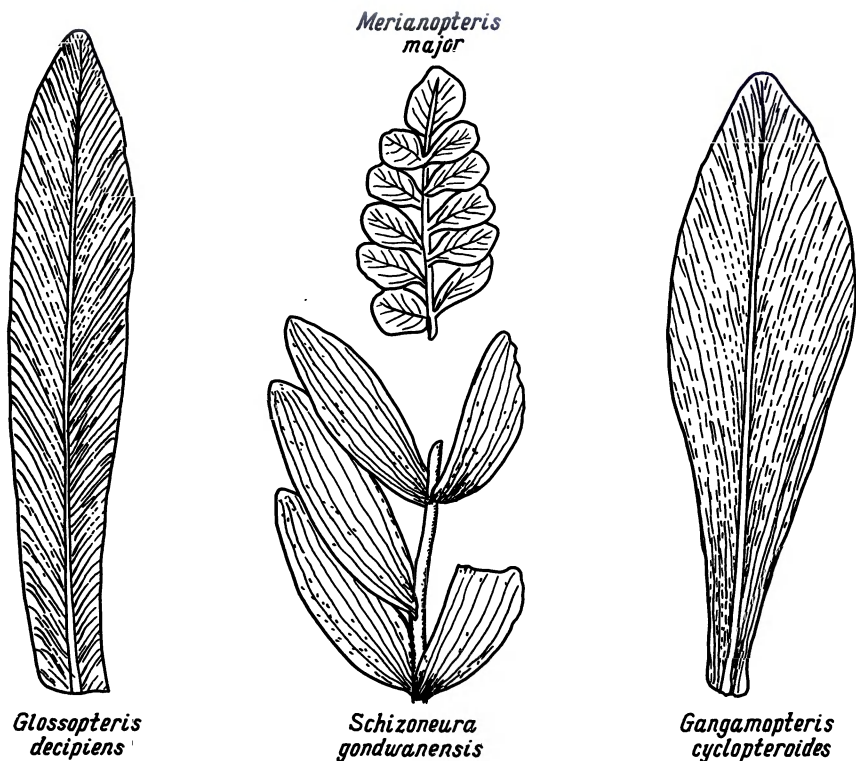


Рис. 136. Некоторые типичные представители ископаемых папоротникообразных Гондваны.

Первым, вероятно, появился *Gangamopteris*, затем птеридосперм *Glossopteris* заселил обширные районы Гондваны.

проявлялось это воздействие? Сколько видов было вынуждено адаптироваться или измениться, чтобы выжить в новой обстановке? Сколько видов не смогло адаптироваться и, следовательно, было обречено на вымирание?

Наиболее убедительные свидетельства ледникового контроля над растительностью относятся к глоссоптериевой флоре Гондваны. Как отмечалось в разделе этой главы «Пермско-каменноугольный мир», *Glossopteris* – род папоротниковидных семенных растений – занимал обширный ареал, включавший районы, покрывавшиеся и не покрывавшиеся пермско-каменноугольными ледниковыми покровами. Вероятно, был ряд глоссоптериевых флор или растительных сообществ, но палеонтологи более ста лет назад признали, что все они были характерны для суперконтинента Гондвана. Главные компоненты этой флоры легко опознаются: они сохранились в ископаемом виде во многих типах

пород — от углей Антарктиды и континентальных песчаных слоев Фолклендских островов до песчаников и сланцев Мадагаскара и алевроитовых сланцев формации Талчир в Индии. Слои с растительными остатками тесно ассоциируются с тиллитами или другими свидетельствами ледниковых условий, а споры *Glossopteris* были даже обнаружены в самих тиллитах.

Вот что пишет палеонтолог Бернхард Куммель о глоссоптериевой флоре: «Поразительная индивидуальность гондванской флоры, возможно, связана с похолоданием климата Южного полушария в позднекаменноугольное время и с широким распространением оледенения. Космополитическая флора, ранее занимавшая эту территорию, вымерла в связи с наступлением прохладного умеренного климата, к которому адаптировалась гондванская флора».

Другие авторы тоже признавали, что развитие этой уникальной флоры было реакцией на климатическое стимулирование оледенения. Пламстед предполагал, что *Glossopteris* и другие растения эволюционировали благодаря высокой космической радиации в южных полярных районах. Это довольно «специальная» гипотеза, и более вероятным представляется, что растения эволюционировали (возможно, весьма быстро в масштабах геологического времени), чтобы существовать в областях вечной мерзлоты и прохладного умеренного климата с продолжительной зимой и коротким летом. Поскольку первые наземные растения появились не ранее силура, представители глоссоптериевой флоры были пионерами, которые были вынуждены приспособиться к условиям крайнего холода и резких сезонных колебаний температуры. Обширное распространение этих растений — свидетельство успешной адаптации к климату ледникового периода.

В каменноугольный и пермский периоды произошел ряд важных событий в развитии растительного и животного мира Земли, но самым важным этапом в палеонтологическом отношении, конечно, был конец пермского периода. Тогда за несколько миллионов лет резко сократилось число родов морских беспозвоночных: фораминифер, кораллов, остракод, наутилоидов, плеченогих (брахиопод), морских лилий, трилобитов, бластоидей; вымерли $\frac{3}{4}$ групп мшанок, несколько групп головоногих моллюсков и губок и многие семейства моллюсков.

Наземные растения не испытали сильных изменений в отличие от позвоночных животных. В конце пермского периода вымерло около 75% семейств земноводных и свыше 80% семейств пресмыкающихся. В чем же заключалась причина этой «биологической катастрофы», этого эпизода, который рассматривается как «самый значительный период вымирания в палеонтологической летописи»?

В ответах на этот вопрос нет согласованности. Однако известно, что гибель различных растений и животных не была «внезапной в геологическом понимании» или, иными словами, не было единого катастрофического события, которое привело бы к уничтожению большого числа менее стойких видов. Наиболее резонно предположить, что совместное воздействие изменений климата и гидросферы в пермско-каменноугольный ледниковый период, связанное с колебаниями уровня океанов и изостатическими движениями, которые проявлялись в Гондване, было слишком сложным, чтобы многие растения и животные могли успеть приспособиться к нему в своем развитии. Большинство видов тогда еще имело довольно примитивный характер и адаптировалось к специфическим морским или наземным обстановкам. Эти обстановки менялись сотни раз в течение ледникового периода, и только наиболее стойкие виды сумели выжить.

Рассматривая другие ледниковые периоды, мы считаем «ледниковое стимулирование» возможным фактором эволюции, но в пермско-каменноугольный ледниковый период, который отличался большой продолжительностью и глубокими глобальными воздействиями, оледенение, по-видимому, превратилось в ведущий фактор. Он подавлял развитие большей части живой природы. Только наиболее мобильные и эластичные виды пережили пермский период.

Джон Эндрюс

Последний крупный период продолжительного оледенения в истории Земли, по-видимому, начался около 37 млн. лет назад в Антарктиде, а около 12 млн. лет назад оледенению подверглись некоторые высокие горные хребты Аляски. Эти датировки не укладываются в рамки издавна сложившегося представления о том, что последний крупный период геологической истории — четвертичный — можно называть «ледниковым периодом». В этой главе мы покажем, почему это прежнее представление оказалось несостоятельным, но, чтобы попытаться разобраться в событиях, которые привели к оледенению и все еще оказывают влияние на нашу планету, надо рассмотреть изменения в географии Земли в интервале от конца мелового периода (65 млн. лет назад) до середины третичного периода (примерно 30 млн. лет назад).

В этой главе рассматривается несколько тем. Одна из основных сводится к утверждению, что «прошлое — ключ к будущему». Это лишь перефразировка давно известного геологического принципа «настоящее — ключ к прошлому». Однако геологи и геоморфологи (особенно те, которые изучают отложения и формы рельефа, связанные с ледниками и другими природными системами, реагирующими на глобальные климатические изменения) в настоящее время пытаются установить историю кайнозойских оледенений и межледниковий. Если эти исследования позволят выявить вполне определенные зависимости, метеорологи и климатологи смогут моделировать, а возможно, и прогнозировать климатические изменения, которые предстоит испытать нам и нашим потомкам. Эта задача — отнюдь не академическое исследование, оторванное от жизни: мы начинаем понимать, что население «космический корабль Земля», что производство продовольствия имеет предел, что энергетические ресурсы ограничены и что экономические кризисы и стихийные бедствия, происходящие ежегодно, зависят и от капризов климата. Большинство метеорологов теперь сходятся на признании того, что климат вообще изменчив, и в настоящей главе будут представлены явные свидетельства крупных глобальных изменений климата.

Мы живем в довольно своеобразном интервале геологического времени, выделяющемся на фоне последних одного-двух миллионов лет: крупные ледниковые покровы сейчас находятся только в Антарктиде (площадь 14 млн. км²) и Гренландии (1,76 млн. км²). Как отмечалось в предыдущих главах книги, такие интервалы называют межледниковьями. Данные изучения глубоководных океанических осадков показывают, что подобные периоды благоприятных условий на земном шаре составляли лишь около 10% времени за последние один-два миллиона лет. В среднем межледниковья продолжались по 10 000 лет, нынешнее межледниковье началось между 14 000 и 10 000 лет назад, и некоторые исследователи полагают, что очередное оледенение уже началось 5000 лет назад! Другие, однако, предсказывают, что возврат к ледниковым условиям произойдет в будущем, причем оценки этого срока колеблются от 2000 до 50 000 лет.

Если человечество собирается учитывать нависшую над ним природную катастрофу небывалых масштабов, эти прогнозы необходимо уточнить. Но человечество находится в довольно трудном положении. Хотя угроза нового ледникового периода очевидна, не меньше опасности таит в себе и противоположная тенденция — глобальное повышение температуры и связанное с ним таяние Антарктического и Гренландского ледниковых покровов. Талые воды ледниковых покровов устремятся в океаны, и уровень последних поднимется примерно на 75 м. Чтобы представить себе последствия, возьмем подробную карту и увидим, сколько городов и густонаселенных районов земного шара находится на высотах ниже 75-метровой горизонтали. Трудно определить долю населения нашей планеты, которое может испытать последствия этой катастрофы, но, учитывая население стран, входящих к Северному морю, таких городов, как Нью-Йорк, Лос-Анджелес, Лондон, и обширных районов Азии, воздействие такого повышения уровня океана было бы колоссальным.

Эта преамбула объясняет, почему знания о кайнозойском ледниковом периоде должны стать частью духовного богатства каждого разумного человека. Эти знания имеют также более глубокую философскую подоплеку. Из гл. 2 настоящей книги явствует, что нам еще не известны причины оледенений и межледниковий. Или, что то же самое, мы не понимаем, как взаимодействуют на земном шаре атмосфера, океаны и криосфера при формировании погоды. Отсюда следует, что мы не знаем и поэтому не можем прогнозировать вероятный итог ненамеренного и намеренного антропогенного преобразования океанов и атмосферы Земли за счет чрезмерного увеличения содержания CO₂, за счет сельскохозяйственного производства, обуславливающего изменения энергетического баланса нашей планеты, и за счет других процессов.

Кроме того, последовательно нараставшее похолодание Земли в раннем кайнозое и начало нынешнего ледникового периода оказали глубокое воздействие на флору и фауну земного шара, поскольку все его природные системы испытали влияние неоднократно повторявшихся похолоданий и потеплений. Некоторые организмы сопротивляются этому воздействию, при этом соответственно увеличивается их видовой состав и численность популяций, тогда как менее приспособленные организмы погибают, будучи не в состоянии перенести изменившиеся условия. В предыдущих главах мы видели, что подобные события многократно происходили в геологической истории, но нынешний ледниковый период имеет особое значение, потому что стимулировал развитие человека. Конечно, нам никогда не удастся досконально выяснить, приспособлявали ли наши примитивные предки свою жизненную стратегию к климатически обусловленным изменениям среды, или эволюция человека происходила в более спокойных условиях. Тем не менее это дает повод для размышлений.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ НОМЕНКЛАТУРА И ПРАКТИКА

Для последних нескольких миллионов лет истории Земли мы располагаем большей информацией, чем для любого другого периода. Это, однако, палка о двух концах, поскольку сложность локальных стратиграфических данных препятствует выполнению широких обобщающих исследований, которые требуются для построения моделей или гипотез. Для кайнозоя геологи описали множество различных схем в качестве типовых. Они организованы по трем формальным стратиграфическим «кодам», что показано ниже.

Последовательность отложений, или литостратиграфия. Это краеугольная основа построений во всех наших исследованиях. Литостратиграфия сводится к регистрации последовательности плотных и рыхлых пород, обнажающихся по берегам рек и морей и в дорожных выемках, вскрывающихся буровыми скважинами, и к обозначению выделенных подразделений. В каждом разрезе изменения среды во времени оцениваются в соответствии с изменениями характера осадков. Типичные подразделения выделены так, чтобы другие исследователи могли изучать породы и последовательность их накопления, а затем проводить корреляции между типовыми разрезами и районами, в которых они работают. Основные единицы в литостратиграфии — формации, подразделяемые на пачки и слои.

Биостратиграфия. В более древней части геологической истории Земли «время» интерпретируется на основе эволюции специ-

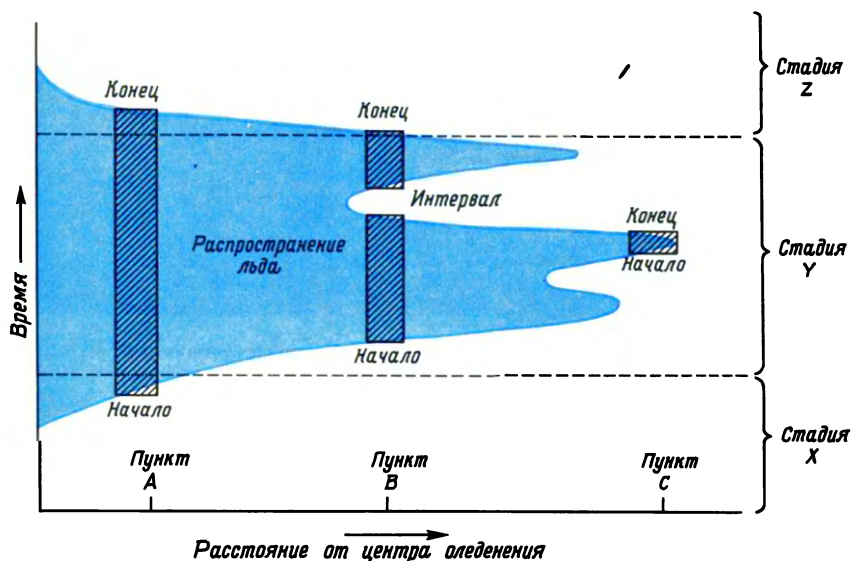


Рис. 137. Схема принципиального распределения климатостратиграфических подразделений во времени.

В пункте А самые древние ледниковые отложения накапливались в стадии Х, и там в течение длительного времени развивалось оледенение. В пункте В оледенение началось позднее и ледниковые стадии разделялись интервалом. В пункте С ледниковые отложения сформировались за очень короткое время в середине стадии Y.

фических групп ископаемых, однако за последние два миллиона лет масштабы эволюции были невелики, и соответственно геологи-четвертичники используют биостратиграфию больше для того, чтобы установить изменения климата, чем уточнить «время» накопления отложений данного подраздела. При изучении и континентальных, и глубоководных океанических осадков основное внимание теперь уделяется изменениям сообществ растений или животных. Таким образом, биостратиграфия — отрасль геологии, которая частично помогает нам распознавать оледенения и межледниковья прошлого.

Учет времени, или хроностратиграфия. Хроностратиграфия имеет для нас основополагающее значение. Четвертичная система — хроностратиграфическая единица, и отсюда по определению границы между четвертичным и третичным периодами или между плейстоценом и голоценом признаются *глобально синхронными*, имеющими одинаковый возраст на всем земном шаре.

В научной литературе велись долгие споры о возрасте этих границ, и разные исследователи первую из этих границ проводили между 3 млн. и 0,7 млн. лет назад, а вторую — между 14 000

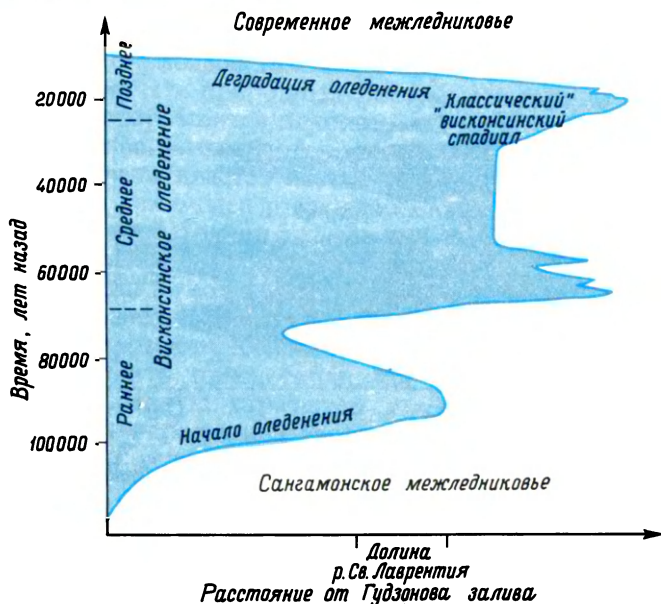


Рис. 138. Схема развития висконсинского оледенения по профилю от Гудзонова залива до южного края Лаврентийского ледникового покрова.

Схема помогает интерпретировать стратиграфические данные.

и 7000 лет назад. Однако эти расхождения произвольны. Все они связаны с временными различиями глобальной реакции на климатические изменения, которые прослеживаются в плейстоценовых и голоценовых отложениях. Очевидно, влияние похолодания прежде всего заметно проявляется в высоких широтах и в последнюю очередь — в тропиках, но это не означает, что хроностратиграфическая граница имеет разный возраст в зависимости от местоположения пункта на земном шаре. В целях унификации выбраны опорные разрезы, в которых положение границ признано всеми учеными. Например, опорный разрез, маркирующий положение границы плиоцена и плейстоцена, находится в Калабрии, Италия, где в тектонически поднятых морских осадках установлено появление холодовыносливых видов моллюсков в Средиземном море около 1,7 млн. лет назад. Это вовсе не противоречит тому факту, что в Северном море холодовыносливые моллюски появились 2,5 млн. лет назад, т. е. еще в плиоцене. Эти проблемы могут показаться формальными, имеющими узкое значение, но о них следует сказать, так как они вызывают непонимание в кругах исследователей изменений климата в четвертичный период.

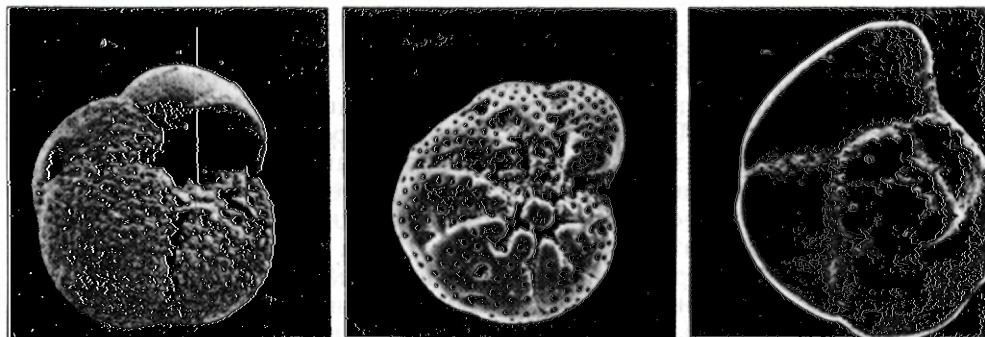


Рис. 139. Фораминиферы из глубоководных морских осадков.

Геологам, интересующимся нынешним ледниковым периодом, во многом помогают рассмотренные выше стратиграфические коды, однако необходимо иметь в виду и другую крупную проблему интерпретации. На приведенном выше графике показано, что начало оледенения в горах и на плато Скандинавии или на востоке Канадской Арктики на несколько тысяч лет предшествовало распространению льдов в котловинах Балтийского моря или Великих озер Северной Америки. Следовательно, отложения, фиксирующие начало последнего, или висконсинского, оледенения, в районе Гудзонова залива накапливались совсем в иное время, чем в штате Иллинойс, хотя в обоих районах они представляют собой ту же самую реакцию на климат. С другой стороны, за счет гляциодинамических различий отложения последнего оледенения в Иллинойсе имели значительно большую мощность, чем близ центра оледенения в районе Гудзонова залива. Однако, когда разрезы сопоставляются на пространственно-временном графике, ледниковая (климатическая) история района становится более понятной. Смысл всех этих построений состоит в том, что *реакция* таких природных систем, как ледниковые покровы, не укладывается в формальные хроностратиграфические рамки: начальная ледниковая стадия в одном районе может сопоставляться с окончанием межледниковья в другом районе. Хотя эти положения понятны, сами причинно-следственные связи климатических изменений и смен оледенений и межледниковий трудно выяснить.

ДАТИРОВАНИЕ КАЙНОЗОЙСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ

Геологи, физики и химики много занимались разработкой методов определения возраста горных пород, рыхлых осадков и ископаемых. Сложности создания литостратиграфической летописи

кайнозойских ледниковых и межледниковых стадий очень велики: на суше во многих разрезах отсутствуют интервалы, соответствующие 1000, 10 000 и даже 1 000 000 лет. Каким образом следует проводить корреляцию морен на Шпицбергене и в восточной Гренландии с целью построения глобальной схемы развития оледенений? Были использованы два пути. Во-первых, разрабатывались методы определения относительного или «абсолютного» возраста серии геологических событий, а во-вторых, стали обращать больше внимания не на установление последовательности чередования оледенений и межледниковий на суше, а на возможно более детальное изучение изменений сообществ фораминифер и других организмов в длинных колонках донных осадков глубоководных океанических бассейнов. Эти колонки в разных случаях представляют собой непрерывную стратиграфическую летопись событий за периоды от 30 000 до 3 млн. лет.

Здесь неуместно подробно разбирать относительные достоинства и недостатки всех методов датирования, применяемых в настоящее время. Целесообразнее сконцентрировать внимание на нескольких методах, которые представляются наиболее важными при изучении кайнозойских оледенений и особенно последних нескольких ледниково-межледниковых циклов.

Глобальная картина разрастания и убывания ледниковых покровов Земли выявляется при изучении относительных изменений содержания тяжелого стабильного изотопа кислорода ^{18}O в раковинах фораминифер, извлеченных из колонок глубоководных морских осадков. Для построения графика, подобного представленному на рис. 140, требуется произвести ряд сложных операций. Реальную основу такого графика составляют данные двух методов: калий-аргонового (K-Ar) метода определения возраста вулканических пород и палеомагнитного метода регистрации систематических изменений магнитного поля Земли.

K-Ar-метод базируется на допущении, что в вулканических минералах при распаде радиоактивного калия (^{40}K) образуется изотоп ^{40}Ar , который накапливается с возрастом минералов и который можно отличить от ^{40}Ar , присутствующего в атмосфере.

В 1960-х годах K-Ar-метод датирования вулканических пород стали совмещать с исследованиями палеомагнетизма. Как было показано выше (раздел «Изменения в недрах Земли» в гл. 2), в течение кайнозоя направление магнитного поля Земли несколько раз изменялось. Например, за последние 700 000 лет преобладало нормальное (такое, как сейчас) направление, за исключением одного или двух кратковременных интервалов с обратным направлением. До «нормальной (прямой) магнитной эпохи Брунес» поле Земли преимущественно имело обратную намагниченность, но во время «обратной магнитной эпохи Мацуяма» тоже

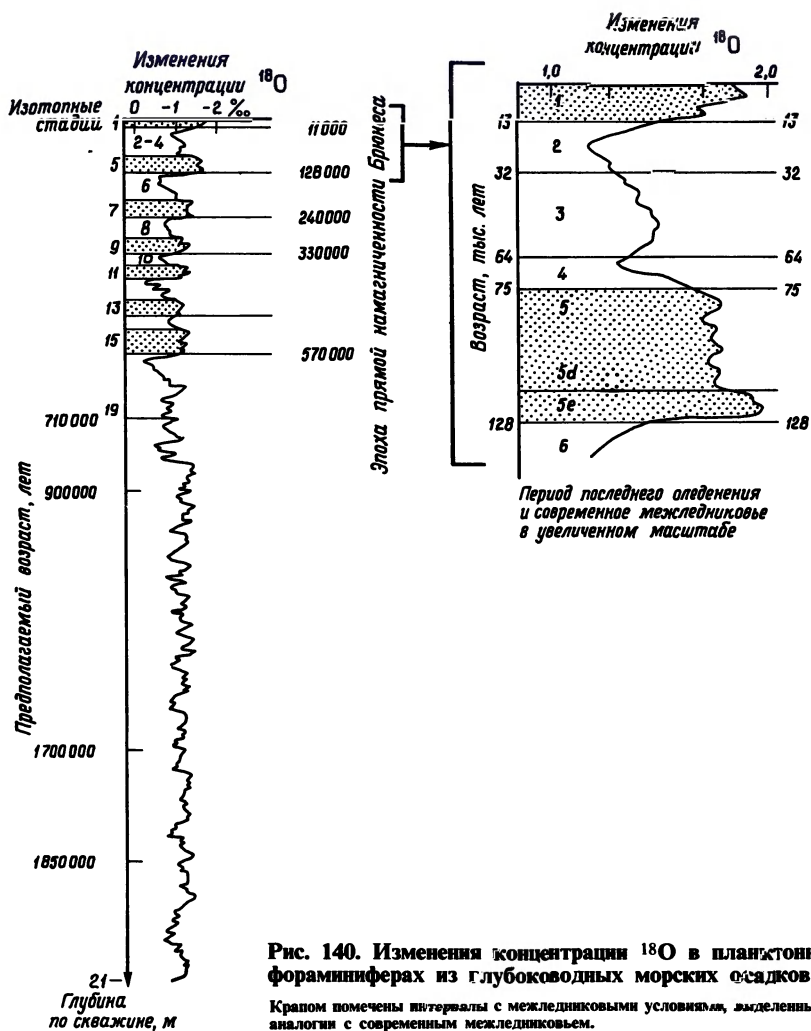


Рис. 140. Изменения концентрации ^{18}O в планктонных фораминиферах из глубоководных морских осадков.

Кратом помечены интервалы с межледниковыми условиями, выделенные по аналогии с современным межледниковьем.

было несколько эпизодов с прямой намагниченностью. Датирование К-Аг-методом показало, что рубеж эпох Брунес и Мацуяма приходился на 700 000 лет назад.

Какое отношение имеют все эти данные к вышеупомянутому графику? Следующий этап научного анализа состоял в определении остаточной намагниченности компонентов, содержащих железо, в морских осадках. Анализ нескольких колонок осадков, взятых из областей с предполагаемыми низкими скоростями се-

диментации, показал, что длительный период с нормальным магнитным наклонением и склонением сменялся периодом с обратным наклонением и склонением. Этот переход коррелируется с границей эпох Брунес и Мапуяма, установленной по вулканическим породам, и, таким образом, это обеспечивает временную маркировку в колонках.

Поступление осадков в глубоководные морские бассейны в течение четвертичного периода происходило относительно равномерно, и поэтому можно принять возраст палеомагнитной границы равным 700 000 годам и рассчитать скорость осадконакопления в колонке. Например, если эта граница в колонке установлена на глубине 6,5 м, то скорость осадконакопления составит 0,00093 см/год, или 0,93 см за 1000 лет. Соответственно верхняя часть колонки мощностью 1 м образовалась примерно за последние 107 500 лет. Предполагаемые оценки возраста осадков моложе 40 000 лет можно проконтролировать путем радиоуглеродного датирования органических или карбонатных материалов из колонок.

Теперь в нашей колонке любой слой осадков датирован. Следующий этап — обработка осадков и извлечение из них небольших раковин ископаемых фораминифер. Затем проводится анализ каждого образца для установления в нем относительного содержания стабильных изотопов ^{16}O и ^{18}O .

Первоначально весь интерес сводился к пониманию фораминифер и моллюсков как органических систем, росших в условиях равновесия с морской водой. Лабораторные исследования показали, что температуры морской воды изменялись и менялось также отношение $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$. Эти изменения концентрации ^{18}O могли быть связаны с колебаниями температуры океанов. Однако некоторые исследователи сомневались в этом. Они полагали, что изменения отношения $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ отражают глобальные изменения объема ледниковых покровов. Теоретически во время оледенения более легкий изотоп ^{16}O в большей степени испаряется с поверхности океанов и накапливается в крупных ледниковых покровах. Это означает, что концентрация более тяжелого изотопа в морской воде увеличивается. Напротив, во время межледниковья «легкая» вода возвращается в океаны и, таким образом, доля ^{18}O там уменьшается, а ^{16}O — увеличивается.

Если эта теоретическая предпосылка верна (мы еще не вполне уверены в этом), то колебания на вышеупомянутом графике могут отражать действительно имевшую место последовательность развития ледникового покрова за последние несколько сотен тысяч лет. Максимумы и минимумы на кривой концентрации ^{18}O в глубоководных морских осадках могут быть обозначены цифрами от 1 (последние 10 000 лет) до 23 (около 900 000 лет назад). Максимумы (1, 3, 5 и т. д.) интерпретируются как межледниковья

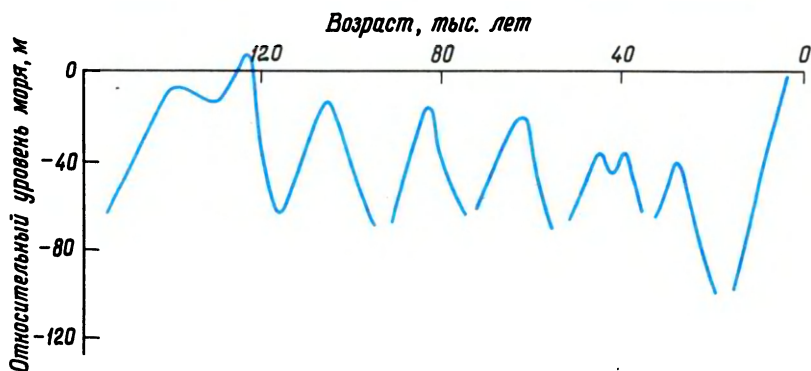


Рис. 141. Кривая колебаний уровня моря, основанная на данных по Новой Гвинее и другим районам с минимальным влиянием оледенения.

Хронологическая шкала в основном базируется на датировках кораллов из древних морских террас по изотопам урана.

или крупные межстадиалы, а минимумы (2, 4, 6 и т.д.) — как крупные оледенения. Мы еще вернемся к этому вопросу в настоящей главе.

Этот обзор, иллюстрирующий, как датируются и анализируются колонки глубоководных морских осадков, подчеркивает важную роль глубоководных морских исследований как объединяющего фактора, способствующего познанию кайнозойских оледенений. Действительно, теперь многие исследователи убеждены в том, что глобальная хроностратиграфия кайнозойского ледникового периода должна основываться на вариациях в концентрации ^{18}O в глубоководных морских осадках.

Однако большинство специалистов по кайнозойским оледенениям занимаются изучением континентальных отложений, которые гораздо сложнее датировать, чем океанические осадки, из-за многочисленных перерывов в осадконакоплении. Однако мы всегда должны помнить о допущениях, лежащих в основе изотопно-кислородных исследований, и пытаться разработать независимые хронологические шкалы для областей, непосредственно подвергавшихся оледенению, и для областей, где зарегистрированы планетарные колебания уровня моря, которые связаны, хотя и не непосредственно, с разрастанием и таянием ледников Земли. В таких исследованиях весьма успешно применялись два метода определения возраста, хотя возрастной предел применения радиоуглеродного (^{14}C) метода колеблется между 40 000 и 75 000 лет, а предел метода датирования по изотопам уранового ряда (^{230}Th) может быть углублен до 250 000–350 000 лет. Диапазон применения радиоуглеродного метода охватывает при-



Рис. 142. Древесина-плавник на высоко поднятой террасе, Южные Шетландские острова, Антарктика.

Такой материал можно использовать для датирования колебаний уровня моря по ^{14}C .

мерно половину последнего ледниково-межледникового цикла, тогда как при датировании по ^{230}Th можно охватить около пяти циклов, фиксируемых по вариациям концентраций ^{18}O .

Для радиоуглеродных датировок можно использовать, например, раковины моллюсков, древесину, торф, кости и карбонатные осадки. Метод основан на наличии небольшого количества радиоактивного изотопа ^{14}C в атмосфере. Этот радиоактивный изотоп входит в трофические цепи, и все живые существа содержат известное количество ^{14}C по отношению к другим — стабильным изотопам углерода ^{12}C и ^{13}C . После гибели организма ^{14}C распадается с определенной скоростью, образуя азот: каждые 5700 лет исчезает половина исходного количества радиоактивного углерода. С помощью чувствительных счетчиков можно датировать образцы, возраст которых достигает 13 периодов полураспада ^{14}C , т.е. 75 000 лет. В природных материалах такого возраста остается всего 0,006% от исходного количества ^{14}C ; соответственно результаты датирования должны тщательно интерпретироваться, так как столь малое количество

легко могло подвергнуться загрязнению, особенно более молодым ^{14}C , который мог проникнуть в образец при просачивании грунтовых вод или путем механической инфильтрации, например, в результате проникновения корней растений в изучаемые остатки.

В обычных радиоуглеродных лабораториях счетчики фактически измеряют скорость распада радиоактивного изотопа, т.е. регистрируют индивидуальные импульсы энергии, испускаемые по мере того, как атомы ^{14}C распадаются, образуя атомы стабильного азота ^{14}N . Определение возраста относительно молодых образцов занимает немного времени, но в более древних образцах скорость распада столь медленная, что эта процедура часто длится несколько суток и даже недель. В действительности процесс распада случаен, и число импульсов за единицу времени колеблется. Эти вариации отражаются в виде средней статистической ошибки, которая указывается при каждой конечной датировке, например 5340 ± 200 лет. Более точная датировка (с меньшей средней статистической ошибкой) может быть получена при более длительном счете радиоактивности образца.

