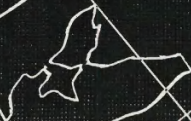


*Джон Имбри
Кетрин Палмер Имбри*

ТАЙНЫ ЛЕДНИКОВЫХ ЭПОХ





ТАЙНЫ
ЛЕДНИКОВЫХ
ЭПОХ

*John Imbrie and
Katherine Palmer Imbrie*

ICE AGES

*SOLVING
THE
MYSTERY*

Hillside, New Jersey

1979

*Джон Имбри
Кетрин Палмер Имбри*

ТАЙНЫ ЛЕДНИКОВЫХ ЭПОХ

*ПОЛТОРА
ВЕКА
В ПОИСКАХ
РАЗГАДКИ*

Перевод с английского М. Г. Гросвальда
Под редакцией академика
Г. А. Авсюка

ПРОГРЕСС
Москва 1988

ББК 26.222.8
И 50

Редактор *И. М. Максимова*

Имбри Дж., Имбри К. П.

И 50 Тайны ледниковых эпох: Пер. с англ./Под ред. Г. А. Авсюка; Послесл. Г. А. Авсюка и М. Г. Гросвальда.—М.: Прогресс, 1988.—264 с.: ил.

Книга известного американского геолога Дж Имбри и его дочери, писательницы Кетрин Имбри, посвящена во многом еще загадочным периодам эволюции Земли—ледниковым эпохам

Авторы раскрывают историю исследования оледенений Земли, знакомят читателя с различными гипотезами и теориями их происхождения

Популярный и увлекательный стиль изложения гармонично сочетается с научной глубиной и точностью изложения проблем Книга будет интересна и для широкого круга читателей, и для специалистов в области наук о Земле

И 1805040800—420 КБ—56—18—87
006(01)—88

ББК 26.222.8

Редакция литературы по географии, экологии и народонаселению

Заведующий редакцией *О. Д. Катагоцин*

© 1979 by John Imbrie and Katherine Palmer Imbrie

© Перевод на русский язык, послесловие издательство «Прогресс», 1988

Предисловие

Уже давно известно, что Земля неоднократно подвергалась оледенениям. Образ гигантских ледяных масс, некогда покрывавших сушу, столь ярко запечатлелся в нашем воображении, что чуть ли не каждый снежный буран дает повод для газетных сенсаций: не наступает ли новый ледниковый период?

Эта книга об истории ледниковых эпох — о том, как менялась природа Земли при глобальных похолоданиях, что было их причиной, когда надо ждать следующее оледенение. Она также расскажет о научных открытиях, а значит, и о людях науки: астрономах, геохимиках, геологах, палеонтологах и геофизиках из десятка стран, которые на протяжении полутора столетий подбирают ключи к решению тайны ледниковых эпох.

При работе над книгой мы пользовались помощью многих людей. Воспоминаниями о своем отце, Милутине Миланковиче, с нами поделился Васко Миланкович, за что мы ему бесконечно благодарны. Полный список публикаций М. Миланковича любезно прислан Татомиром П. Ангеличем из Сербской академии наук и искусств. Ряд необходимых нам разделов из этих публикаций был переведен с немецкого Барбарой Грёнквист. Неоценимую помощь в поисках сведений о Джеймсе Кролле оказал Гордон Крейг из Эдинбургского университета. Бесценным руководством при изучении самых ранних этапов развития ледниковой теории послужили исследования Альберта В. Кароцци из Иллинойского университета. Чрезвычайно полезными для нашей книги оказались и малоизвестные источники, найденные Кетрин Краузе.

Свои личные воспоминания предоставили в наше распоряжение Уильям А. Берггрен, Уоллес С. Брёккер, Роз-Мари Кляйн, Чезаре Эмилиани, Сэмюэль Эпстайн,

Дэйвид Б. Эриксон, Родс У. Фейрбридж, Джеймс Д. Хейс, Джордж Кукла, Робли К. Мэтьюз, Нил Д. Опдайк, Николас Дж. Шеклтон и Маник Талвани, за что мы им очень благодарны.

Розалинд М. Меллор отредактировала рукопись, беспощадно устраняя даже малейшие несоответствия, в чем ей помогал Терри А. Питерс. Наконец, Барбара З. Имбри стала первым читателем и критиком рукописи, также немало сделав для ее усовершенствования.

Мы благодарны и администрации Музея науки в Бостоне, которая предоставила специальный отпуск одному из авторов — Кетрин Имбри. Мы хотели бы поблагодарить и редактора издательства — Ридли Энслоу — за благожелательность и ценные советы. Своим появлением эта книга во многом обязана его заинтересованности и энтузиазму.

Сиконк, Массачусетс
июнь 1978 г.

Дж. И.,
К. П. И.

Пролог

ЗАБЫТЫЙ
ЛЕДНИКОВЫЙ
ПЕРИОД

Еще каких-то двадцать тысяч лет назад Земля пребывала в жестоких объятиях ледникового периода. Гигантские массы льда, получавшие непрерывное пополнение из арктических бастионов холода, медленно наступали на юг, безжалостно погребая под собой леса, равнины и горы. Действие льда наложило неизгладимый отпечаток на земную поверхность, так что и сейчас, через тысячи лет после конца оледенения, его следы безошибочно распознаются в облике ландшафтов. Температуры воздуха тогда резко снижались, а земная кора районов, на которые надвигались ледниковые покровы, испытывала прогибание. В то же время количество воды, изымавшееся из гидросферы для формирования этих покровов, было столь велико, что уровень Мирового океана снижался более чем на сто метров, превращая в сушу огромные пространства континентальных шельфов.

Холодный этап истории Земли стали называть ледниковым периодом. В Северной Америке самый большой ледниковый покров, или комплекс, имевший среднюю толщину не менее двух километров, расползлся из района Гудзонова залива и занимал всю восточную Канаду, Новую Англию и большую часть Среднего Запада. Второй ледниковый комплекс континента приурочивался к Скалистым горам Канады и другим нагорьям Запада, его лед покрывал часть Аляски, всю западную Канаду, большие площади в штатах Вашингтон, Айдахо, Монтана. В Европе ледниковый покров, двигавшийся из центров в Скандинавии, Шотландии и на арктическом шельфе, распространялся на основную площадь Британских островов, Данию, север ГДР, Польши и СССР. Ледниковая шапка меньшего масштаба, возникшая в Альпах, покрыла всю Швейцарию, а также соседние части Австрии, Италии, Франции

и ФРГ. В Южном полушарии подобные ледниковые шапки формировались в Австралии, Новой Зеландии, Аргентине. Таким образом, древнее оледенение охватывало не только области и районы, в которых ледники существуют и сегодня, но еще не менее тридцати миллионов квадратных километров суши, лежащей за их пределами; сейчас также известно, что оно распространялось и на обширные площади континентальных шельфов.

К южным краям великих ледниковых покровов



1. Оледенение Северного полушария сегодня (слева) и в последнюю ледниковую эпоху (справа). Двадцать тысяч лет назад большие части Северной Америки, Европы и Азии были покрыты ледниковыми щитами; поверхность Северного Ледовитого океана и северная окраина Атлантического океана скрывались под пан-

примыкала ландшафтная зона безлесной тундры. В летние сезоны, короткие и прохладные, в этой зоне появлялись неприхотливые растения, короткие стебли которых, укрываясь от леденящих ветров, плотно жались к болотистому грунту. В летние сезоны здесь паслись стада северных оленей и мамонтов, однако зимой они откочевывали на юг, где находили более щедрые пастбища. В Северной Америке зона тундры представляла собой узкую полосу, отделявшую ледниковые покровы от простиравшихся южнее лесных



цирем плавучего льда; уровень Мирового океана был на 110–120 м ниже современного; обширные площади континентальных шельфов, в том числе коридор между Азией и Северной Америкой, становились сушей (составлено по данным Дж. Дентона и других участников Проекта КЛИМАП).

пространств; в восточной части континента леса, почти целиком состоявшие из ели, занимали обширные площади междуречий и долин, а на Среднем Западе с его более аридным климатом такие леса могли существовать лишь на днищах речных долин, где они вытягивались в длинные узкие ленты; на водоразделах же этой области формировались лёссовые степи.

В Европе и Азии зона тундры была шире, чем в Северной Америке, многие исследователи считают, что на юге она переходила не в лесную зону, а в сухие степи. По-видимому, такие степи протягивались через два континента — от атлантического побережья Франции в Центральную Европу и далее в Восточную Сибирь.

Преследуя в тундре стада оленей и мамонтов, охотники каменного века могли подходить к самым краям ледниковых покровов. Их меховые одежды едва спасали от лютого холода, лица покрывались струпьями под ударами северного ветра.. Могли ли они вообразить, что природные условия, в которых будут жить их далекие потомки, станут совсем иными!

И тем не менее оледенение пришло к концу. Около 14 000 лет назад ледниковые покровы суши стали заметно сокращаться и за последующие семь тысяч лет достигли своих современных размеров. В Северном полушарии их остатки сегодня представлены лишь Гренландским ледниковым щитом и небольшим числом ледниковых шапок Канадской и Евразийской Арктики. Но мы должны знать: по равнинам Северной Америки, где фермеры Айовы и Дакоты сейчас выращивают урожай кукурузы и пшеницы, некогда двигался лед почти двухкилометровой толщины, а там, где шумит листва европейских лесов, простирались бескрайние степные пространства.

Ландшафты, появившиеся после таяния льда, оказались настолько сильно измененными, что их можно с полным основанием называть ледниковыми. На обширных площадях ледниковые покровы интенсивно эродировали свое ложе; в процессе движения они вырабатывали в каменных породах этого ложа глубокие желоба, а отторгнутый от него материал — и пылеватые продукты тонкого истирания, и гигантские глыбы — захватывался льдом и переносился к краям ледниковых покровов, где он вытаивал и откладывался,



2. Ледниковые отложения полуострова Кейп-Анн, Массачусетс. Пример ландшафта, типичного для области недавнего покровного оледенения (по Дж. Дэна, 1894).

образуя нагромождения несортированных масс валунного суглинка, обычно называемого мореной (рис. 2).

Ледниковые покровы отступили и исчезли, ушли они и из памяти людей. Не знаем, существует ли эта странная вещь — память поколений, но если и существует, то она явно несовершенна, поскольку мир каменного века был вскоре забыт. Даже самые ясные следы, оставленные великими ледниковыми покровами, первоначально получили превратное толкование. Еще в восемнадцатом столетии геологи верили, что покров грубых несортированных «наносов», выстилающий сушу во многих районах Северной Европы и Америки, возник во время библейского Всемирного потопа. И лишь в начале девятнадцатого века появились ученые, которые усомнились в правильности такого объяснения. В самом деле, могли ли воды потопа, даже вызванные к жизни промыслом божьим, занести гигантские валуны в места, которые на многие сотни километров удалены от источников каменного материала? И если нет, то что же могло?

Часть I

ЛЕДНИКОВЫЙ ПЕРИОД: ОТКРЫТИЕ

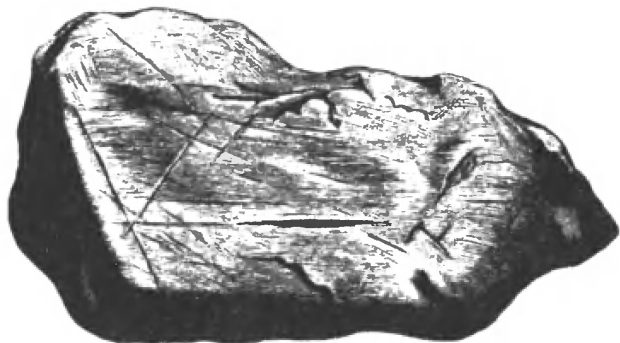


1. ЛУИ АГАССИС И ЛЕДНИКОВАЯ ТЕОРИЯ

Немногие из жителей Невшателя были на ногах в 4.15 утра 26 июля 1837 года. Поэтому вряд ли кто из них видел, как длинная вереница солидных экипажей неторопливо проскрипела по булыжным улицам этого швейцарского города. И уж тем более никто не мог знать, что в самой большой карете, влекомой четверкой белых лошадей, находились трое из наиболее уважаемых ученых того времени.

Первый из них — Леопольд фон Бух; знаменитый геолог, известный своей неиссякаемой энергией, на сей раз был замкнут и молчалив; ссутулив плечи и полускрыв лицо за седыми буклями, он мрачно смотрел в качающийся пол. Второй — Жан Баптист Эли де Бомон — держался прямо и надменно; несмотря на непривычно раннее время, он был изысканно одет, а его холодный взгляд одинаково безучастно скользил и по оледенелым вершинам Альп, громоздящимся вдаль за Швейцарской равниной, и по зеленым склонам более приветливой Юры. Третьим был Луи Агассис, темно-волосый и широкоплечий молодой человек. Обычно живой и уверенный в себе, теперь он выглядел смущенным и расстроенным; ему казалось, что Эли де Бомон с его ледяным высокомерием похож на холодные альпийские пики, которые так же, как и он — безмолвно и свысока, — взирают на вереницу дребезжащих карет. Агассису, человеку быстрого и пытливому ума, казалось непостижимым, что ученые столь крупного масштаба оказались неспособными оценить важность той поездки через горы Юры.

А накануне ее, 24 июля, в Невшателе состоялась годовичная конференция Швейцарского общества естествоиспытателей, на которой президент общества, Луи Агассис, выступил с докладом, вызвавшим немалое удивление его ученых коллег. Аудитория ждала новых данных об ископаемых рыбах, недавно обнаруженных



3. Штрихованный валун из ледниковых отложений Европы. Валуну такого рода – характерная деталь древнеледниковых ландшафтов (по Дж. Гейки, 1877).

в далекой Бразилии, а услышала взволнованный рассказ о штрихованных валунах, которыми усеяны склоны Юры у самого Невшателя (рис. 3). Такие валуны часто образуют беспорядочные нагромождения в местах, весьма далеких от коренных выходов соответствующих пород, в связи с чем их обычно называют эрратическими, то есть блуждающими. Докладчик утверждал, что они заслуживают особого внимания исследователей, так как представляют собой одно из главных доказательств и прошлого оледенения гор, и специфического – ледникового – периода в истории Земли.

Тогда, собственно, и начался спор, ставший одним из самых ожесточенных в истории геологической науки. Ему было суждено продолжаться более четверти столетия и завершиться всеобщим признанием ледниковой теории. И хотя, строго говоря, идея о древних оледенениях возникла задолго до Агассиса, именно его «еретический» доклад, вошедший в историю как «Невшательский трактат», сделал представление о ледниковом периоде, ранее известное лишь узкому кругу специалистов, достоянием широкой публики.

Конечно, Агассис, будучи президентом авторитетного научного общества, мог рассчитывать на особое внимание ведущих ученых своего времени. Однако его доклад стал лишь одним из звеньев той цепочки, которая в конце концов и привела к становлению ледниковой теории – к торжеству концепции великих

ледниковых покровов, некогда распространявшихся на обширные области земного шара. Впрочем, эта теория, которая на первых порах отвергалась даже самыми выдающимися учеными, уже давно принималась как факт многими простыми швейцарцами: живя и работая в горах, они повседневно сталкивались с вещественными следами, оставленными древними ледниками. Были и геологи, которые раньше Агассиса стали сторонниками ледниковой теории, однако они не могли способствовать ее дальнейшему распространению.

Швейцарский пастор Бернар Кун еще в 1787 году сделал вывод, что эрратические валуны являются не чем иным, как свидетельством древнего оледенения. Еще через семь лет Джеймс Геттон — шотландский естествоиспытатель, которого сейчас считают одним из основоположников геологической науки, — провел наблюдения в горах Юры и пришел к тому же заключению, что и Кун. В 1824 году Енс Эсмарк обнаружил признаки древнего оледенения в горах Норвегии. Данные Эсмарка стали известны Рейнгарду Бернгарди — немецкому профессору естественной истории, который смог дополнить их и собственными наблюдениями. В результате в 1832 году появилась его статья, в которой была выдвинута идея об огромном ледниковом щите, некогда покрывавшем всю Северную Европу и доходившем до центральной Германии.

Большинство пионеров ледниковой теории приходили к ее признанию совершенно самостоятельно, опираясь лишь на собственные исследования. Однако общепринятые представления об эрратических валунах как «осадке» Всемирного потопа укоренились так глубоко, что ни одному из них не удалось переубедить хоть сколько-нибудь заметную группу своих современников. Для развенчания старой теории потребовались двадцать пять лет и объединение усилий нескольких величайших умов человечества.

Вряд ли стоит удивляться, что во времена господства религиозного мировоззрения не только широкая публика, но и настоящие ученые верили, что эти валуны разносились чудовищными потоками воды и грязи, связанными с библейским потопом. Правда, и эта «теория» не оставалась неизменной: к тому времени, когда Агассис выступил со своим Невцательским трактатом, разнос эрратики стали объяснять с позиций

дрифтовой гипотезы, выдвинутой в 1833 году выдающимся английским геологом Чарлзом Лайелем. Известно, что Лайель считал рассматриваемые валуны продуктами айсбергового и ледового разноса: по его представлениям, в северных частях бассейнов, возникших при потопе, должны были дрейфовать айсберги и льдины, нагруженные каменными обломками.

Первым среди предшественников Агассиса, чьи пылкость и творческое воображение позволили получить бесценные данные, ставшие основой его Невшательского трактата, был Жан-Пьер Перроден – альпинист, живший на юге Швейцарских Альп и промышлявший охотой на серн в районе Луртье, в долине Валь-де-Баньес. Многолетние наблюдения Перродена привели его к убеждению: ледники, которые сейчас занимают лишь самые южные – верхние – части Валь-де-Баньес, в прошлом заполняли всю долину. Он писал:

«Я долго изучал штрихи и шрамы, которые сохранились вплоть до самого Шамсека на всех выходах стойких к выветриванию пород. Проведя затем наблюдения возле ледников, я пришел к убеждению, что все эти отметины образованы давлением ледниковых масс. Поэтому мне кажется очевидным, что в прошлом долина Валь-де-Баньес была целиком заполнена льдом, и я готов доказать это любому скептику, сопоставив упомянутые штрихи и шрамы с такими же образованиями, которые на наших глазах вытаивают из-под краев ледников».

В 1815 году Перроден поделился своими мыслями с Жаном де Шарпантье – натуралистом, которому было еще суждено стать влиятельным сторонником ледниковой теории. Тогда, однако, наблюдения альпиниста не убедили Шарпантье, хотя и показались ему интересными.

«Перроден протянул свой ледник всего лишь на тридцать восемь километров от его современного конца до Мартиньи (поскольку он сам, вероятно, никогда не заходил дальше этого города), – писал Шарпантье вскоре после встречи, – и я был согласен, что эрратические валуны не могли разноситься водой. Тем не менее я счел его гипотезу необычной и экстравагантной, а потому вовсе не заслуживающей не только проверки, но и обсуждения».

Не прошло, однако, и трех лет, как Перроден нашел

первого по-настоящему сочувствующего слушателя, каковым оказался Игнац Венец – инженер, занимавшийся строительством дорог и мостов. Между 1815 и 1818 годами в связи со своей работой Венец провел много времени в районе долины Валь-де-Баньес и часто встречался с Перроденом. Их долгие беседы обычно вращались вокруг проблемы ледников; сейчас ясно, что



4. Ледник Церматт в Швейцарских Альпах. Рисунок, опубликованный Луи Агассисом в 1840 г. (заимствован из работы А. В. Кароци, 1967).

они сыграли огромную роль в становлении теории оледенений.

Но и Венец далеко не сразу принял идеи Перродена. Правда, в 1816 году на годичном собрании Швейцарского общества естествоиспытателей в Берне он поднял вопрос о ледниках, однако сделал это только для того, чтобы изложить некоторые мысли об их движении и о механизме формирования морен — валообразных скоплений обломочного материала, обрамляющих ледниковые языки (рис. 4). В последующие пять лет его все еще не оставляли сомнения в правильности ледниковой теории. Хотя в дневниковых записях, датированных 1821 годом (и оставшихся неопубликованными до 1833 года), есть сообщение о том, что ему удалось выделить несколько гряд, сложенных валунами и щебнем и лежащих в пяти километрах от конца ледника Флеш; здесь же высказано предположение, что эти гряды суть морены, оставленные ледником в одну из прежних стадий его развития.

Можно считать, что гляциалистские идеи, усвоенные Венецем от Перродена, получили полное развитие лишь к 1829 году. Именно тогда Венец выступил с докладом на годичном собрании общества в поселке Осписе¹ на перевале Большой Сен-Бернар. В нем говорилось о колоссальных ледниках, некогда распространявшихся из Альп не только на Швейцарскую равнину и горы Юры, но и на другие районы Европы. Этот вывод подкреплялся сведениями о находках эрратических валунов и морен, а также данными их сравнения с моренами современных альпийских ледников.

И все же этот доклад мало что изменил: ученые коллеги в своей массе либо игнорировали, либо даже отвергали высказанные в нем идеи. Но на собрании был один человек, который оказался подготовленным к восприятию теории. Это был Жан Шарпантье, старый знакомый Венеца. Будучи директором соляных копей Бекс в Швейцарии, Шарпантье не мог не интересоваться природой и естественными науками. Теперь он воспылал желанием поддержать и Венеца, и ту самую теорию, идеи которой, изложенные Перроденом, он так необдуманно отверг почти пятнадцать лет назад.

В последующее пятилетие, с 1829 по 1833 год,

Шарпантье приложил свои недюжинные способности исследователя и аналитика к проблеме древнего оледенения. И хотя пальма первенства в принятии радикальных идей Перродена должна быть отдана Венецу, главная заслуга в создании фактологического базиса ледниковой теории, в сборе и классификации ее доказательств, несомненно, принадлежала Шарпантье. Однако он был только ученым и не обладал напористостью и упорством, без которых нельзя было добиться признания этой теории. Ведь противодействие, которое встречала идея древнего оледенения, было очень сильным, и поэтому защитить ее мог только настоящий боец.

Но все же, пока официальная наука оставалась на позициях дрейфовой теории, сформулированной Лайелем и освященной словами Библии, многие простые швейцарцы, сами того не зная, давно приняли ледниковую теорию. И сам Шарпантье имел случай понять это, когда он, следуя в Люцерн для выступления в защиту ледниковой теории на очередном собрании общества, встретил совсем неожиданного союзника.

«На своем пути по долине Хасли и Лунгерна я увидел на Брунигской дороге старого лесоруба из Мейрингена. Некоторое время мы шли с ним вместе и разговаривали. Когда же я сошел на край тропы и стал осматривать большой гранитный валун, он заметил: «Таких камней здесь много, однако они не местные, а принесены издалека, от самого Гримзеля: они ведь состоят из гайсбергских гранитов, которых здесь совсем нет».

Когда же я спросил, как, по его мнению, эти камни достигли здешних мест, он ответил без колебания: «Это Гримзельский ледник принес и отложил их на обоих бортах долины. В прошлом он должен был доходить до самого Берна, но вода же затащила валуны на такую высоту над днищем долины, ведь для этого здесь должны были бы образоваться целые озера».

Этот славный старик не мог знать о рукописи, лежавшей в моем кармане. А ведь в ней было подтверждение его гипотезы! Он был немало удивлен, когда увидел, с каким удовольствием я воспринял его экскурс в геологию, а еще больше — когда я дал ему несколько франков, чтобы он выпил за здоровье древ-

него Гримзельского ледника и брунигских валунов».

Увы, и тост лесоруба не смог помочь ледниковой теории. Она была отвергнута и люцернским собранием общества, причем на сей раз в числе участников, выступивших против ее признания, был и Луи Агассис.

Агассис познакомился с Шарпантье еще в люцернской школе. Уже тогда ум Шарпантье вызывал всеобщее восхищение, и не исключено, что именно под его влиянием Агассис избрал для себя путь натуралиста. Но теперь, спустя десять лет, Агассис сам вошел в число ведущих ученых Европы. Его уважение к Шарпантье сохранилось, однако идеи старого друга, касающиеся древнего оледенения, на первых порах казались ему фантастичными.

Шарпантье не раз приглашал Агассиса к себе, в Бекс, он чувствовал, что этот район, известный богатством ископаемой фауны и другими геологическими образованиями, будет интересен для Агассиса. Это приглашение было в конце концов принято, и в 1836 году, через два года после того самого доклада в Люцерне, Агассис приехал в Бекс и провел там лето. В то время сам он занимался изучением ископаемых рыб. О его отношении к ледниковой теории мы уже говорили: как и большинство других ученых, Агассис верил в дрейфовую теорию Лайеля. Однако он был не прочь услышать, а главное — увидеть собственными глазами любые доводы, которые мог бы привести его друг Шарпантье в пользу теории древних оледенений. Можно думать, что Агассис специально отправился в Бекс, чтобы доказать своему незадачливому другу ошибочность этой теории. Мог ли он ожидать, что сам быстро станет ее сторонником.

Шарпантье твердо верил, что альпийские ледники когда-то распространялись далеко за пределы своих нынешних границ, но он не считал своим долгом публикацию этих выводов, не стремился довести их до сознания современников. Он с удовольствием показывал следы древних ледников друзьям и сотрудникам, посещавшим его в Бексе, и этого ему было достаточно: Шарпантье не сомневался, что правильная теория и сама пробьет себе дорогу. В общем, получилось так: ледниковая теория зародилась в результате наблюдений простых людей — крестьян и лесоруб-



5. Луи Агассис на леднике Унтераар. Портрет, хранящийся в библиотеке Невшательского университета (из работы А. В. Кароци, 1967).