В последнее время эффективность счета ^{14}C , точность и достоверность радиоуглеродных датировок значительно повысились. Ученые в США и Канаде применили в качестве масс-спектрометров линейные ускорители и циклотроны и действительно *сосчитали* число атомов ^{14}C в образце. Этот метод имеет несколько преимуществ: одно из них заключается в том, что вес анализируемого образца измеряется в миллиграммах, а не в граммах, как до сих пор; второе преимущество состоит в том, что счет осуществляется за период от 90 до 400 мин, т.е. за гораздо более короткий промежуток времени, чем в обычных лабораториях.

Третье преимущество, пока еще не достигнутое, — теоретическая возможность дальнейшего углубления предела радиоуглеродного датирования до 100 000 лет. Благодаря этому удастся датировать многие важные межстадиальные отложения в Европе и других частях света, относящиеся к периоду между 75 000 и 100 000 лет назад. Однако следует заметить, что в образцах этого временного диапазона содержится мало атомов ^{14}C и необходима гарантия, что они не загрязнены. Эту задачу будет нелегко осуществить, но это возможно при условии концентрации крупных молекул белков, сохранившихся в некоторых материалах, например в раковинах морских моллюсков.

Наши представления о связи между концентрацией ^{18}O в глубоководных осадках океанов и изменениями уровня Мирового океана во время перехода от последнего межледниковья к последнему оледенению, т.е. между 125 000 и 115 000 лет назад, основываются главным образом на результатах датирования мор-

ских кораллов по изотопам уранового ряда. За последние годы этим же методом был определен возраст карбонатных осадков пещер в Северной Америке и Великобритании, что пополнило представления о хронологии вышеупомянутого переходного интервала.

Более распространен ураново-иониевый метод определения абсолютного возраста. Исследования показали, что современные морские кораллы, карбонатные осадки пещер и в меньшей степени раковины моллюсков содержат несколько миллионных долей урана, но крайне незначительное количество иония (^{230}Th), потому что уран растворим в природных водах, тогда как продукт радиоактивного распада ^{230}Th нерастворим. Со временем: содержание ^{230}Th возрастает до равновесного с ураном (период полураспада 75 000 лет). Если при радиоуглеродном датировании в большинстве лабораторий можно определять возраст образцов, превышающий семь периодов полураспада ^{14}C (40 000 лет, или 0,8% оставшегося количества ^{14}C), то предел датирования по ^{230}Th составляет 300 000 лет, или четыре периода полураспада.

Сравнительно новый метод определения возраста или, вернее, корреляции отложений основан на химических изменениях белка погибших организмов. Для датирования по аминокислотам можно использовать раковины морских и наземных моллюсков, кости животных, раковины фораминифер и остракод и остатки растений. Принцип этого метода состоит в том, что со временем изменяется оптическая конфигурация аминокислот, являющихся компонентами структуры белков ископаемого организма. Однако это химическая реакция, и она зависит от температуры. Следовательно, разные результаты будут получены для раковин одновозрастных видов моллюсков, отобранных, например, из южной Англии и северной Аляски. Это значит, что метод датирования по аминокислотам наиболее полезен для региональных корреляций (например, в пределах Великобритании). После более глубокого изучения механизма этого процесса можно будет более широко применять данный метод. Одна из наиболее важных сторон метода – его очень широкий временной диапазон: он может применяться почти во всех регионах для датирования отложений возрастом до 1 млн. лет, а в арктических и антарктических областях – для датирования ископаемых возрастом до 15 млн. лет.

Рассмотренные выше методы датирования целиком зависят от тщательности и достоверности стратиграфических наблюдений, выполненных в полевых условиях при отборе образцов. При этом возникает ряд важных проблем. Например, залегают ли изучаемые образования *in situ*? Не загрязнены ли пробы? Точно ли установлен генезис слоев, перекрывающих и подстилающих датируемый слой? В конечном итоге наше понимание кайнозойско-

го ледникового периода зависит от более утонченного использования методов датирования и от стремления глубже выяснить закономерности процесса накопления и условий залегания ледниковых осадков. Учитывая эти тенденции, обратимся к рассмотрению важной проблемы установления кайнозойского ледникового периода.

УСТАНОВЛЕНИЕ ЛЕДНИКОВОГО ПЕРИОДА

Всякий раз, когда заходит речь о кайнозойском ледниковом периоде, неизменно поднимаются два вопроса. Во-первых, когда и почему возникли крупные устойчивые ледниковые покровы Антарктиды и Гренландии? Во-вторых, как они повлияли на развитие неустойчивых ледниковых покровов в Северном полушарии?

Установление оледенения в Антарктиде ознаменовало собой начало кайнозойского ледникового периода. Этому предшествовал длительный интервал с преобладанием мягкого климата и обширных морей, что способствовало отложению мела на территории Англии и Франции. В Северной Америке от Арктической Канады до Мексиканского залива простирался крупный морской пролив. Однако история меловых морей — это история неоднократно чередовавшихся трансгрессий и регрессий, которые связываются с изменениями объема Мирового океана. Во многих отношениях эти колебания были предвестниками того при-

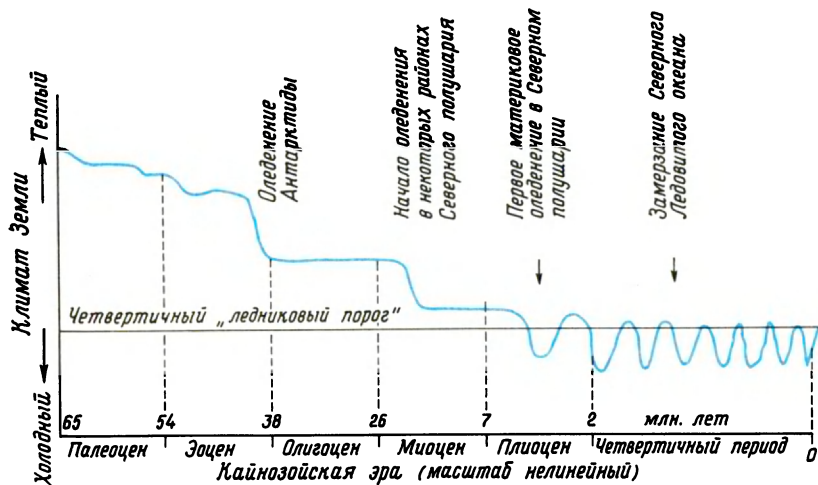


Рис. 143. Предполагаемая тенденция развития климата Земли в третичном и четвертичном периодах, направленная к достижению «ледникового порога».

По крайней мере в течение последних 2 млн. лет происходили колебания климата относительно этого порога.

родного окружения, которое было характерно для раннего и среднего кайнозоя с их довольно быстрыми изменениями природы. Как упоминалось в гл. 2, эти основополагающие изменения в географии нашей планеты, видимо, создали необходимые условия для установления ледникового периода.

На рис. 143 показана тенденция изменения температур на земном шаре за последние 70 млн. лет. В первой половине третичного периода области, ныне покрытые льдом, как, например, Баффинова Земля у 71° с. ш., характеризовались растительностью и соответственно климатом, которые сейчас присущи южным приатлантическим штатам США. Подобные заключения были сделаны на основе изучения ископаемых остатков растений и животных из разрезов Аляски и северной Канады. Такие теплые климатические условия преобладали, хотя Северный полюс находился поблизости от края Северного Ледовитого океана. Таким образом, в районах, расположенных в пределах Полярного круга, тогда были длинные летние дни и длинные зимние ночи.

Однако мир не оставался статичным. Произошло несколько событий, которые неминуемо повлекли за собой глобальное понижение температур. Это продолжалось до тех пор, пока не возникли подходящие условия для роста ледниковых покровов. Антарктида медленно перемещалась в район Южного полюса. В Северном полушарии происходили крупные палеогеографические изменения, включая образование Северного Ледовитого океана, открытие северо-западного (море Баффина и море Лабрадор) и северо-восточного проходов (Гренландское и Норвежское моря) при спрединге от Северо-Атлантического хребта и активное образование системы разломов между западной Гренландией и восточной частью Канадской Арктики. Образование разломов на древних щитах в свою очередь сопровождалось поднятием и образованием сбросов по краям рифтовых зон. Поднятия изменили рельеф этих северных областей: на месте низких равнин образовались внутренние плато высотой порядка 600 м с высоко поднятыми краями. События в Северном и Южном полушариях происходили одновременно, и, таким образом, трудно сказать точно, какое событие послужило «пусковым механизмом» кайнозойского оледенения. Все они сыграли свою роль в этом процессе, и без этого своеобразного стечения обстоятельств, возможно, развитие нашей планеты в последующие 10–30 млн. лет было бы совершенно иным.

Исследователи кайнозойского ледникового периода нередко сталкиваются с противоречивыми фактическими данными. Но ведь то же самое наблюдается и в настоящее время. Деревья растут на моренах, покрывающих лед, на Аляске; жуки, свидетельствующие о теплых условиях, были обнаружены поблизости от ледников Исландии; современные ледники существуют в районах

с летними температурами от 7 до -4°C . Поскольку оледенение развивалось в течение кайнозоя, вполне естественно, что в геологической летописи сохранились противоречия. Действительно, возраст свидетельств времени начала оледенения Антарктиды колеблется от 55 млн. до 25 млн. лет, тогда как возраст свидетельств неледниковых условий колеблется от 70 млн. до 15 млн. лет. Однако немногие из этих данных относятся к одному и тому же району. Отсюда можно сделать вывод, что оледенение в Антарктиде наступило не одновременно; первоначально оно характеризовалось ограниченным распространением в одной части материка, в то время как в других частях еще преобладали теплые условия. Напомним, что современные ледники существуют у самого экватора на высотах около 5500 м.

Оледенение в Антарктиде в первую очередь возникло в Трансантарктических горах и горах Гамбурцева. Все факты указывают на развитие оледенения в отдельных районах Антарктиды в олигоцене (38–26 млн. лет назад). Настоящий ледниковый покров, вероятно, образовался на этом материке в начале миоцена (25–20 млн. лет назад).

Распространение ледникового покрова на территории Антарктиды площадью 13 млн. км² оказало большое влияние на температуры всей Земли. В гл. 2 сообщалось, что летом поверхность льда и снега отражает в атмосферу большую часть коротковолновой радиации, поступающей от Солнца. Здесь проявляется роль высокой отражательной способности, или альбедо, поверхности свежевыпавшего снега — около 80% против 20–40% для поверхностей с растительным покровом. Иными словами, в первом случае поглощается всего 20% поступающей энергии, а во втором 80–60%. Поэтому оледенение Антарктиды привело к значительному понижению средних температур на всем земном шаре и тем самым способствовало еще более широкому распространению оледенения.

Постепенное ухудшение климата Земли в начале и середине третичного периода четко отразилось в изменениях растительности в северных широтах. Теплолюбивые умеренные и субтропические растения на Аляске и в северной Канаде уступили место видам, характерным для более холодных климатов. Однако первые прямые свидетельства оледенения в Северном полушарии были обнаружены в высоких горах южной Аляски, где ледниковые отложения переслаиваются с лавами. Последние удалось датировать с помощью калий-аргонового метода, и результаты показали, что в этих высоких горах ледниковый покров существует с середины миоцена (около 10 млн. лет).

До сих пор не известно время возникновения Гренландского ледникового покрова. В самой Гренландии не обнаружено никаких прямых свидетельств этого события. Исходя из общих со-

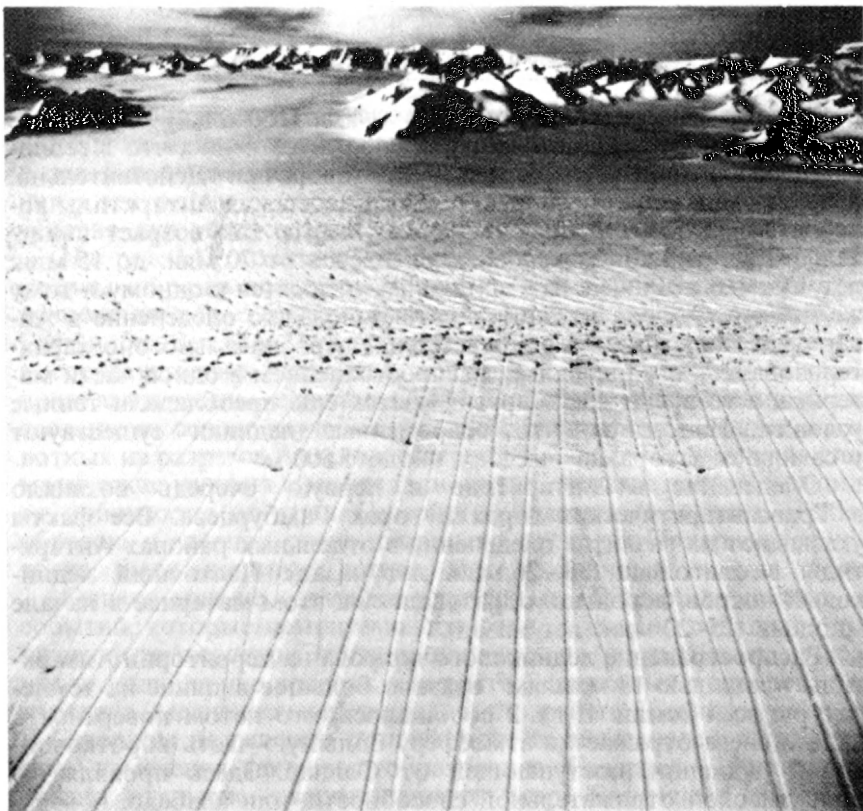


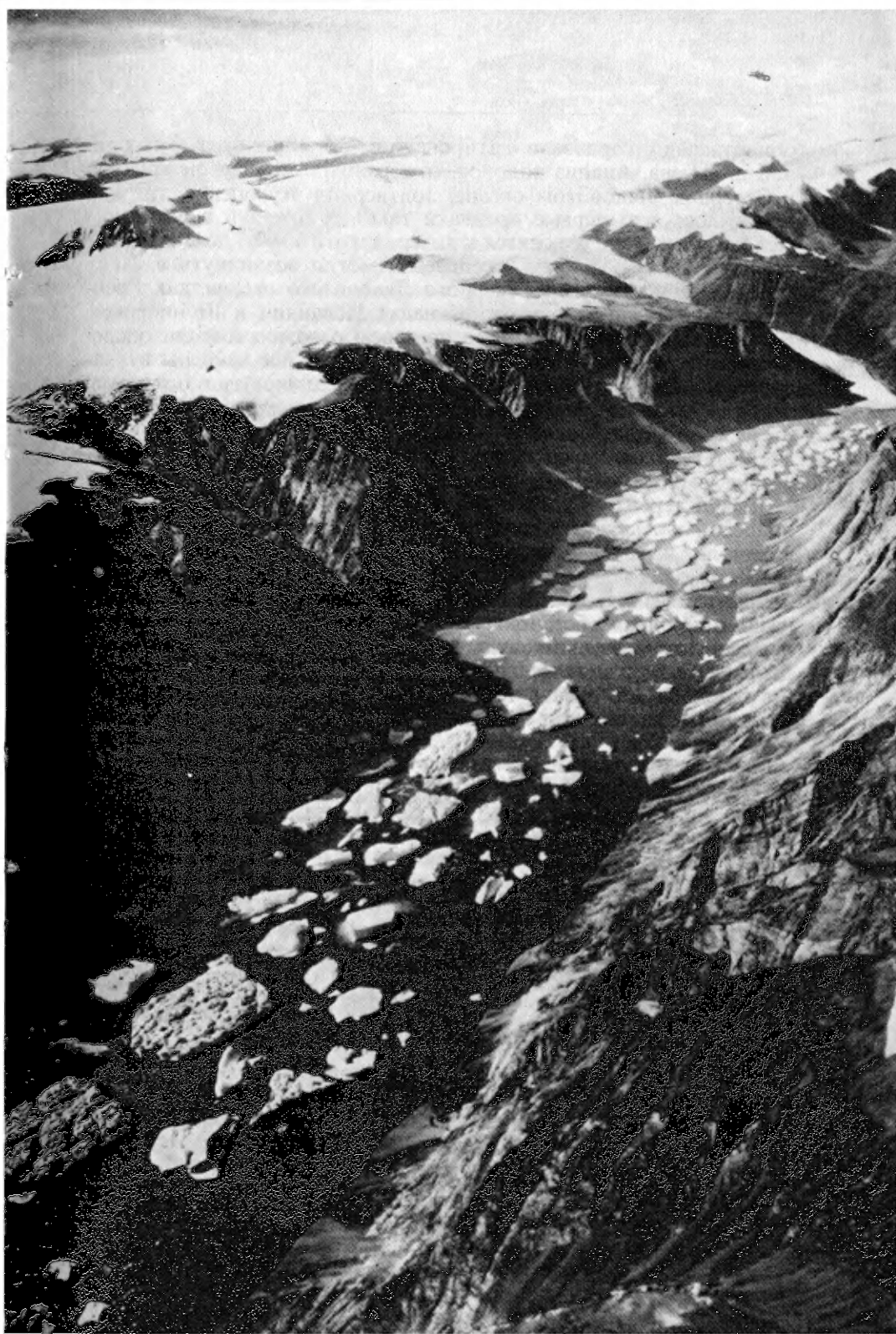
Рис. 144. Ледники в Трансантарктических горах, Антарктида.

Прежде всего ледники сформировались на южном склоне горного хребта и сток льда был направлен в сторону Южного полюса. В настоящее время горы в значительной степени перекрыты Восточно-Антарктическим ледниковым покровом, а выводные ледники устремляются в противоположную сторону к шельфовому леднику Росса.

Рис. 145. Фьорд в восточной Гренландии, забитый айсбергами.

Айсберги такого рода начали переносить обломки ледникового происхождения в моря, окружающие Гренландию, около 3,5 млн. лет назад.

ображений, представляется, что этот ледниковый покров образовался в среднем миоцене. Анализ глубоководных морских осадков в этом случае вновь оказался полезным для изучения кайнозойской истории Земли. В последние годы крупные исследования нашей планеты выполнялись по Программе глубоководного морского бурения (Deep Sea Drilling Program, DSDP). Буровой платформой служило специально оборудованное судно. Во многих океанах мира были отобраны длинные колонки донных осадков, и их исследование помогло дать ответ на наш вопрос. В колонке из пункта, расположенного к югу от Гренландии и к северо-востоку от Ньюфаундленда, первые находки обломочно-го материала, отложившегося из основания плавучего льда, были



обнаружены в горизонте, датированном 3,5 млн. лет, т. е. серединой плиоцена. Анализ колонок, отобранных поршневой трубкой в Северном Ледовитом океане, подтвердил эту оценку, так как выяснилось, что первые признаки таких отложений в Северном Ледовитом океане относятся к интервалу от 6 млн. до 3 млн. лет назад. В первую очередь оледенение могло возникнуть в таких районах вдоль берегов Северного Ледовитого океана, как Гренландия, арктические острова Канады, Исландия и Шпицберген. В настоящее время мы ничего не знаем о возникновении оледенения во всех этих районах, кроме Исландии, где найдены вулканические породы, переслаивающиеся с ледниковыми осадками, и соответственно выяснилось, что там за последние 3 млн. лет было много оледенений.

Выше приводились факты, свидетельствующие, что климат Земли неминуемо движется к «порогу неустойчивости», который был характерен для последних 1–2 млн. лет. По-видимому, Гренландский и Антарктический ледниковые покровы существовали 3 млн. лет назад. В некоторых горных районах Аляски тоже развивалось оледенение, и локальная ледяная шапка могла впервые покрыть платобазальты Исландии. Иными словами, 3 млн. лет назад природная обстановка могла быть весьма похожей на современную межледниковую. Однако, судя по фактическим данным, было и значительное различие. Если поверхность Северного Ледовитого океана теперь большей частью скована льдом, то анализы взятых при бурении глубоководных морских осадков

Рис. 146. Кайнозойские базальты, выступающие над небольшой ледяной шапкой и выраженные в рельефе в виде нунатаков, Исландия.

В этой стране, где вулканические породы переслаиваются с ледниковыми отложениями, установлено, что оледенение началось не менее 3 млн. лет назад.





Рис. 147. Замерзший Северный Ледовитый океан у северного берега острова Элсмир.

Шельфовый ледник Уорд-Хант, показанный на этой фотографии, и поверхностный слой морского льда начали формироваться около 700 тыс. лет назад.

и заключенной в них фауны показывают, что 3 млн. лет назад в этом океане не было льдов. Его ледяной покров, по оценкам, возник гораздо позднее — 700 000 лет назад. Значение этого события для климата Земли нельзя недооценивать. Хотя летом поверхность морского льда отражает не так сильно, как ледниковый лед или снег, то тем не менее значительно сильнее, чем открытая вода (открытая поверхность океана поглощает большую часть поступающей коротковолновой радиации). Таким образом, распространение ледяного покрова в Северном Ледовитом океане площадью 15 млн. км² по своему воздействию сопоставимо с более ранним распространением Антарктического ледникового покрова. Время замерзания Северного Ледовитого океана было очень важной вехой в истории кайнозойского ледникового периода. Датировка 700 000 лет, основанная на упоминавшейся выше палеомагнитной шкале, показывает, что в течение всей магнитной эпохи Брунес замерзший океан в Арктике оказывал существенное влияние на климат земного шара.

Итак, мы имеем два основных временных среза. Первый из них — около 3 млн. лет назад — характеризуется обширными ледниковыми покровами в Антарктиде и Гренландии, отдельными

местными очагами оледенения, но отсутствием покрова морских льдов в Арктике; второй срез – около 700 000 лет назад – представляет межледниковье, когда распространение льдов было подобным современному. Что же происходило в интервале между 3 000 000 и 700 000 лет назад? К какому времени следует отнести начало классической серии оледенений Северного полушария, начавшейся с небраскского оледенения Великих равнин Северной Америки и с дунайского оледенения в Альпах?

Это важные, но трудные вопросы. В основных областях распространения ледниковых отложений не найдено образований, которые можно непосредственно отнести к данному времени, хотя по вулканическому пеплу можно примерно оценить возраст небраскского оледенения. Однако временной срез около 700 000 лет назад отличался ухудшением климата земного шара до «полюса оледенения», и, следовательно, с образования массивных неустойчивых ледниковых покровов тогда действительно началось оледенение в Северном полушарии. Это был главный поворотный момент в истории кайнозойского ледникового периода. Хотя и нет абсолютной уверенности, факты, однако, свидетельствуют о том, что в Антарктиде (скорее всего, в Восточной Антарктиде) и Гренландии ледниковые покровы сохранялись в течение последних 3 млн. лет. Это устойчивые ледниковые покровы нашей планеты. Аналогичным образом в Северном Ледовитом океане сохранялся ледяной покров в течение последних 700 000 лет, и это тоже была постоянная величина в энергетическом балансе Земли. Переменными величинами в истории Земли за последние 3 млн. лет были неустойчивые элементы в виде крупных ледниковых покровов Северного полушария, возможно больших шельфовых ледников, окаймлявших ледниковые покровы, и обширных площадей морских льдов. В гл. 2 рассматривались причины установления оледенений; ниже в настоящей главе мы обратимся к проблеме, которую многие считают еще более важной, а именно к выяснению факторов, останавливающих развитие оледенения.

ИСТОРИЯ ПОЗДНЕКАЙНОЗОЙСКИХ ОЛЕДЕНЕНИЙ

Известно, что в кайнозое на территории Европы и Северной Америки было четыре главных оледенения; в Альпах их называли (от древнего к молодому) гюнцским, миндельским, рисским и вюрмским, а их предполагаемые аналоги в Северной Америке – небраскским, канзасским, иллинойсским и висконсинским. В Альпах некоторые ученые выделяют два более древних оледенения – биберское и дунайское. При характеристике природы позднего кайнозоя мы ориентировались преимущественно на межледниковые обстановки, которые прерывались четырьмя резкими

вспышками оледенений неизвестной продолжительности. В результате широкого изучения глубоководных морских осадков в сочетании с увеличившейся возможностью датировать более разнообразные материалы произошло столкновение новых фактов и гипотез с традиционными представлениями.

Как можно согласовать график, изображенный на рис. 140, с прежним представлением о четырех оледенениях? Судя по вариациям концентрации ^{18}O в глубоководных морских осадках, можно предполагать, что если верны некоторые из основных допущений, то за последние 900 000 лет отношение $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ в Мировом океане девять или десять раз менялось до такой степени, что это можно объяснить только развитием крупных ледниковых покровов в Северном полушарии. Следовательно, в глобальном масштабе данные по вариациям ^{18}O , по-видимому, свидетельствуют, что примерно за последние 900 000 лет обширные территории земного шара были заняты ледниковыми покровами, которые существовали в среднем по 90 000 лет, а затем исчезали. Если принять содержания ^{18}O в фораминиферах за последние 10 000 лет как характерные для межледниковых условий, то можно сделать вывод, имеющий непосредственное значение для человечества, который состоит в том, что межледниковья были гораздо короче оледенений и в среднем продолжались всего по 10 000 лет. В более широких временных рамках по изменениям концентрации ^{18}O в глубоководных морских осадках в позднем кайнозое можно выделить два периода: более ранний между 2 000 000 и 850 000 лет назад и более поздний, охватывающий последние 850 000 лет. Таково качественное выражение изотопно-кислородных данных. В более раннем периоде особенно резких изменений в концентрации ^{18}O не обнаружено. За последние 850 000 лет эти изменения составляли около 1,5% в рамках ледниково-межледникового цикла, тогда как в предыдущий период, судя по результатам изучения колонки из центральной части Тихого океана, они не превышали 0,7%.

Последнее оледенение (висконсинское в Северной Америке, вюрмское в Альпах) не было столь обширным, как несколько предыдущих оледенений. Напротив, ледниковые покровы земного шара во время последнего оледенения, очевидно, удерживали несравненно меньше воды, чем во время других оледенений магнитной эпохи Брунес.

Брёкер и Ван Донк обратили внимание на тот факт, что ход каждого ледникового цикла в глобальном масштабе похож на зубцы пилы. Это указывает на медленное постепенное разрастание покровов льдов до максимума, который быстро сменялся деградацией оледенения. На этой модели быстрое исчезновение неустойчивых ледниковых покровов сильно контрастирует с фазой их медленного образования.

Изменение концентрации ^{18}O в глубоководных морских осадках свидетельствует о том, что в реакции земного шара на изменения климата имели место повторявшиеся циклы. Обработка изотопно-кислородных данных с помощью статистических методов позволила установить циклы повторяемостью около 20 000, 45 000 и 100 000 лет, соответствующие ритмам в распределении поступающей от Солнца коротковолновой радиации, выведенным из законов небесной механики (так называемая теория Миланковича, описанная в гл. 2). Эта основная периодичность реакции земного шара на изменения климата не должна привести нас к ошибочным выводам о том, что на нове глобальных закономерностей можно прогнозировать очень крупные региональные вариации и что циклы, выявленные по данным изучения глубоководных морских осадков, являются средними.

Как же согласовать традиционное мнение о четырех крупных оледенениях, развивавшееся геологами-гляциалистами за последнее столетие, с более динамичной интерпретацией позднеледникового климата Земли, основанной на исследованиях глубоководных морских осадков? На этот кардинальный вопрос трудно ответить прежде всего из-за невозможности датирования отложений многих классических разрезов, на которых строится стратиграфия древнеледниковых областей. Связь между непрерывной летописью осадконакопления в океанах и более фрагментарной летописью материкового оледенения может быть установлена на основе истории климатических изменений, восстановленной по материалам изучения погребенных почв и фауны наземных моллюсков в мощных толщах золотых пылеватых отложений (лессов) Центральной Европы, особенно Чехословакии, Венгрии и Австрии (см. гл. 3). Эти осадки сохраняют остаточную намагниченность, и поэтому оказалось возможным отделить слои эпохи Брунес от более древних слоев эпохи Мацуяма. Кукла и другие геологи реконструировали климатическую историю Центральной Европы за последние 1,8 млн. лет. Для этого периода было выделено около 18 «ледниковых» циклов. Эти данные интерпретировались, чтобы показать, что амплитуды изменений климата в период между 700 000 и 1 800 000 лет назад и за последние 700 000 лет были сходны. Такое заключение противоречит прежнему выводу, и, таким образом, по этому вопросу не достигнуто согласия. Если было 18 ледниковых циклов, то как они связаны с четырьмя оледенениями в Европе и Северной Америке?

Предварительная попытка решения этого вопроса была сделана Куклой для последних 900 000 лет, а более ранние события пока не увязаны с данными по накоплению глубоководных морских осадков. Основные положения, выдвинутые Куклой, следующие: классические межледниковые толщи часто представляют

собой комплексы, которые соответствуют нескольким морским изотопным ледниково-межледниковым циклам; оледенения, предшествовавшие последнему, включают ряд ледниковых эпизодов, равных по своему значению последнему – висконсинскому, или вюрмскому, оледенению. Например, в Северной Америке отложения последнего межледниковья, называемого сангамонским, по предположению Куклы, накапливались в период между 320 000 и 70 000 лет назад. Подобным же образом последнее межледниковье в Северной Европе, часто называемое эмским, по мнению Куклы, включало три эпизода, которые отвечали морским изотопным стадиям 5, 7 и 9 (рис. 140), причем каждый из этих эпизодов называли «эмским».

Проблема в целом фактически сводится к установлению возраста. Как сопоставить между собой обособленные разрезы с межледниковыми отложениями возрастом более 70 000 лет (т.е. за пределами возможностей большинства радиоуглеродных лабораторий)? Так как разрезы находятся в разных районах, нельзя прибегнуть к прямой корреляции на биостратиграфической основе. Если в межледниковых отложениях содержатся раковины пресноводных или наземных двустворчатых моллюсков или других животных, то с помощью аминокислотного метода можно выяснить, сопоставимы ли эти отложения по возрасту с «эмскими» межледниковыми отложениями Дании или с ипсвичскими межледниковыми отложениями Англии. В настоящее время приведенный выше график следует принимать как весьма стимулирующую гипотезу, которую по возможности следует проверить.

Трудно непосредственно сопоставить ледниковые и межледниковые отложения опорных разрезов со стратиграфией глубоководных областей океанов. Однако общее число ледниково-межледниковых циклов, выделяемых в изотопно-кислородной летописи морских осадков, сопоставимо с числом циклов лёссонакопления. Кроме того, были исследованы длинные колонки осадков озер и торфяных болот Европы и Южной Америки, которые накапливались за последние полмиллиона лет.

Скважина глубиной 12 м, пробуренная в Македонии, вскрывает в основании слои, отвечающие изотопной стадии 17 (см. рис. 140). Колебания в содержании пыльцы дуба говорят об участии местной растительности и соответственно служат показателем регионального климата: процентное содержание пыльцы дуба возрастает во время межледниковий и имеет низкие значения во время оледенений. По колебаниям в содержании пыльцы дуба можно выделить несколько главных изменений климата, которые могут быть достаточно корректно сопоставлены с ходом осадконакопления в глубоководных районах Северной Атлантики.

Большую часть отложений данной скважины, однако, нельзя датировать, вследствие чего эти сопоставления не следует счи-

тать абсолютно доказанными. Тем не менее они послужили серьезной проверкой традиционных представлений. Выяснилось, что Европа испытала гораздо больше климатических изменений, чем следовало из классической модели оледенений. Основная трудность заключается в корреляции событий, предшествовавших последнему межледниковью. Ниже мы более подробно рассмотрим события последних 125 000 лет. Поскольку этот интервал гораздо ближе к нам, мы можем точнее датировать относящиеся к нему образования и лучше знаем его особенности. Кроме того, флора и фауна нашей планеты в значительной степени унаследованы от этого интервала.

ПОСЛЕДНЕЕ МЕЖЛЕДНИКОВЬЕ И ПОСЛЕДНЕЕ ОЛЕДЕНЕНИЕ

В этом разделе рассматривается последовательность известных нам событий, позволяющая оценить динамику процессов разрастания и убывания оледенения. Кроме того, мы взглянем на мир, особенно на Северное полушарие, во время наибольшего распространения последнего оледенения. Этот максимум на самом деле не очень хорошо датирован, но условно многие исследователи считают, что он имел место около 18 000



Рис. 148. Свидетельство повышения уровня моря во время последнего межледниковья – поднятая береговая линия эмского, или сангамонского, возраста на побережье Уэльса.

Береговая галька покоится на скальной платформе, вероятно имеющей более древний возраст.

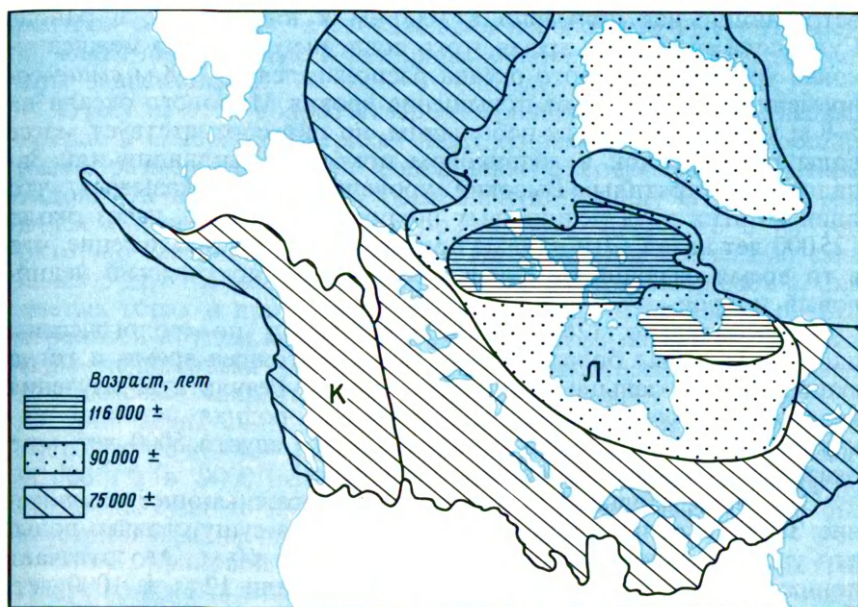


Рис. 149. Три части Лаврентийского ледникового покрова Северной Америки (Л). Показан также Кордильерский ледниковый покров (К). В основных очагах оледенение возникло около 116 тыс. лет назад, в устойчивой центральной зоне—около 90 тыс. лет назад, на большей части неустойчивой периферийной зоны—около 75 тыс. лет назад.