бов; она была впервые сформулирована Игнацем Венецем, а затем развита и систематизирована Жаном Шарпантье; наконец, теория приобрела и своего энергичного пропагандиста, каковым стал Луи Агассис (рис. 5).

Сделавшись гляциалистом, Агассис сразу показал, что умеет быстро и жадно учиться. Вместе с Шарпантье и Венецем он побывал на ледниках Диаблерца и долины Шамони, обследовал морены Ронского

ледника. Факты говорили сами за себя, и на сей раз Агассис был весь внимание. Потребовалось всего лишь несколько недель, чтобы он усвоил все, чему могли научить Шарпантье и Венец, а затем и превзошел своих учителей. Используя факты, которые они по крупицам собирали на протяжении семи лет, Агассис быстро построил всеобъемлющую ледниковую теорию, которая, по его мнению, могла уверенно противостоять любым нападкам противников. К сожалению, в своем рвении он в ряде случаев допускал вольности в обращении с данными Шарпантье, явно граничившие с нарушением научной этики. К тому же его расширенный вариант теории по ряду важных вопросов шел много дальше, чем позволяли имевшиеся факты.

Как это часто бывает, увлеченный Агассис недооценил силу оппозиции. Нередко он действовал легкомысленно: даже свой знаменитый доклад Швейцарскому обществу естествоиспытателей в Невшателе он подготовил в великой спешке за вечер, предшествовавший заседанию, и оказался совсем не подготовленным к отрицательной реакции аудитории. Еще раз напомним: члены общества ждали доклада об ископаемых рыбах, и даже сама тема речи их молодого президента явилась для них полной неожиданностью.

«Совсем недавно, — говорил Агассис, — наши коллеги Шарпантье и Венец, опираясь на результаты своих исследований, выдвинули новую радикальную концепцию, которая должна иметь далеко идущие последствия для настоящего и будущего науки. Я думаю, что район, в котором идет наше заседание, может служить хорошим фоном для моего доклада, а поднятый в нем вопрос мы сможем решить в ходе совместных наблюдений на склонах нашей Юры. Я имею в виду ее ледники, морены и эрратические валуны».

Далее Агассис детально изложил собственные данные, а также итоги работ Венеца и Шарпантье и тут же предложил их интерпретацию: «Представляется очевидным, что вся Юра в прошлом скрывалась под огромными ледниковыми массами. Эти массы, — продолжал он, — представляли собой часть ледникового щита колоссальных размеров, который покрывал Европу, достигая на юге Средиземного моря. Подо льдом оказывалась и большая часть Северной Америки».



6. Зарисовка обработанного ледником скального выступа в районе Невшателя, опубликованная Луи Агассисом в 1840 г. Агассис указывал, что отполированные и изборозженные поверхности скал, встречающиеся на больших расстояниях от современных ледников, могут служить доказательством древнего оледенения (из работы А. В. Кароци, 1967).

Агассис назвал этот период истории Земли *ледниковым* – *Eiszeit*, – используя термин своего друга, ботаника Карла Шимпера. По его гипотезе, возникновение полярного ледникового покрова предшествовало рождению Альп, а сползание льда в сторону Юры началось позже, в ходе поднятия горной системы. Эратические валуны и обработанные льдом скалы, которыми изобилуют склоны Юры, как раз и представляют собой следы этого сползания: они образованы движущимся льдом и позволяют восстановить направление его движения (рис. 6).

Доклад многих шокировал. Он вызвал такой фурор, что повестка дня заседания оказалась скомканной, а непривычные к подобным поворотам участники – смущены и даже напуганы. Один из них, Аманц Грессли, например, был так потрясен, что не смог огласить собственную работу по теории седиментации, которая, как выяснилось позже, оказалась ценным вкладом в геологическую науку.

Реакция на выступление Агассиса была страстной.

В жаркой дискуссии, развернувшейся в геологической секции, споры достигли высочайшего накала, и распалившиеся ораторы не скупилась на резкие выражения. И кажется, лишь в одном они были едины — в неприязни идей докладчика.

На следующий день Агассис рассказал о наблюдениях, сделанных в районе самого Невшателя, и прочел положительный отзыв о своей теории, написанный Карлом Шимпером. Однако оппозиция после этого нисколько не ослабла, наоборот, она еще более усилилась с прибытием Эли де Бомона.

Агассис все-таки надеялся, что даже самые законченные скептики не устоят перед доказательствами, которые может представить сама природа, что их убедят следы оледенения, запечатленные в рельефе и поверхностных отложениях района Невшателя, как они убедили его самого. Этой цели и должна была послужить экскурсия в горы Юры, намеченная на следующий день: наемные экипажи были готовы, чтобы доставить членов общества в Ла-Шо-де-Фон, находящийся в самом сердце этих гор. Вот не лишнее юмора описание этой экскурсии, оставленное одним из ее участников:

«В общем, я был достаточно знаком с ведущими учеными нашей группы, чтобы понять, сколь большую роль в их отношениях играли эгоизм и соперничество. Не случайно на протяжении всей поездки Эли де Бомон оставался холоден как лед, а Леопольд фон Бух шагал как заведенный, не удостоивая взглядом окружающего; его раздражение выражалось в непрерывном бурчании: все его возмущало — и некий англичанин, не перестававший трещать о Пиренеях («И это здесь, в Юре!»), и примкнувшие к экскурсии любители с их дурацкими вопросами. Что касается самого Агассиса, то он все еще пребывал под горьким впечатлением резкого выступления фон Буха, критиковавшего его доклад; после выхода в маршрут Агассис сразу отделился от группы и одиноко шагал в полукилометре впереди нас».

Было отчего и злиться и грустить. Казалось, что следы оледенения, которые так ясно видел Агассис, на остальных не производят никакого впечатления. И раз это так, то кому нужна вся его затея, к чему эта изнурительная поездка в горах, эта тряска по

ухабам дороги, измучившая и людей и лошадей... Похоже, что он думал именно так. Но он все-таки ошибался: и его трактат, и последующая экскурсия в горы, и монументальный труд «Исследования ледников», увидевший свет в 1840 году, на много лет вперед привлекли внимание мира науки к проблеме древнего оледенения. Конечно, доклад Агассиса, сделанный в 1837 году в Невшателе, содержал немало преувеличений. Однако он достиг одной цели, которая была самой важной, — изменил отношение к ледниковой теории. Эту теорию все еще можно было критиковать, но ее стало невозможно игнорировать.

Агассис продолжал исследования древнего оледенения и в годы, последовавшие за Невшателем, хотя ведущие ученые Европы отнюдь не прекратили нападков на его теорию. Доброжелатели настойчиво советовали ему вернуться к изучению ископаемых рыб. Среди них был и Александр Гумбольдт, который в декабре 1837 года писал Агассису: «Занимаясь рыбами, Вы сможете сделать более ощутимый вклад в положительную геологию, чем всеми своими общими рассуждениями (в том числе и «ледяными») о переворотах в примитивном мире, — рассуждениями, которые, как Вы сами прекрасно знаете, кажутся убедительными только их авторам».

Однако Агассис отнюдь не гонялся за химерами. Пройдут годы, и Гумбольдт сам поймет, что он был одним из первых, кто постиг истину. Других же ученых еще надо было убедить, что Земля действительно пережила ледниковый период.

2. ТРИУМФ ЛЕДНИКОВОЙ ТЕОРИИ

Агассису, с его замечательным воображением, смелостью в постановке вопросов и энергичным стилем изложения, было нетрудно овладеть вниманием широкой публики. Читатель любого возраста не мог оставаться равнодушным, читая такие строки:

«Появление чудовищных ледниковых покровов означало уничтожение всей органической жизни на земной поверхности. Территория Европы, которая перед тем была покрыта тропической растительностью и населена огромными слонами и гиппопотомами, внезапно исчезла под бескрайними массами льда, погребавшего все — равнины, озера, моря, возвышенности. Наступило безмолвие смерти... Источники иссякли, течение рек прекратилось, и лучи солнца, встававшего над этими застывшими просторами, ...слышали лишь завывание северных ветров да сухой треск, с которым поверхность ледяного океана вдруг рассекалась змеящимися трещинами».

Сама мысль о чудовищных катастрофах, раз за разом стирающих жизнь с лица планеты, не была новой. Наоборот, во времена Агассиса большинство ученых верили, что история Земли подразделялась на несколько эпох и каждая из них завершалась мощной катастрофой. Считалось, что именно на этапах таких катастроф происходило смятие и дробление горных пород, воздымание горных хребтов; все это сопровождалось мощными потопами, вносившими свою лепту в уничтожение всей растительной и животной жизни на планете. А с началом каждой новой эпохи жизнь заново вдыхалась в опустошенный мир — но только затем, чтобы просуществовать до следующего катаклизма.

Концепция катастрофизма доминировала в теоретической геологии XVIII и XIX столетий, и для этого

были веские причины: как-никак, а она прекрасно объясняла окаменелые останки странных животных, которые извлекались из земли геологами. К тому же объяснение геологической летописи, которое давала концепция катастроф, не подрывало веру в мудрость слова божьего, записанного в Ветхом завете, а это и во всем делало ее позиции непоколебимыми.

Не только дилетанты, но и ученые того времени считали очевидным, что Всемирный потоп, уничтоживший все живое, за исключением лишь Ноя с его набитым животными ковчегом, был не чем иным, как очередной катастрофой, которая завершила предшествующую эпоху и расчистила место для новой, современной. Например, когда в 1706 году в торфянике у Олбани, в штате Нью-Йорк, был найден огромный зуб вымершего мастодонта, то сразу же последовало уверенное заключение о его принадлежности человеку — конечно же, представителю того «несчастливого и грешного племени», которое населяло Землю до потопа. Лично обследовав зуб, губернатор Массачусетса Дадли отправил его бостонскому пастору Коттону Мазеру со следующим письмом:

«Я думаю, зуб видели все врачи города, и я совершенно уверен, что он принадлежал человеку. Я провел измерения: в вертикальном положении его высота равна 6 дюймам без осьмушки, окружность — 13 дюймам, также без осьмушки, и вес — 2 фунта 4 унции (в системе Троя)... Не сомневаюсь, что зуб соответствует только телу человека и что этот последний стал жертвой потопа. Столь же несомненно, что несчастное создание бродило по глубокой воде, пока могло держать голову над ее поверхностью, и только потом, как и все ему подобные, потеряло волю к сопротивлению. Глубина, на которой найден зуб, дает представление о толщине молодых слоев, отложенных после потопа».

Еще через двадцать лет часть скелета неведомого животного была обнаружена Иоганном Якобом Шейхцером в осадках древнего озера в Швейцарии. Знаменитый естествоиспытатель также решил, что имеет дело с костями древнего человека, погибшего в водах Всемирного потопа. После этого Шейхцер опубликовал книгу, названную «Homo diluvii testis», что значит «Человек, видевший потоп». И лишь через

столетие крупнейший французский анатом Жорж Кювье подверг эти кости повторному изучению и доказал, что они принадлежали особи гигантской, ныне вымершей, саламандры.

Сам Агассис немало способствовал развитию учения катастрофизма. Этому послужили его удивительно детальные зарисовки ископаемых рыб и других вымерших животных, которые, как предполагалось, жили в более ранние эпохи. Поставив на место потопа великое оледенение, Агассис, конечно же, бросил вызов общепринятой точке зрения на природу последней всемирной катастрофы, однако сама вера в такие катастрофы при этом сохранялась незыблемой.

Одним из самых авторитетных сторонников теории потопа в то время был англичанин Уильям Бакленд. Заняв в 1820 году должность профессора минералогии и геологии в Оксфордском университете, он быстро стал наиболее уважаемым геологом Англии, к мнению которого прислушивались. Поэтому было ясно, что, переубедив его, Агассис мог бы получить важнейшего союзника. Как и Агассис, Бакленд имел талант замечательного лектора, своими выступлениями он умел буквально всколыхнуть аудиторию. Даже в Оксфорде, казалось собравшем незаурядных людей всей Англии, Бакленд выделялся силой и неповторимостью своей личности, а также эксцентричностью поведения. Знаменитые на весь университет кабинеты Бакленда ломились от коллекций горных пород, черепов и скелетов. И тем не менее он твердо верил, что подлинная школа геолога — не кабинет, а поле, и использовал любую возможность для демонстрации естественных геологических разрезов. Причем, отправляясь на экскурсии, он всегда облачался в свою «академическую» пелерину и надевал высокий цилиндр, что, надо думать, еще более повышало его популярность среди студентов. Но все это не могло заслонить одного несомненного факта: Бакленд был глубоко предан науке и пользовался заслуженным уважением. Большинство ведущих геологов Англии, включая Чарлза Лайеля, считали себя его учениками.