лет назад. Здесь при глобальном обзоре событий мы вновь сошлемся на колебания концентрации ^{18}O в глубоководных морских осадках.

Пик последнего межледниковья был около 125 000 лет назад. Свидетельства, собранные в различных местах земного шара, показывают, что климат последнего межледниковья был значительно теплее, чем в любое время за последние 10 000 лет, охватывающие нынешнее межледниковье. Например, в Канадской Арктике обнаружены разрезы с отложениями последнего межледниковья; содержащиеся в них остатки растений, мхов и жуков использовались для оценки прежнего климата, при этом учитывались современные ареалы показательных видов: лиственница росла на острове Банкс в 300 км к северу от современного ареала; карликовая береза была господствующим кустарничком в арктической тундре на Баффиновой Земле, тогда как в настоящее время она растет в 450 км к югу от этого района и то лишь в наиболее благоприятных местообитаниях; в тех же самых разрезах на Баффиновой Земле ископаемые виды мхов и жуков обнаруживают четкие признаки сходства с современными видами,

встречающимися примерно в 1000 км к юго-западу, в районе Гудзонова залива. Во время этого последнего теплого межледникового уровень Мирового океана располагался на 5–8 м *выше* современного. Глобальное повышение уровня Мирового океана на 5–8 м может показаться небольшим, но оно соответствует массе воды, заключенной в ледниковом покрове Гренландии или Западной Антарктиды. Высокий уровень моря показывает, что один из этих двух ледниковых покровов, вероятно, исчез около 125 000 лет назад. Эти данные подтверждают предположение, что в то время разрушился и исчез Западно-Антарктический ледниковый покров.

Следовательно, 125 000–120 000 лет назад, по геологическим данным, мир был более теплым, чем в настоящее время, и тогда существовало меньше ледникового льда. Результаты изучения колебаний уровня моря и изотопно-кислородная летопись показывают, что 115 000 лет назад, т. е. всего спустя 5000 лет, мир оказался на грани последнего оледенения!

Это — замечательное и довольно настораживающее заключение. За 5000 лет из океанов переместилось на сушу столько воды, что уровень Мирового океана понизился на 60 м. Это отвечает понижению уровня океана на 1,2 см в год или 12 м за 1000 лет. Такие величины могут показаться небольшими, но представьте себе необъятную площадь Мирового океана, насчитывающую 360 млн. км². Итак, в начале последнего оледенения 43 200 км³ воды (эквивалентны ~ 129 600 км³ снега) ежегодно накапливалось на суше. Трудно полностью оценить значение таких цифр, но они должны производить сильное впечатление!

Начало последнего оледенения было выдающимся событием в геологической истории. Однако при оценке скорости разрастания льдов встают особые проблемы. В холодных районах на крайнем севере Канады за год выпадает всего около 0,1 м твердых осадков (в пересчете на воду), а у современной северной границы лесной зоны 0,3–0,5 м. Большая часть снега целиком тает каждое лето. В отличие от этого в таких арктических областях, как западная Гренландия, Норвегия и Шпицберген, характеризующихся более ровным морским климатом, выпадает значительно больше твердых осадков. Остается неясным, как формировались ледниковые покровы во время последнего оледенения при скоростях, выведенных на основе геологических данных? Дело в том, что при таких скоростях в областях роста ледниковых покровов должно выпадать больше осадков; отсюда в свою очередь вытекает предположение, что в таких областях температуры могли не понижаться, а, наоборот, даже повышаться.

Изучение колебаний уровня моря проводилось на субтропических островах; изменения концентрации ¹⁸O в глубоководных морских осадках также изучались на территориях, удаленных от

центров оледенения; следовательно, необходимо выяснить, есть ли какие-либо данные в полярных областях для подтверждения этих зависимостей.

Ответ на этот вопрос утвердительный. Основной ледниковый покров в Северной Америке — Лаврентийский — отличался обширными размерами и был сопоставим с современной Антарктидой. Он покрывал всю центральную Канаду и распространялся к берегам Арктики, к полуострову Лабрадор и на территорию северных штатов США. На западе он временами смыкался с другим ледниковым покровом, располагавшимся в Скалистых горах и прибрежных горах Канады, а на севере он был ограничен другим комплексом льда, который называют Иннуитским ледниковым покровом, или Франклинским ледниковым комплексом. Лаврентийский ледниковый покров подразделялся на три части: область первоначальной аккумуляции льда, область устойчивого ледникового покрова в интервале между 90 000 (?) и 9000 лет назад и широкий южный и западный край, где, судя по имеющимся фактам, ледниковый покров был неустойчивым на протяжении тысячелетий.

На Баффиновой Земле, где находился северо-восточный край Лаврентийского ледникового покрова, плато и горы в настоящее время отчасти заняты ледниковыми шапками и ледниками. Высокие волнистые нагорья Баффиновой Земли, северной части полуострова Лабрадор, Киватина и островов Канадского Арктического архипелага — все это территории, где начал формироваться последний ледниковый покров Северной Америки. Всего 100 км отделяют нагорья внутренней части Баффиновой Земли от внешнего побережья, выходящего к Баффинову заливу и морю Лабрадор. В настоящее время это побережье омывается холодными арктическими водами, которые приносятся Канадским (или Лабрадорским.— *Перев.*) течением, следующим от островов Канадского Арктического архипелага; температуры воды — 1°C, и, конечно, в составе морской фауны и наземной флоры районов, испытывающих влияние этого холодного течения, сохранились только устойчивые к холоду виды. Можно было бы предположить, что в этих районах была скудная флора и фауна и во время становления последнего оледенения. Однако результаты исследований свидетельствуют об обратном. Над торфяными отложениями последнего межледникового вскрыты морские осадки, которые содержат раковины организмов, сходных с теми, которые теперь обитают в более теплых водах Западно-Гренландского течения и у берегов северной Норвегии. С исчезновением колоссальной нагрузки вышележащего ледника произошло поднятие суши, и эти морские осадки оказались на высоте 70 м над современным уровнем моря. Они перекрыты основной мореной. Раковины морских моллюсков были датированы несколькими

методами, и было установлено, что разрастание ледникового покрова и наступание его выводных ледников происходили позднее 130 000 и ранее 86 000 лет назад.

В нашей реконструкции исходных условий возникновения оледенения в Северной Америке необходимо дополнительно учесть приток теплых вод Западно-Гренландского течения. Он обуславливал отсутствие ледяного покрова в значительной части моря Баффина и, вероятно, возросшее выпадение снега над Баффиновой Землей.

Что происходило в то время в Северной Европе? Об этом можно судить на основании изучения колонок осадков Северной Атлантики и непрерывных разрезов на суше. Гренландское и Норвежское моря представляют собой увеличенную копию океанографической ситуации в морях Лабрадор и Баффина: теплые воды движутся к северо-востоку в виде Северо-Атлантического течения и предопределяют мягкий морской климат на Британских островах и в Норвегии; холодные арктические воды текут к югу вдоль побережья восточной Гренландии. Изучение колонок глубоководных осадков из северной части Северной Атлантики показало, что около 120 000 лет назад Северо-Атлантическое течение отклонялось к югу по сравнению с нынешним положением из-за поступления холодных полярных вод. Около 115 000 лет назад полярный фронт (океанографическая граница между холодными арктическими и более теплыми субарктическими водами) перемещался к югу до района Британских островов. Это происходило дважды во время изотопной стадии 5; эти глобальные стадиялы обозначают как 5d и 5b. Эти внезапные довольно непродолжительные похолодания прослеживаются в отложениях Северной Европы. Они прекрасно выражены в разрезе Гран-Пиль мощностью 18 м во Франции.

В соответствии с нашей реконструкцией Северного полушария в начале последнего оледенения моря Баффина и Лабрадор были более свободны ото льда, чем в настоящее время, а в Северной Европе, по крайней мере до 50° с.ш., напротив, климат был гораздо более суровым и холодным. Общие причины возникновения оледенения уже рассматривались в гл. 2, но уместно заметить, что, когда критический порог был достигнут, каждое оледенение могло быть вызвано уникальным набором факторов. В одних случаях в число этих факторов могли входить процессы, действовавшие в соответствии с теорией Миланковича, тогда как в других – случайные элементы, не обнаруживающие строгой периодичности.

В период между 120 000 и 80 000 лет назад на Земле было два основных ледниковых стадияла. Они разделялись двумя эпизодами более мягкого климата, когда часть накопленного льда таяла и уровень Мирового океана повышался от 60 м до 15 м ниже со-

временного положения. Около 75 000 лет назад оледенение очень быстро достигло широкого распространения. До этого, вероятно, оно ограничивалось разрастанием Антарктического и Гренландского ледниковых покровов, развитием устойчивого ядра Лаврентийского ледникового покрова, ростом масс льда на Канадском Арктическом архипелаге и развитием ледяного комплекса в Европейской Арктике с возможным центром на мелководном шельфе Баренцева моря. Нет свидетельств существования ледникового покрова на этой ранней стадии развития оледенения в Северной Европе.

Скорости изменения концентрации ^{18}O и понижения уровня Мирового океана около 75 000 лет назад были примерно такие же, что и на более раннем этапе, 120 000–115 000 лет назад. Уровень Мирового океана понизился примерно на 100 м ниже современного положения всего за несколько тысяч лет.

Около 75 000 лет как раз располагается предел датирования с помощью ^{14}C -метода, и события, имевшие место между 75 000 лет назад и началом деградации оледенения на земном шаре, около 15 000 лет назад, могут быть установлены во временном масштабе как по континентальным, так и по глубоководным морским осадкам. 75 000 лет назад Лаврентийский ледниковый покров расширился примерно на 1000 км к югу и западу и сомкнулся с Кордильерским ледниковым покровом, который облекал горы западной Канады и Аляски. В Европе Скандинавский ледниковый покров стал более мощным и распространился над горами Норвегии и Швеции. Не известно, покрывалась ли в то время льдом территория Великобритании, но факты скорее свидетельствуют об обратном.

Климат земного шара между ледниковым стадиалом 75 000 лет назад и несколько более крупным ледниковым стадиалом 18 000 лет назад трудно представить себе. Изучение глубоководных морских осадков указывает лишь на некоторое повышение температур океанов в этот период. В Северной Америке Кордильерский ледниковый покров деградировал и совсем исчез, а Лаврентийский ледниковый покров отступил к северу и востоку до его устойчивого положения, хотя лед все еще блокировал долину реки Святого Лаврентия. В Европе нет четких свидетельств климата этого времени, но находки ископаемых почв и мамонтов¹ в Норвегии и Швеции свидетельствуют о том, что большая часть Скандинавского ледникового покрова растаяла, и ледники сохранялись лишь в высоких горах.

Эти межстадиальные условия продолжались в интервале между 60 000 и 25 000 лет назад. Ботанические и зоологические данные по южным периферическим частям ледникового покрова

¹ В оригинале ошибочно упомянуты мастодонты.—Прим. перев.

показывают, что местами климат был сходен с современным¹, тогда как в других местах был более прохладный. Рассматриваемый продолжительный межстадиал сыграл важную роль на завершающем этапе развития *Homo sapiens*, и существовавшие тогда природные обстановки, несомненно, повлияли на миграции наших предков. В течение этого периода уровень Мирового океана удерживался примерно на 50 м ниже современного положения. Следовательно, большие области шельфа находились в субаральных условиях, представляя собой благоприятные местобитания для первобытного человека и крупных промысловых животных. Недавние исследования на территории Юкон, Канада, подтверждают, что первобытный человек проник в Северную Америку во время этого межстадиала, т.е. по крайней мере на 19 000 лет раньше даты, которую признавали многие археологи. Теперь мы имеем явный перевес аргументов в пользу заселения Северной Америки во время главного межстадиала висконсинского оледенения. Этот факт подтвержден также рядом радиоуглеродных датировок, которые для археологических памятников в Центральной и Южной Америке варьируют между 19 000 и 26 000 лет, и это вызывало дискуссии среди археологов, поскольку полученные датировки оказались древнее явных свидетельств быстрого заселения Северной Америки охотниками на крупных млекопитающих около 11 000 лет назад.

Последним крупным событием в истории последнего оледенения был быстрый рост и распространение ледниковых покровов на территории Скандинавии, Великобритании и Кордильер Северной Америки, а также южного и западного краев Лаврентийского ледникового покрова. Из имеющихся данных вытекает, что это последнее крупное оледенение началось около 25 000 лет назад и в глобальном масштабе максимум оледенения был достигнут 18 000 лет назад. Однако в местном и региональном масштабах различные края разных ледниковых покровов достигли максимумов неодновременно в интервале между 22 000 и 9 000 лет назад: в общем южные края ледниковых покровов Северного полушария достигли максимума около 18 000 лет назад, тогда как в высоких северных широтах максимум был достигнут 10 500 лет назад на Шпицбергене, 10 000–11 000 лет назад – в восточной Гренландии, 8 000–10 000 лет назад – на востоке Канадской Арктики, 13 000 лет назад – на западе Канадской Арктики и 14 000 лет назад – на юго-западном краю Кордильерского ледникового покрова.

¹ Это указывает на близость к межледниковым условиям, особенно принимая во внимание разрушение Скандинавского ледникового покрова. – Прим. перев.

МИР 18000 ЛЕТ НАЗАД

Ученые всего мира за последние пять лет занимались глобальной реконструкцией ледниковых покровов, океанов, атмосферы и наземной растительности во время максимума последнего оледенения 18 000 лет назад. Значительная часть этих усилий направлялась группой исследователей, участников проекта CLIMAP. Эти работы субсидировались прежде всего США по линии Международного десятилетия исследования океана (International Decade of Ocean Exploration, IDOE).

Природа Земли 18 000 лет назад и последующие события во многих отношениях предопределили облик мира, в котором мы теперь живем. Задача реконструкции мира на срез 18 000 лет назад, по имеющимся сейчас данным, включает несколько различных элементов. Многие из них представляют собой синтез существующих данных, но другие требуют разработки нового подхода и применения сложных моделей, созданных с помощью ЭВМ. Поскольку этот тип коллективных исследований в конечном итоге ведет к более полному пониманию современного климата и его предстоящих изменений, целесообразно уделить ему некоторое внимание, чтобы выяснить его достоинства и недостатки.

РЕКОНСТРУКЦИЯ ЛЕДНИКОВОГО ПОКРОВА

Можно допустить, что реконструкция ледникового покрова — нетрудная задача. Однако она включает три аспекта: картографирование положения краев ледниковых покровов земного шара на определенный временной срез, реконструкцию трехмерной модели масс льда и оценку общего объема воды, которая заключена в ледниковых покровах. Оказывается, что ни одна из этих задач не является легкой и нет единого мнения ученых по поводу любой из них.

Существуют две совершенно разные модели мира, существовавшего 18 000 лет назад.

В соответствии с одной моделью — моделью максимального распространения льда, предложенной Т. Хьюзом и Д. Дентоном из США и М. Гросвальдом из СССР, — в географии Северного полушария резко преобладал массивный комплекс ледниковых покровов и шельфовых ледников. Эти ученые предположили, что в районе Баренцева моря находился ледниковый щит мощностью 3000 м и, кроме того, существовали ледниковые покровы на мелководном шельфе вдоль берегов Восточной Сибири. В других районах Северного полушария ледниковые покровы рассматриваются как имевшие сток к морю через шельфы и соответственно смыкавшиеся с шельфовыми ледниками моря Баффина и Норвежского — Гренландского морей. В этом мире

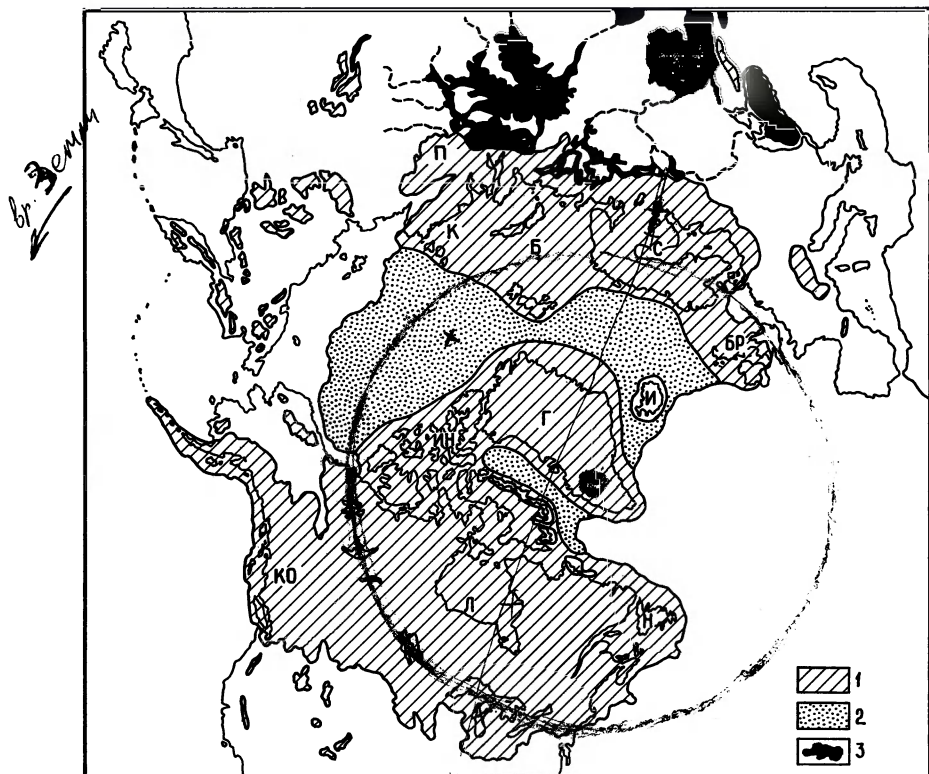


Рис. 150. Модель максимального развития оледенения Северного полушария 18 тыс. лет назад.

Ледниковые покровы: Баренцевоморский (Б), Британский (Бр), Восточно-Сибирский (ВС), Гренландский (Г), Иннуитский (ИИ), Исландский (И), Карскоморский (К), Кордильерский (КО), Лаврентийский (Л), Ньюфаундлендский (Н), Путоранский (П), Скандинавский (С). 1—области, покрытые льдом; 2—шельфовые ледники; 3—озера, принимавшие сток талых ледниковых вод.

было крайне ограниченное число убежищ, т.е. мест, где растения и животные пережили последнее оледенение. Тундровые растения и животные могли сохраниться в относительно небольших свободных ото льда районах территории Юкон, Канада, или в некоторых частях Аляски либо были вынуждены мигрировать к югу и заселить относительно узкую тундровую зону южнее Лаврентийского ледникового покрова. Судя по ископаемым остаткам растений и животных, в Европе к югу от ледниковых покровов простирался гораздо более широкий тундровый пояс.

Альтернативная модель основывается на материалах исследований на Шпицбергене, в Гренландии и Канадской Арктике—в

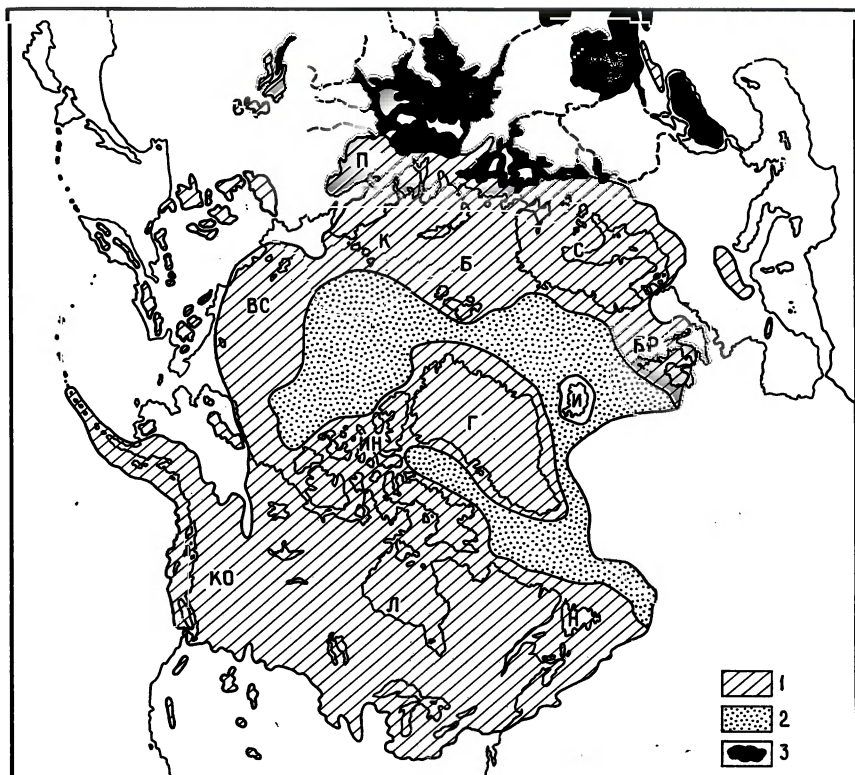


Рис. 151. Модель минимального развития ледниковых покровов и шельфовых ледников в Северном полушарии 18 тыс. лет назад.

Ледниковые покровы: Баренцево-морский (Б), Британский (БР), Гренландский (Г), Инчуитский (ИН), Исландский (И), Карско-морский (К), Кордильерский (КО), Лаврентийский (Л), Ньюфаундлендский (Н), Путоранский (П), Скандинавский (С). 1—области, покрытые льдом; 2—шельфовые ледники; 3—озера, принимавшие сток талых ледниковых вод.

областях, которые, судя по модели максимального оледенения, были перекрыты толщиной льда мощностью 1000 м и более. Однако вместо находок осадков возрастом менее 18 000 лет вдоль этих берегов многочисленные исследователи не раз описывали стратиграфическую последовательность, представленную горизонтом морских осадков, нередко поднятым на 70–80 м над современным уровнем моря и содержащим раковины морских моллюсков возрастом более 40 000 лет; эти осадки в свою очередь перекрыты другим морским слоем, вмещающим раковины моллюсков, радиоуглеродный возраст которых составляет 11 000–8000 лет. Объектом критики является тот факт, что во

всех рассматриваемых разрезах выражен перерыв в отложении морских осадков, соответствующий интервалу между $\sim 10\,000$ лет назад и $\sim 40\,000$ лет назад.

Модель максимального оледенения основывается на допущении, что ледниковый лед распространялся над этими разрезами, но не оставил отложений. Таким образом, ледниковый покров в середине висконсинского оледенения рассматривается как примерзавший к ложу (гл. 3). Модель минимального распространения льда предполагает наличие свободных ото льда областей между основными ледниковыми покровами и шельфовыми ледниками или постоянными морскими льдами. В отношении оценок площади и объема льда для Северной Америки и Гренландии расхождения незначительны. Однако гораздо более важен вопрос о распространении основного ледникового покрова в районе Баренцева моря и восточнее, в районе Карского моря.

При реконструкции мощности ледниковых покровов, существовавших 18 000 лет назад, исследователи учитывали современные представления о форме и физических свойствах ледниковых покровов. Однако в связи с этими задачами возникают серьезные проблемы. Их можно выявить, если обратиться к анализу принятых допущений: 1) ледниковый покров находился в состоянии равновесия; 2) современные ледниковые покровы являются аналогами всех ледниковых покровов прошлого; 3) погружение земной коры за счет ледниковой нагрузки достигало равновесия.

Первое и третье допущения, вероятно, ошибочны. Известно, что ледниковый покров может достичь наибольшего распространения за несколько тысячелетий (скажем, за 5000 лет), а это слишком малое время для достижения равновесного состояния покровом льда или прогибающейся земной корой.

Помимо того, Д. Боултон из университета Восточной Англии поставил под сомнение правомочность второго, наиболее важного допущения. Ледниковые покровы можно реконструировать по их мощности путем сравнения с современными ледниковыми покровами, которые, по-видимому, преимущественно лежат на коренных породах. Однако, как указывал Боултон, многие ледниковые покровы в плейстоцене распространялись в районы, сложенные осадочными породами, включая водонепроницаемые глины, а также в районы с мощным развитием вечной мерзлоты. В этих случаях под ледниковым покровом вода, образующаяся при донном таянии, не могла просачиваться в подстилающие осадки и соответственно трение между ледником и ложем уменьшалось; это создавало особую ситуацию, характерную для пульсаций, когда край ледника наступает с катастрофической скоростью — порядка нескольких километров в год. В условиях ограниченного трения у ложа (захваченная вода действовала как

смазка) ледниковые покровы истончались и наверняка становились гораздо менее мощными, чем это следует из реконструкций, опирающихся на все три отмеченных выше допущения.

Есть факты, подтверждающие идеи Боултона; они относятся к очень низкому профилю, проходящему поблизости от юго-западного края Лаврентийского ледникового покрова. Эти идеи вполне согласуются с изображением ледникового покрова на рис. 149. Устойчивая внутренняя зона должна была иметь профиль, сопоставимый с современным Гренландским ледниковым покровом. Однако неустойчивая зона ледникового покрова ограничена с внутренней стороны контактом между водопроницаемыми гранитами Канадского щита и почти водонепроницаемыми меловыми осадками, залегающими далее к югу. Боултон предполагает, что ледниковые лопасти, проникавшие к югу в котловины Ирландского и Северного морей, тоже имели небольшую мощность.

Важно отметить, что оценка объема льда 18 000 лет назад, сделанная с учетом всех вышеперечисленных допущений, представляет собой *максимальное* значение. Этот объем, пересчитанный на водный эквивалент и разделенный на площадь Мирового океана, дает показатель глобального понижения уровня океана во время оледенения. Как мы вскоре увидим, этот простой расчет в действительности осложняется. Современные оценки различаются на порядок: минимальная составляет около 80 м, а максимальная — 160 м.

В реконструкциях климата Земли во время максимума оледенения 18 000 лет назад другими важными параметрами, вводимыми в ЭВМ, являются распространение различных растительных зон и, что более важно, температуры поверхностных слоев океана. Одним из важных достижений за последнее десятилетие была разработка методики, которая по изменениям популяций ископаемых фораминифер в различных океанических осадках позволила сделать оценки температур и солености поверхностных слоев океанов во время формирования этих осадков. В колонках глубоководных морских осадков уровень, отвечающий времени 18 000 лет назад, определяется методом изотопно-кислородной стратиграфии, а температура поверхностных морских вод вычисляется из уравнений, связывающих современные сообщества фораминифер с присущей им океанической обстановкой. Основываясь на анализе образцов из колонок глубоководных морских осадков, мы допускаем, что такие соотношения выдерживались и в прошлом. Результаты этих исследований показывают, что во время максимума последнего оледенения температуры поверхностных вод в субтропических и тропических районах океанов были примерно такими же, как в настоящее время, но в умеренных широтах Атлантики между 60 и 40° с. ш. они

были значительно более низкими; температурный градиент между северными и экваториальными районами, следовательно, был выше, чем теперь.

Распространение льдов и изменения растительного покрова и температур поверхностных морских вод – такая информация необходима для разработки крупных моделей общей циркуляции при помощи ЭВМ. Создано несколько моделей, и, поскольку каждая из них программировалась по-своему, имеются расхождения и в полученных результатах. Однако гораздо большее впечатление производят признаки их общего сходства. Наш мир 18 000 лет назад был в целом суше, чем теперь. Над ледниковыми шапками и вблизи краев ледниковых покровов, особенно на территории СССР, температуры были гораздо более низкими, но ближе к экватору они, по-видимому, были близки к современным. Модели показывают систему атмосферной циркуляции в соответствии с вышеупомянутыми факторами.

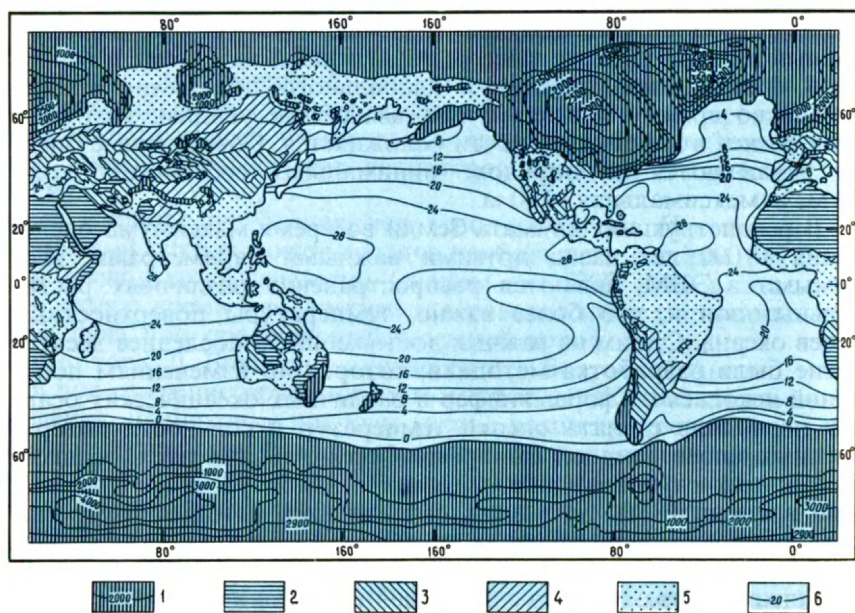


Рис. 152. Мир 18 тыс. лет назад.

Реконструкция ледниковых покровов, типов растительности и температур поверхностных морских вод земного шара (по материалам CLIMAP).

1 – снег и лед (включая ледниковые покровы, ледяные шапки, шельфовые ледники и морские льды); 2 – преимущественно пустынные территории, альbedo 0,30–0,39; 3 – степи и пустыни, альbedo 0,25–0,29; 4 – ксерофильные травостой, альbedo 0,20–0,25; 5 – территории с густым растительным покровом, альbedo менее 0,20; 6 – изолинии температуры поверхностных морских вод (на август 18 000 лет назад).

Модели открывают важную, хотя и ограниченную, перспективу для выяснения основополагающей проблемы: почему и как закончилось последнее оледенение? Как отмечалось выше, изотопно-кислородные данные свидетельствуют о том, что каждое оледенение резко заканчивается незадолго перед очередным межледниковьем. Брёкер и Ван Донк назвали такие интервалы терминациями.

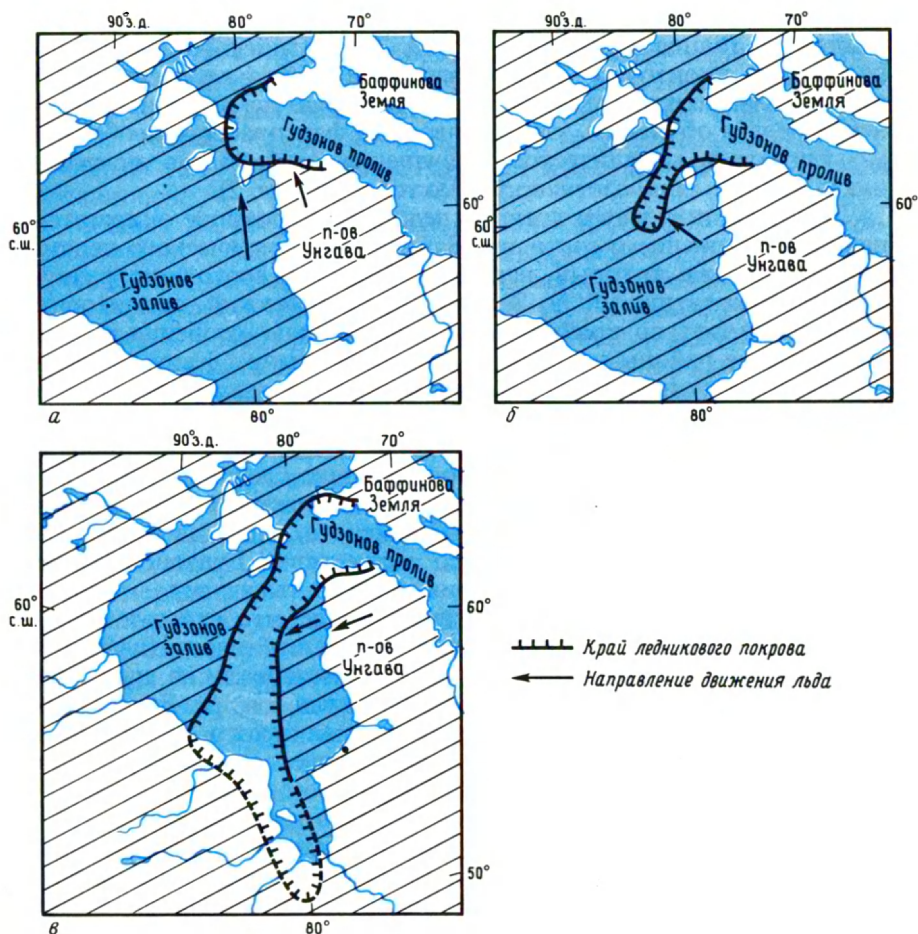


Рис. 153. Ход деградации оледенения в центральной части Лаврентийского ледникового покрова в течение 200 лет.

Быстрый распад древнего ледникового покрова был обусловлен проникновением морских вод из Гудзонова пролива в Гудзонов залив; после этого ледниковый покров раскололся на две части. а–8300 лет назад; б–8200 лет назад; в–8100 лет назад. 1–край ледникового покрова; 2–направление движения ледника.

Терминация I в глобальном масштабе имела место примерно 13 000 лет назад. Это можно объяснить просто: как явствует из модели циркуляции атмосферы, 18 000 лет назад нарушилось устойчивое состояние климата и повышение температур привело к таянию ледниковых покровов. Но фактически дело было не в этом. Свидетельства повышения температуры на суше немногочисленны вплоть до 14 000 лет назад, а к этому времени значительное количество воды возвратилось в океаны. Возможный ответ должен исходить из установленного в конце 1960-х годов факта, что таяние внутренних частей Лаврентийского ледникового покрова произошло очень быстро – за несколько десятилетий или, как максимум, столетий. Столь быструю деградацию оледенения нельзя объяснить климатическими факторами, а необходимо учитывать механическое разрушение ледникового покрова, иначе говоря *гляциологические* факторы (см. гл. 2).