Бакленд был убежденным катастрофистом. В своей торжественной лекции, открывавшей его курс в Оксфорде и названной «Объяснение связи между геологией и религией», он выразил убежденность, что главная

цель геологической науки сводится к тому, чтобы «...подтвердить данные религии и показать, что известные ей факты согласуются с описанием сотворения мира и потопа, которые мы находим в заповедях Моисея». Наряду с этим он стал первым геологом, сделавшим главным предметом своих исследований эрратические валуны и беспорядочные скопления песчано-щебнистого и суглинистого материала, который выстилает почти всю поверхность Британских островов. Бакленд поставил перед собой задачу выяснить, как образовались эти скопления. И хотя у него не было сомнений, что они обязаны своим происхождением Всемирному потопу, все же оставалось много вопросов, еще требовавших решения.

И прежде всего, мог ли потоп — и если мог, то как — перенести и отложить столь колоссальные массы обломков горных пород? Бакленд верил, что одного лишь движения водных масс, связанных с потопом, было достаточно для перемещения этого материала и формирования «дилювия», как называли покров рыхлых поверхностных отложений приверженцы идеи потопа, или дилювиалисты. При этом верил не только потому, что такое объяснение соответствовало библейской легенде; ему казалось, что последняя находит подтверждение и в той истории, которая «записана» в самих отложениях.

В 1821 году Бакленд исследовал кости, найденные в Йоркшире, в пещере у Пикеринга, и установил, что в своем большинстве они принадлежали гиенам, но среди них присутствуют также разрозненные остатки скелетов двадцати трех других видов, в том числе львов, тигров, слонов, носорогов, гиппопотамов и разных птиц.

По заключению Бакленда, эта пещера была логовом древних гиен, которое впоследствии оказалось затопленным и уничтоженным Всемирным потопом. Положение костей и их соотношение с перекрывающим суглинком, писал Бакленд, доказывают, что допотопные животные действительно утонули. А изучив сталагмиты, покрывающие пол пещеры, он сделал вывод, что возраст потопа — пять или шесть тысяч лет, что, как было отмечено с немалым торжеством, полностью соответствует свидетельству Библии.

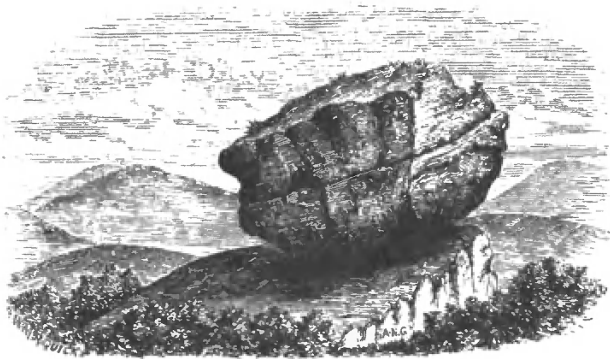
Результаты своих исследований Бакленд изложил

в книге, которую посвятил епископу Дургамскому и назвал «Реликвии потопа, или Изучение органических остатков из пещер, трещин и дилювиальных отложений, а также анализ других геологических явлений, подтверждающих действие Всемирного потопа» (1823 год). В эту монументальную работу были включены также итоги исследований, проведенных Баклендом в еще двадцати пещерах, разбросанных по территориям Англии и континентальной Европы. Книга была удостоена специальной медали Королевского общества, она сделала имя своего автора известным в европейских геологических кругах.

Ни в одной из допотопных пещер Бакленд не встретил человеческих костей, и поэтому он решил, что сотворение человека относится к очень недавнему времени. Можно себе представить его потрясение, когда вскоре после того в пещерных отложениях у Пэвилленда, на южном берегу Уэлса, был найден скелет женщины, окрашенный в ржаво-красный цвет и украшенный кусочками мамонтовой кости. Многим показалось, что этой находкой опровергалась одна из основ концепции потопа. Однако Бакленд и здесь сумел найти выход из затруднения. Обратив внимание на такие факты, как положение находки в самых верхних слоях отложений пещеры и ее близость к остаткам британского военного лагеря времен римлян, сделав затем ряд простых сопоставлений и поборов в себе моральные табу, связанные с викторианским воспитанием, он пришел к заключению:

«Ситуация с британским лагерем, расположенным на холме прямо над самой пещерой, разъясняет многое — и то, что это за женщина, и то, что это было за время. Что же касается ее профессии, то близость лагеря, дающая мотив пребывания, и положение пещеры, намекающее на откровенное и манящее уединение, явно сами говорят за себя».

Однако остальные особенности дилювиальных наносов столь легкому объяснению не поддавались. Главную проблему составляло происхождение эрратических валунов. Некоторые из них достигали размеров небольших домов и, судя по составу пород, испытали перенос на сотни километров от своих коренных источников (рис. 7). Не менее удивительными казались царапины и борозды на отшлифованных



7. Эрратический валун в Шотландии. Луи Агассис связывал присутствие таких валунов вдалеке от их коренных (скальных) источников с действием древних ледников (по Дж. Гейки, 1894).

скальных выходах, вскрывающиеся под плащом из валунов и глины.

Катастрофисты считали, что подобные царапины и борозды могли образоваться в результате действия гигантских волн, которые возникали лишь при потопе и в настоящее время не наблюдаются. Возможная динамика этих волн — так называемых «волн трансляции» — стала предметом тщательного анализа; расчеты, выполненные математиками Кембриджского университета, дали точные характеристики глубин и скоростей течения водных масс потопа; их выводы публиковались в серьезных научных журналах.

Однако были и геологи, не верившие, что потоки воды могли переносить огромные валуны. Им более импонировал вариант теории, предложенный Лайелем в «Основах геологии», увидевших свет в 1833 году. По его идее, сформулированной в 1833 году, валуны транспортировались дрейфующими айсбергами и отлагались по мере таяния плавучих ледяных гор. Сторонники айсберговой теории, которая, как мы уже говорили, неплохо вписывалась в концепцию Всемирного потопа, стали обозначать такие отложения термином «дрифт» (по-русски — «дрейф»); им казалось, что этот термин наиболее точно отражает происхождение плаща несортированного обломочного материала.

Важное подкрепление точки зрения сторонников дрейфовой теории многие видели в наблюдениях ис-

следователей северной и южной полярных областей. Ведь еще не кто иной, как Чарлз Дарвин, в своем отчете о плавании на «Бигле» писал, что некоторые айсберги, с которыми он встречался в Южном океане, несли с собой валуны.

Однако Бакленд был первым, кто понял, что, несмотря на все это, ни лайелевская дрейфовая теория, ни классическая концепция потопа не способны дать правдоподобного толкования всех известных фактов. Так, например, для объяснения с их точки зрения «дрифтовых» наносов, известных в целом ряде горных районов, необходимо допустить, что уровень морей и океанов некогда повышался более чем на 1500 метров. Но откуда бралась эта вода? И куда она затем делась? Пытаясь ответить на эти и подобные им вопросы, некоторые диллювиалисты, что называется, давали волю воображению, мало затрудняя себя объяснением неудобных им фактов. Массы воды изливались из колоссальных подземных резервуаров, утверждали они, а потом внезапно поглощались неведомыми нам пустотами. Или: Земля испытывала резкие колебания относительно своей оси, чем создавались чудовищные приливные волны, которые должны были перехлестывать даже через высочайшие горы. Или: гигантская комета задела земную поверхность, вызвав невиданные по силе вихри в гидросфере.

Теория Лайеля в своем первоначальном виде действительно уперлась в проблему уровней океана, однако при некоторой модификации и она смогла дать объяснение находок «дрифта» в горах. Так, например, присутствие эрратических глыб в горах Юры Лайель предложил связывать не с айсбергами, дрейфовавшими в океане, а с плавучим льдом, разносившим валуны по обширным озерам. Последние же могли подпруживаться завалами, возникавшими вследствие землетрясений или схода лавин.

Судя по дневникам Бакленда, его не удовлетворяли ни ответы, которые предлагались сторонниками потопа, ни ответы, которые давала теория айсбергового разноса. Поэтому он продолжал поиск новых подходов к проблеме, способных помочь в объяснении всех известных ему особенностей поверхностных отложений Англии. Случилось так, что именно тогда, в сентябре 1838 года, он принял участие в конферен-

ции немецких натуралистов во Фрайберге и оказался свидетелем доклада своего друга, Луи Агассиса, в котором последний вновь, как и год назад в Невшателе, изложил доводы в пользу ледниковой теории. Слухи об этой теории уже успели дойти до Бакленда, и главной целью его поездки во Фрайберг, собственно, и было встретить Агассиса и самому разобраться в его фактических данных и соображениях.

После конференции Бакленд с женой отправились в Невшатель—в горы, которые незадолго до того убедили самого Агассиса в правильности ледниковой теории. В этой поездке участвовали еще двое—Агассис, горевший желанием сделать влиятельного Бакленда своим единомышленником, и Шарль Люсьен Бонапарт, брат прежнего императора Франции Наполеона. Шарль был богатым человеком со страстным интересом к естественной истории и уймой свободного времени; он оставался не у дел с самого 1815 года, со времени поражения Наполеона у Ватерлоо.

Бакленд решил погостить у Агассиса, исходя из личных и из научных соображений. Он и его жена познакомились, а затем и подружились со швейцарским ученым еще несколько лет назад в Англии, куда Агассис приезжал для знакомства с коллекциями ископаемых рыб. Теперь Бакленд намеревался отдать ответный визит, а заодно и познакомиться с молодой супругой Агассиса, которая оставалась в Невшателе.

Можно себе представить, что на всем долгом пути через горы мысли Бакленда вновь и вновь возвращались к ледниковой теории. Что же за доводы предьявит ему Агассис, чтобы убедить в ее обоснованности? Ждать пришлось недолго—едва прибыв в Невшатель, маленькая партия тотчас же отправилась в окрестные горы. Агассис шагал впереди, время от времени указывая на следы воздействия древнего оледенения: он был уверен, что геология района окажется красноречивее словесных объяснений. Однако упрямому Бакленду все это показалось неубедительным. Тогда Агассис организовал экскурсию в Альпы, к языкам современных ледников; он надеялся, что вид свежих следов их движения и эрозионной работы сломает наконец лед неверия его английского коллеги. И цель в конце концов была достигнута—Бакленд с ним согласился. Но, как показало будущее, лишь временно.

Письмо из Англии, в котором супруга Бакленда благодарила Агассиса за гостеприимство, содержало приписку: «Однако доктор Бакленд остался столь же далеким от согласия с Вами, как и был прежде». По-видимому, стоило Бакленду избавиться от прямого влияния Агассиса и удалиться от альпийских ледников, как к нему вернулись прежний скепсис и сомнения.

Естественно, что такой поворот не мог не разочаровать Агассиса. Мы уже говорили, что Бакленд пользовался всеобщим уважением, так что, стань этот оксфордский профессор гляциалистом, он был бы не менее полезен для ледниковой теории, чем император Константин для развития христианства. В самом деле, однако, ждать Агассису оставалось недолго. Уже к осени 1840 года чаша весов качнулась в его пользу. Критическую роль при этом сыграла новая поездка Агассиса в Англию, предпринятая летом 1840 года все с той же целью изучения ископаемых рыб. В ее ходе, в сентябре, он принял участие в годичном собрании Британской ассоциации прогресса науки, состоявшемся в Глазго, и выступил с докладом о ледниковой теории. В нем вновь прозвучал его главный вывод: «Было время, когда весь север Европы, а также Азии и Америки покрывался ледниковыми массаами».

Как и следовало ожидать, реакция большинства присутствующих была отрицательной. Причем в потоке критических выступлений особенно громко прозвучал голос Чарлза Лайеля. Что касается Бакленда, то он на сей раз промолчал. Причина этого молчания остается непонятной, так как, судя по дневниковым записям Бакленда, к моменту собрания он уже успел пересмотреть фактический материал и убедиться в правоте Агассиса. Почему вдруг взял и убедился, тоже неясно: то ли семена, брошенные Агассисом два года назад, постепенно проросли, то ли Бакленд испытал внезапное озарение, подобное ослепительной вспышке света, в которой истинная вера пришла к апостолу Павлу. Во всяком случае, вскоре после собрания Бакленд пригласил Агассиса и другого известного геолога, Родрика Мёрчисона, поехать в Шотландию и северную Англию для изучения их поверхностных отложений. Можно считать, что именно во время этой экскурсии Бакленд окончательно убедился в правильности теории, которую так стойко отстаивал его друг и коллега

Агассис. Так что он оказался первым крупным английским геологом, который твердо встал на позиции ледниковой теории (чего, впрочем, не случилось с Мёрчисоном, до конца своих дней отстаивавшим позиции дрифтовой теории).

Одним из первых деяний, осуществленных Баклендом в роли новообращенного гляциалиста, стала его научная «проповедь», адресованная Чарлзу Лайелю. Ее действие было удивительно быстрым, поскольку уже 15 октября торжествующий Бакленд писал Агассису: «Лайель целиком принял Вашу теорию!!! А когда я указал ему премиленький моренный комплекс, лежащий всего лишь в паре миль от дома Лайеля-отца, он просто обрадовался: еще бы, наше объяснение устранило уйму трудностей, которые мучили Лайеля всю жизнь».

Надо думать, время для признания ледниковой теории наконец наступило. Самый новый ее адепт, Лайель, не теряя времени, подготовил доклад «О геологических доказательствах существования древних ледников в Форфаршире», который и зачитал на ноябрьском заседании Лондонского геологического общества. Здесь же выступил и Агассис, сделавший доклад «Ледники и следы их прежнего существования в Шотландии, Ирландии и Англии». На сей раз не остался в стороне и Бакленд, решительно поддержавший ледниковую теорию в докладе «Доказательства оледенения Шотландии и северной Англии».

Можно было ожидать, что после того, как в защиту ледниковой теории выступило это трио всемирно известных геологов, оппозиция к ней рухнет сама собой. Однако ничего подобного не произошло. Общая реакция участников заседания была по-прежнему отрицательной. За докладами гляциалистов последовали горячие споры, в заключение которых вновь выступил Бакленд. Об этом выступлении и обстановке в зале можно судить по таким заметкам очевидца:

«...аудитория была возбуждена, причем не только предвкушением долгожданной чашки чая (время близилось к полудню), но также критическим пафосом и ссылками на археологию, которые источал уважаемый профессор... и вид и тон его были столь победны, что никто из оппонентов не посмел усомниться в достоверности ледниковых шрамов, царапин и полировки



8. Достопочтенный профессор Бакленд в полной экипировке «гляциалиста». Шарж современника Томаса Сопвича, на котором Бакленд изображен стоящим на изборожденной скальной поверхности. В первоначальном варианте на валунах у его ног были видны бирки, на одной из которых значилось: «Обработано льдом 33 тысячи и 330 лет до сотворения мира», а на второй: «Поцарапано телегой позавчера на мосту Ватерлоо». Настоящий вариант был опубликован А. Гейки (1875), бирки и надписи из уважения к Бакленду сняты.

на скалах в наших горах... в общем — все тот же вечный зуд без возможности почесаться».

Известно, что в науке, как и в религии, самая истовая вера живет в неофитах. Ведь еще менее месяца назад, на конференции в Глазго, Бакленд сидел прикусив язык, когда теория Агассиса подвергалась ожесточенным нападкам, а вот теперь он резко сменил фронт и рвется на ее защиту, что, конечно же, не осталось незамеченным. Приобрела известность карикатура, на которой оксфордский профессор был изображен в его пелерине и цилиндре, увешанным предметами геологического снаряжения и попирающим иштрихованную (льдом?) поверхность (рис. 8). У его ног — два образца со следующими надписями: «Обработано льдом 33 тысячи и 330 лет до сотворения мира» и «Поцарапано телегой позавчера на мосту Ватерлоо».

Одно время казалось, что, несмотря на наскоки журналистов и скептицизм членов Лондонского геологического общества, уже близок день, когда все естествоиспытатели Англии перейдут в лагерь гляциалистов. Один из английских коллег, Эдуард Форбс, писал Агассису: «Вы заставили всех здешних геологов буквально помешаться на ледниках, они теперь превращают добрую Англию в ледяной дом. Лишь один-два псевдоученых еще пытаются противиться Вашим взглядам, но эти потуги смешны и абсурдны». Однако жизнь показала, что Форбс нарисовал слишком оптимистическую картину. Прошло еще двадцать лет, прежде чем большинство британских геологов действительно приняли ледниковую теорию.

Почему же система представлений, ценность которой сейчас совершенно очевидна, тогда столкнулась со столь сильным противодействием? Ответить на это непросто. Скорее всего, здесь проявила себя природа людей, которые вообще не приемлют нового без сопротивления, особенно если это новое — идеи, противоречащие давно устоявшимся научным истинам или религиозным убеждениям. А ведь теория Агассиса бросала вызов и тем и другим. Причина в данном случае — не столько в религии, сколько в приверженности к старым догмам, которую нередко отождествляют с научной ортодоксальностью.

Одна из трудностей борьбы с дилловизмом

была связана с тем, что океан в прошлом действительно затоплял области суши и делал это не единожды, а многократно. Достаточно назвать такие свидетельства подобных событий, как ископаемые рыбы и раковины моллюсков, в изобилии встречающиеся в осадочных породах на всех континентах. Многие страницы «Основ геологии» Лайеля посвящены описанию морских трансгрессий, или вторжений океана, и выяснению их географических пределов. Поэтому нельзя не признать, что мысль о связи наносов (дрифта) с особо бурными течениями потопа выглядела как довольно естественное развитие одного из общеизвестных принципов геологии.

Среди самых первых причин, вызвавших сомнение в морском происхождении наносов, было почти полное отсутствие в них остатков морских организмов. Возможно, что, будь это отсутствие совсем полным, победа ледниковой теории наступила бы и раньше. Фактически, однако, наносы областей, которые Агассис и его сторонники считали древнеледниковыми, в ряде случаев все же содержали морские окаменелости. Подобные отложения — так называемый раковинный дрифт — в свое время немало омрачили торжество теоретиков ледникового периода. Правда, дрифт этого типа встречался довольно редко; он был известен лишь в береговых районах северо-востока США, на южном побережье Балтийского моря, в Шотландии и северной Англии и, как стало ясно много позже, на приморских низменностях арктической Евразии и Канады. Но как ни мало знали о раковинном дрифте в середине XIX века, сомнений в его существовании не было, и, следовательно, этот феномен нуждался в объяснении. Первым за него взялись дилловиялисты, которые уже тогда сделали раковинный дрифт излюбленным объектом своих исследований. Они обстоятельно изучали морскую фауну из валунных суглинков и песков и постоянно ссылались на нее, пытаясь доказать, что эти отложения разнесены не ледниками, а дрейфующими айсбергами.

Находки раковинного дрифта ставили в тупик даже самых стойких приверженцев ледниковой теории. Но так продолжалось только до 1865 года, когда шотландец по имени Джеймс Кроль сумел объяснить эти находки действием ледниковых покровов, надви-

гавшихся из районов, которые ныне заняты мелко-водными морями. При этом лед сдирал ил и раковины с морского дна, ассимилировал их, а затем отлагал в местах, где мы их находим теперь. Таким образом, по мысли Кролля, проделавшие такой путь раковины — это не что иное, как миниатюрные эрратические валуны, принесенные льдом с их подводной родины.

Другим фактором, тормозившим признание теории Агассиса, было общее невежество геологов в вопросах, касающихся ледников. Современники Агассиса и Бакленда с великим трудом воспринимали идеи о движении и геологической роли горных ледников и уж совсем не могли представить себе ледниковые покровы равнин, да еще столь огромные, какими они рисовались в смелой гипотезе первых гляциалистов. И их можно понять: ведь до исследований 1852 года никто, например, не знал, что современное оледенение Гренландии, ранее наблюдавшееся лишь в его краевых частях, имеет общую форму выпуклого щита. А уж что касается истинных размеров и формы ледникового покрова Антарктиды, то они были установлены еще позже, в последней четверти столетия (рис. 9). Но



9. Антарктический ледниковый покров. В девятнадцатом столетии в результате экспедиций в полярные области геологи получили материал для суждения об условиях ледниковых эпох по данным наблюдений в районах современного оледенения (по Дж. Гейки, 1894).

положение менялось: исследования полярных областей расширялись, маршруты геологов все чаще проходили через горы, и осведомленность о ледниках и их работе росла. Вместе с тем менялась и психология научной общественности; мысль о ледниковом покрове, подобном гренландскому или антарктическому и некогда покрывавшем Европу, которая еще недавно казалась нелепой, теперь стала представляться более приемлемой. Впрочем, и раньше гляциалистские идеи гораздо легче воспринимались геологами Швейцарии, Скандинавских стран и Шотландии, работавшими в горах, чем их коллегами, вся деятельность которых проходила на равнинах и приморских низменностях. Зато последней категории геологов казалось вполне естественным, когда рассматриваемые наносы объяснялись вторжениями океана и айсберговым разносом.

Дополнительным фактором, работавшим против ледниковой теории, была крайняя экстравагантность некоторых утверждений Агассиса. Фантазия и горячая увлеченность заносили Агассиса, и он нередко писал о гораздо более широком распространении древнеледниковых покровов, чем это следовало из геологических данных. Так, в докладе 1837 года Агассис утверждал, что ледниковый покров Европы доходил до Средиземного моря, хотя на его берегах никто не находил ледниковых отложений или иных следов деятельности льда. Понятно, что необоснованность подобных выводов компрометировала всю теорию, облегчая задачу скептиков, которые пытались опровергнуть и рациональную часть концепции Агассиса.

Со временем взгляды швейцарского натуралиста на географическое распространение древнего оледенения стали еще более крайними. Стоило ему, например, в 1865 году во время экспедиции в Южную Америку обнаружить следы прошлого разрастания ледников Анд, как тут же последовал вывод, что древнеледниковый покров, занимавший Европу и Северную Америку, погребал под собой и материк Южной Америки. Никаких доказательств этого вывода Агассис представить не мог, поэтому его публикация достигла лишь одной цели: вызвала ярость геологов. Лайель после того писал: «Агассис... просто помешался на оледенении... Подумать только: вся долина великой Амазонки, до самого ее устья, заполнялась льдом...

При этом он даже не пытается скрыть, что не видел там ни единого штрихованного валуна, ни одной обработанной льдом скалы». Хорошо хоть, что и в Великобритании, и в континентальной Европе к тому времени накопили достаточно данных, чтобы никто—исключая разве что лишь самых завзятых диллювиалистов—не сомневался в истинности ледниковой теории.

Пока в Европе бушевали научные страсти, сам Агассис отправился в Америку. Его поездка была организована по инициативе Чарлза Лайеля, который незадолго до того побывал в Соединенных Штатах, а теперь хотел, чтобы и его швейцарский коллега увидел Новый Свет собственными глазами. В сентябре 1846 года в порту Ливерпуля Лайель пожелал ему счастливого пути, будучи уверенным, что не пройдет и года, как они увидятся вновь.

После трудного плавания через океан и краткого захода в Галифакс судно Агассиса прибыло в Бостон. Агассис сразу поспешил на берег, горя нетерпением и здесь найти подтверждение своей теории. И он не ошибся. «Выскочив на берег,—писал он впоследствии,—я поспешил к высоткам, обрамляющим гавань... и немедленно встретился со знакомыми следами—полированными скалами, бороздами и царапинами, которые я столько раз видел в ледниковых районах Европы... Это убедило: здесь также работал великий ледниковый покров».

В Бостоне Агассис был тепло принят Джоном Эмори Ловеллом, который предложил ему остановиться в своем удобном доме на Пембертон-сквер. Как и многие до него, Ловелл очень скоро подпал под влияние обаятельной личности Агассиса. Будучи преуспевающим текстильным фабрикантом и членом правления Гарвардского университета, Ловелл оказался как раз тем человеком, который смог обеспечить выдающемуся ученому из Европы достойное место в Массачусетсе. Уже в начале следующего года в Гарварде была введена новая профессорская должность, предназначенная специально для Агассиса. Последний к тому времени начал испытывать финансовые трудности, так что предложение оказалось как нельзя кстати. Оно было с благодарностью принято, и Америка становится второй родиной Агассиса: он остается

здесь навсегда, вплоть до своей кончины в 1873 году.

Агассис много путешествовал по Новому Свету, и его радовало, что популярность ледниковой теории нередко явно опережала ее создателя. Его теория к тому времени была принята на вооружение многими американскими учеными. А еще в 1839 году, спустя всего лишь два года после оглашения Невшательского трактата, американский палеонтолог Тимоти Конрад опубликовал краткую статью, в которой писал: «Мистер Агассис связывает отшлифованные скалы и так называемые дилювиальные шрамы, известные в Швейцарии, с воздействием льда, точнее — включенных в лед песка и щебня, которые он влечет в ходе своего безостановочного движения. Я думаю, что так же следует объяснять и полированные поверхности скал западной части штата Нью-Йорк». Через два года, в 1841 году, Эдуард Хичкок, бывший тогда геологом штата Массачусетс, посвятил теории Агассиса свой приветственный адрес, обращенный к только что учрежденной Ассоциации американских геологов.

В общем, к середине 1860-х годов, через тридцать лет после знаменитого доклада Агассиса в Невшателе, ледниковая теория прочно утвердилась на обеих сторонах Атлантического океана. Причем она получила признание не только в странах Западной Европы и Америки, но и в огромной России, где ее успехи были связаны с именами Федора Богдановича Шмидта, Петра Алексеевича Кропоткина, а также профессоров Московского университета К. Ф. Рулье и Г. Е. Щуровского. Правда, отдельные выступления представителей оппозиции не прекращались еще долго. Одна из последних контратак дилювиализма состоялась в 1905 году, воплотившись в тысячестраничном трактате, который был опубликован эксцентричным эрудитом сэром Генри Ховартом. Тем не менее было вполне очевидно: никто не мог представить фактов, способных поколебать ледниковую теорию. Существование ледникового периода стало восприниматься как нечто само собой разумеющееся. Наступило время всерьез заняться изучением природы этого периода.