Эти представления о древнем ледниковом покрове опираются на анализ нынешнего состояния Западно-Антарктического ледникового покрова, который, вероятно, близок к состоянию разрушения. Лаврентийский и Западно-Антарктический ледниковые покровы имеют по крайней мере одну общую особенность: их центральные районы находятся ниже уровня моря. Хьюз, Дентон и Гросвальд считают такие ледниковые покровы унаследованно неустойчивыми. Большие площади Скандинавского и Баренцево-морского ледниковых покровов (если последний существовал) также находились ниже уровня моря. Однако следует иметь в виду, что во время длительного средневисконсинского межстадиала устойчивая внутренняя зона Лаврентийского ледникового покрова противостояла проникновению моря через Гудзонов залив и долину реки Святого Лаврентия десятки тысяч лет.

Недавно было высказано предположение, что стимулом для деградации оледенения послужило сочетание изостатического и эвстатического факторов, которые воздействовали на края ледниковых покровов там, где они оканчивались в море. Если относительный уровень моря повышается у края такого ледникового покрова (при продолжающемся прогибании земной коры или при внезапном повышении уровня Мирового океана), то край будет всплывать. Это вызовет отёл айсбергов и развитие бухт отёла. Сток отступающего льда будет направлен в бухту отёла, и подобная «положительная обратная связь» может обусловить быструю деградацию оледенения. Такой процесс установлен для района Гудзонова залива.

В глобальном масштабе можно обнаружить последовательное разрушение ледниковых покровов, причем каждый этап будет служить пусковым механизмом для следующего этапа. Такую многоступенчатую систему могли составлять Баренцево-морский, Скандинавский, Лаврентийский и, наконец, Западно-Антарк-

тический ледниковые покровы. Когда происходило разрушение ледниковых покровов, изменялась циркуляция атмосферы и некоторые ледниковые покровы, например Кордильерский, могли растаять вследствие глобального повышения температур. Хотя такое объяснение может показаться сложным, причина (или причины) терминаций и на самом деле является комплексной!

НЫНЕШНЕЕ МЕЖЛЕДНИКОВЬЕ И СОВРЕМЕННЫЕ ЛЕДНИКИ

Последний крупный интервал геологической истории носит условное название «голоцен». Он представляет собой важный период для развития человека, современной флоры и фауны (см. ниже). Возраст границы плейстоцена и голоцена – 10 000 лет. В общем голоцен охватывает период нынешней межледниковой обстановки.

Однако мы не должны думать, что 10 000 лет назад повсеместно одновременно началось «межледниковье». В то время Лаврентийский ледниковый покров в Северной Америке еще занимал территорию площадью 7,5 млн. км², и последние остатки ледниковых покровов на полуострове Лабрадор и в Киватине сохранялись вплоть до 6000 лет назад. В Скандинавии 10 000 лет назад ледниковый покров только что отступил после крупной подвижки, а около 8000 лет назад растаял всюду, кроме самых высоких каровых бассейнов в горах.

Исследования показывают, что голоцен можно разделить на три крупные климатические фазы. Границы между ними на земном шаре колеблются в пределах от нескольких сотен до нескольких тысяч лет, но здесь мы наметим лишь самые общие закономерности.

Ранняя часть голоцена (10 000–8000 лет назад) характеризовалась быстрым улучшением климатических условий на суше и в океанах. На этот интервал приходился окончательный переход от мира, существовавшего 18 000 лет назад, к миру, в целом напоминающему тот, в котором мы живем. Местами, возможно во многих районах, климат был теплее и влажнее современного.

Окончательный распад Лаврентийского ледникового покрова 8000 лет назад, по-видимому, происходил во время так называемого «климатического оптимума». Изучение всех разрезов в Северном полушарии и некоторых разрезов в Южном показывает, что между 8000 и 5000 лет назад средние температуры воздуха были выше современных и по крайней мере временами в пустынях Африки условия были более влажными.

По многочисленным геологическим данным, крупное изменение климата могло начаться где-то между 5000 и 3500 лет назад. В переходный период происходило постепенное понижение глобальных температур до критического уровня, который привел

к «неогляциалу» (т.е. новому оледенению) во многих полярных и высокогорных районах. Колсер предположил, что возобновившееся в последние 5000 лет оледенение положило конец голоценовому межледниковью и что мы являемся свидетелями выделенного шведским ученым Нильсом-Акселем Мёрнером «первого будущего оледенения» (см. гл. 8).

Исследователи пытались выявить глобальные закономерности подвижек ледников за последние 5000 лет. Дентон и Карлен предполагают, что в голоцене проявлялся основной 2500-летний ритм оледенения. Работы моих коллег на Баффиновой Земле свидетельствуют, однако, о более короткой периодичности, что также подкрепляется данными по Швейцарским и Австрийским Альпам.

Современные ледники и ледниковые покровы земного шара представляют собой реакцию на климатические изменения, значительно различающиеся по масштабам (амплитуде). Мы уже видели, что Антарктический и Гренландский ледниковые покровы были устойчивыми в течение миллионов лет (кроме Западной Антарктиды). В Канадской Арктике ледяные шапки островов Барнс, Пенни, Девон и некоторых более северных островов вмещают лед, датируемый последним оледенением. Напротив, многие ледники Скалистых гор, Альп и других областей могут относиться к последней вспышке оледенения – так называемому «малому ледниковому периоду».

РЕЖИМЫ ЛЕДНИКОВ И ЛЕДНИКОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Важно напомнить, что нет единого режима ледников. Как отмечалось в гл. 3, отдельные ледники реагируют на изменения их вещественного баланса. Также нет двух ледников, имеющих одинаковый оборот вещества, и существуют большие различия в энергии оледенения (или потенциале эрозионного воздействия). Соотношение между энергией оледенения и темпами экзарации уже обсуждалось в гл. 3, но, рассматривая нынешний ледниковый период, мы должны помнить, что во время позднекайнозойских оледенений каждый отдельный ледник испытывал колебания в способности к экзарации. Например, высказывалось мнение, что массивные каровые ледники Антарктиды обладали высоким потенциалом эрозионного воздействия в середине третичного периода, когда оледенение прогрессивно распространялось на этом материке. Следовательно, в то время климат Антарктиды еще не был столь суров, а по эродирующей способности исходные ледники, вероятно, были сопоставимы с современными приморскими ледниками умеренных широт. Значит, работа (в форме эрозии), проделанная за единицу времени этими антарктическими

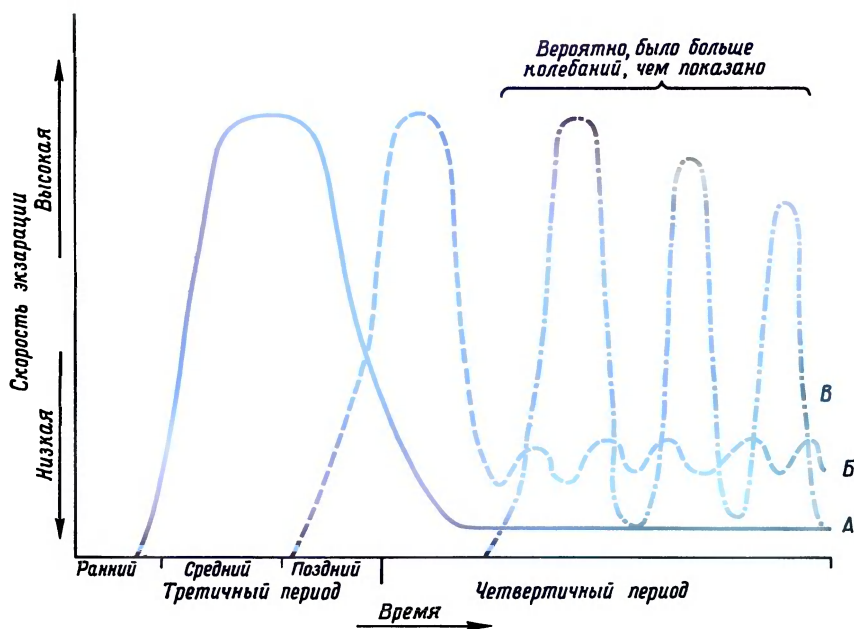


Рис. 154. Темпы экзарации на протяжении кайнозойского ледникового периода. Кривые относятся к Антарктиде (А), Баффиновой Земле (Б) и Скалистым горам (В).

ледниками, может быть описана кривой А на рис. 154. Напротив, кар на Баффиновой Земле в Канадской Арктике мог образоваться в результате работы, обозначаемой кривой Б, а работа, которая привела к созданию кара в Шотландии, обозначена кривой В. Эти графики схематичны, но они говорят о том, что любая эрозионная форма рельефа — результат комплекса событий, изменяющихся во времени.

Темпы экзарации не измерялись достаточно широко, хотя некоторые оценки уже приводились в гл. 3. Если мы интересуемся сменами ледниковых и межледниковых обстановок в кайнозое, надо знать темпы экзарации и их изменения во времени. Вулканические породы в Антарктиде эродировались каровыми ледниками со средней скоростью около 300 мм за 1000 лет (0,3 мм/год). В штате Вашингтон, США, исследования на горе Рейнир показали, что средняя скорость экзарации там составляла 1100 мм за 1000 лет (1,1 мм/год). Сопоставимые результаты были получены для каровых ледников на Передовом хребте Скалистых гор в штате Колорадо (40° с.ш.) и на Баффиновой Земле (66° с.ш.). Судя по объемам морен, на Передовом хребте

экзарация составляла около 2000 мм за 1000 лет (2 мм/год), а на Баффиновой Земле— всего 50 мм за 1000 лет (0,05 мм/год). Следовательно, в последнем районе, судя по нынешним размерам каров, экзарация продолжалась от 1 до 3 млн. лет, тогда как на Передовом хребте современные каровые бассейны могли быть выработаны примерно за 150 000 лет, если учесть выведенные показатели экзарации.

Общее представление о темпах экзарации и ее колебаниях в разных шкалах времени: короткой (столетия), средней (тысячелетия) и длинной (миллионы лет)—чрезвычайно важно для понимания путей дальнейшей эволюции рельефа земного шара в областях современного оледенения. Насколько велика была в количественном выражении экзарация в норвежских фьордах в период от 100 000 до 10 000 лет назад по сравнению с периодом от 1 000 000 до 900 000 лет назад (здесь можно оперировать показателями уменьшения мощности пород в метрах)? Происходила ли экзарация в течение длительного периода геологического прошлого с постоянной скоростью или большинство наших ландшафтов развилось в течение первого или двух первых оледенений и впоследствии претерпело мало изменений?

На эти вопросы трудно ответить. Некоторые современные исследования показали, что висконсинское, или вислинское, оледенение унаследовало мир, созданный предыдущим оледенением, и не внесло в него существенных изменений. Отсюда вытекает вывод, что основополагающий характер ледникового рельефа был приобретен еще в начале кайнозойского ледникового периода. Легко делать столь категоричные утверждения, но гораздо труднее их опровергнуть или доказать. В Канадской Арктике имеются факты, подтверждающие это положение. Ледниковые и морские отложения возрастом от нескольких тысяч лет до более 350 000 лет, которые местами сохранились вдоль бортов долин в верхних частях фьордов, накопились после врезания фьордов. В Гудзоновом заливе, на Баффиновой Земле, островах Банкс и Элсмир осадки последнего межледниковья выходят в обнажения по берегам рек или просто слагают современную поверхность. Полагают, что все эти территории во время последнего оледенения были покрыты толщей льда мощностью 1–3 км.

Эта тема вновь разжигает давние споры между сторонниками ледниковой эрозии и их противниками, между исследователями, которые, глядя на огромные фьорды в Гренландии, целиком

Рис. 155. Скованный льдом Хейр-фьорд на острове Элсмир.

Этот крупный фьорд образовался во время древнего оледенения. Он не мог быть выработан небольшими современными ледниками, спускающимися в него с обеих сторон от ледяных шапок и снежников.



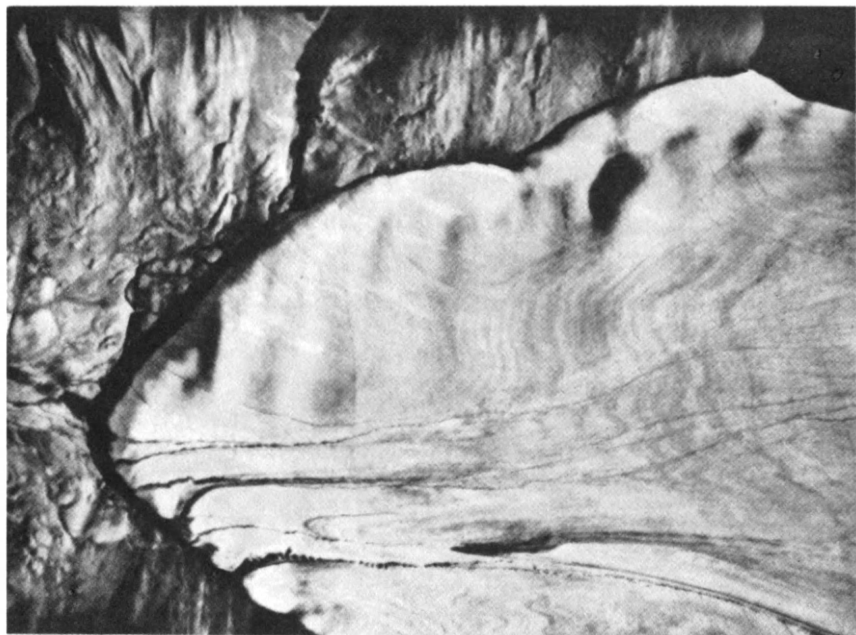


Рис. 156. Плановый аэрофотоснимок ледника Лоуэр-Гилмен в северной части острова Элсмир.

Это «холодный» ледник с температурами основания ниже 0°C . Вероятно, такие ледники оказывали лишь небольшое воздействие на ложе.

связывали их образование с экзарацией, и теми, которые считали, что лед проходил над этими фьордами в первично пассивном состоянии. Подобно многим ситуациям в естественных науках, оба крайних мнения не имеют абсолютного значения, но могут оказаться правомочными в отдельных редких случаях. Дело в том, что временами и местами ледники и ледниковые покровы выступают как активные агенты эрозии, но в другие времена в других местах они оказывают небольшое эрозионное воздействие или вообще не эродируют ложе.

Различное воздействие льда на рельеф в какой-то мере связано с характером температур у ложа ледника. Если лед тонким чехлом покрывает какую-либо вершину на севере Канадской Арктики, где средняя годовая температура -18°C , то, вероятно, у его ложа температуры ниже точки плавления (см. гл. 3), он движется очень медленно и предохраняет от разрушения подстилающие породы. В качестве диаметрально противоположного примера сошлемся на массу льда в каровом или долинном леднике в уме-



Рис. 157. Площади, занятые морями и приледниковыми озерами в Северной Америке в конце последнего оледенения, когда таял Лаврентийский ледниковый покров.

1—районы развития поздне- и послеледниковых морских отложений; 2—районы распространения осадков приледниковых озер.

ренной морской обстановке. Такой ледник быстро движется, скользит по ложу, истирает и дробит выступы коренных пород. Рельеф, выработанный такими ледниками, часто изображают на туристических рекламных плакатах. Этот живописный рельеф характерен для большинства горных хребтов земного шара. Однако территории, покрывавшиеся такими массами льда в плейстоцене, малы по сравнению с пологохолмистыми поверхностями, которые некогда подстилали значительные части Лаврентийского и Скандинавского ледниковых покровов.

Хотя геологи-гляциалисты почти сто лет не перестают уди-

вляться и размышлять о величии обработанных ледниками гор и побережий, число исследований этих типов рельефа и теорий, объясняющих процессы их формирования, не столь велико по сравнению с работами, посвященными строению ледниковых форм рельефа. Успешное изучение ледниково-аккумулятивных форм рельефа тормозилось вследствие тенденции к специализации. Исследователи овладевали ограниченным набором методов, которые применялись для всех отложений, либо внимание концентрировалось на изучении отдельных форм рельефа, например друмлинов и озов.

Обобщающий подход, предложенный Д. Боултоном, сводится к рассмотрению комплексов форм рельефа, которые следовало бы ожидать в разных ситуациях. Характерные наборы форм рельефа можно обрисовать для следующих гляциологических условий: долинный ледник; субполярный ледниковый покров, или ледник, или, возможно, ледник умеренного типа, который оказался сильно перекрытым чехлом обломочного материала; ледниковый покров умеренного типа; спускающийся в море или озеро край ледника с отёлом айсбергов. Комплексы форм рельефа преимущественно отражают процессы, которые активно проявляются на краях ледниковых покровов и ледников и поблизости от этих краев. В географическом отношении размещение основных областей ледниковых отложений ограничено Северной Америкой и Северной Европой. В целом в области бывшего Лаврентийского щита преобладают обширные выходы докембрийских пород, отпрепарированных льдом. Области мощных ледниковых отложений приурочены к поясу шириной около 300 км, который простирается к северу от границ оледенений.

Основные комплексы форм рельефа описывались в гл. 3. Теперь интересно установить, каково их значение в разных древнеледниковых районах. На гляциальной карте Северной Америки бросается в глаза огромная территория, некогда покрывавшаяся водой либо вследствие повышения уровня моря во время деградации оледенения, либо в связи с тем, что у края отступавшего ледникового покрова были крупные озера. Это особенно характерно для Северной Америки, но также свойственно, хотя и в меньшей степени, Северной Европе.

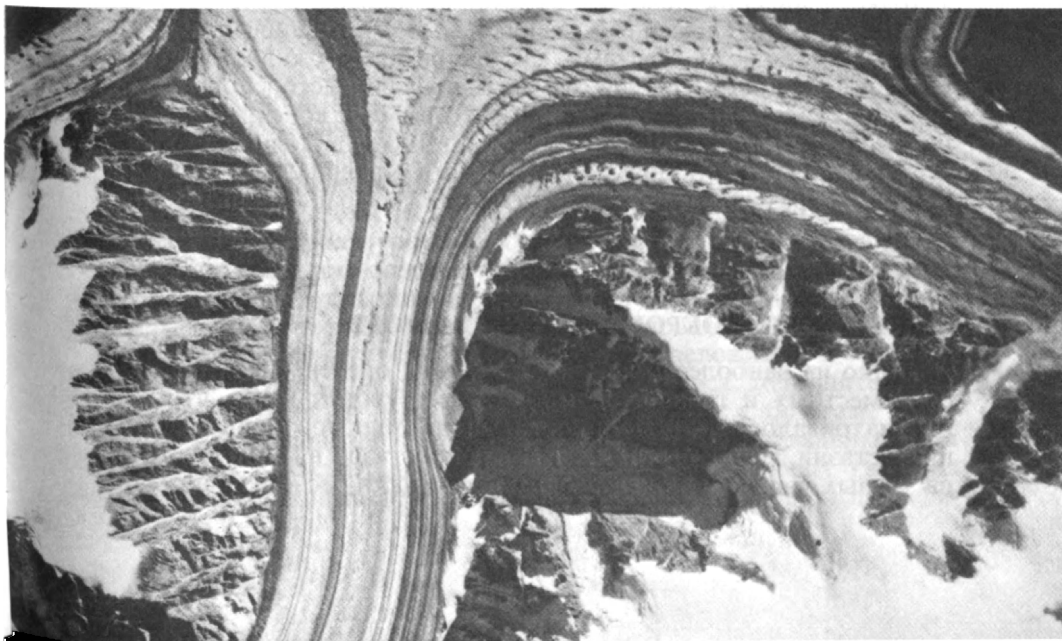
Многие из областей, которые прежде были покрыты водой, пересекаются моренами Де Геера (см. раздел «Морены как ледниково-аккумулятивные формы рельефа» в гл. 3). Это, возможно, самые распространенные ледниковые формы рельефа в Северной Америке. Они занимают тысячи квадратных километров по обе стороны от Гудзонова залива и вдоль прибрежных арктических равнин Канады, они также описывались в бассейнах приледниковых озер южной Канады и долины реки Святого Лаврентия.

Второй крупный комплекс форм рельефа в Северной Америке — субполярный. Трудно сказать, были ли ледники в действительности субполярными или проявилось значение других факторов. Однако действительно от Северной и Южной Дакоты до прерий Альберты, Саскачевана и Манитобы в Канаде большинство форм рельефа отражает переложение ледниковых образований в ходе следующих процессов: первичное накопление отложений на поверхности ледникового покрова сменялось таянием и разрушением льда в ходе абляции и, наконец, течением обломочного материала по уклону. Для образующегося при этом рельефа типичны холмы и бугры, простирающиеся на больших площадях. При вскрытии этих форм после сооружения дорог прослеживается определенная смена осадков: основная морена, озерные осадки, водно-ледниковые пески и галечники. Субполярные ледники Шпицбергена представляют собой аналог рассматриваемой части края Лаврентийского ледникового покрова.

Третий крупный комплекс форм рельефа обычно считается «типичным» для областей оледенения. Но это не так. Однако он представлен во многих областях, где давно ведутся исследования по гляциальной геологии и геоморфологии. Одной из таких областей является район Великих озер Северной Америки. Здесь за последние 100 лет исследователи задокументировали толщ

Рис. 158. Плановый аэрофотоснимок крупного долинного ледника в горах Гренландии.

Скалистые борта трога резко расчленены. На поверхности ледника четко выделяются морены. Этот ледник необычен, поскольку в нижней части он разделяется на два языка.



ледниковых отложений, которые часто переслаиваются с неледниковыми отложениями с признаками накопления *in situ*. Такая стратиграфия напоминает слоеный пирог. Здесь сохранилась не каждая межледниковая и межстадиальная поверхность суши, но есть достаточно хорошо сохранившиеся погребенные почвы, торф и стволы деревьев, явно свидетельствующие о том, что в этих районах ледники перекрывали поверхность и, кроме того, отлагали осадки. Поверхность рассматриваемой области характеризуется признаками, которые говорят о том, что температуры в основании ледникового покрова были близки к точке плавления льда. Наиболее показательны линейные формы рельефа в виде друмлинов и рифленых морен; они веерообразно расходятся по направлению к массивным конечным моренам, которые характеризуют периоды равновесия в вещественном балансе ледникового покрова. Местами талые воды, возникавшие у основания ледникового покрова, создали длинные извилистые озы, которые пересекают некоторые части Канады и США.

В Альпах, горах Северной Америки, Гималаях и других горных районах преобладает четвертый комплекс форм рельефа. В этом случае процессы и осадки в общем похожи на те, которые происходят у основания ледникового покрова умеренного типа. Однако приуроченность ледника к долине и наличие крутых скальных бортов в верховьях вносят отличительные особенности, в частности камнепады способствуют накоплению обломков на поверхности льда, что не наблюдается на ледниковых покровах: большая часть этого материала включается в состав боковых, срединных и конечных морен. Долинные ледники во многих районах земного шара имеют в основании температуры, близкие к точке плавления льда (гл. 3). Они оставляют после себя линейные формы, сложенные ледниковыми отложениями или коренными породами. Местами, как, например, в Скалистых горах США и в Северной Италии, области позднеплейстоценового оледенения окаймлены массивными береговыми и конечными моренами, которые возвышаются от 60 до 100 м над дном долины. В верхних частях долин большая часть материала морен произошла в результате непосредственной экзарации ледникового ложа.

ЛЕДНИКОВЫЕ ПОКРОВЫ И УРОВНИ МОРЯ

Одно из наиболее важных воздействий оледенения выражается в местных и глобальных колебаниях уровня моря, что уже рассматривалось в гл. 3. Чтобы понять взаимоотношения гляциоэвстазии, гляциоизостазии и гидроизостазии в кайнозое, группа ученых университета штата Колорадо для расчета положения

уровня моря в любой точке на поверхности Земли использовала ЭВМ. За основу они приняли известную историю ледниковых покровов мира и главные характеристики строения Земли. Кроме того, они сочли необходимым включить в свои расчеты гравитационное влияние на уровень моря массы льда. (Это впервые было предложено Вудвордом в конце XIX в. Масса ледниковых покровов столь велика, что она буквально притягивает поверхность океанов так, что эта поверхность повышается по направлению к краю ледника примерно на 30 м.)

Результаты расчетов на ЭВМ показали, что влияние деградации оледенения после его последнего максимума 18 000 лет назад можно проследить по многочисленным древним образованиям, оставленным почти повсеместно. Группа исследователей выделила пять основных систем колебаний уровня моря в глобальном масштабе. В пределах периметров бывших ледниковых покровов преобладающим процессом за последние 18 000 лет было поднятие, в результате чего поверхность Земли поднялась до ее доледникового уровня. Материал, перемещенный во время оледенения из-под ледникового покрова, образовал вал, окаймляющий край этого покрова; по мере того как ледниковый покров распадался, поверхность в зоне вала опускалась. С удалением от областей ледниковой нагрузки, а именно в океанических бассейнах, происходило постепенное повышение уровня моря и затопление береговых зон по мере того, как вода возвращалась в океаны. Однако в Южном полушарии, по расчетам, выделяется период поднятия суши на 1–2 м, начавшийся около 5 000 лет назад.

Обработка местных данных о колебаниях уровня моря при моделировании при помощи ЭВМ проводилась в значительном объеме. Следует заметить, однако, что модель еще нельзя считать окончательной. Например, еще невозможно учесть влияние Антарктического ледникового покрова, и, кроме того, нынешняя модель создана при допущении, что Земля не имеет литосферы. Тем не менее вывод из этой работы прост: уровень моря в любой точке на Земле не только отражает количество воды, захваченной или выделенной неустойчивыми ледниковыми покровами.

В общем расчеты на ЭВМ показывают, что во время максимума оледенения уровень океана поодаль от ледниковых покровов был ниже современного на 80–150 м. Это означает, что во время ледниковых периодов большие площади мелководных шельфов земного шара осушались и, следовательно, могли заселяться растениями и животными, включая человека и его ранних предков. К площади суши добавлялась полоса дополнительных земель шириной от 1 до 400 км, прилегающая к берегам, и это частично компенсировало потери земель, занятых ледниковыми покровами. Доказательства использования осушенных участков шельфа растениями и животными были получены при проведе-

нии бурения и разведочных работ на континентальных шельфах. Остатки растений, прибрежных моллюсков и частей скелетов крупных млекопитающих, как, например, мастодонтов, часто привлекаются рыболовными, а также, конечно, научно-исследовательскими судами.

ПОЗДНЕКАЙНОЗОЙСКИЕ ОЛЕДЕНЕНИЯ, РАСТЕНИЯ, ЖИВОТНЫЕ И ЧЕЛОВЕК

Хотя мы знаем, что флора и фауна земного шара резко изменились во время позднекайнозойских оледенений, вовсе нелегко количественно оценить роль оледенений в этих изменениях.

Как отмечалось в гл. 1, можно предположить, что в течение благоприятных климатических периодов, когда отрицательное воздействие окружающей среды уменьшалось, эволюция происходила медленнее и полное вымирание больших групп растений и животных, вероятно, было редким явлением. Отчасти это имело место потому, что в стабильных условиях экологические ниши быстро заполняются и тем самым ограничиваются возможности для развития новых видов вследствие конкуренции со стороны существующих видов.

Наши знания о жизненных формах прошлого всегда зависят от их сохранности в геологической летописи и доступности для изучения. Однако, по оценкам, всего 10% общего числа современных видов растений Северо-Западной Европы существовали до миоцена, и Р. Ф. Флинт отмечал, что из 119 видов млекопитающих, ныне обитающих в Европе и сопредельных частях Азии, 113 появились в четвертичном периоде и из них 6 – не ранее последнего оледенения, т.е. 100 000 лет назад.

На кайнозойскую историю Земли существенно повлияли два значительных события. Первое из них – понижение температуры, второе – распад массивов суши и развитие крупных океанических бассейнов. В результате последнего процесса произошла изоляция фаун и флор на материках и островах. Некоторая миграция животных между Азией и Америкой в течение позднекайнозойских оледенений временами, возможно, происходила через мелководный шельф Берингова моря, но этот район находится далеко на севере и, следовательно, приток животных из Азии в Америку и наоборот ограничивался северными бореальными и арктическими формами. Имеются лишь ограниченные конкретные сведения, что понижение температур и неоднократное разрастание и убывание ледниковых покровов вызывали специфические физиологические адаптации. Выдвигались гипотезы, что у животных, обитавших в северных широтах, развивался покров жира и шерсти, тогда как формирование пустынь способствова-

до созданию запасов пищи и влаги у верблюдов и родственных им групп животных.

Что происходило с растениями и животными во время неоднократных кайнозойских оледенений Северной Америки, Европы и других территорий?

Эта тема уже в общих чертах рассматривалась в гл. 3, но здесь можно указать на некоторые особые положения в связи с влиянием четвертичных оледенений. Каждое наступание ледников в основном воздействовало на северные виды. Во время оледенений не только понижалась температура и ограничивалось количество свободной влаги, но и область распространения этих видов резко сокращалась, поскольку большие территории в высоких и умеренных широтах были постоянно заняты льдом. Чтобы выжить, растения и животные вынуждены были мигрировать в убежища, где они могли «переждать» оледенение.

Можно представить себе несколько различных типов убежищ, которые использовались во время позднекайнозойских оледенений. Во-первых, во время оледенения растительные зоны Северного полушария просто смещались к югу. Так, в Северной Америке южная граница зоны тундры располагалась южнее края ледникового покрова у 40° с.ш. против ее современного положения у 60° с.ш. Однако исследования показали, что в Северной Америке во время оледенений зона тундры имела ограниченное распространение и достигала в ширину всего от 50 до 200 км против ее максимальной ширины 1500 км в настоящее время! Следовательно, понятие «миграция» просто предполагает вытеснение и смешение флоры и фауны. Кроме того, перемещение тундры до 40° с.ш. сопровождалось физиологическими изменениями за счет влияния таких факторов, как угол падения лучей Солнца и продолжительность дня.

Находки ископаемых и ареалы современных растений, жуков и зверей использовались для доказательства существования убежищ в высоких северных широтах. Лучшее всего изученный пример — большая не подвергавшаяся оледенению территория, охватывающая восток СССР, Аляску и Северо-Западную Канаду, носящая название «Берингия». В ее состав во время оледенений входили низменности берингоморского шельфа и внутренние равнины и горы центральной Аляски и территории Юкон. Даже горы этой большой территории не были целиком покрыты льдом. Таким образом, Берингия отличалась широким разнообразием местообитаний, которые могли использоваться растениями и животными, мигрировавшими в связи с разрастанием крупных ледниковых покровов. Данные по другим северным районам не столь полны, и поэтому продолжают споры о существовании убежищ во время позднекайнозойских оледенений в Канадской Арктике, Гренландии, Исландии, Скандинавии и на

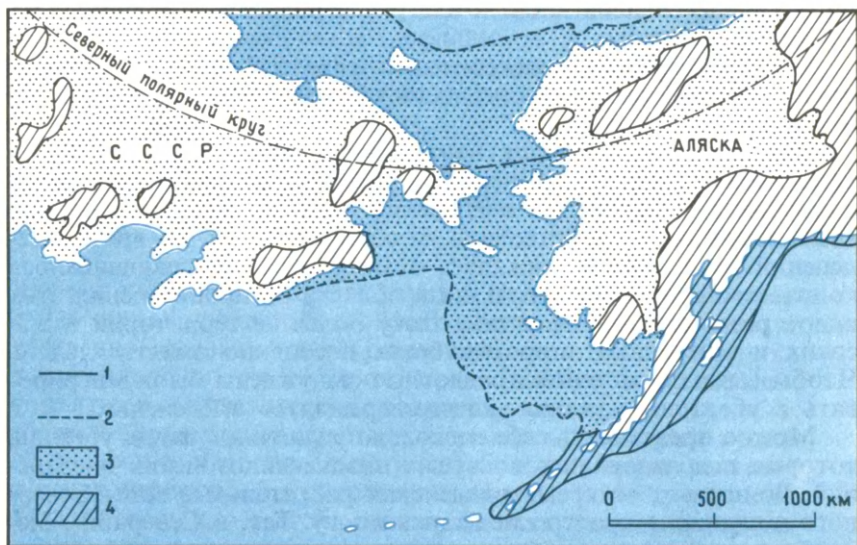


Рис. 159. Карта Берингии.

Эта территория весьма тщательно изучалась, поскольку полагали, что на периферии Северного Ледовитого океана сохранились убежища растений и животных. 1—современная береговая линия; 2—древняя береговая линия; 3—древняя суша; 4—ледники и ледяные шапки во время висконсинского оледенения.

арктических островах, окаймляющих Баренцево и Карское моря. Ботаники и зоологи поддерживали гипотезу о существовании убежищ, основываясь на разобщенном характере нескольких ключевых ареалов растений и насекомых; эту гипотезу обычно называют «нунатаковой». Многие исследователи сомневались в способности растений и насекомых перенести зиму в этих северных широтах во время максимума оледенения. Однако следует иметь в виду, что норвежская ботаническая экспедиция обнаружила более 60 видов сосудистых растений на некоторых нунатаках Гренландии, примерно в 150 км от края ледникового покрова. Выживание этой довольно богатой флоры, впрочем, можно объяснить и благоприятными местными условиями, например большим количеством солнечного света на небольших выходах коренных пород, окруженных зоной с высокими значениями альбедо (см. раздел «Поведение льда» в гл. 2).