3. КАКОВА ЖЕ ОНА – ПРИРОДА ЛЕДНИКОВОГО ПЕРИОДА?

Обретя уверенность в реальности древних оледенений, геологи захотели узнать о них как можно больше. Подобно сыщикам, обследующим место преступления, они искали улики, которые позволили бы распутать клубок событий, имевших место тысячелетия назад. Но если в детективных романах все действие ограничивалось рамками одной комнаты или в редких случаях провинциальным английским поместьем, то для разгадки захватывающей геологической тайны надо было собрать доказательства, рассеянные по лику всей планеты. Таким образом, предстоял всемирный розыск.

Сам того не подозревая, Агассис выбрал удачный исторический момент для выдвижения своей теории. То была эпоха королевы Виктории, время процветания Британской империи, когда богатство, накопленное в результате сложения достижений промышленной революции с огромными ресурсами империи, делало возможным организовывать экспедиции в любые, даже самые отдаленные уголки мира.

Геологи викторианской эпохи имели и теоретические и практические мотивы для упорного поиска подходов к решению загадки ледникового периода. У них, как и у всех ученых, была естественная жажда нового, желание заполнить пробелы в той загадочной и недорисованной картине, которую на их глазах набросал Агассис. Но были и другие – более материальные – мотивы. Ведь к тому времени в развитых странах уже были созданы специальные геологические службы, в число задач которых входила научная оценка экономического потенциала малоосвоенных областей. Лучшим примером этого могут служить Соединенные Штаты, где в годы, последовавшие за Гражданской войной, геологи, вооруженные молотками и передвигающиеся на лошадях, сумели исследовать и закартировать весь Запад. Именно для этой цели специальным

актом конгресса, принятым в 1879 году, там была учреждена Геологическая служба.

Чтобы понять механизмы геологической деятельности ледников, экспедиции направлялись в горы. Они вели наблюдения за современными гляциальными процессами и за следами, оставленными древними оледенениями, что позволило проникнуть во многие секреты этой деятельности, понять способы формирования морен. Было установлено, что ледники образуются из снега в местах, где он накапливается в таком количестве, которое превышает летнее таяние; выяснилось, что тридцатиметровой толщины скопления снега бывает достаточно, чтобы в его основании возникали слои чистого льда, и что дальнейшее увеличение толщины снежно-ледяных масс ведет к тому, что они начинают медленное движение. Движущийся лед способен захватывать свободно лежащие обломки и мелкозем, а также отрывать и ассимилировать целые глыбы коренных пород. А валуны, песок и щебень, вмороженные в придонные слои движущегося льда, выполняют роль огромного напильника, который сглаживает, шлифует, а часто и царапает каменные поверхности, служащие ледниковым ложем.

Другим достижением раннего периода интенсивных гляциологических исследований было открытие закона, контролирующего размеры и скорости движения ледников. Это был закон баланса снега, или, точнее, твердых осадков, по которому для каждого типа климата могут быть характерны лишь вполне определенные, соответствующие ему размеры ледников. В самом деле, эти размеры зависят от количества ежегодно выпадающего снега и от того, какая его часть успевает растаять и испариться за теплые сезоны. По этому закону, изменения климата должны сопровождаться ростом или сокращением ледников — их изменениями, которые прекращаются с установлением нового баланса, или равновесия прихода и расхода льда.

Чего еще не понимали геологи того времени, так это того, что при фиксированном положении концов стационарных, или равновесных, ледников их лед отнюдь не прекращает своего движения вниз по склону. В верхних частях ледников, где приход снега превышает его расход на таяние, это движение ускоряется, а влекомый льдом обломочный материал не отла-

гается. В то же время в нижних частях, где таяние льда превышает приход снега, движение льда, наоборот, замедляется, и включенный в него материал постепенно вытаскивает и накапливается на поверхности ложа. При этом подо льдом формируются своеобразные толщи валунных суглинков и песков, которые почти всегда отличаются высокой плотностью, связанной с воздействием ледниковой нагрузки; эти толщи называют основной, или донной, мореной.

Как мы уже говорили, при потеплении климата края ледников отступают на новые — равновесные — рубежи. В случае горных ледников такие рубежи располагаются выше прежних, в случае ледниковых щитов они лежат ближе к их центрам. Нижние части ледниковых языков испытывают стагнацию, или мертвеют; их лед перестает двигаться и постепенно стает. При этом значительная часть валунов, песка и прочего материала, включенных в мертвый лед, высвобождается, образуя слои так называемой абляционной морены, которая в типичных случаях скапливается поверх основной, или донной. Другая часть обломочного материала выносится потоками талой воды, текущими по внутри- или приледниковым каналам, и отлагается в виде флювиогляциальных дельт и террас, или зандров.

Геологи викторианской эпохи уже умели определять пределы распространения древнеледниковых покровов, что они делали на основе данных о положении наиболее мощных скоплений морены. В этих скоплениях обычно представлены обе — основная и абляционная — фации моренных отложений, а сами они получили название конечных морен. Им также удалось выяснить, что в ряде случаев наносы, которые ранее именовались дрифтом, фактически представляют собой флювиогляциальные толщи, то есть продукты аккумулятивной деятельности потоков талых ледниковых вод.

Прошло немало времени, прежде чем геологи выяснили, что подобные потоки практически так же действовали и в глубине ледников, заполняя трещины, внутриледниковые туннели и каверны флювиогляциальным материалом, и что после стаяния ледниковых языков с пустотами, заполненными этим материалом, на земной поверхности остаются хаотические холмистые нагромождения неслоистых, а в ряде случаев и



10. Карта Т. К. Чемберлена – первая попытка показать Северную Америку в последнюю ледниковую эпоху (по Дж. Гейки, 1894).

слоистых отложений. Не приходится удивляться, что в прошлом такие отложения ставили исследователей, включая и Бакленда, в тупик.

Получив в свое распоряжение всю эту новую информацию о ледниках и ледниковых процессах, геологи смогли сравнительно быстро выяснить географию ледниковых отложений и форм рельефа, а затем и

составить карты древнеледниковых покровов. В частности, они установили, что в Северной Америке граница древнего оледенения маркирована конечноморенным валом с высотами до пятидесяти метров и протягивается от острова Лонг-Айленд на востоке до штата Вашингтон на западе (рис. 10). Они также выяснили, что к северу от этой границы ледниковые отложения представлены главным образом мореной, а к югу от нее — плащом флювиогляциальных галечников и песков.

Геологи научились также определять направления движения древних ледников по данным замера ориентировок шрамов и борозд, оставленных на поверхности лежа движущимся льдом. Эти ориентировки наносились на карты, которые — при достаточно большом числе замеров — могли дать полную и подробную картину движения древнеледниковых покровов на обширных площадях. Еще один способ достижения той же цели, разработанный в то время, состоял в восстановлении траекторий переноса эрратических валунов методом прослеживания их пути от пунктов, где они были найдены, назад к коренным выходам соответствующих пород. Глядя на такие карты, геолог мог легко «прочитать», по каким направлениям растекался лед древнеледниковых покровов.

Данная методика была применена не только в Северной Америке, но и в Европе, Азии, Южной Америке и Новой Зеландии. В результате этого уже в 1875 году появилась карта мира, отразившая историю великого оледенения на кульминационном этапе ледникового периода. Было выяснено, что общая площадь, на которую распространялись ледниковые покровы, составляла не менее сорока миллионов квадратных километров, то есть была примерно втрое больше их современной площади. Но древние оледенения понастоящему ярко проявились только в Северном полушарии, поэтому подобные осредненные цифры несколько искажают масштабы происшедших изменений. Если же рассмотреть одно Северное полушарие, то в нем одном древние ледники занимали до двадцати шести миллионов квадратных километров, превосходя современное оледенение в тринадцать раз. В оледенении Южного полушария доминировал, как он доминирует и теперь, Антарктический ледниковый покров;

его размеры также увеличивались, но не очень сильно, так как края этого покрова не могли выдвинуться за пределы континентального шельфа. В остальных областях Южного полушария появлялись лишь ледниковые шапки скромных размеров, они покрывали горные районы Южных Анд, юго-восточной Австралии, Тасмании и Южного острова Новой Зеландии.

К удивлению геологов, скоро стали известны факты, судя по которым великие ледниковые покровы Северного полушария имели не только южные, но и северные границы. Таким образом выяснилась ошибочность точки зрения Агассиса, по которой оледенение Северного полушария имело форму единого ледникового покрова, распространявшегося на все северные материки из центра, совпадавшего с Северным полюсом. Вместо него были реконструированы несколько отдельных ледниковых щитов, каждый из которых имел свой собственный центр растекания льда. Например, центр Лаврентьевского ледникового щита, появившегося на палеогеографической карте Северной Америки, находился в районе Гудзонова залива, всего лишь на 60° с.ш. Из этого центра лед двигался не только на юг, восток и запад, но и на север, в сторону Северного Ледовитого океана. Последний же в ледниковый период покрывался сравнительно тонкой пленкой морского льда или, как доказывают некоторые гляциологи, плавучим шельфовым ледником, похожим на современный ледник Росса в Антарктиде.

Некоторые геологи очень рано поняли, что если теория Агассиса верна, то на формирование наземных ледниковых покровов должна была пойти огромная масса воды и что ее источником мог быть только Мировой океан. Еще в 1841 году вышла примечательная работа шотландского геолога Чарлза Макларена, в которой он отметил: «В связи с теорией Агассиса возникает вопрос, которого сам он не коснулся. Если допустить, что вся огромная область между 35-й параллелью и Северным полюсом одевалась покровом льда, толщина которого позволяла ему перекрыть горы Юры с их высотами до 5000 французских футов, или одной английской мили, то становится очевидным, что изъятие такого количества воды из океана не могло не оказать существенного влияния на его глубину». Опираясь на те скудные

данные, которые тогда были доступны, Макларен под- считал, что «...потери воды, вызванные формированием упомянутого покрова льда, должны были приводить к снижению океанского уровня на 800 футов».

Тогда этот вывод казался чистой фантазией, однако уже к 1868 году появилось достаточно данных, чтобы дать и сравнительно точную оценку «ледникового» падения уровня океана. Поскольку границы ледниковых покровов были ясно показаны на картах, то для ее получения не хватало лишь одного — надежных сведений о средней толщине ледниковых покровов. Чтобы эти сведения были, геологи начали сбор данных о следах покровного оледенения в горах. Их рассуждения были просты: если вершина горы покрывалась льдом, значит, толщина последнего здесь была как минимум равна высоте горы. Более точную информацию могли дать горы, которые, подобно горе Мо- наднок в штате Нью-Гэмпшир, затоплялись льдом лишь частично, так что их вершины оставались свободны от оледенения и выступали над поверхностью ледникового покрова, образуя скалистые острова в море льда. Сейчас, когда льда уже нет, его прежний уровень в таких местах можно определить по границе, на которой резко меняется облик горных склонов. Ниже этой границы все скальные выходы выровнены и сглажены, выше ее они имеют неровную, угловатую форму. Так что толщину древнего льда здесь можно восстановить просто по высоте указанной границы над окружающей местностью.

Используя подобные расчеты, геологи смогли установить, что средняя толщина материковых ледниковых покровов Северного полушария была свыше полутора километров. Отсюда можно было дать и первую грубую оценку объема льда этих покровов. Первым, кто сделал соответствующий расчет, был геолог из Кливленда Чарлз Уитлси. В статье, увидевшей свет в 1868 году, он так описал свою задачу:

«... показать, что в ледниковый период неизбежно происходило падение уровня океана... Накопление льда на суше могло идти только за счет осадков, которые выпадали в виде снега и дождя, а затем смерзались. Подлинный источник этих осадков — испарение с открытой поверхности океана. Конечно, озера, реки, болота и низменности тоже поставляли пар в облака, но они

сами пополняли свои запасы влаги за счет океана... И если осадки, выпадавшие на поверхность суши, переставали возвращаться назад, то объем общего водного резервуара уменьшался». Уитлси рассчитал, что «...в период самого сильного похолодания падение уровня океана должно было составлять не менее 350 или 400 футов» (то есть 100–120 метров).

Падение уровня океана, предположенное Уитлси (и подтвержденное новейшими исследованиями), было достаточным, чтобы вызвать значительные изменения в географии морских берегов земного шара. Сам Уитлси писал: «По мере регрессии океана менялись и очертания континентов; острова, входившие в состав архипелагов, подобных Вест-Индскому, объединялись, образуя новые острова, не столь многочисленные, но более крупные; в океане появлялись новые участки суши, а обширные отмели выходили на поверхность и причленились к материкам». Позднейшие работы археологов и геологов показали, что среди участков суши, отвоёвывавшихся в ледниковый период у океана, был и так называемый Берингийский «мост», позволивший охотничьим племенам палеолита проникнуть из Азии на материк Северной Америки.