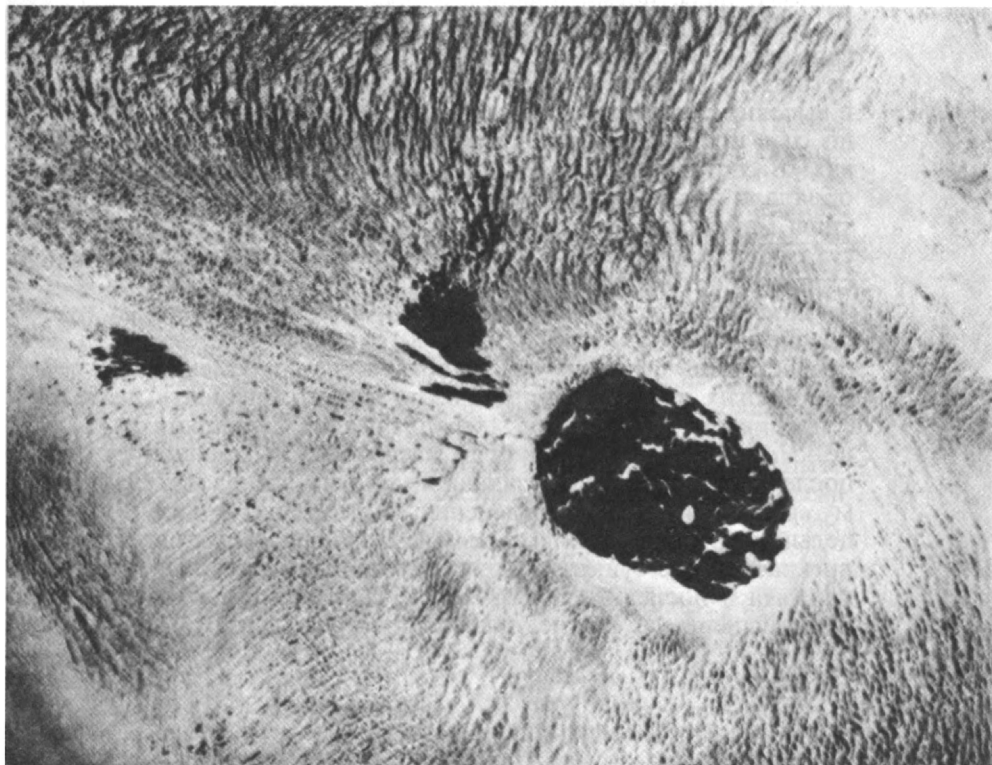
Однако мысль, что значительная доля арктических организмов может выжить в горах, обрамляющих ледниковые покровы, вероятно, нереальна. Как отмечалось выше, имеются некоторые факты, по крайней мере для последнего оледенения, которые указывают на то, что крупные свободные ото льда участки суще-

ствовали во время максимума оледенения 18 000 лет назад в таких областях, как Земля Пири в Гренландии, часть острова Банкс в Канадской Арктике и северная часть Аляски, и эти участки могли служить убежищами. Кроме того, с позиции сторонников минимального распространения оледенения (см. раздел «Реконструкция ледникового покрова» в этой главе), значительные части шельфа должны были осушаться во время наибольшего распространения оледенения на земном шаре; эти низменности служили дополнительным пространством, где некоторые организмы могли пережить суровые обстановки ледникового периода.

Мы не можем определить относительное значение трех основных типов убежищ: областей, расположенных к югу от ледниковых покровов, областей, находившихся близ ледниковых покровов в северных широтах (например, Берингия), и нагорий и гор, выступавших в виде нунатаков над ледниковым покровом. Вероятно, последний тип был наименее важен, но, судя по совре-

Рис. 160. Холмистый останец—нунатак, со всех сторон окруженный льдом, сильно разбитым трещинами, поблизости от края Гренландского ледникового покрова.

Такие нунатаки могли служить убежищами для некоторых видов растений во время кайнозойских оледенений.



менной ситуации в Гренландии, его нельзя игнорировать при глубоком анализе проблемы убежищ.

Система неоднократных оледенений позднего кайнозоя, чередовавшихся со значительно более короткими межледниковьями, медленно сокращала генетическое разнообразие жизненных форм на Земле.

Палеонтологи разделили фауну четвертичного периода на большие группы. Самая древняя из них – виллафранкская фауна, которая восходит к раннему плейстоцену и, возможно, даже к плиоцену. Ее представляли животные, которые часто отличались невысоким ростом по сравнению с более поздними родственными формами. Настоящие слоны, лошади и первобытные быки были новыми элементами, типичными для виллафранка.

Существенное изменение произошло между 900 000 и 600 000 лет назад между ваальским и кромерским межледниковьями. В это время вымерло большое число видов и появились совершенно новые виды слонов и носорогов. Крупные ископаемые, относящиеся к этой среднеледниковой группе, были обнаружены в разрезах на территории ГДР и ФРГ. Вымирание многих видов совпало с распространением первых млекопитающих с арктическими, или «холодными», чертами; в стратиграфической летописи впервые были обнаружены кости северного оленя, овцебыка и лемминга, и в ходе последующей эволюции появились мамонт, шерстистый носорог и лось.

Развитие среднеледниковых фаун продолжалось с модификациями вплоть до последнего межледниковья (около 125 000 лет назад). Главным изменением было окончательное вымирание в высоких широтах таких форм, как бегемот, которого нам трудно себе представить плавающим в Темзе и других северных реках! В составе позднеледниковых фаун северных стран преобладали такие крупные травоядные животные, как различные типы мамонтов, мастодонтов и бизонов. Кроме того, там присутствовало большое число различных копытных, населявших степные пастбищные угодья.

Последняя крупная волна вымирания произошла на рубеже позднего плейстоцена и голоцена, около 10 000 лет назад. Она превосходила по своим масштабам даже современное истребление многих видов, которое можно прямо приписать деятельности одного из последних млекопитающих, появившихся на арене, – *Homo sapiens*. Причины массового вымирания в конце последнего оледенения озадачили многих исследователей. Почему, выжив во время оледенения, определенный вид (или даже целый род, как, например, мамонт *Elephas* и мастодонт *Mastodon*) прекратил свое существование в условиях более благоприятного климата в последние 10 000 лет? Этого нельзя объяснить отличием нынешнего межледниковья от предыдущих: пожалуй, его

надо отнести к прохладным межледниковьям, и такая трактовка верна при сопоставлении с последним межледниковьем. Каждое межледниковье до некоторой степени было уникальным, если рассматривать никогда полностью не повторявшиеся пути миграции в убежища и из них. Следовательно, можно предполагать, что к вымиранию крупных растительноядных животных, которые составляли главный элемент в позднеплейстоценовой фауне, привело уникальное сочетание климата и ответной реакции растительности.

П. Мартин был одним из наиболее рьяных защитников «нестественной» причины вымирания организмов. Он довольно убедительно доказывал, что не мог быть случайным тот факт, что вымирание, в частности в Северной Америке, северной ветви слонов, многих видов бизонов и нескольких типов оленей произошло в то же время, когда, судя по археологическим данным, появился человек, охотившийся на крупных животных. Изучение археологических памятников Великих равнин Северной Америки, датированных интервалом от 11 000 до 10 000 лет назад, убедительно показало, что первобытные люди тогда располагали эффективными орудиями и методами охоты на крупных животных. Были обнаружены скелеты животных с застрявшими в них наконечниками метательных копий. Кроме того, охота велась с помощью капканов и путем загона стад животных к крутым обрывам. Около 10 000 лет назад люди жили большими группами, организация которых была, вероятно, подчинена задачам ведения охоты. Мартин высказал предположение, что за счет выборочного истребления самок и молодых животных популяции промысловых животных быстро сократились до критического уровня, когда воспроизводительная способность вида не могла обеспечить его нормального существования.

Другие факторы, вероятно, тоже содействовали вымиранию ряда видов животных около 10 000 лет назад, но трудно игнорировать тот факт, что этот процесс совпал с распространением первобытного человека, располагавшего действенными орудиями истребления.

Нелегко оценить роль человека и его ближайших предков в истории позднекайнозойских ледниковых периодов. Советские исследователи здесь устанавливают самую прямую геологическую связь и называют последние 2–3 млн. лет в истории Земли *антропогеном*¹, тем самым акцентируя внимание на развитии в плиоцене и плейстоцене прямых предшественников человека.

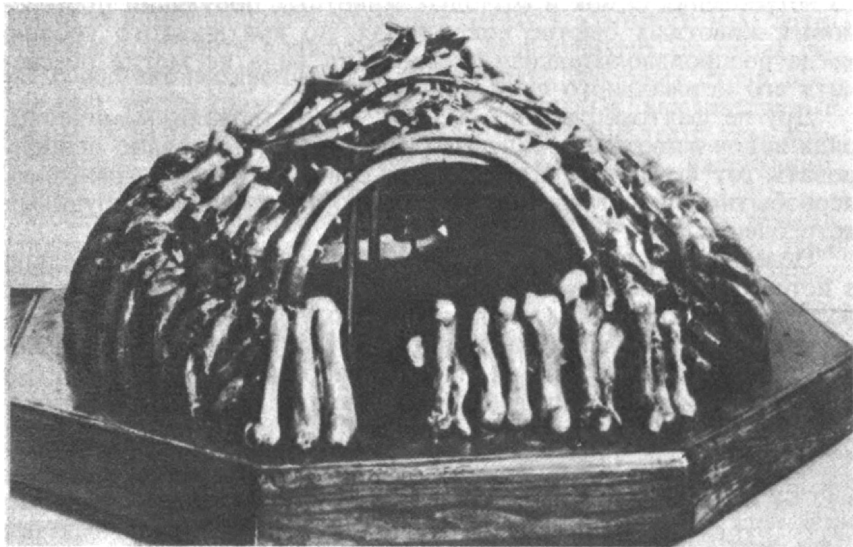
¹ Термин «антропоген» действительно довольно широко применяется в СССР как эквивалент четвертичного периода, продолжительность которого оценивается в 1,8 млн. лет, но этот термин не распространяется на плиоцен.— *Прим. перев.*



Рис. 161. Туша детеныша мамонта, обнаруженная в 1977 г. в илистых отложениях у поселка Сусуман в верховьях Колымы, Якутская АССР.

Рис. 162. Жилище, построенное из костей мамонта. Стоянка в селе Межирич (Украина).

В позднем палеолите, когда происходило постепенное улучшение климата, совершенствование охоты способствовало истреблению мамонтов в Евразии.



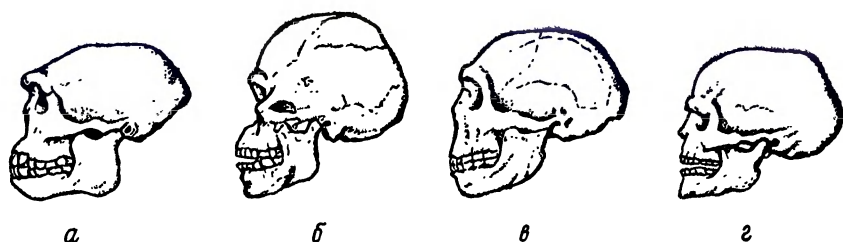


Рис. 163. Эволюция человека в плейстоцене.

Формы черепов яванского (а), раннего неандертальского (б), позднего неандертальского (в) и кроманьонского (г) человека свидетельствуют о прохождении ряда стадий, которые увенчались появлением *Homo sapiens*.

Однако сложно определенно доказать, что неоднократно повторявшиеся оледенения Северного полушария и последовательная эволюция *Homo sapiens* находятся в причинно-следственной зависимости.

Родословную человека удалось проследить до небольшого гоминида ростом 1,2 м, названного рамапитеком (*Ramapithecus*), который обитал в северной Индии около 9 млн. лет назад. Спустя 4–6 млн. лет развитие этого рода привело к выделению группы гоминидов, названных австралопитеками (*Australopithecus*). Последующая эволюция происходила по двум линиям: одна из них вымерла, другая через *A.habilis* привела к *Homo erectus* и затем к *Homo sapiens*.

Австралопитек был обнаружен только в Африке, и, судя по имеющимся ныне данным, этот материк был колыбелью человечества. Оледенения, происходившие в Европе, несомненно отражались на природной среде в Африке, но, как показывают реконструкции климата за последние 18 000 лет, нельзя ограничиваться простой корреляцией оледенений и климата. Так, например, благодаря применению радиоуглеродного датирования выяснилось, что периоды повышения уровней озер в Африке (так называемые пльвиалы) не были синхронными оледенениям Северной Европы. Помимо того, попытки ученых привлечь модели общей циркуляции атмосферы убедительно показали, что масштабы изменений природной среды в субтропиках и тропиках во время максимума оледенения были совсем невелики. Наиболее существенный вывод, вытекающий из этих опытов моделирования климата Земли в ледниковый период, сводится к тому, что оледенения приходились на периоды уменьшения количества осадков на земном шаре. Предполагают, что во время наибольшего распространения последнего висконсинского оледенения резко сократилась площадь зоны тропических дождевых лесов.

Эти положения следует применять с осторожностью, рассматривая вероятные изменения среды обитания различных видов *Australopithecus* и *Homo* в ранне- и среднечетвертичное время.

Яванский человек (*Homo erectus*), имевший рост 1,5 м, обитал, видимо, на большей части Старого Света. Остатки этого раннего предка человека были обнаружены в Индонезии, Китае и Африке. В один из интервалов среднего плейстоцена, сопоставляемый с классическим эльстерским оледенением и последующим гольштейнским межледниковьем, линия *Homo sapiens* четко ответвилась от более древнего ствола *H. erectus*. Сванскомбский человек и штайнхаймский человек относятся к ранним этапам развития *Homo sapiens*, и следует обратить внимание на многочисленные находки остатков такого типа на стоянках Северной Европы, расположенных поблизости от края ледникового покрова.

Эволюция *Homo sapiens* отличалась большой изменчивостью, и подвид *Homo sapiens sapiens*, к которому относимся мы, был лишь одним из нескольких типов, которые сохранились, тогда как другие вымерли. Вероятно, наиболее известным из вымерших подвидов был неандертальский человек (*Homo sapiens neanderthalensis*), который характеризовался широким распространением в позднелайстоценовое время; по-видимому, он вымер около 35 000 лет назад в середине последнего оледенения. До сих пор не известно, почему неандертальский человек вымер именно во время межстадиала в середине последнего оледенения. Равным образом не удалось выявить характер взаимоотношений (если они вообще имели место) между неандертальцами и представителями более прогрессивной (?) линии (*H. sapiens sapiens*), от которой мы все произошли. Не исключено, что эти отношения носили антагонистический характер и привели к уничтожению одного подвида другим.

Быстрые эволюционные изменения произошли в конце позднечетвертичного времени. Судя по находкам ископаемых остатков, человек тогда широко расселился из первоначальной родины в Африке и проник в Австралию и Америку; колонизация Новой Зеландии и островов Океании произошла позднее, после изобретения соответствующих средств навигации.

Много жарких споров развернулось по поводу путей миграции первобытного человека в Америку. Уровень Мирового океана во время оледенений понижался настолько, что между Азией и Северной Америкой формировался сухопутный мост в районе современного Берингова моря. Палеонтологические данные по Аляске свидетельствуют, что на большей части территории Берингии во время оледенений существовали убежища растений и животных. Там были найдены кости и рога многих крупных травоядных животных, в том числе мамонта. Первобытные люди, изготовлявшие каменные орудия (отсюда название «палеоли-

тические культуры»), в среднем и позднем плейстоцене населяли степи и равнины северной части СССР. Непонятно, что удерживало этих людей от переселения в Северную Америку. Предположение о раннем проникновении человека в Америку (более 11 000 лет назад) получило столь же энергичную поддержку, как в недавнее время идея Вегенера о перемещении материков. На самом деле многие находки и датировки не имеют подобающей геологической и археологической привязки, но тем не менее становится все труднее игнорировать непрерывно поступающую информацию о раннем заселении Америки. До недавних пор некоторые из наиболее достоверных доказательств были установлены в Центральной и Южной Америке, где культурные слои с орудиями человека были датированы радиоуглеродным методом интервалом от 26 000 до 14 000 лет. Эти датировки оказались более древними, чем это предусматривала прежняя точка зрения о заселении Северной Америки охотниками на крупных животных, оставившими изящно изготовленные наконечники металлических копий, которые относят к культурам Фолсом и Кловис. Следовательно, существовал очевидный разрыв во времени между культурами первобытного человека в Латинской Америке и в Северной Америке. Это породило ряд умозрительных заключений, что первопоселенцы не воспользовались Берингийским сухопутным мостом, а приплыли на лодках или плотах. Исследователи отмечали некоторые черты сходства между отдельными ранними стоянками вдоль западного побережья Южной Америки и Японии.

Значение Берингии в четвертичной истории Северной Америки было предметом глубоких исследований Национального музея человека в Канаде. В центре внимания этих междисциплинарных изысканий оказались находки обработанных костей на стоянках вдоль реки Олд-Кроу на территории Юкон. Возраст костей, определенный радиоуглеродным методом, превышает 25 000 лет. Первоначально кости были обнаружены в аллохтонных условиях, поэтому не исключено, что человек просто использовал ископаемый материал для изготовления орудий. Однако впоследствии обработанные кости были найдены в обнажениях по берегам рек. Древесина из тех же слоев имеет радиоуглеродный возраст не менее 35 000 лет; полученные данные интерпретировались как свидетельства обитания групп людей в этой части Берингии во время средневисконсинского межстадиала (т.е. в интервале от 60 000 до 25 000 лет назад). Не известно, удалось ли этим людям пережить в этой местности ухудшение климата, которое привело к возобновлению оледенения в горах на территории Юкон и в Аляске и к очередному наступанию края Лаврентийского ледникового покрова в бассейне реки Олд-Кроу. Ясно только то, что между 11 000 и 10 000 лет



Рис. 164. Небольшая церковь в покинутом селении Фуруфьердур, северо-западная Исландия.

В малый ледниковый период в условиях ухудшения климата многие подобные поселения были заброшены и население Исландии сократилось наполовину за счет холода и внешней миграции.

назад племена первобытных охотников, применявших эффективные орудия и методы добычи животных, заселяли Великие равнины Северной Америки от Техаса до Альберты. Очень трудно допустить, что распространение этих племен было связано со своеобразной инвазией в Северную Америку через Берингийский сухопутный мост, и есть основания предполагать, что на Великих равнинах перед максимумом последнего оледенения уже жили первобытные люди. Отсутствие свидетельств большого притока людей на Аляску в период от 11 000 до 10 000 лет назад служит подтверждением этой гипотезы.

Быстрое развитие хозяйства и культуры человека происходило за последние 10 000 лет в межледниковых климатических условиях. Многие исследователи отмечали связь между климатом и историей первобытного человека (а также недавней историей, запечатленной в письменных источниках). Некогда пользовавшаяся популярностью, затем забытая и теперь снова возрожденная концепция «климатического детерминизма» Э. Хантингтона констатирует тесную зависимость войн, эпидемий и гражданских

беспорядков от изменений климата. В последние годы профессор Э. Ле Руа Ладюри в своей книге «Времена пиршеств, времена голода»¹ показал, что на жизнь людей эпохи Возрождения эти изменения тоже оказывали влияние, и мы знаем, что малый ледниковый период, который только недавно завершился, оказал большое воздействие на жизнь народов в Скандинавии и Альпах.

В следующей главе рассматривается значение современных и предстоящих изменений климата, а также постоянно стоящая перед нами угроза очередного оледенения.

Только что поступили сведения о ледовой обстановке в Канадской Арктике летом 1978 г. Температуры летних месяцев там были на 3–5°C ниже средней многолетней нормы, мощный слой снега все еще покрывает возвышенные части этого региона, и мощный покров льда сковывает море Баффина. Сколько же понадобится таких летних периодов, как в 1978 г., чтобы началось очередное оледенение?

¹ Ladurie E. *Le Roy. Times of feast, times of famine*. New York, Doubleday, 1971, 428 p.

8. РИТМ, ПРИЧИНА И ПРОГНОЗ

Брайан Джон

ПРОБЛЕМЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

В этой книге мы постоянно обращались к исследованиям геологической истории Земли и ритмично повторявшихся в ней ледниковых периодов. Можно надеяться, что предыдущие главы дали читателю более реалистическое ощущение времени по сравнению с имевшимися до сих пор представлениями. Однако, как отмечал Янг в гл. 4, восприятие времени у нас сильно редуцировано: мы детально представляем себе четвертичный ледниковый период, а о докембрийских ледниковых периодах у нас имеются лишь обрывки впечатлений. Мы можем предполагать существование более чем одного раннепротерозойского ледникового периода и имеем свидетельства трех позднепротерозойских ледниковых периодов, однако весь фактический материал, относящийся к периоду до начала фанерозоя, настолько разрознен и настолько зависит от радиоизотопных определений возраста, которые вполне могут быть ошибочны, что ни в чем нельзя быть уверенным.

Проблемы усложняются, если мы при рассмотрении докембрия признаем, что старый геологический «принцип униформизма» малопригоден для интерпретации наиболее древних осадков. Представление о том, что настоящее — ключ к пониманию прошлого и что современные обстановки можно использовать для реконструкции древних, утрачивает свое значение, если принять во внимание, что в атмосфере докембрия был избыток двуокиси углерода и вряд ли присутствовал кислород.

Строматолиты, красноцветы и, может быть, древние тиллиты можно истолковывать на основе физических законов, которые, видимо, еще не могут быть точно сформулированы. Механизмы, вызывавшие установление ледниковых периодов в докембрии, возможно, были иными; не исключено также, что сами процессы оледенения сильно отличались от тех, которые описаны в гл. 3.

В предыдущих главах книги при анализе факторов, способствовавших наступлению ледниковых периодов, было чрезвычайно трудно оценить относительное значение многочисленных теорий, объяснявших существование ледниковых периодов. Мы рассмотрели теории перемещения материков и горообразования, теории изменения астрономических параметров, теории, свя-

занные с поведением льда. Некоторые из этих теорий могут показаться взаимно подкрепляющими, другие – взаимно исключющими. Одни из них просты и логичны, другие сложны и настолько зависят от «случайных» сочетаний обстоятельств, что их широкое использование кажется по меньшей мере сомнительным. И все же стоит ли искать универсальную теорию для объяснения происхождения «зим нашей планеты»? Может быть, следует ограничиться идеей о том, что каждый ледниковый период мог быть вызван только ему присущим сочетанием природных факторов?

Конечно, каждый ледниковый период приходился на время уникального размещения материков, уникальных условий циркуляции океанических вод и атмосферы. Если рассматривать геологическое время как линейную и необратимую функцию, придется сделать вывод, что ни один период в истории Земли не был точной копией другого предшествовавшего или последующего периода. В предыдущих главах было убедительно показано, насколько разной была планета Земля в докембрийское, позднеордовикское, пермско-каменноугольное время и в четвертичный период. Однако утверждать, что мы не должны разрабатывать теорию, применимую для объяснения происхождения *всех* ледниковых периодов, – значит искать легкий путь. Ведь в конечном итоге мы, по-видимому, имеем дело с закономерным чередованием ледниковых периодов, по крайней мере в течение более поздней части геологической истории, на что указывают все аналитические данные. В начале настоящей книги (см. раздел «Распределение ледниковых периодов во времени» в гл. 1) было показано, что ледниковые периоды повторялись с интервалом около 150 млн. лет. Но почему в таком случае нет широко представленных следов юрского ледникового периода, который должен был иметь место около 150 млн. лет назад? Может быть, ритмичность ледниковых периодов является кажущейся, а не реальной? Попробуем теперь разобраться в этой проблеме несколько более детально, чем при рассмотрении основных ледниковых периодов.

ПЕРИОДИЧНОСТЬ ИЛИ СЛУЧАЙНОСТЬ?

Самые древние ледниковые периоды, охарактеризованные Янгом в гл. 4, в настоящее время достаточно надежно «фиксированы» благодаря многочисленным радиоизотопным определениям их возраста. По-видимому, они имели место около 2200–2300 млн., 900 млн., 750 млн. и 600 млн. лет назад.

Материалы по раннему протерозою трудно интерпретировать, особенно в геохронологическом отношении. Гуронские лед-

никовые отложения являются древнейшими из ныне известных. Самая молодая ледниковая формация в районе озера Гурон датируется 2288 млн. лет, а самая древняя могла образоваться на несколько миллионов лет раньше. Ледниковые отложения раннего протерозоя в Южной Африке сформировались в интервале между 1950 млн. и 2340 млн. лет назад, в Австралии они имеют такие же датировки. Есть факты, указывающие на существование более чем одного ледникового периода, но их не удалось подкрепить надежными определениями возраста.

По-видимому, ледниковые периоды позднего протерозоя повторялись через 150 млн. лет. Однако Янг, тщательно проанализировавший данные, относящиеся к интервалу между 1200 млн. и 600 млн. лет назад, считает, что результаты датирования недостаточно убедительны, чтобы выделение трех ледниковых периодов — гнейсётского, стёртского и варангского — считать четко обоснованным. Этим и объясняется его осторожный подход к проблеме периодичности в гл. 4. Хотя все гнейсёские ледниковые отложения, по-видимому, характеризуются возрастом примерно 900 млн. лет, определения возраста более молодых тиллитов и связанных с ними осадков не столь однозначны. Стёртское оледенение в разных частях земного шара, вероятно, имело место в интервале между 810 млн. и 715 млн. лет назад, тогда как варангский ледниковый период датируется интервалом между 680 млн. и 570 млн. лет назад.

Большая часть имеющихся определений возраста верхнепротерозойских пород содержит стандартные ошибки от 20 млн. до 50 млн. лет, так что все приведенные выше датировки лишь приблизительны. Даже если мы будем принимать их как таковые, то убедимся, что отдельные ледниковые периоды могли продолжаться по 50–100 млн. лет каждый и, возможно, самые холодные части этих периодов разделялись интервалами по 150 млн. лет. И вновь при интерпретации геохронологических данных возникают трудности. Но поставим вопрос: были ли ледниковые периоды, продолжавшиеся, скажем, по 50 млн. лет каждый, достаточно длительными, чтобы массивы суши могли переместиться из тропических районов в полярные или наоборот? Ведь, как указывалось в гл. 4, мы должны объяснить широкое распространение тиллитов на всех палеоширотах, включая и экваториальный пояс.

Ответить на этот вопрос можно на основании имеющихся фактов. Из более «молодой» летописи геологических событий мы знаем, что Южный Атлантический и Северный Атлантический океаны образовались за 50 млн. лет, а для перемещения Индийского субконтинента из высоких южных широт через экватор в тропики Северного полушария потребовалось немного больше времени. Янг предположил (см. конец гл. 4), что в докембрии

земная кора была еще более подвижной и, вероятно, больше нет оснований для особых дискуссий о позднепротерозойских «тропических» ледниковых покровах.

Данные о фанерозойских оледенениях вполне определены. Ордовикский ледниковый период (гл. 5), по-видимому, характеризовался кульминацией ледниковых процессов около 450 млн. лет назад, но некоторые следы оледенения в Сахаре на несколько миллионов лет древнее. Тиллиты предположительно силурийского возраста найдены в Аргентине и Боливии, и некоторые авторитетные ученые полагают, что ледники могли существовать в ряде районов древнего суперконтинента Гондваны в течение силурийского периода. Таким образом, продолжительность позднеордовикского ледникового периода составляла примерно 50 млн. лет (между 460 млн. и 410 млн. лет назад).

Пермско-каменноугольный ледниковый период (гл. 6), видимо, был столь интенсивный и длительный, что его часто подразделяют на несколько четко выраженных ледниковых циклов. В целом он продолжался около 100 млн. лет – в интервале между 340 млн. и 240 млн. лет назад. Однако если принять во внимание периоды горного оледенения в позднем девоне и ранней перми, т.е. до и после основной части рассматриваемого ледникового периода, то можно считать, что суммарная продолжительность времени воздействия оледенения на облик Земли тогда превышала 150 млн. лет.

Наконец, кайнозойский ледниковый период, в котором мы теперь живем (гл. 7), имеет все признаки крайней устойчивости, поскольку в высоких широтах обоих полушарий (в пределах 30° от полюсов) располагаются крупные массивы суши. Обычно начало этого ледникового периода относили примерно к 2 млн. лет назад, но теперь известно, что еще в олигоцене, около 38 млн. лет назад, произошло резкое понижение температур по крайней мере в высоких широтах Южного полушария. Около 13 млн. лет назад, в миоцене, начал формироваться Антарктический ледниковый покров, который достиг наибольшего распространения менее 4 млн. лет назад. Образование Гренландского ледникового покрова началось около 3,5 млн. лет назад. Эту последовательность событий, которая представляется нам хорошо датированной, можно рассматривать как прообраз истории более древних ледниковых периодов. Она также показывает нам, что четвертичный ледниковый период уже продолжается более 10 млн. лет и еще далек от завершения (здесь, по-видимому, речь идет не о четвертичном, а о кайнозойском ледниковом периоде. – *Перев.*).

Возвращаясь к вопросу о периодичности, мы можем теперь спросить: можно ли говорить об интервале порядка 150 млн. лет между ледниковыми периодами, если известно, что некоторые из этих периодов продолжались по 50 млн. лет и даже больше?

Есть веские аргументы, подтверждающие, что варангский и пермско-каменноугольный периоды длились не менее чем по 150 млн. лет каждый, так что мы сталкиваемся со «взаимно перекрывающимися ледниковыми периодами». Иными словами, не целесообразнее ли рассматривать оледенение как нормальное и постоянное состояние планеты Земля, хотя ледниковые периоды проявлялись на материках только в тех случаях, когда в ходе глобальных перемещений эти материки пересекали области высоких широт?

Как объяснить отсутствие следов оледенения в некоторые интервалы геологической истории? Почему не было крупных оледенений в юрское время, 150 млн. лет назад, и на протяжении значительной части раннего и среднего протерозоя?

Все это коварные вопросы, но частично ответы на них уже были даны в гл. 1 и 2 и в главах, посвященных отдельным ледниковым периодам. Оледенение в полярных широтах и в высокогорных областях земного шара наверняка могло происходить в любые интервалы геологической истории. Не менее очевидно, что полярное и горное оледенения возвещали начало ледникового периода и сохранялись долгое время (возможно, десятки миллионов лет) по окончании этого периода. Однако пик ледникового периода должен был приходиться на время, когда материковые ледниковые покровы распространялись в умеренных широтах.

Расположение материков, вероятно, было основным фактором, определявшим установление ледниковых периодов. Мы даже предположили (см. гл. 1), что юрский ледниковый период не был выражен из-за отсутствия крупных массивов суши в полярных широтах. Хотя в то время и было глобальное похолодание, не было конкретных условий для развития оледенения в высоких широтах и соответственно ледниковый период не мог установиться. Сходные обстоятельства могли проявиться в тех интервалах истории докембрия, для которых не выявлены следы оледенения.

Теперь мы можем задать другой вопрос: если ледниковые периоды действительно повторялись с интервалом 150 млн. лет, можно ли также выделять глобальные «теплые периоды», которые разделяли периоды похолодания? Иными словами, если мы говорим о «зимах планеты», можно ли также обособлять «летние периоды планеты»?

Мы можем проверить это предположение, исследуя периоды возрастом около 75 млн., 225 млн., 375 млн., 525 млн., 675 млн. и 825 млн. лет назад, которые представляют собой как раз промежуточные стадии между ледниковыми периодами, рассмотренными в этой книге. Аргументы в пользу глобального потепления на этих стадиях не убедительны, особенно это относится

к ранней части геологической истории Земли. Однако Янг говорит о не очень четких свидетельствах глобального потепления в осадках, переслаивающихся с ледниковыми отложениями позднего протерозоя. В гл. 1 мы обращали внимание на значительное улучшение климата в кембрии, которое сопровождалось эволюционным «взрывом». Около 375 млн. лет назад в девонском периоде в поясе высоких широт Южного полушария существовала обширная суша, причем к югу от 30° ю.ш. концентрация материков была наибольшей, чем в любое последующее время. И все же этот период был, по-видимому, временем глобального потепления. На территории, где в отмеченных благоприятных обстоятельствах следовало бы ожидать развитие крупного полярного оледенения, нет никаких следов воздействия ледяных шапок или ледниковых покровов. Если обратиться к палеоклиматическим реконструкциям следующего вероятного теплого интервала, который мог иметь место около 225 млн. лет назад, то мы увидим, что он приходился на триасовый период – время глобального потепления, а также время вымирания растений и животных в широких масштабах. Причина этого вымирания не известна наверняка, но нет сомнений в том, что по окончании пермско-каменноугольного ледникового периода природные обстановки на земном шаре резко изменились. В меловой период, около 75 млн. лет назад, климат земного шара вновь стал теплее. В Западной Европе тогда был тропический климат, и постепенное понижение температуры по окончании мелового периода надежно установлено по результатам многих исследований.

Высказанная выше гипотеза включает много сложных и неопределенных аспектов. В связи с дискуссией о глобальных потеплениях и похолоданиях следует обратить внимание на трудность примирения новых палеогеографических идей, возникших в последнее десятилетие, с устарелыми представлениями палеоклиматологии и палеонтологии. Распределение климатов прошлого, древних растительных поясов, ареалов ископаемых растений и животных до сих пор еще не пересмотрено в свете новых идей о перемещении материков, признанных современными геофизиками. В целях обобщения на рис. 165 представлена предполагаемая последовательность основных климатических интервалов на нашей планете, которую признают не все авторы этой книги. Это – оригинальная рабочая гипотеза, которая нуждается в проверке. Интервал между ледниковыми периодами в 150 млн. лет кажется более правдоподобным, чем любой другой интервал, о котором можно говорить, исходя из имеющейся информации. Представление о существовании такого интервала более оправдано, чем идея о том, что распределение ледниковых периодов во времени объясняется сочетанием случайных обстоятельств.

ОЩУЩЕНИЕ МАСШТАБА ВРЕМЕНИ

В предыдущем разделе было показано, что, пытаясь понять причины возникновения ледниковых периодов и их распределение в геологической истории, мы должны изучать только те теории, которые применимы в широком масштабе времени. В гл. 2 мы рассмотрели ряд теорий, которые могут быть правомочны в масштабах десятков миллионов лет: в них учитывались такие «внутренние» факторы, как перемещение материков и спрединг океанического дна, горообразование, крупномасштабные колебания уровня моря за счет объединения и распада суперконтинентов и изменения состояния ядра Земли, приводящие к изменению направления магнитного поля.

Однако ни одна из этих теорий не представляется сама по себе способной (даже в сочетании с одной или несколькими другими теориями) объяснить ритмичность ледниковых периодов. Поэтому важное значение может иметь также ряд астрономических факторов: количественные изменения солнечной радиации, изменения в Галактике или изменения химического состава атмосферы, гидросферы и литосферы. Во всех этих случаях, по-видимому, сказываются долгопериодные осцилляции, но «период» в 150 млн. лет еще не окончательно доказан. «Галактический период», выделенный Родсом Фейрбриджем в гл. 5, составляет 200–250 млн. лет. Он плохо увязывается с рассматриваемым нами распределением ледниковых периодов. Возможно, существует другой галактический или космический ритм с повторяемостью через 150 млн. лет, который еще должным образом не уточнен. Возможно, именно такой ритм обусловлен деятельностью расплавленных недр Земли; он ведет к быстрому палеомагнитным изменениям, с которыми можно связать установление ледниковых периодов. Однако о хронологии изменений направления магнитного поля Земли до мелового периода еще так мало известно, что никаких долгопериодных осцилляций или колебаний не установлено.

Таким образом, до сих пор коренная причина возникновения ледниковых периодов остается невыясненной. Можно лишь сказать, что при определенном «благоприятном» распределении суши и океанов и «благоприятном» распределении высоких горных хребтов ледниковые периоды, вероятно, повторяются с интервалом приблизительно 150 млн. лет. Во время промежуточных потеплений оледенения не проявлялись, даже если распределение суши и другие факторы теоретически были подходящими для их развития. В связи с этим мы занимаемся раскрытием механизма *изменения климата* в широком масштабе.

Когда мы изучаем изменения климата, происходившие в рамках ледниковых периодов, поиск их причин несколько облегчает-

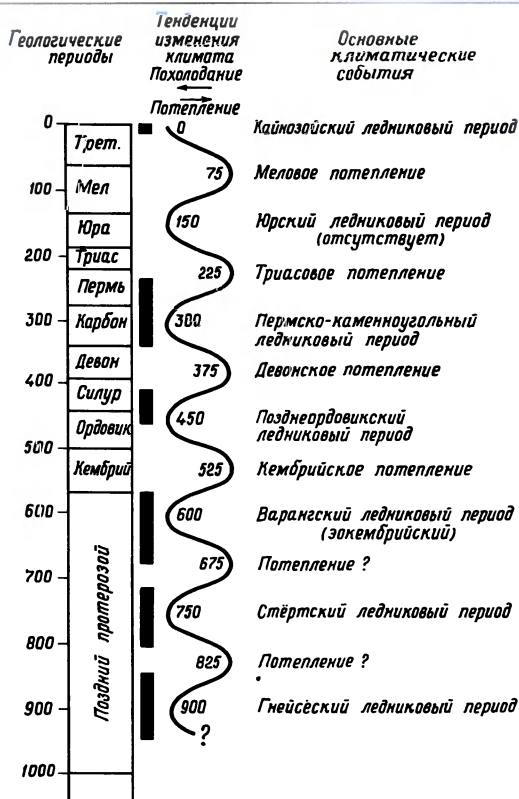


Рис. 165. Гипотетическая последовательность ледниковых и «теплых» периодов за последний миллиард лет.

Четко выявляется повторяемость ледниковых периодов через 150 млн. лет, если не считать отсутствия ледникового периода в юрское время. Черные полосы показывают предполагаемую продолжительность ледниковых периодов.

ся. Изменения климата в масштабе сотен или тысяч лет трудно выявить более или менее достоверно, но колебания масштаба десятков тысяч лет для поздней части нынешнего ледникового периода фиксируются достаточно надежно. Оледенения и межледниковья, по-видимому, охватывали интервалы времени порядка 100 тыс. лет. Благодаря внедрению радиоизотопного датирования и других методов определения возраста ученым, исследующим историю Земли, удалось установить довольно обоснованную последовательность изменений климата за последний миллион лет или несколько более. Основные изменения климата рассматривались Дж. Эндрюсом в гл. 7, где также обсуждались вероятные причины этих изменений.

Таблица 3

Амплитуды изменений климата во время одного ледникового периода

Климатические изменения	Временной диапазон изменений	Периодичность	Формы проявления
Первый порядок	Десятилетия	25–100 лет	Небольшие колебания, например кратковременные ледниковые пульсации
Второй порядок	Столетия	250–1000 лет	Крупные колебания послеледникового и исторического времени, например «малый ледниковый период»
Третий порядок	Тысячелетия	2500–10 000 лет	Стадиальные и межстадиальные эпизоды в пределах оледенений
Четвертый порядок	Десятки тысяч лет	25 000–100 000 лет	Оледенения и межледниковья

В рамках одного ледникового периода можно не учитывать такие факторы, как перемещение материков и горообразование, и основное внимание следует уделять внешним причинам, которые рассматривались в гл. 2. Чередование оледенений и межледниковий могло зависеть от изменений солнечной постоянной (см. раздел «Внешние причины» в гл. 2), «внутренне регулируемых» повышений и понижений концентрации двуокиси углерода в атмосфере, колебаний уровня моря или сдвигов в системе океанических течений. В то же время некоторая существенная неустойчивость состояния атмосферы, вероятно, проявилась в колебательных изменениях циркуляции воздушных масс, что приводило к повторявшимся циклам роста и распада ледниковых покровов в умеренных широтах. Однако, как отмечалось в нескольких главах этой книги, истинные причинно-следственные связи весьма сложно выявить. Простое «сопоставление» ритмов может привести исследователей к неправильному выводу, что проблема климатических изменений и ледниковых периодов решена.

Для понимания климатических изменений на среднем уровне особенно важны следующие две группы теорий.

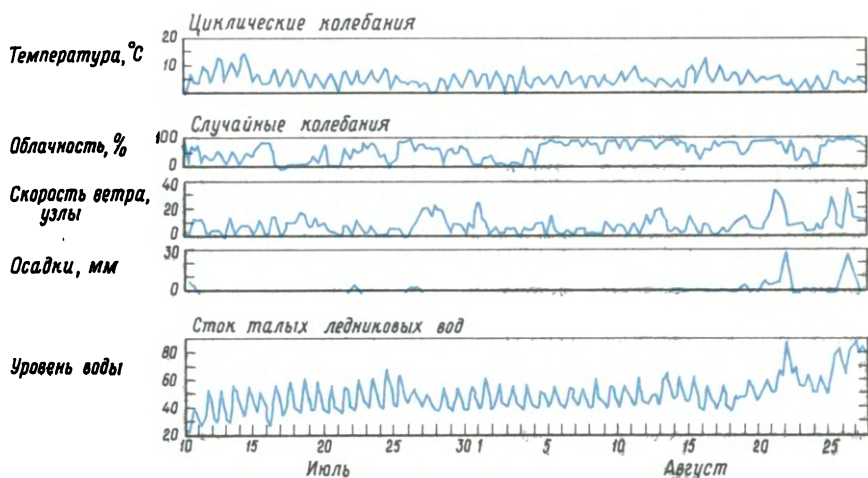


Рис. 166. Изменения природной среды близ края ледяной шапки в Исландии. Некоторые колебания имеют периодический, другие — случайный характер. Результирующие показатели колебаний (в данном случае сток талых ледниковых вод) включают циклические и случайные элементы. Такой же характер, вероятно, имеют и изменения климата в масштабах тысячелетий, столетий и десятилетий.

В первую очередь это теории, связанные с поведением льда. Раньше они должным образом не учитывались исследователями изменений климата, но благодаря недавним значительным успехам гляциологии эти теории приобрели дополнительное обоснование. Мысль о том, что состояние ледниковых покровов зависит от сложного взаимодействия уровня моря, температуры океанических вод и циркуляции атмосферы, представляется весьма важной для объяснения смен оледенений и межледниковий.

Эти колебания можно также объяснить на основе разработанной Миланковичем модели астрономических ритмов. Как упоминалось в гл. 2, в изменении элементов орбиты Земли выделены три основных цикла, каждый из которых оказывает небольшое самостоятельное влияние на климат, но, когда все три цикла рассматриваются в совокупности, можно установить повторяющиеся совпадения фаз, которые способствуют ухудшению климата полушарий. Ученые представили систему фаз похолодания и потепления в Северном полушарии, рассчитанную на основе модели Миланковича. Недавно эта модель получила значительную поддержку благодаря результатам анализа климатических ритмов, выявленных при изучении колонок глубоководных морских осадков. В работе, опубликованной в 1976 г. Хейсом, Имбри и Шеклтоном, подтверждается существование циклов с периодичностью в 100 000, 42 000–43 000 и 24 000 лет. Эти авторы пришли

к выводу, что «изменения в геометрии земной орбиты являются основной причиной четвертичных ледниковых периодов» (здесь они имели в виду четвертичные оледенения).

Этот вывод был с восторгом воспринят такими авторами научно-популярных книг, как Н. Колдер и Дж. Гриббин, а также многими климатологами и исследователями истории Земли. Однако мы должны поставить перед собой вопрос: действительно ли изменения в геометрии земной орбиты являются *основными* причинами оледенений и межледниковий? И прежде всего, действительно ли изотопно-кислородная летопись представляет собой достоверную индикацию разрастания и сокращения ледниковых покровов в умеренных широтах? Это довольно спорная проблема. Данные изотопно-кислородной летописи могут быть правильно истолкованы в отношении похолодания или потепления океанов, но ведь эти потепления и похолодания могут совпадать, а могут и не совпадать с оледенениями и межледниковьями, выявленными на основе геологических или гляциологических критериев. В случае несовпадения (а это весьма вероятно) «основная причина» четвертичных оледенений может в конечном итоге оказаться вовсе не столь основной...

При рассмотрении климатических изменений, происходивших за последние 100 тыс. лет, помимо вышеупомянутых ритмов можно дополнительно выявить ряд других ритмов. Это ритмы среднего и малого порядков, которые не имеют особого значения для понимания повторяемости ледниковых периодов в геологической истории, но которые важны для прогнозирования будущих изменений климата нашей планеты. Здесь особенно существенны изменения солнечной радиации; как выяснилось, короткопериодные климатические осцилляции четко совпадают с «циклами солнечных пятен» в 11, 22 и 44 года. Изменения климата или погоды рассматривались в разных временных диапозонах — от недель до сезонов года, лет, десятилетий, столетий. Некоторые из выявленных аномалий можно объяснить как случайные, но другие могут быть связаны с постепенными сдвигами в системе циркуляции атмосферы. На уровне отдельных лет или десятилетий проявляется воздействие механизмов обратной связи с такими факторами, как снежный покров Северного полушария, пути циклонов и температуры океанических вод, которые сложно взаимодействуют между собой. По-видимому, существуют связи между распределением погод на Земле и изменениями магнитного поля, особенно на уровнях столетий и тысячелетий, и Дж. Гриббин энергично отстаивал точку зрения, что новая наука «магнетометеорология» может предоставить ключи для раскрытия механизмов короткопериодных изменений климата. Он также предполагал наличие связей между активностью Солнца, землетрясениями, вулканическими извержениями и изме-

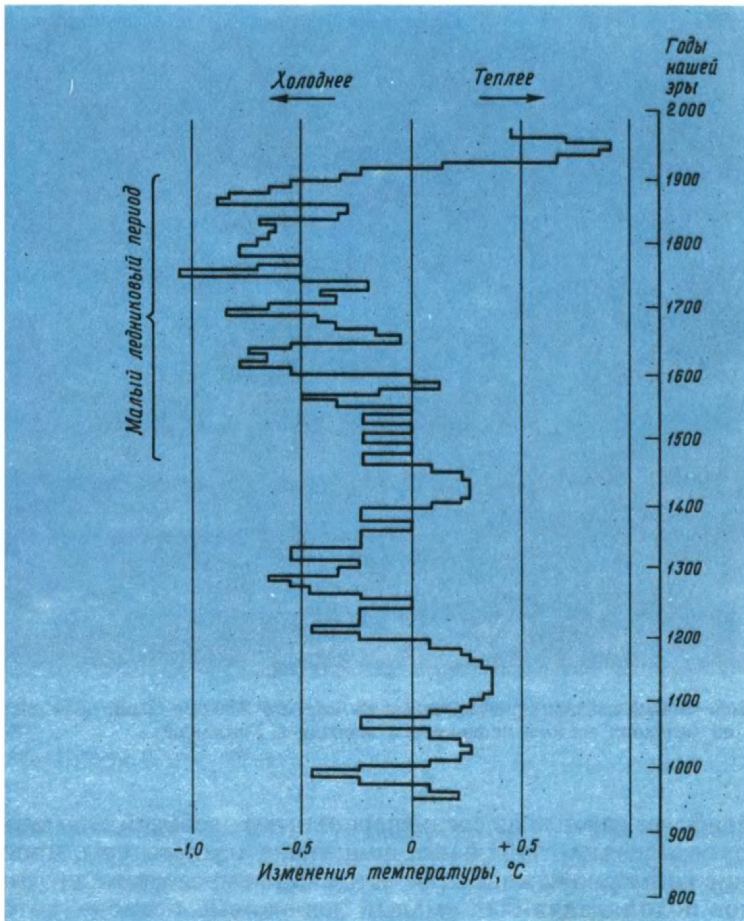


Рис. 167. Малый ледниковый период в Исландии.

На графике показаны вычисленные величины средних температур для каждого десятилетия начиная с 950 г. н.э. Сильное похолодание, продолжавшееся с 1450 по 1900 г., оказало неблагоприятное воздействие на плодородные районы Северной Европы.

нениями климата, что кажется довольно убедительным. Палеотемпературные изменения, зарегистрированные при изучении кернов льда из Гренландии, показывают, что помимо вероятного ритма в 13 000 лет, связанного с ростом и разрушением ледниковых тел, проявляются осцилляции с интервалами в 180, 80 и 30–40 лет. Причины этих осцилляций, однако, недостаточно ясны.



Рис. 168. Зимний пейзаж, запечатленный на картине Ван-дер-Кера, дает представление об условиях малого ледникового периода в Голландии.

Наиболее важные из среднепериодных колебаний климата, видимо, определяли глобальные понижения температуры, происходившие примерно каждые 2500 лет. Самым последним из этих периодов похолодания был «малый ледниковый период», который довольно четко зафиксирован в истории Западной Европы, Дальнего Востока и других районов. Это похолодание не было повсеместно выражено, но в Северо-Атлантической области несколько важных исторических событий было связано с длинной серией суровых зим, подвижек ледников, повышенным падежом домашнего скота и гибелью людей.

В Исландии и Гренландии период от 800 до 1000 г. н.э. отличался теплым сухим климатом. Затем климат резко ухудшился, и за 400 лет поселения викингов в Гренландии пришли в полное запустение вследствие усилившегося холода и прекращения контактов с внешним миром. Прохождение судов вдоль берегов Гренландии стало практически невозможным из-за колоссального выноса морских льдов из Арктики.

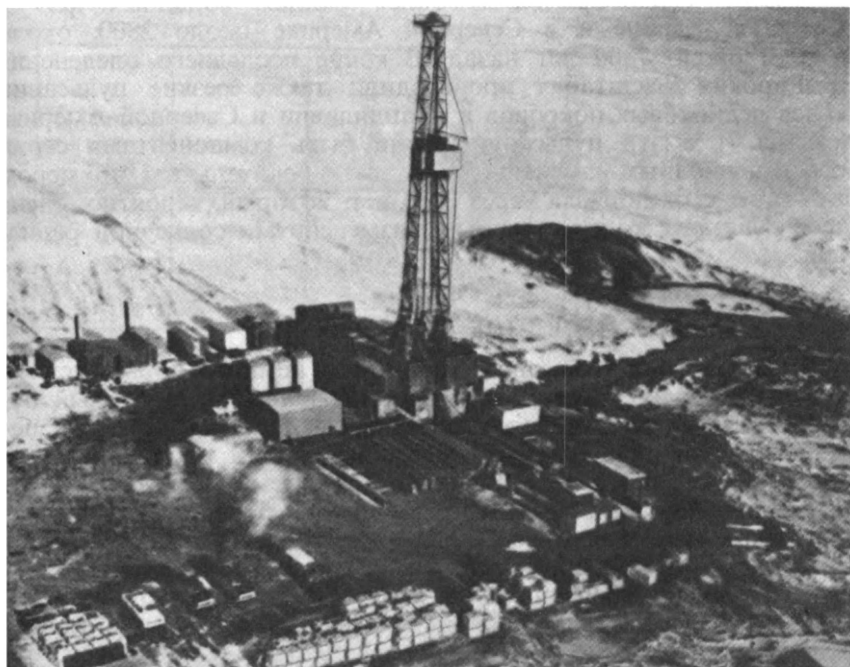


Рис. 169. Человек постепенно научился налаживать хозяйство в крайне холодных условиях.

Нефтебуровая установка на севере Аляски.

Одновременно климат ухудшился и в Исландии, где XVI–XVII столетия были временем тяжелых испытаний. В период между 1200 и 1800 гг. население этой страны сократилось вдвое, главным образом из-за голода.

В Скандинавии малый ледниковый период тоже резко проявился в виде серии крайне суровых зим, подвижек ледников в горах и частых неурожаев. Массовая миграция норвежцев, шведов и финнов в Новый Свет в XIX в. была по крайней мере частично связана с крайне неблагоприятными условиями малого ледникового периода.

В период между 1500 и 1900 гг. трудности испытывали жители альпийских долин, и даже на равнинах Европы похолодание проявилось в виде неоднократно повторявшихся затяжных холодных зим, замерзания рек и озер и частых неурожаев.

Малый ледниковый период, который, видимо, достиг кульминации около 200 лет назад, был лишь самым недавним из среднепериодных ухудшений климата. В нашем распоряжении есть

надежные свидетельства и более ранних холодных фаз в Северной Европе и в Северной Америке – около 2800, около 5300 и около 7800 лет назад. В конце последнего оледенения в широких масштабах происходили также резкие пульсации краев ледниковых покровов в Скандинавии и Северной Америке (см. гл. 7), и эти пульсации могли быть компонентами серии среднепериодных изменений климата. Убедительным примером является ритм порядка через 2500 лет, который, вероятно, очень тесно связан с количественными изменениями солнечной радиации.

КОГДА БУДЕТ ОЧЕРЕДНОЕ ОЛЕДЕНЕНИЕ?

В заключение этой книги мы можем немного поразмыслить о будущем. Мы уже видели, что кайнозойский ледниковый период вовсе не закончился, и, если предыдущие ледниковые периоды имели с ним нечто общее, он должен продлиться еще около 40 млн. лет. Следует согласиться с тем, что мы живем не в послеледниковое время этого ледникового периода. Наступание льдов несомненно возобновится. Этот вывод не совпадает с мнением авторов некоторых учебников, которые оптимистически допускали, что ледниковый период остался позади и заслуживает изучения только с исторических позиций. Период, в котором мы живем, – типичное межледниковье. Оно ничем не отличается от более древних межледниковий и, во всяком случае, не теплее, чем межледниковья прошлого. Напротив, нынешнее межледниковье более прохладное, чем некоторые более древние межледниковья, и есть основания предполагать, что оно также может оказаться короче. Это может быть типичным для межледниковий, которые приходятся на «спад» ледникового периода, и в свою очередь приводит к более сильному глобальному похолоданию. К счастью для нас и для всего живого на Земле, этот процесс, видимо, остановится до того, как ледниковые покровы достигнут тропических стран, но, судя по геологическим и палеоклиматическим данным, можно допустить, что именно этот конкретный ледниковый период еще несколько продолжится, прежде чем достигнет кульминационной стадии похолодания.

Все приведенные утверждения звучат как абстракции. Однако мы все хотим знать, когда начнется очередная фаза похолодания и когда начнется следующее оледенение.

Рассматривая ледниково-межледниковый ритм, можно убедиться, что нам не угрожает опасность, так как нынешнее межледниковье, вероятно, еще продлится 5–10 тыс. лет. Из анализа распределения похолоданий и потеплений в неогляциале следует, что перед нами не стоит явная опасность начала очередного оледенения. Малый ледниковый период только что завершился, и

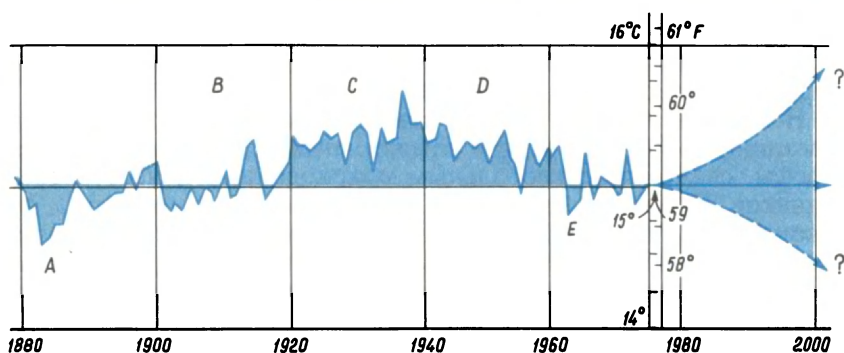


Рис. 170. График изменений температуры Северного полушария после 1880 г. Хотя после 1938 г. происходит постепенное ухудшение климата, нет гарантии, что эта тенденция продлится и климат на Земле станет холоднее.

Рис. 171. Признаки очередной «зимы»?

Ученые исследуют шельфовый ледник Росса в Антарктиде. Изучение района, где шельфовый ледник переходит в Западно-Антарктический ледниковый покров, в первую очередь позволит обнаружить признаки распада ледникового покрова. Внимание человечества должно быть приковано к результатам этих работ.



в течение ближайших 2500 лет не предвидится очередного похолодания. Даже когда наступит следующий малый ледниковый период, люди будут гораздо лучше подготовлены к нему, чем наши предки в период 1500–1900 гг. н.э.

Недавно некоторые авторы книг пытались вызвать большую сенсацию, говоря об угрозе предстоящей климатической катастрофы, связанной с глобальным похолоданием и наступанием ледников. Например, книга Н. Колдера «Машина времени и ледяная угроза» и книга Дж. Гриббина «Климатическая угроза» наполнены мрачными и ужасными предсказаниями «повторных климатических спиралей», аномалий погоды и расширения площади снежного покрова в Северном полушарии. Однако у нас, по-видимому, нет веских доказательств в пользу происходящих существенных изменений климата. Даже изменения климата, вытекающие из информации, которую поставляют модели, рассчитанные на ЭВМ (некоторые из них в качестве основы используют теорию Миланковича), слишком долгопериодны и имеют ограниченное применение в рамках ближайших нескольких тысячелетий. Нет веских оснований для предсказания, что очередное широкое распространение оледенения произойдет в предстоящие 2000 лет. Нет серьезных поводов для тревоги, поднятой Н. Колдером по поводу обильных снегопадов, которые якобы чуть ли не в любой момент могут погрузить нас в состояние очередного оледенения. Нет веских оснований предполагать, как это делает Дж. Гриббин, что «ледниковый период может наступить за несколько столетий, и современное ухудшение климата настоятельно требует внимания всех, кто отвечает за судьбу человечества».

Никто не может быть уверен в том, как изменится климат Земли, и хотя надо критически воспринимать утверждения лиц, сеющих тревогу, все же надо трезво оценивать вероятность быстрых климатических изменений. В предыдущей главе Дж. Эндрюс отстаивал идею, что климат ледникового типа быстро сменяется климатом межледникового типа и наоборот. Внезапное проявление ледниковых обстановок означает, что цепь реакций включается в действие за тысячу или даже за несколько сотен лет. Сходным образом внезапное разрушение ледниковых покровов и быстрая пульсация частей ледникового покрова осуществляются столь молниеносными темпами в геологическом отношении, что такие события следует рассматривать как «геологические катастрофы».

Хотя, судя по имеющимся данным, в ближайшем будущем вряд ли произойдут быстрые перемены климата, такая вероятность вовсе не исключена. Ведь в конечном счете лед – обычный компонент ледникового периода, и его распространения можно ожидать в любой момент независимо от того, будем ли мы предупреждены о подвижке или нет.

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

- Абиссальная равнина** (abyssal plain) – обширная равнина с чехлом осадков на дне океана.
- Абляционная морена** (ablation moraine) – морена, образованная при вытаивании обломочного материала из ледникового льда непосредственно за счет абляции.
- Абляция** (ablation) – таяние и другие процессы, ведущие к уменьшению массы снежных и ледяных тел.
- Агломерат** (agglomerate) – скопление грубообломочного материала или угловатых глыб лавы, образовавшихся при вулканическом извержении.
- Айсберг** (iceberg) – крупная обособленная глыба ледникового льда, свободно плавающая в воде после отёла (откола от конца ледника.– *Перев.*).
- Аккумуляция** (accumulation) – наращивание поверхности ледника или снежного поля за счет выпадения снега и других процессов.
- Активный слой** (active layer) – поверхностный слой грунта, оттаивающий каждое лето в областях вечной мерзлоты.
- Алевролит** (siltstone) – порода, образовавшаяся при уплотнении слоя алеврита и тонкозернистого песка.
- Аллювий** (alluvium) – осадки текучих вод, состоящие преимущественно из песка, алеврита и глины.
- Альbedo** (albedo) – показатель белизны или яркости поверхности, получающей солнечную радиацию. (Показатель отражательной способности поверхности.– *Перев.*).
- Альпийская орогения** (Alpine orogeny) – кайнозойский цикл горообразования. В Европе в это время возникли Альпы.
- Альпийской оледенение** (alpine glaciation) – оледенение, представленное снежными полями и долинными ледниками в областях расчлененного горного рельефа.
- Аммонит** (ammonite) – свободно плавающий морской моллюск с внешней оболочкой из арагонита, которая внутри подразделяется на камеры. В настоящее время полностью вымер. Диаметр некоторых раковин аммонитов превышает 1 м.

- Ангария (Angaraland)** – один из крупных материков (суперконтинент), существовавший в каменноугольном периоде. Впоследствии соединился с Лавразией и образовал северную часть Пангеи.
- Антарктика (Antarctic)** – территория, ограниченная Южным полярным кругом (66,5° ю. ш.).
- Антиклиналь (anticline)** – выпуклая складчатая или сводообразная структура в толщах слоистых пород, как правило, возникшая за счет боковых давлений.
- Аргиллит (mudstone)** – тонкозернистая порода, обычно состоящая из алевроита и глины, которые осаждались в глубоководной среде.
- Арет (arête)** – заостренный узкий гребень между двумя вершинами. Характерен для расчлененного горного рельефа.
- Арктика (Arctic)** – территория, ограниченная Северным полярным кругом (66,5° с. ш.).
- Армориканская орогения (Armorican orogeny)** – См. Герцинская орогения.
- Архей (Archaean)** – одно из основных подразделений докембрия.
- Атмосфера (atmosphere)** – газообразная оболочка Земли.
- Афтонское межледниковье (Aftonian interglacial)** – межледниковье между небрасским и канзасским оледенениями в Северной Америке.
- Базальт (basalt)** – темноокрашенная тонкозернистая порода, образовавшаяся при застывании лавы. Базальтовые лавы – наиболее распространенный тип лав.
- Бараний лоб (roche moutonnée)** – невысокий скальный холм, обработанный движущимся ледником; склон, обращенный навстречу движению ледника, гладко отшлифован, а противоположный крут и неровен.
- Берингия (Beringia)** – древняя суша, включавшая Аляску и северо-восточную Сибирь. В настоящее время часть ее затоплена в результате трансгрессии моря.
- Биберское оледенение (Biber glaciation)** – предполагаемое раннее оледенение в Альпах (кайнозойский ледниковый период).
- Биостратиграфия (biostratigraphy)** – раздел стратиграфии, изучающий различия в распределении ископаемых остатков организмов в осадочных отложениях.
- Биосфера (biosphere)** – «сфера жизни» на поверхности Земли. (По В. И. Вернадскому, биосфера включает нижнюю часть атмосферы, гидросферу и верхнюю часть литосферы, которые взаимосвязаны сложными биогеохимическими процессами перераспределения энергии и вещества. – *Перев.*)

- Боковая морена** (lateral moraine) – морена, образовавшаяся по краям ледника, обычно в троговой долине.
- Бореальный лес** (boreal forest) – См. Тайга.
- Борозды движения** (chatter-marks) – небольшие серповидные вмятины, оставленные на поверхности породы перекрывающим ее льдом. (Термин может применяться для обозначения знаков не только серповидной, но и любой формы. – *Перев.*)
- Брахиоподы** (brachiopod) – морские беспозвоночные животные с двустворчатой раковиной, одна из створок обычно гораздо больше другой.
- Валунная глина** (boulder clay) – устаревший синоним термина «морена». (В настоящее время еще часто употребляется в английской литературе. – *Перев.*)
- Варангский ледниковый период** (Varangian ice age) – ледниковый период в самом конце докембрия (около 600 млн. лет назад). Назван по району Варангер в Норвегии.
- Верховое болото** (muskeg) – северное болото, поросшее сфагновыми мхами, осоками и редкими деревьями.
- Вершинная (задняя) стенка кара** (headwall) – крутой скальный уступ, выработанный экзарацией карового ледника и другими процессами.
- Ветровой ковш** (wind-scoop) – овальная впадина на поверхности снега вдоль края какого-либо препятствия, образовавшаяся в результате завихрения воздушного потока, отклоняющегося от данного препятствия.
- Вечная мерзлота** (permafrost) – слой постоянно (вернее, длительно. – *Перев.*) мерзлых горных пород; мощность его может достигать сотен метров.
- Висконсинское оледенение** (Wisconsin stage) – последнее оледенение в Северной Америке.
- Вислинское оледенение** (Weichselian stage) – последнее оледенение в Северо-Западной Европе. Сопоставимо с висконсинским оледенением в Северной Америке.
- Внутриледниковый** (englacial) – находящийся внутри ледника.
- Водно-ледниковый, флювиогляциальный** (fluvio-glacial, glaciofluvial) – относящийся к деятельности талых вод в самом леднике и за его пределами.
- Возгонка, сублимация** (sublimation) – фазовый переход снега или льда в водяной пар.
- Вулкан** (volcano) – трещина (или канал) в земной коре, по которой выбрасывается или изливается материал из глубинных магматических очагов.

- Вулканический туф** (tuff) – порода, состоящая из мелких частиц (часто пепла), выброшенных во время вулканических извержений.
- Вулканология** (vulcanology) – наука, изучающая вулканы и процессы вулканических извержений.
- Выветривание** (weathering) – процесс разложения или разрушения пород под воздействием физических и химических факторов.
- Выводной ледник** (outlet glacier) – крупный ледник, спускающийся от края ледяной шапки или ледникового покрова по направлению к берегу моря.
- Выпахивание** (plucking) – процесс денудации, связанный с работой движущегося ледника. При этом даже крупные глыбы отделяются от пород коренного ложа и уносятся льдом.
- Вюрмское оледенение** (Würm stage) – последнее оледенение в Альпах (по классической схеме).
- Гастроподы** (gastropod) – животные (моллюски), защищенные спирально закрученной раковиной, не разделенной на камеры.
- Гаугандское оледенение** (Gowganda glaciation) – оледенение, или ледниковый период, следы которого сохранились в породах формации Гауганда в Северной Америке. Возраст около 2300 млн. лет.
- Геология** (geology) – наука, изучающая строение и состав Земли.
- Геоморфология** (geomorphology) – наука, изучающая общую конфигурацию поверхности Земли и формы рельефа, а также процессы образования рельефа.
- Геосинклиналь** (geosyncline) – крупный прогиб, сформировавшийся вдоль края континента и испытывавший воздействие тектоники плит и спрединга океанического дна.
- Геофизика** (geophysics) – наука, использующая принципы математики и физики для изучения внутреннего строения Земли и процессов, происходящих в ее геосферах.
- Герцинская орогенія** (Hercynian orogeny) – цикл горообразования в Европе в поздней части палеозойской эры (пермско-каменноугольное время).
- Гидролакколит, морозный бугор, пинго** (pingo) – крупный бугор, образовавшийся в результате разрастания линзы погребенного льда.
- Гидросфера** (hydrosphere) – прерывистая водная оболочка Земли. Большая часть этой оболочки – Мировой океан.
- Глобального исследования атмосферы программа** (Global Atmospheric Research Program, GARP) – международный научный проект.

- Глобальной циркуляции модель** (Global Circulation Model, GCM) – обобщенное представление о циркуляции атмосферы Земли.
- Глоссоптериевая флора** (Glossopteris flora) – флора с обилием птеридоспермов *Glossopteris*. Особенно широко была распространена на территории Гондваны в пермский период.
- Глубоководного бурения программа** (Deep Sea Drilling Program, DSDP) – международный научный проект.
- Глубоководный желоб** (deep sea trench) – глубокий желоб на дне океана, сформировавшийся в зоне субдукции океанической плиты. Глубины таких желобов могут достигать 10 км.
- Глыбовый лед** (brash-ice) – скопление плавающих льдов (ледяная каша), состоящее из паковых льдин и айсбергов.
- Гляциология** (glaciology) – наука о ледниках, снеге и льде.
- Гляциоэвстазия** (glacio-eustasy) – колебания уровня Мирового океана, обусловленные изъятием или поступлением масс воды в связи с разрастанием и таянием ледниковых покровов.
- Гнейсёский ледниковый период** (Gnejsö ice age) – необщепринятый термин для обозначения ледникового периода, имевшего место в докембрийское время, около 900 млн. лет назад.
- Голоценовое межледниковье** (Holocene interglacial) – современное межледниковье кайнозойского ледникового периода.
- Гоминиды** (hominids) – семейство приматов, включающее человека и его близких предков.
- Гондвана** (Gondwanaland) – гигантский древний материк (суперконтинент) в Южном полушарии, включавший Южную Америку, Африку, Индию, Антарктиду и Австралию.
- Гранит** (granite) – крупнозернистая интрузивная магматическая порода, часто белого или розового цвета.
- Граница питания** (equilibrium line) – уровень ледника, отделяющий область аккумуляции от области абляции. (Почти совпадает с фирновой линией. – *Перев.*)
- Граптолиты** (graptolites) – группа вымерших морских животных, остатки которых часто используются для определения возраста нижнепалеозойских пород.
- Грубозернистый песчаник** (gritstone) – песчаник, состоящий преимущественно из крупных, нередко угловатых зерен кварца.
- Гумидный климат** (humid climate) – климат с количеством осадков и увлажнением поверхности, достаточными для существования разнообразных растений и животных.