Вскоре затем в Шотландии и Скандинавии были обнаружены затопленные волноприбойные клифы и другие береговые формы, подтверждающие вывод о «ледниковом» снижении уровня океана. Но в некоторых местах геологи натолкнулись и на совсем другие образования, которые свидетельствовали: во время отступления льда уровень океана был выше современного. Особенно ясные следы таких уровней – поднятые террасы и береговые линии – были встречены на Скандинавском полуострове; в горах его центральной части отложения с морскими раковинами сейчас находятся на высотах, почти достигающих трехсот метров. Правильная интерпретация поднятых морских отложений этого типа была впервые дана шотландским геологом Томасом Джемисоном, который в 1865 году писал:

«В Скандинавии и Северной Америке, а также в Шотландии есть данные о погружении суши, которым сопровождалось покровное оледенение; странно сказать, но высоты, на которых в названных районах находят морскую фауну, практически везде одинаковы. Я пришел к выводу, что данное погружение каким-то

образом связано с той огромной нагрузкой, которую испытывала покрывавшаяся льдом суша». Далее Джемисон поделился своими мыслями о возможных причинах такого погружения. Согласно его предположению, под верхней, жесткой частью земной коры должны лежать слои расплавленных пород, который течет под давлением.

Впоследствии эти оригинальные и смелые выводы получили подтверждение в данных геофизических измерений. Как и предполагал Джемисон, верхние слои земной коры действительно плавают на подстилающем их более текучем материале. И когда на поверхности Земли формируются массы льда, земная кора испытывает погружение — точно так же, как оседает лодка при увеличении числа ее пассажиров.

Таким образом, поднятые береговые линии, наблюдаемые в областях древних оледенений, могут повествовать интересную историю вторжений океана, или, как говорят геологи, морских трансгрессий. Пока продолжался сам ледниковый период, происходило глобальное падение уровня океана, которое заставило все береговые линии сместиться более чем на сто метров вниз. В то же время тяжесть ледниковых покровов вызывала местное прогибание подстилающих участков земной коры. А убывание оледенения сопровождалось реакцией двух разных типов: *немедленным* повышением уровня океана и *постепенным* поднятием земной поверхности. Таким образом, при дегляциации Новой Англии, Скандинавии и других областей древнего оледенения на освобождавшиеся от льда площади немедленно наступали (трансгрессировали) моря. Однако со временем земная кора этих областей поднималась до своей первоначальной высоты, вызывая там кажущееся снижение уровня (регрессию) океана. В некоторых районах поднятие земной коры, связанное с дегляциацией, все еще продолжается. Например, в районе озера Верхнее (Канада) это поднятие и сейчас идет со скоростью тридцать пять—сорок сантиметров в столетие. А вот за пределами древнеледниковых областей история, которую могут рассказать береговые линии, совсем не так замысловата: там эти линии отражают лишь глобальное понижение и повышение уровня океана, происходившие в ответ на изъятие воды из главного резервуара Земли и возвращение ее обратно.

Пока одни геологи распутывали загадки в древне-ледниковых областях, другие вели исследования на площадях, лежавших за их пределами. И их тоже ждали открытия. Они, в частности, выяснили, что во время похолодания во внеледниковых областях Европы, Азии и Северной Америки сформировался плащ своеобразных пылеватых (алевритовых) отложений, которые отличаются гомогенностью и желтоватым цветом. Эти отложения, как оказалось, покрывают общую площадь более двух с половиной миллионов квадратных километров. Их стали называть лёссами, заимствовав народный термин, который был в ходу у немецких крестьян. В некоторых районах толщина лёссового плаща превышала три метра, в других — была значительно меньше, а сам плащ становился прерывистым, пятнистым.

Лёссовые отложения впервые заинтересовали геологов еще в начале XIX века, однако их происхождение долго оставалось неразгаданным. Тот факт, что они состояли из очень мелких, хорошо сортированных зерен алевритовой размерности, наводил на мысль о связи лёссов с динамичными водными массами. Однако в них отсутствовала горизонтальная или косая слоистость, характерная для морских и озерных осадков. Отсутствовали в лёссах и остатки морской фауны. Удовлетворительное объяснение их происхождения появилось только в 1870 году. Его дал немецкий геолог Фердинанд фон Рихтгофен, который не только опубликовал свою теорию, но и потратил много сил на ее защиту от нападок скептиков.

«Совершенно очевидно, — писал Рихтгофен, — что ни одно из известных свойств лёссов не может быть объяснено существующими теориями, в том числе и гипотезой их водного происхождения. Ни моря, ни озера, ни реки никак не могли аккумулировать эти осадки на горных склонах, расположенных на высотах до 8000 футов (2,4 км). Ни отсутствие слоистости, ...ни характерная для лёссов столбчатая отдельность, ни беспорядочность распределения и угловатость формы зерен кварца, ...ни, наконец, включения наземных моллюсков и костей наземных млекопитающих также никак не объяснишь с точки зрения этой (водной) концепции.

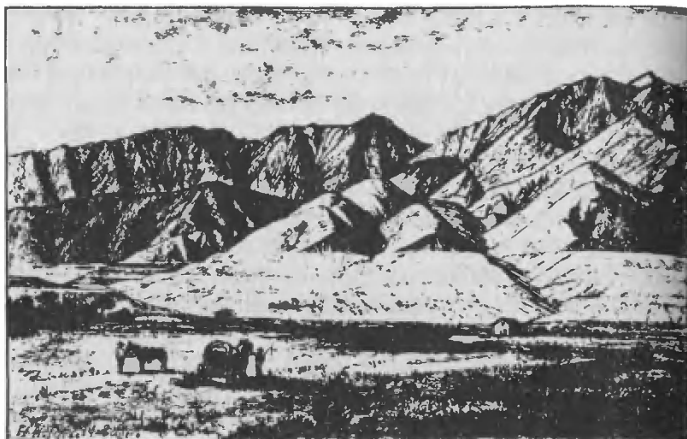
Существует лишь один большой класс процессов,

который может быть привлечен для интерпретации материала лёссов, отличающегося исключительной однородностью и образующего покровы на площадях во многие сотни квадратных километров... Эти процессы — эоловые: тот агент, который мог выносить пыль из сухих мест и отлагать ее на покрытых растительностью поверхностях, — это ветер. Причем по мере накопления новых порций эолового материала на лёссах может продолжаться развитие почв».

Представление об эоловом происхождении лёссовых отложений получило всеобщее признание. Тем самым геологи внесли дополнительную ясность в интригующую картину природных условий ледникового периода, еще одна деталь этой картины встала на свое место. Таяние льда и сток с южных краев ледниковых покровов вели к выносу огромных масс пылеватых продуктов ледникового истирания горных пород — тонкозернистых песков и алевритов. Вместе с галечниками и песками они накапливались в ледниковых предполях, где оставались незакрепленными, так как не фиксировались ни многолетним снегом, ни растительным покровом. Пылеватый материал беспрепятственно выносился из приледниковой зоны сильными ветрами, которые периодически срывались с ледникового покрова. Идеи Рихтгофена были подтверждены наблюдениями на Аляске, где подобные процессы действуют и сейчас: летнее таяние ледников и сток талых вод сопровождаются выносом масс алеврита, которые отлагаются в приледниковой зоне, быстро высыхают, выдуваются ветрами и отлагаются на степных площадях; буквально на глазах наблюдателей там формируются плодородные лёссы.

Тонкозернистые осадки, вынесенные потоками талых ледниковых вод с территории Канады, оказались бесценным подарком для фермеров Среднего Запада США. Ледниковые ветры развеивали и переносили эти осадки на юг, где они стали основой богатых, легко культивируемых и хорошо дренированных почв американского кукурузного пояса.

На американском Западе геологи нашли доказательства того, что в ледниковом периоде климат ныне пустынных земель Юты, Невады, Аризоны и южной части Калифорнии был значительно более влажным. Вот дневниковая запись инженера-топографа Говарда



11. Береговые линии древнего озера Бонневилл (Бонвилл) в штате Юта. Террасы у подножия гор в окрестностях Уэллсвилла были сформированы во время оледенения в береговой зоне озера. После исчезновения ледниковых покровов климат области преобразовался из влажного в засушливый и уровень озера резко снизился. Его единственным останком является Большое Солёное озеро (по Г. К. Гилберту, 1890).

Стенсбери, занимавшегося съёмкой равнинных побережий Большого Солёного озера в 1852 году:

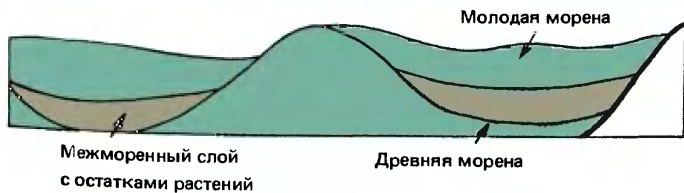
«На склоне хребта, примыкающего к береговой равнине, я насчитал тринадцать отчетливых бенчей, или волноприбойных площадок; очевидно, они выработаны древним озером, уровень которого неравномерно снижался, надолго задерживаясь на высоте каждого бенча. Самый высокий бенч сейчас на 200 футов (60 м) возвышается над днищем озерной котловины... Если это предположение верно — а все как будто бы говорит в пользу его правильности, — то здесь располагалось внутреннее море, простиравшееся на сотни миль, а изолированные горы, высящиеся на западе и юго-западе прибрежной равнины, явно становились большими островами, похожими на острова, которые сейчас выступают из воды остаточного озера».

Дальнейшие исследования подтвердили выводы Стенсбери. В 1870-х годах сотрудник Геологической службы США Гроув Гилберт доказал, что Большое Солёное озеро — всего лишь остаток древнего и гораздо

более крупного бассейна, который он назвал озером Бонневилл (рис. 11). По своим размерам оно превосходило любое из современных Великих озер Северной Америки, а его максимум приходился на время великого оледенения. Тем самым было доказано, что на Западе США климат ледникового времени был не только холоднее, но и много влажнее современного.

Уже в самом начале эры исследований ледникового периода геологи натолкнулись на факты, свидетельствующие о многократности древних оледенений. Так, Эдуард Коломб, работавший в Вогезах (Франция), еще в 1848 году сообщил о находке в одном из обнажений двух слоев морены. Однако в этом случае моренные слои разделялись лишь толщиной речных отложений, образование которых можно было толковать по-разному: и как свидетельство небольшого и кратковременного отступления ледникового языка, и как указание на длительный перерыв в оледенении. В 1850-х годах подобные находки были сделаны также в Уэлсе, Шотландии и Швейцарии, однако и они не поколебали господства консервативных взглядов: в межморенных слоях большинство геологов по-прежнему видели следы лишь мелких колебаний климата, осложнявших течение единого ледникового периода.

Однако в 1863 году Арчибальд Гейки в своей работе, посвященной ледниковым отложениям Шотландии, доказал, что растительные остатки, залегающие между моренными толщами, представляют собой подлинное свидетельство длительных теплых интервалов, которые разделяли разные ледниковые эпохи (рис. 12).