- Гуронский ледниковый период** (Huronian ice age) – См. Гаугандское оледенение.
- Гюнцское оледенение** (Günz glaciation) – второе оледенение в Альпах, выделенное Пенком и Брукнером.
- Двейкское оледенение** (Dwyka glaciation) – оледенение пермско-каменноугольного возраста в Южной Африке.
- Двустворчатый моллюск** (bivalve) – моллюск с двустворчатой раковиной, защищающей тело.
- Девенское оледенение** (Devensian glacial stage) – последнее оледенение на Британских островах, сопоставимое с вислинским в Северо-Западной Европе.
- Девонский период** – геологический период в середине палеозойской эры, в интервале от 395 млн. до 345 млн. лет назад.
- Денудация** (denudation) – сглаживание поверхности суши под влиянием процессов выветривания и эрозии.
- Дефляция** (deflation) – удаление с поверхности Земли рыхлого материала под воздействием ветра.
- Диорит** (diorite) – крупнозернистая интрузивная магматическая порода.
- Докембрий** (Precambrian) – отрезок геологического времени, начавшийся с образования Земли и завершившийся около 570 млн. лет назад.
- Долерит** (dolerite) – темноокрашенная магматическая порода, похожая на базальт, но более крупнозернистая.
- Долинный зандр** (valley train) – область развития отложений талых ледниковых вод, ограниченная бортами трога.
- Долинный ледник** (valley glacier) – ледник, который спускается вниз по трогу или долине, созданной или по крайней мере углубленной в результате экзарации.
- Доломитит** (dolostone) – горная порода, состоящая главным образом из карбонатного минерала доломита.
- Донное скольжение ледника** (basal sliding) – скольжение ледника по ложу, чему способствует в качестве смазки пленка воды.
- Древний красный песчаник** (Old Red sandstone) – термин, применяемый в Англии для отложения девонского периода (возраст от 395 млн. до 345 млн. лет).
- Дрейф материков** (continental drift) – движение континентальных блоков (плит) на поверхности Земли.
- Дропстон** (dropstone) – камень или валун, упавший на дно моря после транспортировки плавучим льдом. Такие камни обычно встречаются в ледниково-морских отложениях.
- Друмлин** (drumlin) – невысокий холм удлинненно-овальной формы со сглаженной поверхностью, сложенный ледниковыми отложениями. Строение друмлинов

- зависит от характера воздействия ледника.
- Дунайское оледенение** (Donau glaciation) – самое раннее оледенение в Альпах (по классической схеме).
- Дюна** (dune) – холм из песка или других мелкозернистых осадков, принесенных ветром.
- Жильный лед** (vein ice) – подземный лед в областях распространения вечной мерзлоты, образующий вертикальные или крутонаклонные «жилы».
- Зандровая равнина** (sandur, мн. ч. sandar) – обширная равнина, сложенная водно-ледниковыми осадками.
- Зандровый поток** (outwash stream) – поток талых вод, берущий начало от края ледника, внутри ледника или на его ложе и устремляющийся за пределы ледника.
- Затвердевание** (solidification) – превращение расплавленной лавы в пласты твердых пород.
- Зеленокаменная порода** (greenstone) – основная вулканическая порода (например, базальт), измененная в результате метаморфизма.
- Земной магнетизм, геомагнетизм** (geomagnetism) – магнитное поле Земли, проявляющееся в магнитных свойствах горных пород на поверхности или поблизости от нее.
- Знаки ряби, волноприбойные знаки** (ripple marks) – следы ряби, обусловленные движением воды или ветра по поверхности такого мелкозернистого материала, как, например, песок.
- Зональность** (zonation) – определенная последовательная смена зон или поясов.
- Известняк** (limestone) – осадочная порода, в основном состоящая из карбоната кальция. Обычно образуется в чистой теплой воде из остатков морских организмов – кораллов и моллюсков.
- Изменение направления магнитного поля Земли** (magnetic reversal) – изменение положения магнитных полюсов Земли с прямого на обратное и наоборот.
- Изморозь** (rime ice) – лед, образующийся в результате замерзания капель атмосферной влаги при соприкосновении с холодными поверхностями.
- Изостазия** (isostasy) – состояние равновесия в земной коре. Под влиянием веса льда кора прогибается, снятие этой нагрузки сопровождается поднятием коры.
- Иллинойское оледенение** (Illinoian glaciation) – предпоследнее оледенение в Северной Америке. Предполагаемый аналог заальского оледенения в Европе.
- Инволюция** (involution) – сильно деформированная сложная структура, возникшая в результате нарушения слоистости отложений. Обычно служит показателем перигляциальных условий.

- Интрузивные породы** (intrusive rocks) – магматические породы, образовавшиеся при застывании магмы, внедрившейся в трещины и полости.
- Инфракембрийские ледниковые периоды** (Infra-cambrian ice ages) – ледниковые периоды, предшествовавшие вараангскому (зокембрийскому) ледниковому периоду. Различают два инфракембрийских ледниковых периода – гнейсёский (около 900 млн. лет назад) и стёртский (около 750 млн. лет назад).
- Ипсвичское межледниковье** (Ipswichian interglacial) – последнее межледниковье на Британских островах. Сопоставляется с эмским межледниковьем.
- Ископаемые остатки** (fossils) – любые остатки растений или животных, сохранившиеся в горной породе.
- Исследование, картографирование и прогнозирование климата в долгосрочном аспекте** (Climate Long Range Investigation Mapping and Prediction, CLIMAP) – научный проект.
- Кайнозойская эра** (Cenozoic) – эра «новой жизни», начавшаяся около 65 млн. лет назад. Включает третичный и четвертичный периоды.
- Каледонская орогения** (Caledonian orogeny) – цикл горообразования в силуре и начале девона.
- Кам** (kame) – крутосклонная гряда или холм у края тающего ледника, сложенные песчано-гравийным материалом. (Материал обычно плохо сортирован, отлагался талыми ледниковыми водами как в благоприятных, так и в затрудненных условиях стока. – *Перев.*)
- Каменноугольный период, карбон** (Carboniferous) – период палеозойской эры в интервале от 345 млн. до 280 млн. лет назад.
- Каменные многоугольники, сортированные полигоны** (stone polygons) – многоугольные образования на поверхности грунта со скоплениями обломочного материала по их границам. Обусловлены морозным выветриванием и близкими к нему процессами.
- Камовая терраса** (kame terrace) – терраса, сложенная песчано-гравийным материалом, который накапливался между бортом ледника и склоном долины.
- Канзасское оледенение** (Kansan glaciation) – одно из оледенений в Северной Америке, имевшее место после афтонского межледниковья и ранее ярмутского межледниковья.

- Кар, цирк (cirque, в Англии – corrie, в Уэльсе – cwm)** – кресловидное углубление в горах, выработанное небольшим ледником.
- Карбонатные породы (carbonates)** – осадочные породы, состоящие из карбонатных минералов: кальцита, доломита, арагонита и др.
- Катастрофизм (catastrophism)** – во многом дискредитировавшее себя учение, объяснявшее геологическую историю внезапными крупными катастрофами вроде библейского всемирного потопа.
- Кварцит (quartzite)** – осадочная или метаморфическая порода, в основном состоящая из зерен или кристаллов кварца.
- Кембрийский период (Cambrian)** – самый ранний период палеозойской эры, в интервале от 570 млн. до 500 млн. лет назад.
- Конвекция (convection)** – перенос тепла, обусловленный изменениями плотности жидкости.
- Конечная морена** – масса ледниковых отложений, накопленных у конца ледника (end moraine), особенно во время его наибольшей подвижки (terminal moraine).
- Консолидация (consolidation)** – преобразование мягкого рыхлого материала в твердую плотную породу.
- Континентальная кора (continental crust)** – кора, слагающая материки и преимущественно состоящая из гранитных пород.
- Кора (crust)** – верхняя оболочка Земли мощностью от 0,5 км под океанами до 60 км под горными системами материков.
- Кораллы (corals)** – твердые известковые отложения, состоящие из скелетов многочисленных мелких морских животных.
- Кордильера (cordillera)** – длинный горный хребет, сформировавшийся на краю материка по соседству с океаническим желобом.
- Косая слоистость (cross-bedding)** – внутреннее расположение слоев в стратифицированных породах, когда слои наклонены под острым углом к главным плоскостям напластования.
- Красноцветные отложения, красноцветы (red beds)** – окрашенные в красный цвет осадочные породы, сформировавшиеся в условиях сильного окисления, содержат гематит.
- Кратон (craton, kraton)** – древняя устойчивая часть земной коры (например, щит), которая практически не испытала воздействия тектонических движений в фанерозое.
- Криноиды (crinoids)** – морские беспозвоночные животные, принадлежащие к типу иглокожих со стеблем и телом, защищенными известковыми табличками.

- Криосфера (cryosphere)** – оболочка поверхности Земли, характеризующаяся наличием низких температур, снега и льда. (Вертикальный диапазон криосферы многими учеными понимается более широко – от верхних слоев земной коры до нижних слоев ионосферы. – *Перев.*).
- Кристалл (crystal)** – тело определенной геометрической формы, образованное химическим элементом, соединением или изоморфной смесью.
- Кристаллическая порода (crystalline rock)** – порода, образовавшаяся при охлаждении расплава и состоящая из кристаллов различных минералов. (К кристаллическим породам относятся также метаморфические породы. – *Перев.*).
- Лава (lava)** – огненно-жидкий расплав, изливающийся из глубинных зон Земли (во время вулканических извержений. – *Перев.*), затем остывающий и затвердевающий на земной поверхности.
- Лавразия (Laurasia)** – гигантский древний материк (суперконтинент) в Северном полушарии, объединявший Северную Америку, Гренландию и Европу.
- Лаврентийский ледниковый покров (Laurentide icesheet)** – ледниковый покров, распространявшийся в северных районах Северной Америки в кайнозое.
- Ламинарное течение (laminar flow)** – тип течения жидкости, при котором происходит лишь весьма незначительное турбулентное перемешивание.
- Ламинарное течение малоподвижного льда (sheet-flow)** – тип течения ледника, при котором сохраняется относительное постоянство скорости на обширной территории.
- Ледник (glacier)** – ледяное тело, питающееся главным образом за счет твердых осадков (снега) и движущееся вниз по склону под действием собственной тяжести.
- Ледниковая борозда (groove)** – глубокая вмятина на поверхности горной породы, обусловленная абрадирующим воздействием ледника.
- Ледниковая котловина (keettle-hole)** – впадина с крутыми склонами, обычно округлой котлообразной формы, приуроченная к району развития ледниковых или водно-ледниковых отложений. Образование таких впадин связано с таянием погребенных глыб мертвого льда.
- Ледниковая мельница (moulin)** – глубокий колодец на поверхности ледника, куда обрушиваются талые воды.
- Ледниковая теория (glacial theory)** – теория, приписывающая некоторые изменения земной поверхности работе ледников.

- Ледникового контакта текстуры** (ice-contact structures) – оползневые и другие текстуры, формирующиеся в осадках, которые накапливаются поблизости от тающего ледника.
- Ледниковое воздействие** (glacial stress) – воздействие на растительный и животный мир, оказываемое оледенением и связанными с ним резкими или быстрыми изменениями климата.
- Ледниковые отложения** (drift) – термин, используемый для обозначения всех материалов, отложенных ледником и тальми ледниковыми водами.
- Ледниковый стимул** (glacial stimulus) – ускорение развития (эволюции) под воздействием оледенения и сопряженных с ним изменений климата.
- Ледниковый паводок, йёкюдльхлёуп** (jökullhlaup, glacier outburst flood) – внезапное мощное поступление талых ледниковых вод вследствие прорыва подледникового озера или исключительно быстрого таяния льда.
- Ледниковый период** (ice age) – продолжительный период (обычно исчисляемый миллионами лет), во время которого ледниковые покровы неоднократно распространялись в высоких и умеренных широтах нашей планеты.
- Ледниковый покров** (icesheet) – огромный ледник сводообразной формы площадью более 50 000 км². Ложе из коренных пород может быть под тяжестью льда частично опущено ниже уровня моря.
- Ледовый разнос** (ice rafting) – перенос ледниковых отложений плавучими льдами – паковыми льдинами и айсбергами.
- Ледяная шапка** (ice cap) – крупный ледник в горах или на плато, мало зависящий от рельефа ложа.
- Ледяной клин** (ice wedge) – клин подземного льда, заполняющий вертикальную трещину на поверхности многолетнемерзлой породы.
- Ленточные осадки** (varves) – мелкозернистые слоистые осадки, сформировавшиеся большей частью в приледниковых озерах. Слоистость интерпретируется как результат годовых или сезонных ритмов осадконакопления.
- Лёсс** (loess) – тонкозернистый осадок, образовавшийся в результате ветрового переноса и отложения материала ледникового и водно-ледникового происхождения.
- Литоология** (lithology) – характеристика физических свойств осадочных пород. (Также наука об осадочных породах. – *Перев.*)
- Литостратиграфия** (lithostratigraphy) – стратиграфия, основанная на различных физических свойствах совокупности слоев горных пород.

- Литосфера (lithosphere)** – внешняя твердая оболочка Земли, преимущественно состоящая из пород неорганического происхождения.
- Магма (magma)** – расплавленный материал из глубинных зон Земли, из которого образовались все магматические породы.
- Магматическая порода (igneous rock)** – порода, образовавшаяся путем застывания расплавленной огненной массы – магмы, которая поступила из глубинных зон Земли.
- Магнитная эпоха (magnetic epoch)** – период времени, в течение которого магнитное поле Земли отличалось устойчиво нормальной (прямой) или устойчиво обратной полярностью.
- Малый ледниковый период (Little Ice Age)** – период прохладного климата и наступания ледников в Северном полушарии, продолжавшийся со средних веков до начала нынешнего столетия.
- Мантия (mantle)** – глубинная зона Земли, располагающаяся ниже земной коры и выше ядра. Большая часть мантии находится в твердом состоянии, но ее верхние слои – в расплавленном состоянии.
- Материк, континент (continent)** – крупный массив суши, резко поднимающийся над ложем океана.
- Международное десятилетие исследования океана (International Decade of Ocean Exploration, IDOE)** – международный научный проект.
- Межледниковье (interglacial)** – часть ледникового периода, во время которой на поверхности Земли оставалось относительно мало льда.
- Межстадиал (interstadial)** – интервал во время ледниковой стадии, когда климат улучшался и происходило кратковременное отступление льдов.
- Мезозойская эра (Mesozoic)** – эра «средней жизни» в интервале от 225 млн. до 65 млн. лет назад.
- Меловой период (Cretaceous)** – последний период мезозойской эры в интервале от 136 млн. до 65 млн. лет назад.
- Мертвый лед (dead ice)** – неподвижный лед (обычно у конца ледника), не получающий материал из области аккумуляции и не участвующий в движении ледника.
- Метаморфическая порода (metamorphic rock)** – порода, сильно измененная под воздействием температуры или давления.
- Метеорит (meteorite)** – твердое тело, упавшее на поверхность Земли из межпланетного пространства.

- Микстит (mixtite)** – осадочная порода, состоящая из смеси тонких частиц, гальки и более крупных обломков, с незначительными признаками сортировки и слоистости. Термин применяется в тех случаях, когда генезис породы точно не известен.
- Миланковича теория (Milankovich theory)** – теория о связи изменений климата с количеством солнечной радиации, получаемой на разных широтах, и с параметрами небесной механики.
- Миндельское оледенение (Mindel glaciation)** – третье оледенение в Альпах (по классической схеме).
- Минерал (mineral)** – твердое неорганическое вещество, характеризующееся только ему присущими физико-химическими свойствами.
- Миоцен (Miocene)** – одна из эпох третичного периода.
- Мировой океан (World ocean)** – совокупность океанов земного шара (основная часть гидросферы Земли. – *Перев.*). Подразделяется на отдельные океаны.
- Миссисипский период (Mississippian)** – употребляемый в Северной Америке эквивалент нижнего отдела каменноугольного периода.
- Многоклеточное животное (metazoan)** – животное, чье тело состоит из множества клеток.
- Морена (moraine)** – гряда или холм, сложенные ледниковыми отложениями, которые накапливались у края ледника или близ него.
- Морена вытаивания (meltout till)** – морена, сформированная путем разгрузки обломочного материала с поверхности ледника на его ложе во время таяния.
- Морена Де Геера (De Geer moraine)** – небольшая гряда моренного материала, сформировавшаяся у конца отступавшего ледника или в его непосредственной близости в глубоководной среде. Обычно встречаются серии таких гряд.
- Морена накопления (lodgement till)** – морена, послойно накапливающаяся на ложе ледника под воздействием активного льда, температура которого близка к точке плавления.
- Морозное вспучивание (frost heaving)** – нарушение или поднятие поверхности грунта при расширении мелких кристаллов льда.
- Морской лед (sea ice)** – лед, образовавшийся в результате замораживания поверхностных слоев морской воды.
- Морской ледниковый покров (marine or maritime icesheet)** – ледниковый покров, покоящийся на коренных породах, которые полностью или частично находятся ниже уровня моря; с этим связана крайняя неустойчивость ледникового покрова.

- Мутьевой поток, турбидитное течение** (turbidity current) – плотностное течение, обусловленное присутствием в воде взвешенного материала, обычно на крутых подводных склонах.
- Нагрузка (load)** – материал, определяющий изостатическое прогибание участка земной коры.
- Наклонение эклиптики** (obliquity of ecliptic) – угол наклона оси вращения Земли.
- Наледниковый** (supraglacial) – находящийся на поверхности ледника.
- Наносы (load)** – обломочный материал, переносимый рекой или другими агентами.
- Натечная морена (flow-till)** – морена, отложенная путем сползания обломочного материала на тающую ледяную поверхность.
- Наутилоиды (nautiloids)** – морские животные с внешними раковинами из арагонита, разделенными на камеры.
- Небраскское оледенение** (Nebraskan glaciation) – самое раннее плейстоценовое оледенение в Северной Америке.
- Неогляциал (Neoglacial)** – период наступания ледников во время голоценового межледниковья (после климатического оптимума. – *Перев.*).
- Несяк (bergstern)** – глыба плавающего льда, крупный обломок айсберга.
- Нивация (nivation)** – процесс эрозии под снежниками, ведущий к образованию углубления в коренных породах.
- Нисходящий ветер, кататабический ветер** (katabatic wind) – ветер с вертикальной составляющей, направленной вниз по склону, например по горной долине, по склону ледяной шапки или ледникового покрова.
- Нунатак (nunatak)** – холм или горная вершина, возвышающиеся над поверхностью ледника.
- Обратная связь (feedback)** – реакция системы на результаты ее действия в тех случаях, когда имеется причинно-следственная зависимость между двумя переменными.
- Огранный обломок** (faceted stone) – обломок с одной или несколькими уплощенными гранями, срезанными (сколотыми) движущимся ледником.
- Оз (esker)** – длинная извилистая гряда, сложенная песчаным и гравийно-галечным материалом. Обычно образуется потоками талых вод в подледниковых туннелях.
- Озерный (lacustrine)** – образованный в озере.
- Океаническая кора** (oceanic crust) – кора, слагающая ложе океанов и образующаяся у конструктивных краев плит вдоль срединно-океанических хребтов.

- Океанический бассейн** (ocean basin) – бассейн, ограниченный краями материков и состоящий из срединно-океанических хребтов, абиссальных равнин, глубоководных желобов и других элементов рельефа.
- Олигоцен** (Oligocene) – одна из эпох третичного периода.
- Ордовикский период** (Ordovician) – период в ранней части палеозойской эры в интервале между 500 млн. и 430 млн. лет назад.
- Орогенция** (orogeny) – цикл горообразования.
- Осадочная порода** (sedimentary rock) – горная порода, состоящая из органических или неорганических частиц, отложенных после их транспортировки агентами денудации.
- Основная морена** (ground moraine) – общий термин для обозначения обширного покрова морены с небольшими амплитудами высот. (Также моренная равнина.– *Перев.*).
- Остракоды** (ostracods) – мелкие ракообразные животные с двусторонними известковыми раковинами. Обитатели пресных и морских вод. Много родов сохранилось в современной фауне.
- Осыпь** (talus, scree) – груда обломков горных пород, продуктов морозного выветривания, у подножия крутого склона.
- Отёл** (calving) – отламывание айсбергов и небольших глыб льда от находящегося на плаву конца ледника.
- Отложение** (deposition) – аккумуляция или сгущение обломочных частиц, перенесенных природными агентами.
- Отложенная морена** (till) – осадки, отложенные непосредственно ледниковым льдом.
- Падение** (dip) – угол, образуемый пластом горной породы или другой поверхностью с горизонтальной плоскостью.
- Паковый лед** (pack ice) – плавающий лед, не причлененный к берегу. Обычно образует поля из сплоченных льдин.
- Палеогеография** (paleogeography) – наука о географии прошлого, включающая реконструкцию древних ландшафтов и конфигурации материков на основании разнообразных данных.
- Палеозойская эра** (Paleozoic) – эра «древней жизни» в интервале между 570 млн. и 225 млн. лет назад.
- Палеоклиматология** (palaeoclimatology) – наука о климатах прошлого.
- Палеонтология** (palaeontology) – наука об органическом мире прошлого, базирующаяся в основном на анализе ископаемых остатков растений и животных.
- Палеоцен** (Palaeocene) – самая древняя эпоха третичного периода, начавшаяся около 65 млн. лет назад.

- Палинология** (palynology) – наука о пыли и спорах растений.
- Пангея** (Pangaea) – крупнейший материк палеозойской эры, сформировавшийся путем объединения Гондваны, Лавразии и Ангарии.
- Парниковый эффект** (greenhouse effect) – свойство нижних слоев атмосферы пропускать коротковолновую солнечную радиацию и сильно поглощать длинноволновую радиацию. Это способствует поддержанию относительно высоких температур на земной поверхности.
- Перемещение земной коры** (crustal wandering) – общий термин для обозначения изменений конфигурации и широтного положения массивов суши на поверхности Земли в течение геологического времени.
- Перемещение материков.** – См. Дрейф материков.
- Перешеек** (isthmus) – узкая полоса, соединяющая два более крупных участка суши.
- Перигляциальный** (periglacial) – характеризующийся морозным раздроблением и другими процессами, присущими холодному климату с развитием вечной мерзлоты и без нее.
- Период** (period) – единица геологического времени, основное подразделение эр.
- Период полураспада радиоактивного изотопа** (half-life) – период, в течение которого первоначальное количество радиоактивного изотопа (например, ^{14}C) сократится наполовину за счет распада с образованием других изотопов.
- Пермский период** (Permian) – последний период палеозойской эры в интервале от 280 млн. до 225 млн. лет назад.
- Пермско-каменноугольный ледниковый период** (Permo-Carboniferous ice age) – ледниковый период в позднем палеозое, особенно проявившийся на территории Гондваны.
- Песчаник** (sandstone) – порода, преимущественно состоящая из зерен кварца.
- Петрология** (petrology) – наука о горных породах, включающая минералогию, петрографию и др.
- Пирокластическая порода** (pyroclastic rock) – магматическая порода, сформировавшаяся в результате мощных вулканических взрывов. Состоит из скоплений грубых угловатых обломков и пепла.
- Планктон** (plankton) – организмы, плавающие и пассивно переносимые водой. Различают фитопланктон (растительные организмы) и зоопланктон (животные организмы).

- Пласт (stratum)** – отдельный слой однородного материала, обычно осадочного происхождения.
- Пластическая деформация (plastic deformation)** – деформация ледникового льда в результате незначительных изменений формы кристаллов и упорядочения кристаллической структуры. Происходит особенно при температуре, близкой к точке плавления.
- Плато (plateau)** – возвышенность, поверхность которой отличается более или менее одинаковыми высотами.
- Плейстоцен (Pleistocene)** – первая эпоха четвертичного периода, в котором мы живем.
- Плиоцен (Pliocene)** – последняя эпоха третичного периода, завершившаяся около 2 млн. лет назад.
- Плоскость Галактики (Galactic plane)** – плоскость, в которой находятся спиральные ветви Галактики.
- Плоскость напластования (bedding-plane)** – поверхность, разделяющая слои осадочных пород.
- Плоскость сдвига (shear plane)** – плоская поверхность в леднике, вдоль которой происходит сдвиговое перемещение (или напользание) одной массы льда относительно другой.
- Поверхность несогласия (unconformity)** – контакт, по которому более молодые породы залегают на эродированной поверхности более древних пород.
- Подледниковый (subglacial)** – находящийся под ледником.
- Поднятие (uplift)** – повышение земной поверхности под влиянием тектонических движений, включая и изостатические.
- Ползучесть (creep)** – процесс, при котором кристаллы ледникового льда приобретают упорядоченную ориентировку, что способствует деформации или движению льда.
- Полосчатость (foliation)** – плоскопараллельная, или слоистая, структура, возникшая в горной породе или ледниковом льде (в результате пластических напряжений сдвига. – *Перев.*).
- Полярная пустыня (polar desert)** – территория в высоких широтах, где недостаток влаги и чрезмерный холод препятствуют существованию растений и животных.
- Превышение (relief)** – разность высот между самой высокой и самой низкой точками в данном районе.
- Предледниковая зона изостатического поднятия (forebulge)** – зона поднятия земной коры перед краем ледникового покрова. Это поднятие компенсирует изостатическое погружение области, покрытой льдом.
- Прецессия, или предва** – медленное смещение оси вращения Земли в

- рение, равноденствий** (precession of equinoxes) – пространстве, приводящее, в частности, к постепенному изменению момента наибольшего приближения Земли к Солнцу.
- Приливно-отливное течение** (tidal current) – морское течение, связанное с вертикальным поднятием и опусканием уровня воды при приливах и отливах.
- Протерозой** (Proterozoic) – подразделение геологической истории, предшествовавшее фанерозою. Иногда термин используется как синоним докембрия.
- Проход, разводье** (lead) – длинная узкая полоса океанической воды между двумя полями пакового льда или между отдельными льдинами.
- Пульсационная теория** (surge theory) – теория, объясняющая возникновение ледниковых периодов или оледенений за счет периодически повторяющихся гигантских подвижек (пульсаций) ледниковых покровов.
- Пульсация ледника, ледниковый сёрдж** (surge) – необычайно быстрая подвижка ледника или его части, иногда в результате интенсивного донного таяния.
- Пусковой механизм** (trigger mechanism) – механизм, вызывающий систему процессов, которые способствуют установлению ледникового периода или оледенения.
- Пустыня** (desert) – область низкой увлажненности поверхности, неблагоприятная для существования растений и животных.
- Равнинмент, размыв** (ravinement) – образование глубоких ущелий или ложбин в коренных породах под воздействием льда и потоков талых вод.
- Радиальное растекание льда** (radial flow) – сток льда во все стороны из одного центра – ледяной шапки или центра ледникового покрова.
- Радияция** (radiation) – увеличение со временем разнообразия и численности популяций, а также расширение области распространения (ареала) организмов.
- Радиоизотопный возраст** (radiometric age) – возраст горных пород или ископаемых органических материалов, вычисленный на основе измерения содержания в них радиоактивных изотопов и продуктов их распада.
- Радиолокационное зондирование ледников** (radio-echo sounding) – получение информации о толщине льда путем оценки проницаемости и скорости распространения радиоволн.
- Радиоуглеродное датирование** (radiocarbon dating) – определение абсолютного возраста на основе измерения концентрации радиоактивного изотопа углерода ^{14}C в ископаемых органических материалах.
- Разветвляющееся русло** – русло, распадающееся на множество разъеди-

- (braided stream) — ньющихся и ветвящихся проток. Обычно несет большое количество обломочного материала от конца ледника.
- Разлом (fault)** — разрывное нарушение в земной коре, сопровождающееся относительным перемещением масс горных пород.
- Раковины (tests)** — твердые или жесткие покровные структуры мелких морских организмов, например фораминифер.
- Расселина (crevasse)** — глубокая трещина на поверхности ледника, результат напряжений, возникающих при движении льда.
- Регрессия (regression)** — общее понижение уровня моря по отношению к суше.
- Рисское оледенение (Riss glaciation)** — предпоследнее оледенение в Альпах (по классической схеме).
- Ритмиты (rhythmites)** — осадки с признаками ритмической, или повторяющейся, последовательности накопления.
- Рифленая морена, флютинг-морена (fluted moraine)** — система длинных взаимно параллельных моренных гряд и ложбин, ориентированных по направлению движения ледника.
- Руген-морена (Rogen moraine)** — удлиненная моренная гряда, ориентированная вкрест направлению движения ледника, вероятно образовавшаяся под ледником.
- Сангамонское межледниковье (Sangamon interglacial)** — последнее межледниковье плейстоцена Северной Америки.
- Северотихоокеанский эксперимент (North Pacific experiment, NORPAX)** — научный проект.
- Сель (mudflow)** — массовое движение грязекаменного материала по склону, часто с очень большой скоростью.
- Серак (sérac)** — обособленная вертикально вытянутая глыба ледникового льда, ограниченная взаимно пересекающимися трещинами, например, в ледопаде.
- Серповидные выемки (crescentic gouges)** — серповидные желобки или вмятины округлой формы, образовавшиеся при движении льда по поверхности коренных пород.
- Силурийский период (Silurian)** — один из периодов ранней части палеозойской эры в интервале от 430 млн. до 395 млн. лет назад.
- Синклиналь (syncline)** — желоб или вогнутая складка, образованные слоями горных пород обычно за счет бокового сжатия.

- Система (system)** – последовательность слоев, отложившихся в течение одного геологического периода.
- Скальный останец (tor)** – глыба скальной породы, выделяющаяся на сглаженном склоне или вершине холма.
- Складка (fold)** – искривление или изгиб пластов горных пород, обусловленные сжатием земной коры.
- Снеговая линия (snow-line)** – линия, отделяющая область, в которой летом снег стаивает, от более возвышенной области, где снег может сохраняться круглый год.
- «Снежной лавины» теория (snowblitz)** – теория, объясняющая возникновение оледенения за счет обильных снегопадов в умеренных широтах с последующим эффектом обратной связи.
- Солифлюкция (solifluction)** – медленное движение насыщенных водой почвенных масс или обломков пород вниз по склону.
- Солнечная постоянная (solar constant)** – среднее количество радиации, поступающей на плоскую поверхность, расположенную под прямым углом к направлению солнечных лучей.
- Спелеотем (speleothem)** – осадок карбоната кальция, обычно в известняковых пещерах.
- Спрединг, раздвижение океанического дна (seafloor spreading)** – расширение океанов за счет появления новых участков дна вдоль срединно-океанических хребтов. Плиты по обеим сторонам хребтов постоянно расходятся в стороны от гребня.
- Срединная морена (medial moraine)** – гряда или чехол морены в леднике, вытянутые по направлению движения льда. (Обычно срединная морена располагается в области абляции на поверхности ледника параллельно его берегам. – *Перев.*)
- Срединно-океанический хребет (mid-oceanic ridge)** – вытянутое подводное поднятие, маркирующее положение конструктивного края плиты.
- Стадиал (stadial)** – интервал наступания ледника во время оледенения.
- Стадия (stage)** – один из основных хронологических интервалов (подразделений) ледниковой эпохи, например оледенения, межледниковья.
- Стёртский ледниковый период (Sturtian ice age)** – один из докембрийских ледниковых периодов. Назван по тиллитам Стёрт в Австралии. Возраст около 750 млн. лет назад.
- Стратиграфия (stratigraphy)** – описание и классификация слоев горных пород и их взаимная корреляция.

- Строматолиты** (stromatolites) – горные породы, состоящие из тонких известковых слоев и приуроченные большей частью к докембрийским толщам. Вероятно, сформировались из остатков примитивных морских водорослей.
- Струйное течение** (streamflow) – движение относительно узкого потока льда, более быстрое по сравнению с окружающим менее подвижным льдом.
- Структурный грунт** (patterned ground) – грунт с полигонами, кольцами, полосами и другими проявлениями вечной мерзлоты.
- Субдукция** (subduction) – погружение края одной плиты при столкновении двух плит. Материал коры поглощается в зоне субдукции, а место столкновения часто маркируется глубоководным желобом.
- Суперконтинент** (supercontinent) – огромный массив суши, образовавшийся при объединении (слиянии) различных материков.
- Сухопутный мост** (land bridge) – территория морского дна, находившаяся в субазральных условиях во время понижения уровня моря, что способствовало миграции растений и животных с одного материка на другой.
- Тайга** (taiga) – леса умеренного пояса Северного полушария, состоящие из хвойных пород. Протягиваются широким поясом в Евразии и Северной Америке.
- Талая вода** (meltwater) – вода, образовавшаяся при таянии снега и ледникового льда.
- Талчирское оледенение** (Talchir glaciation) – обозначение пермско-каменноугольного оледенения в Индии.
- Таяние льда, обусловленное давлением** (pressure melting) – донное таяние льда (у ложа ледника) как результат давления даже при температуре несколько ниже 0°C.
- Тектоника плит** (plate tectonics) – деформация коры Земли за счет перемещения плит на земной поверхности. Наибольшая геодинамическая активность возникает при столкновении краев плит.
- Тектонический** (tectonic) – относящийся к движению и деформации земной коры.
- Теплый лед** (warm ice) – лед, температура которого близка к точке плавления; его присутствие способствует образованию талых вод.
- Термокарст** (thermokarst) – западинный рельеф, образовавшийся в результате вытаивания масс подземного льда в области вечной мерзлоты.
- Терраса** (terrace) – плоская или пологонаклонная поверхность, маркирующая прежнее положение уровня моря или уреза реки. (Различают эрозионные и

- аккумулятивные террасы. Обычно под террасами понимают ступеневидные формы рельефа на склонах долин, берегах морей и озер. — *Перев.*)
- Тетис (Tethys)** — возникшая в позднем палеозое часть Мирового океана, ограниченная с севера и северо-запада Лавразией, а с юга и юга-запада — Гондваной.
- Тиллит (tillite)** — прочные породы, сформировавшиеся за счет уплотнения морены в течение длительного времени.
- Торфяной бугор (palsa, frost mound)** — бугор из торфа и других отложений, сформировавшийся в результате разрастания небольших линз погребенного льда.
- Трансгрессия (transgression)** — общее повышение уровня моря по отношению к суше.
- Третичный период (Tertiary)** — первый период кайнозойской эры в интервале от 65 млн. до 2 млн. лет назад. (Подразделяется на два самостоятельных периода — палеогеновый и неогеновый. — *Перев.*)
- Трещина (joint)** — поверхность разрыва или расчленения горной породы, секущая поверхности напластования или другие текстуры.
- Триасовый период (Triassic)** — первый период мезозойской эры в интервале от 225 млн. до 190 млн. лет назад.
- Трилобит (trilobite)** — вымершее морское животное с телом удлиненной и уплощенной формы, подразделявшимся на три сегмента. Трилобиты имеют очень важное значение для стратиграфической корреляции нижнепалеозойских осадочных пород.
- Тундра (tundra)** — тип растительности из мхов, лишайников, осок и кустарничков, развитый в высоких широтах.
- Турбидит (turbidite)** — осадок, отложенный мутьевым потоком на дне моря.
- Тяжелый кислород (heavy oxygen)** — кислород с повышенным содержанием стабильного изотопа ^{18}O .
- Убежища, рефугиумы (refugia)** — территории, не подвергавшиеся оледенению, где, как полагают, растения и животные пережили интервалы широкого распространения ледникового покрова.
- Угленосные отложения (Coal Measures)** — позднекаменноугольные отложения, включающие многочисленные прослои угля.
- Уголь (coal)** — порода, образовавшаяся в результате длительного уплотнения и отвердевания торфа и других растительных остатков.

- Униформизм** (uniformitarianism) – учение, объясняющее все геологические изменения как результат проявления процессов, наблюдаемых в настоящее время. (В понимании Лайелля эти процессы могли иметь самую разную скорость, включая и небольшие местные катастрофы. – *Перев.*)
- Уровень грунтовых вод** (water table) – водное зеркало, ниже которого все межпоровое пространство заполнено водой.
- Фанерозой** (Phanerozoic) – отрезок геологического времени начиная с кембрийского периода. Охватывает палеозойскую, мезозойскую и кайнозойскую эры.
- Фауна** (fauna) – животный мир. Иногда термин используется для обозначения совокупности видов животных.
- Фация** (facies) – литостратиграфическое подразделение или группа таких подразделений со специфическими особенностями, отражающими общность условий среды (осадконакопления. – *Перев.*)
- Фирн** (firn, névé) – замерзшая вода, кристаллическое состояние которой переходное от снега к ледниковому льду. Обычно на поверхности ледника фирн погребен под свежевывавшим слоем снега.
- Фландрское межледниковье** (Flandrian interglacial). – См. Голоценовое межледниковье.
- Флора** (flora) – растительный мир. Нередко термин используется для обозначения совокупности видов растений.
- Фораминиферы** (foraminifera) – мелкие морские животные со студнеобразным телом, защищенным известковой раковиной.
- Формация** (formation) – основная единица при расчленении толщ горных пород. Обычно имеет определенное литостратиграфическое значение (rock formation).
- Фьорд, фиорд** (fjord, fiord) – глубокая троговая долина, выработанная выводным ледником и в настоящее время частично затопленная морем.
- Ходы трилобитов** (Cruriana) – следы, оставленные трилобитами в древних морских осадках.
- Хокснское межледниковье** (Hoxnian interglacial) – предпоследнее межледниковье на Британских островах, предположительно сопоставляемое с гольштейнским межледниковьем в Северо-Западной Европе.
- Холмисто-озерный рельеф** (knock and lochan topography) – рельеф, выработанный в коренных породах в результате экзарации. Чередование котловин, нередко занятых небольшими озерами, и останцовых холмов.

- Холодный лед (cold ice)** – ледниковый лед, находящийся при температуре гораздо ниже точки плавления.
- Хроностратиграфия (chronostratigraphy)** – стратиграфия, опирающаяся на абсолютные или радиоизотопные датировки последовательно залегающих пород.
- Циклотема (cyclothem)** – повторяющаяся серия пластов осадочных пород, как, например, в карбоновых угленосных отложениях.
- Четвертичный период (Quaternary)** – самый молодой и незавершившийся период кайнозойской эры.
- Шельф (continental shelf)** – окраина материка, затопленная морем. Обычно характеризуется небольшими глубинами.
- Шельфовый ледник (ice shelf)** – крупный ледник, находящийся на плаву и образовавшийся в заливе. Питается преимущественно за счет твердых осадков (снега), выпадающих на его плоскую поверхность.
- Штриховка (striae)** – царапины, оставленные при абрадирующем воздействии движущегося ледника.
- Щебнистые склоновые отложения (head)** – мощный слой продуктов морозного выветривания – обломков пород и других материалов на склоне, сложенном коренными породами.
- Щит (shield)** – крупная жесткая область материка, сложенная преимущественно докембрийскими породами. См. также Кратон.
- Эвапорит (evaporite)** – осадочная порода, образовавшаяся в результате испарения путем выпадения минералов из насыщенного раствора.
- Эволюция (evolution)** – постепенное изменение организмов во времени, ведущее к появлению новых видов.
- Эвстазия (eustasy)** – перемещение уровня Мирового океана, вызванное изменением абсолютного количества морской воды.
- Экологическая ниша (ecological niche)** – среда со всеми ее специфическими характеристиками, подходящая для существования данного сообщества растений или животных. (Совокупность условий жизни экосистем. – *Перев.*)
- Экструзивный вулканизм (extrusive volcanic activity)** – вулканические извержения, при которых такие продукты, как лава и пепел, выносятся на земную поверхность.
- Эксцентриситет орбиты (eccentricity of orbit)** – мера приближения орбиты Земли к кругу.
- Эмское межледниковье (Eemian)** – последнее межледниковье в Северо-Западной Европе (если не считать внутривюрмского и голоценового межледниковий. – *Перев.*). Название произошло от реки Эм в Нидерландах.

- Эозойская группа** (Eozoic) – термин для обозначения одной из эр докембрийского времени (устаревшее обозначение протерозоя или только его нижней части. – *Перев.*)
- Эокембрийский ледниковый период** (Eosambrian ice age). – См. Варангский ледниковый период.
- Эоловый** (aeolian) – имеющий отношение к действию ветра.
- Эон** (eon) – самая продолжительная единица геологического времени, объединяет несколько эр.
- Эоцен** (Eocene) – одна из эпох третичного периода между палеоценом и олигоценом.
- Эпоха** (epoch) – единица геологического времени, более короткая, чем период (например, плейстоцен). Несколько эпох объединяются в период.
- Эра** (era) – единица геологического времени, объединяющая несколько периодов.
- Эрозия** (erosion) – процесс разрушения пород на поверхности Земли и сноса обломочного материала под влиянием таких факторов, как реки или ледники. (Для обозначения ледниковой эрозии обычно используется термин «экзарация». – *Перев.*)
- Эрратические валуны** (erratics) – валуны или крупные обломки, перенесенные ледником из мест их первоначального залегания и отложенные в районах распространения пород иных типов.
- Юрский период** (Jurassic) – средний период мезозойской эры в интервале от 190 млн. до 136 млн. лет назад. Время обитания динозавров.
- Ядро** (core) – центральная оболочка Земли, находящаяся отчасти в твердом и отчасти в расплавленном состоянии.
- Ярмутское межледниковье** (Yarmouth interglacial) – межледниковье между иллинойским и канзасским оледенениями в Северной Америке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Перечисленные в этом списке книги, статьи и буклеты большей частью неспециальные. Они сгруппированы по главам и рекомендуются для дальнейшего чтения тем, кто захочет более детально ознакомиться с каким-либо конкретным вопросом. В большинстве из этих книг содержатся подробные библиографические списки.

Глава 1. Планета Земля и холодные интервалы ее истории

- Calder N.* Restless Earth, BBC, London, 152 pp., 1972.
Cousteau J. The White Caps, Angus and Robertson, Brighton, 144 pp., 1973.
Dyson J. L. The World of Ice, Cresset Press, London, 292 pp., 1963.
Eicher D. Geologic Time, Prentice-Hall, N.J., 150 pp., 1968.
Fuchs V. (ed.) Forces of Nature, Thames and Hudson, London, 303 pp., 1977.
Hallam A. (ed.) Planet Earth, Elsevier-Phaidon, Oxford, 320 pp., 1977.
John B. S. The Ice Age, Collins, London, 254 pp., 1977.
John B. S. The World of Ice, Orbis, London, 120 pp., 1979.
Kurtén B. The Ice Age, Rupert Hart-Davis, London, 179 pp., 1972.
Post A., La Chapelle E. R. Glacier Ice, Univ. of Washington Press, 110 pp., 1971.
Seyfert C. K., Sirkin L. A. Earth History and Plate Tectonics, Harper and Row, N.Y., 504 pp., 1973.
Tarling D. H., Tarling M. P. Continental Drift, G. Bell, London, 112 pp., 1971.
Wright A. E., Moseley F. (eds.) Ice Ages: ancient and modern, Seel House Press, Liverpool, 320 pp., 1975.

Глава 2. Ледниковые периоды: поиск причин их установления

- Beaty C. B.* "The causes of glaciation", American Scientist 66, pp. 452–459, 1978.
Brooks C. E. P. Climate through the Ages, Benn, London, 395 pp., 1949.
Calder N. The Weather Machine and the Threat of Ice, BBC, London, 143 pp., 1974.
Fairbridge R. W. (ed.) The Encyclopaedia of Atmospheric Sciences and Astrogeology, Reinhold, N.Y., 1, 200 pp., 1967.
Goudie A. S. Environmental Change, O.U.P., Oxford, 244 pp., 1979.
Gribbin J. (ed.) Climatic Change, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 280 pp., 1978.
Ladurie E. Le Roy. Times of feast, times of famine, Doubleday, N.Y., 428 pp., 1971.
Lamb H. H. The Changing Climate, Methuen, London, 236 pp., 1966.
Lockwood J. G. Causes of Climate, Edward Arnold, London, 288 pp., 1979.
Nairn A. E. M. (ed.) Descriptive palaeoclimatology, Interscience, N.Y., 380 pp., 1961.
Schwartzbach M. Climates of the Past, van Nostrand, N.Y., 328 pp., 1963.

Глава 3. Ледники и их окружение

- Andrews J. T.* Glacial Systems, Duxbury Press, Mass., 191 pp., 1975.
Armstrong T., Roberts B., Swithinbank C., Illustrated glossary of snow and ice, S. P.-R. I., Cambridge, 60 pp., 1966.

- Baird P. The Polar World, Longmans, London, 328 pp., 1964.
- Bird J. B. The Physiography of Arctic Canada, Johns Hopkins Press, Baltimore, 336 pp., 1967.
- Coates D. R. (ed.). Glacial geomorphology, State Univ. of N.Y., 398 pp., 1974.
- Embleton C., King C. A. M. Glacial geomorphology, Edward Arnold, London, 573 pp., 1975.
- Embleton C., King C. A. M. Periglacial geomorphology, Edward Arnold, London, 203 pp., 1975.
- Evans J. G. An introduction to environmental archaeology, Elek, London, 168 pp., 1978.
- Fairbridge R. W. (ed.). Encyclopaedia of geomorphology, Reinhold, N.Y., 1,295 pp., 1968.
- Flint R. F. Glacial and Quaternary Geology, Wiley, N.Y., 892 pp., 1971.
- Goldthwait R. P. (ed.). Till, a symposium, Ohio State Univ., 402 pp., 1971.
- Goldthwait R. P. (ed.). Glacial Deposits, Dowden, Hutchinson and Ross, Pennsylvania, 464 pp., 1975.
- Hamelin L. E., Cook F. A. Illustrated glossary of periglacial phenomena, Université Laval, Quebec, 237 pp., 1967.
- Hatherton T. (ed.). Antarctica, Methuen, London, 511 pp., 1965.
- Ives J. D., Barry R. G. (eds.). Arctic and Alpine Environments, Methuen, London, 1,024 pp., 1974.
- John B. S., Sugden D. E. Coastal geomorphology of high latitudes, Progress in Geography 7, Edward Arnold, London, pp. 53–132, 1975.
- King H. G. R. The Antarctic, Blandford, London, 276 pp., 1969.
- Sharp R. P. Glaciers, Univ. of Oregon Press, 78 pp., 1960.
- Sugden D. E., John B. S. Glaciers and Landscape: a geomorphological approach, Edward Arnold, London, 376 pp., 1976.
- Thorén R. Picture Atlas of the Arctic, Elsevier, Amsterdam, 449 pp., 1969.
- Washburn A. L. Periglacial processes and environments, Edward Arnold, London, 320 pp., 1973.

Глава 4. Древнейшие ледниковые периоды (в докембрии)

- Glen W. Continental Drift and Plate Tectonics, Charles E. Merrill, Columbus, 188 pp., 1975.
- Harland W. B. Evidence of late Precambrian glaciation and its significance, in: Narin A. E. M. (ed.). Problems in Palaeoclimatology, Interscience, N. Y., pp. 119–149, 1964.
- Jopling A. V., McDonald B. C. (eds). Glaciofluvial and glaciolacustrine sedimentation, Soc. Econ. Paleont. and Mineral., Tulsa, Oklahoma, 220 pp., 1975.
- Salop L. J. Precambrian of the northern hemisphere and general features of early geological evolution, Elsevier, Amsterdam, 378 pp., 1977.
- Schermerhorn L. J. Late Precambrian mixites: glacial and/or nonglacial, Amer. Journ. Science 274, pp. 673–824, 1974.
- Spencer A. M. Late Precambrian glaciation in Scotland, Geol. Soc., London, Memoir 6, 98 pp., 1971.
- Uyeda S. The new view of the Earth: moving continents and moving oceans, Freeman, San Francisco, 217 pp., 1978.
- Windley B. F. The evolving continents, John Wiley, London, 385 pp., 1977.
- Young G. M. An extensive early Proterozoic glaciation in North America, Palaeogeog., Palaeoclimatol., Palaeoecol. 7, pp. 85–101, 1970.

Глава 5. Следы оледенения в пустыне: ордовик

- Allen P. Ordovician glacials of the central Sahara, in: Wright, A. E., Moseley F. (eds.). Ice Ages: ancient and modern, Seel House Press, Liverpool, pp. 275–286, 1975.

- Beuf S., Biju-Duval B., Charpai O. de, Rognon P., Gariel O., Bennacef A., Les grès du Paléozoïque inférieur au Sahara, *Inst. Franç. Pétrol.*, 464 pp., 1971
- Fairbridge R. W. Glacial grooves and periglacial features in the Saharan Ordovician, in: Goates D. R. (ed.). *Glacial Geomorphology*, State Univ., New York, pp. 317–327, 1974.
- Harland W. B. The Ordovician ice age, *Geol. Mag.* 109, pp. 451–456, 1972.
- Spjeldnaes N. Ordovician climatic zones, *Norsk. geol. Tidsskr.* 41, pp. 45–77, 1961.
- Williams G. E. Late Precambrian glacial climate and the earth's obliquity, *Geol. Mag.* 112, pp. 441–465, 1975.

Глава 6. Великий пермско-каменноугольный ледниковый период

- Adie R. J. Permo-Carboniferous glaciation of the Southern Hemisphere, in: Wright A. E., Moseley F. (eds.). *Ice Ages: ancient and modern*, Seel House Press, Liverpool, pp. 275–286, 1975.
- Crowell J. C., Frakes L. A. Phanerozoic glaciation and the causes of ice ages, *Amer. Journ. Science* 268, pp. 193–224, 1970.
- Crowell J. C., Frakes L. A. The Late Palaeozoic glaciation, in: Campbell K. S. W. (ed.). *Gondwana geology*, ANU, Canberra, pp. 313–331, 1975.
- Girdler R. W. The palaeomagnetic latitudes of possible ancient glaciations, in: Nairn A. E. M. (ed.). *Problems in Palaeoclimatology*, Interscience, N. Y. pp. 155–178, 1964.
- Hallam A. (ed.). *Atlas of palaeobiogeography*, Elsevier, Amsterdam, 1973.
- Harland W. B., Herod K. N. Glaciations through time, in: Wright A. E., Moseley F. (eds.). *Ice Ages: ancient and modern*, Seel House Press, Liverpool, pp. 275–286, 1975.
- Plumstead E. P. The enigmatic *Glossopteris* flora and uniformitarianism, in: Tarling D. H., Tuncorn S. K. (eds.). *Implications of Continental Drift to the Earth Sciences*, Vol. 1, Academic Press, London, pp. 413–424, 1973.
- Tarling D. H. The geological-geophysical framework of ice ages, in: Gribbin J. (ed.). *Climatic Change*, Cambridge Univ. Press, pp. 3–24, 1978.
- Theron J. N., Blignault H. J. A model for the sedimentation of the Dwyka glacials in the southwestern Cape, in: Campbell K. S. W. (ed.). *Gondwana geology*, ANU, Canberra, pp. 347–356, 1975.

Глава 7. Современный ледниковый период: кайнозойский

- Andrews J. T. The Wisconsin Laurentide ice sheet; dispersed centres, problems of rates of retreat, and climatic implications, *Arctic and Alpine Res.*, 5, pp. 185–199, 1973.
- Bowen D. Q. *Quaternary Geology*, Pergamon, Oxford, 221 pp., 1978.
- Bishop W. W., Miller J. A. *Calibration of Hominid Evolution*, Edinburgh, 1972.
- Day M. H. *Fossil Man*, Hamlyn, London, 159 pp., 1969.
- Fairbridge R. W. Climatology of a glacial cycle, *Quaternary Res.*, 2, pp. 283–320, 1972.
- Flint R. F. *Glacial and Quaternary Geology*, Wiley, New York, 892 pp., 1971.
- French H. M. *The Periglacial Environment*, Longman, London, 309 pp., 1976.
- Howell F. C. *Early Man, Time-Life*, N. Y., 200 pp., 1971.
- Kurtén B. *Pleistocene Mammals of Europe*, Aldine, Chicago, 317 pp., 1968.
- Ives J. D., Barry R. G. (eds.). *Arctic and Alpine Environments*, Methuen, London, 1,024 pp., 1974.
- Mahaney E. C. (ed.). *Quaternary Stratigraphy of North America*, Strondsberg, Penn., 1976.
- McIntyre A., Kipp N. G. et al. Glacial North Atlantic 18,000 years ago: a CLIMAP reconstruction. *Geol. Soc. Amer. Mem.* 143, pp. 43–76, 1976.
- Rankama K. (ed.). *The Quaternary* (Vol. 1), Interscience, N. Y., 300 pp., 1965.
- Shotton F. W. (ed.). *British Quaternary Studies*, Clarendon Press, Oxford, 298 pp., 1977.

- Sparks B.W., West R.G. The Ice Age in Britain, Methuen, London, 302 pp., 1972.
- Sugden D.E. Reconstruction of the morphology, dynamics and thermal characteristics of the Laurentide ice sheet at its maximum, Arctic and Alpine Res. 9, pp. 21–47, 1977.
- Turekian K.K. (ed.) Late Cenozoic glacial ages, Yale Univ. Press, 606 pp., 1971.
- West R.G. Pleistocene geology and biology, Longman, London, 377 pp., 1968.
- Wright H.E., Frey D.G. (eds.). The Quaternary of the United States, Princeton Univ. Press, 933 pp., 1965.

Глава 8. Ритм, причина и прогноз

- Bryson R.A., Murray T.J. Climates of Hunger, Univ. of Wisconsin Press, USA, 171 pp., 1977.
- Budyko M.I. Climate and Life, Academic Press, N.Y., 508 pp., 1974.
- Calder N. The weather machine and the threat of ice, BBC, London, 143 pp., 1974.
- Claiborne R. Climate, Man and History, Angus and Robertson, London, 444 pp., 1973.
- Coleman A.P. Ice Ages, recent and ancient, Macmillan, London, 296 pp., 1926.
- Fairbridge R.W. (ed.). Encyclopaedia of Atmospheric Sciences and Astrogeology, van Nostrand, Reinhold, N.Y., 1,200 pp., 1967.
- Fritts H.C. Tree Rings and Climate, Academic Press, London, 567 pp., 1976.
- Gribbin J. Forecasts, famines and freezes, Wildwood House, London, 132 pp., 1976.
- Gribbin J. The Climatic Threat, Fontana, London, 206 pp., 1978.
- Gribbin J. Astronomical influences, in: Gribbin J. (ed.). Climatic Change, Cambridge Univ. Press, pp. 133–154, 1978.
- Gribbin J., Lamb H.H. Climatic change in historical times, in: Gribbin J. (ed.). Climatic Changes, Cambridge Univ. Press, pp. 68–82, 1968.
- Gribbin J., Plagemann S.H. The Jupiter Effect, Macmillan, London, 1974.
- Lamb H.H. Climate: present, past and future, Vol. 1, Methuen, London, 648 pp., 1972.
- Lamb H.H. Climate: present, past and future, Vol. 2, Methuen, London, 576 pp., 1977.
- Matthews S.W. What's happening to our climate? Nat. Geog. Mag. 150 (5), p. 576, 1976.
- NAS. Understanding Climatic Change, Washington, 239 pp., 1975.
- Singer S.F. The Changing Global Environment, D. Reidel, Dordrecht., 1975.
- Schneider S.H. (with L.E. Mesirov). The genesis strategy: climate and global survival, Plenum, N.Y., 419 pp., 1976.
- Velikovskiy I. Earth in Upheaval, Abacus, London, 263 pp., 1973.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Абиссальная равнина, определение 28
Австралопитек 277
Айсберги 101
— столовые 123
Активные края плит 26
Альпийская область 132
Ангрия 31, 32, 197
Антарктический ледниковый покров 13, 19, 61, 64, 66–68, 73, 121, 126, 221, 239, 260, 285
Антарктический шельфовый ледник 67, 69
Антропоген 275
Армориканская орогения 200
Архей 135–138
Атмосфера 19
- Баланс массы ледника 78, 80
Бараньи лбы 87, 104
Баренцево-море-мост ледниковый покров 258
Берингийский сухопутный мост 279
Берингия 271, 278, 279
Биберское оледенение 240
Биосфера 19
Брунес, магнитная эпоха 226, 227, 239, 241, 242
«Бульдозерный эффект» 103
- Вaalское межледниковье 274
Валунная мостовая 95
Валунные глины 99, 174
Варангский ледниковый период 19, 31, 174, 284
Виллафранкская фауна 274
Висконсинское оледенение 240, 241
Возраст Земли 20
Выпахивание 87
Вюрмское оледенение 43, 240, 241
- Галактический период 288
Гауганда, формация 145, 146, 157
Геосинклиналь, определение 28
Герцинская орогения 200
Гидролаколит 118
Гидросфера 19
Гипотеза глобального оледенения в позднем протерозое 162, 163
— перемещения материков Вегенера 29
Глоссоптериевая флора Гондваны 35, 198, 217
Гляциологический механизм для объяснения смен оледенений и межледниковий 68
Гнейсский ледниковый период 31, 284
Голоцен – последний крупный интервал геологической истории 259
Гольштейнское межледниковье 278
Гондвана 31, 32, 165, 197, 200, 213
Гондванский ледниковый покров 209, 214
Граница питания 78
Гран-Пиль, разрез 248
Гренландский ледниковый покров 13, 62, 64, 73, 221, 235, 238, 249, 260, 285
Грикватаун, тиллиты 147
Гряды выдавливания 124
Гуронское оледенение 31, 145
Гюнцское оледенение 43, 240
- Дальредская толща 150
Двейка, тиллиты 95, 204, 205, 210
Двейкское оледенение 205, 206
Де Геера морены 107
Деструктивные края плит 26
Диамиктиты 173, 189
Докембрийский зон 20, 135
Доломититы 159
Дропстоны 117, 146, 157
Друмлины 105
Дунайское оледенение 240

Европейская плита 200

Железистые кварциты 144, 159, 161

Зандры (водно-ледниковые долины) 114

Западинный, или кратерный, рельеф 118

Западно-Антарктический ледниковый покров 70, 204, 246, 258

Западно-Африканский щит 171

Зеленокаменные породы 137

Земная кора, типы 24

Изменение направления магнитного поля Земли 50

Изостазия 126

Иллинойское оледенение 240

Инволюции 119

Индекс активности ледников 91

Иннуитский ледниковый покров 123

Ипсвичские межледниковые отложения 243

Исполиновые котлы 169

Итараре, слои 202

Йёкюдльхлёуп (катастрофический ледниковый паводок) 111, 182

Кайнозойский ледниковый период 285

Калий-аргоновый (K-Ar) метод датирования вулканических пород 226

Каменные кольца 119

– мостовые 87

– полигоны 119

– полосы 119

Камовые террасы 113

Камы 113

Канадский щит 146

Канзасское оледенение 240

Канканири, формация 189

Карру, система 205

Кары, или цирки 80, 87

«Китовые спины» (сглаженные удлиненные гряды) 120

Климат Земли, причины изменения 44–63

Кловис, культура 279

Комплексы форм рельефа 266

Континентальная кора 24, 26

Концепция «климатического детерминизма» 280

– ледниковых периодов 41

Кордильерский ледниковый покров 249, 259

– складчатый пояс 152

Красноцветные породы, определение 139

Криосфера 19

Кромерское межледниковье 274

Лавразия 31, 32, 197, 200

Лаврентийский ледниковый покров 67, 71, 73, 192, 247, 249, 258, 259, 279

Лаврентийский щит 266

Ларсена шельфовый ледник 121

Латериты 160

Лафонский тиллит 210

Лед паковый 124

– плавучий 121

– подземный 118

Ледники выводные 80, 121

– движение 84

– долинные 80

– застойные, или мертвые 80

– индекс активности 91

– куполовидные 80

– полярные 94

– рельефообразующая способность 91

– с теплым основанием (или умеренного типа) 84, 95

– субполярные 95

– с холодным основанием 84

– характеристика 78

– шельфовые 121

Ледниковая аккумуляция 93

– эрозия, или экзарация 87

Ледниковые борозды 87

– периоды, причины 43

– – распределение во времени 21

– талые воды 108

– шрамы 87

Ледниковый период, определение 78

– покров, реконструкция 251

– – термин 7, 80

– чехол, термин 7

– щит, термин 7

Ледяные клинья 118

– пустыни 184

– шапки 80

Ленточные отложения 116, 146

Лёсс 120, 242

Литосфера 19

- Малый ледниковый период 260, 294
- Мантия 24
- Мацуяма, магнитная эпоха 226, 227, 242
- Межстадиальный период, или межстадиал, определение 78
- Метод датирования по аминокислотам 232
 - – – изотопам уранового ряда (^{230}Th) 229
- Микститы 150, 155, 173
- Миланковича теория 55, 242, 291
- Миндельское оледенение 43, 240
- Модель циркуляции атмосферы 255, 258
- Моренные гряды 105
 - катыши 157
- Морены боковые 103
 - вытаивания 97
 - как отложения (отложенная морена) 95, 173
 - – формы рельефа 101
 - конечные 103
 - – выжимания 103
 - напорные 103
 - натечные 97
 - рифленые 104, 105
 - срединные 103
 - субаквальные 101
 - холмистые 103

Неандертальский человек 278

Небрасское оледенение 240

Нунатаковая гипотеза 272

- Область абляции 78
 - аккумуляции 78
- Озерные котловины 89
- Озы 113
- Океаническая кора 24, 26
- Оледенения позднекайнозойские 240, 270
 - позднепротерозойские 150–164
- Ордовикский ледниковый период 165, 166, 189, 285
- Ортокварциты 138
- «Отпечатки льда» 183

Пакхэйс, формация 185

Палеомагнитный метод регистрации систематических изменений магнитного поля Земли 226

- Палса 118
- Пангея 32, 197
- «Парниковый эффект» 56
- Перемещение коры, термин 44
- Пермско-каменноугольный ледниковый период 285
- Пинго 118
- Платформа, определение 28
- Плювиальные (дождливые) периоды 131
- Плиты 25
- Подушечные лавы 137
- Порт-Аскейг, тиллитовая формация 150–152, 158, 191
- Последнее межледниковье, термин 7
- Потенциал эрозионного воздействия 260
- Принцип униформизма 38
- Протерозой 138–164
- «Протерозойский суперконтинент» 30
- Пульсационная теория Уилсона 66

Радиоуглеродный (^{14}C) метод определения возраста 229

Развитие жизни на Земле 34

Рамапитек 277

Рапитан, группа 155

Рельефообразующая способность ледника 91

Рисское оледенение 43, 240

Ритмиты 116, 146

Ронне шельфовый ледник 121

Росса шельфовый ледник 70, 121

Руген-морены 105

Сангамонское межледниковье 243

Сахарский ледниковый покров 114, 166–184, 189–192

Сванскомбский человек 278

Северо-Американский ледниковый покров 10, 90

Сибирская плита 200

Сибирский ледниковый покров 73

Сине-зеленые водоросли 143

Скандинавский ледниковый покров 67, 73, 90, 126, 192, 249, 258

Солифлюкционный покров 99

Спрединг 25, 163

Срединно-океанические хребты 25

Стадиал, определение 77

Стёртский ледниковый период 31, 284
 Строматолиты 139
 Структурный грунт 159

Талчир, формация 218
 Талчирское оледенение 208
 Тектоника плит 25, 163
 Теория пульсаций ледникового покро-
 ва 69
 — расширяющейся Земли 48
 — «снежной лавины» 64, 66
 Терминации 257, 258
 Термокарст 118
 Террасы парные 127
 Тетис 32, 197
 Тибести, сводовое поднятие 171
 Тиллиты 97, 99, 156, 173
 — способы образования 156
 Типы границ плит 25
 Трансваальская супергруппа 147
 Третичный период, определение 7
 Тромбетас, формация 189
 Тундровый кратер 179
 Турбидитные (мутевые) потоки 99
 Турбидиты 99
 Тури-Крик, формация 147

Уайтаут, конгломераты 208

Фарерско-Исландский порог 62
 Фильхнера шельфовый ледник 70, 121
 Фолсом, культура 279
 Франклинский ледниковый комплекс
 123

Циклотемы 194

Шотландский ледниковый покров 126
 Штайнхаймский человек 278
 Штрихованные валуны 157

Щит, определение 28

Экзарация (или ледниковая эрозия) 87,
 93
 Эльстерское оледенение 278
 Эмское межледниковье 243
 Энергия оледенения 260

Яванский человек 278
 Ядро Земли 25

ОГЛАВЛЕНИЕ

От переводчика	5
Благодарности	8
Предисловие	9
1. Планета Земля и холодные интервалы ее истории. Б. Джон . . .	13
Ощущение времени	20
Распределение ледниковых периодов во времени	21
Геологическая основа	24
Перемещение материков во времени	29
Развитие жизни	34
2. Ледниковые периоды: поиск причин их установления. Б. Джон . . .	38
Причины ледниковых периодов	43
Внутренние причины	44
Внешние причины	52
Поведение льда	63
Цепные реакции и механизмы обратной связи	71
3. Ледники и их окружение. Э. Дербишир	75
Лед на суше	78
Как устроены ледники	83
Движение ледников	84
Рельефообразующая способность ледника	91
Ледниковая аккумуляция	93
Морены как ледниково-аккумулятивные формы рельефа . . .	101
Деятельность талых ледниковых вод	108
Подземный лед	117
Плавучий лед	121
Колебания уровня моря	124
Жизнь во время оледенений и межледниковий	127
4. Древнейшие ледниковые периоды (в докембрии). Г. Янг	135
Древние природные обстановки и горные породы	135
Вероятность развития оледенения в архее	137
Начало протерозоя	138
Древнейший ледниковый период	144
Распространение оледенения	146
Позднепротерозойские оледенения	150
Проблемы интерпретации	156
Распространение оледенений	161

5.	Следы оледенения в пустыне: ордовик. Р. Фейрбридж	165
	Сходимость доказательств	166
	Отличительные особенности	169
	Движение льда	175
	Полярное море	182
	Ледниковый материк	184
	История ледникового периода	189
	Окончание ледникового периода	192
6.	Великий пермско-каменноугольный ледниковый период. Б. Джон	194
	Пермско-каменноугольный мир	196
	Свидетельства ледникового периода	201
	История ледникового периода	212
	Лед, растения и животные	216
7.	Современный ледниковый период: кайнозойский. Дж. Эндрюс	220
	Геологическая номенклатура и практика	222
	Датирование кайнозойских отложений	225
	Установление ледникового периода	233
	История позднекайнозойских оледенений	240
	Последнее межледниковье и последнее оледенение	241
	Мир 18 000 лет назад	251
	Реконструкция ледникового покрова	251
	Нынешнее межледниковье и современные ледники	259
	Режимы ледников и ледниковые процессы	260
	Ледниковые покровы и уровни моря	268
	Позднекайнозойские оледенения, растения, животные и человек	270
8.	Ритм, причина и прогноз. Б. Джон	282
	Проблемы интерпретации	282
	Периодичность или случайность?	283
	Ощущение масштаба времени	288
	Когда будет очередное оледенение?	296
	Словарь терминов	299
	Список литературы	324
	Предметный указатель	328

УВАЖАЕМЫЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Ваши замечания о содержании книги, ее оформлении, качестве перевода и другие просим присылать по адресу: 129820, Москва, И-110, ГСП, 1-й Рижский пер., д. 2, издательство «Мир».

ЗИМЫ НАШЕЙ ПЛАНЕТЫ

под редакцией Б. ДЖОНА

Научный редактор В. И. Чернышева
Младший научный редактор А. В. Швыряева
Художник А. В. Шипов.
Художественный редактор А. В. Проценко, Л. М. Кузнецова
Технический редактор Н. И. Борисова
Корректор А. Я. Шехтер

ИБ № 3015

Сдано в набор 27.10.81.
Подписано к печати 29.04.82.
Формат 60 × 90¹/₁₆.
Бумага офсетная № 1.
Гарнитура таймс. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 21,00. Усл. кр.-отт. 42,34
Уч.-изд. л. 22,24 Изд. № 5/1639.
Тираж 50 000 экз. Зак. 741. Цена 1 р. 60 к.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»
Москва, 1-й Рижский пер., 2.

Можайский полиграфкомбинат Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
г. Можайск, ул. Мира, 93.

1 р. 60 к.

О РЕДАКТОРЕ КНИГИ

Брайан Джон имеет большой опыт исследований ледников плейстоценового ледникового периода. Он неоднократно работал в полярных экспедициях, где занимался изучением воздействия оледенения на рельеф Антарктиды, Гренландии, Канадской Арктики и Скандинавии. Среди его книг — «Ледники и рельеф» (Glaciers and landscape), «Ледниковый период» (The ice age) и «Мир льда» (The world of ice). До 1977 г. он преподавал географию в университете города Дарем, Великобритания. В настоящее время вернулся в родной Уэльс, пишет научные труды и руководит небольшим издательством. Вместе с женой и двумя маленькими сыновьями он живет в сельской местности, где ему принадлежит небольшой земельный участок.