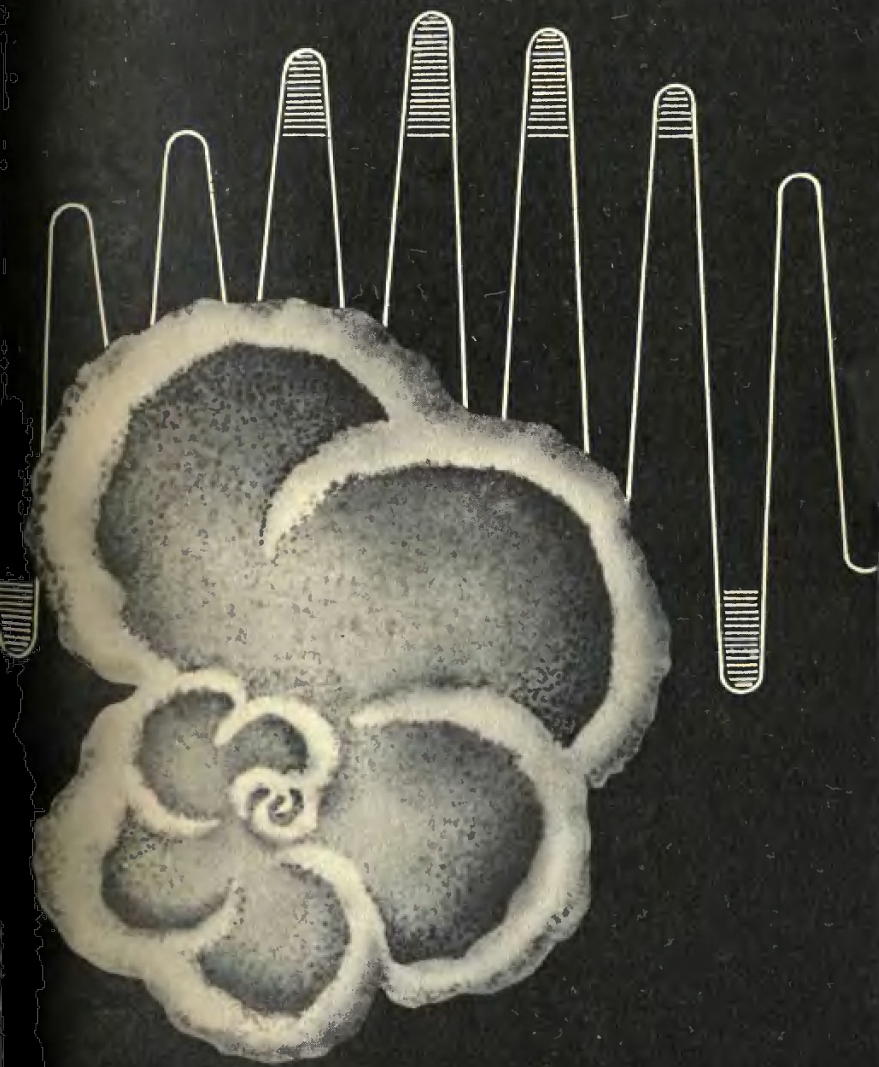


12. Разновозрастные морены в Шотландии. Обнажение в железнодорожной выемке у Коуден-Бёрн, в котором выходят два моренных горизонта и разделяющий их слой торфа с окаменелостями. Подобные факты использовались геологами XIX века для доказательства неоднократности древних оледенений (по Дж. Гейки, 1894).

А в 1873 году директор Геологической службы штата Иллинойс Амос Уорзен смог продемонстрировать гумусированный почвенный горизонт, успевший развиться на нижней морене прежде, чем ее перекрыла верхняя. И поскольку для образования почвы подобного рода необходимы и достаточно теплый климат, и обильная растительность, ее присутствие — сильный аргумент в пользу существования не только холодных ледниковых эпох, но и теплых межледниковых. Прошло еще несколько лет, и американцы Джон Ньюберри и У. Дж. Макги подвели черту под спорами в США, показав, что на Среднем Западе между двумя моренными горизонтами заключены остатки — стволы и корни — древнего леса. В те же годы доказательства неоднократности оледенений были найдены также в Западной Европе и в европейской части России. В 1870-е годы два горизонта морены, отделенные друг от друга слоем лёсса, были обнаружены в районе Полтавы. Еще через десятилетие геологические доказательства двух оледенений и разделявшего их теплого этапа были представлены русскими геологами А. П. Павловым и Н. Н. Боголюбовым для ряда районов Центральной России, включая Подмоскowie, Приалатырский край и бассейн Оки. На межледниковом этапе климат, по словам А. Н. Криштофовича, «был умереннее, чем современный, и, вероятно, влажнее».

Можно считать, что в 1875 году начальный период изучения природы ледниковых эпох был завершен. К этому времени были составлены карты древнеледниковых покровов; определены изменения уровня Мирового океана; выяснено, какие области имели холодный и влажный климат, какие — холодный и сухой. Науке стало известно, что в истории Земли было не единственное оледенение, а целая череда ледниковых эпох, отделенных друг от друга теплыми межледниковьями, климатические условия которых были близки к современным. Теперь, во всеоружии этих знаний, геологи были готовы направить свое внимание от сбора фактов к разработке теории.

Часть II
В ПОИСКАХ
ПРИЧИНЫ



4. СУТЬ ПРОБЛЕМЫ

Итак, подтвердив и развив теорию Агассиса, геология оказалась лицом к лицу с проблемой причин великих оледенений. В связи с этим особое значение приобрели вопросы: что вызывало рост ледниковых покровов прошлого? Почему, распространившись почти на треть площади земной суши, они вдруг начинали отступать? И самый интригующий из них — грозит ли человечеству новое оледенение?

Появилось множество теорий. Некоторые из них первоначально казались правдоподобными, но затем опровергались новыми данными и отбрасывались. Другие не поддавались проверке и потому исключались из рассмотрения, получив популярный в Шотландии приговор: «не доказано».

Безуспешность многих попыток найти ключи к тайне ледникового периода объяснялась узостью подхода к этой проблеме; гляциологи и геологи часто стремились решить ее, занимаясь лишь изменениями самих ледниковых покровов. Им не хватало понимания того, что оледенение — только одно из звеньев глобальной климатической системы, а другими ее звеньями являются такие динамичные элементы планеты, как океан и атмосфера. Эти три элемента тесно взаимодействуют друг с другом, и система «оледенение — океан — атмосфера» работает как единая гигантская машина. Нарушение в одной части этой системы вызывает ответные изменения в других ее частях.

Энергия, которая поддерживает работу климатической машины, скажем, обеспечивает движение воздушных масс или морских течений, поступает от Солнца. Солнечную энергию получает каждый элементарный объем атмосферы, каждый пункт земной поверхности. Часть этой энергии возвращается в космос, что происходит в результате ее отражения облаками, частицами атмосферной пыли, поверхностью океана и суши.

Остаток энергии поглощается, а затем вновь излучается в космическое пространство. Таким образом, каждая часть климатической системы ежедневно усваивает определенное количество энергии, получая его от Солнца, и расходует энергию через отражение и излучение.

Точное равновесие между приходом и расходом солнечной энергии наблюдается только на двух параллелях: 40° с. ш. и 40° ю. ш. На всех других широтах радиационный баланс оказывается неравновесным, и, следовательно, земная поверхность там испытывает либо нагревание, либо охлаждение. Вблизи экватора этот баланс положительный, что ведет к повышению температуры; поверхности суши и океана в экваториальной зоне поглощают много радиационного тепла, поскольку солнце в ней стоит высоко и продолжительность его сияния велика. В приполярных районах, наоборот, радиационный баланс отрицательный и энергия постоянно теряется: снежно-ледяной покров этих районов обладает большой отражательной способностью, а Солнце стоит низко, и его лучи падают на Землю под малыми углами. И если бы температурный режим нашей планеты зависел только от радиации и ее отражения, то полярные области становились бы с каждым годом холоднее, а экваториальные и тропические — жарче. Этого, однако, не происходит, так как существуют воздушные и морские течения, которые переносят тепло от экватора к полюсам. Представление о механизмах переноса тепла дают пассаты и тропические ураганы, а также такие мощные течения, как Гольфстрим в Атлантическом и Куроисио в Тихом океанах. В то же время другие течения, следующие вдоль восточных границ Северной Атлантики и северной части Тихого океана, несут холодную воду с севера на юг, в сторону экватора.

Любая серьезная теория оледенения должна непременно учитывать, что изменения больших ледниковых покровов неизбежно сказывались на всех остальных элементах климатической системы. Например, увеличение размеров ледниковых покровов означало, что определенная масса воды «изымалась» из океана, переносилась в виде атмосферного пара в район оледенения, а затем отлагалась там в виде снега. Таким образом, изменения объема ледников Земли были нераз-

рывно связаны с колебаниями уровня океана. Кроме того, изменения в площадях льда и снега не могли не влиять на радиационный баланс планеты. В самом деле, когда ледниковые покровы росли, росли и потери тепла, связанные с отражением поступающей на Землю радиации, а значит, снижались глобальные температуры, создавая условия для дальнейшего усиления оледенения. И наоборот, когда ледниковые покровы сокращались, эти температуры должны были повышаться, вызывая еще более сильное таяние льдов. Такого рода положительным обратным связям в системе «оледенение — радиационный баланс» придается важнейшее значение в целом ряде теорий оледенения, поскольку они раскрывают природный механизм, с помощью которого могут усиливаться небольшие начальные изменения в размерах ледниковых покровов.

Главная цель большинства теорий как раз и состоит в том, чтобы найти причину этого начального изменения. С 1837 года, то есть со времени Невшательского трактата Агассиса, для его объяснения были предложены десятки теорий. В числе первых из них была теория, предполагавшая, что ледниковый период явился следствием сокращения энергии, поступавшей на Землю от Солнца. И в этом, конечно, был свой резон: раз климатическая машина питается солнечной энергией, то достаточно сильное уменьшение инсоляции действительно могло вызвать похолодание и оледенение. Беда лишь в том, что никакими данными, подтверждающими снижение солнечной радиации в ледниковый период, наука не располагает. Поэтому аргументы, подтверждающие солярную теорию, носят в лучшем случае лишь косвенный характер. Правда, наблюдения, выполненные за последнее столетие, говорят о существовании слабой корреляции между изменениями в температурах и атмосферных осадках, с одной стороны, и числом солнечных пятен — с другой. Но к сожалению, никто пока не доказал, что вместе с количеством солнечных пятен изменяется и поступление солнечной энергии. Другой аргумент, также основанный на косвенных соображениях, сводится к тому, что незначительные подвижки горных ледников, отмеченные в последнее тысячелетие, вроде бы происходили параллельно с изменениями солнечной активности. Эти колебания ледников были невелики, но они все

же позволяют говорить о температурных изменениях, имевших размах в 1 или 2°С. Однако если бы кому-то и удалось доказать, что колебания климата определялись вариациями в солнечной активности, подтвердив это данными наблюдений, выполненных в последние сто или даже тысячу лет, то это бы еще не значило, что доказана и солярная обусловленность древнего оледенения. Большинство специалистов считают, что настоящая проверка солярной теории будет возможна лишь тогда, когда мы научимся рассчитывать изменения интенсивности солнечной радиации во времени. А пока это не сделано, идея о причинной связи между оледенениями и указанными изменениями будет пребывать в состоянии неопределенности, то есть оставаться ни доказанной, ни отвергнутой.

Другая теория предполагает, что климатические изменения, приводившие к оледенениям Земли, были обусловлены неравномерным распределением частиц пыли в космическом пространстве. По одному ее варианту, тенденция к похолоданию устанавливалась тогда, когда Земля проходила через области с повышенной концентрацией космической пыли и значительная часть энергии солнечной радиации рассеивалась этой пылью. По другому варианту той же теории, эффект прохождения солнечной системы через пылевое облако был как раз обратным: пыль в огромных количествах попадала на Солнце, чем усиливалась яркость его свечения и повышалась температура на Земле. Совершенно ясно, что к серьезному рассмотрению «теории космической пыли» можно будет приступить не раньше, чем удастся примирить эти два ее варианта. И если даже такое примирение будет достигнуто, перед исследователями встанет другое, еще более серьезное препятствие — невозможность конкретной проверки этой теории. Ведь астрономия до сих пор не знает ответа на вопрос о том, как менялась концентрация космической пыли между Землей и Солнцем на протяжении геологической истории. Будь в нашем распоряжении хронология изменений этой концентрации, ее можно было бы сопоставить с хронологией оледенений. И только в случае хорошей увязки обоих «календарей» мы могли бы с чистой совестью заключить, что данная теория получила надежное подтверждение.

Еще одна теория использует эффекты изменений концентрации углекислого газа в атмосфере. Содержание этого газа очень невелико, оно составляет лишь около 0,033% массы атмосферы. Тем не менее, судя по данным исследований, он оказывает весьма важное влияние на глобальный климат. Все дело в особых свойствах углекислого газа: будучи сравнительно прозрачным для коротковолновой радиации, поступающей от Солнца, он в то же время непрозрачен для длинноволнового излучения, направленного от Земли в космос. По этой причине вариации в количестве атмосферного CO_2 могут вызывать существенные изменения теплового баланса Земли: с ростом концентрации этого газа атмосфера по своим свойствам все более приближается к стеклянной крыше оранжереи, которая, как известно, обеспечивает нагрев оранжерейного воздуха путем «улавливания» приходящей лучистой энергии.

По убеждению многих ученых, достаточно большое снижение уровня концентрации углекислого газа в атмосфере могло стать причиной разрастания ледниковых покровов. Однако возникает вопрос: почему этот уровень снижался? Очевидно, что до тех пор, пока не будет объяснено, как и почему эта концентрация менялась на разных этапах истории Земли, и в частности почему она оказалась низкой именно тогда, когда происходили оледенения, данная теория должна оставаться в списке тех идей, которые кажутся правдоподобными, но пока не поддаются проверке.

Одна из самых драматичных теорий древнего оледенения исходит из предположения, что начала разрастания ледниковых покровов приходятся на эпохи резких учащений вулканических извержений взрывного типа. При таком усилении вулканизма атмосфера засорялась тонкими продуктами извержений, которые отражали лучистую энергию Солнца в космос, вызывая похолодания климата.

Наблюдения, проведенные сразу после мощных вулканических извержений, подтвердили, что эта теория имеет вполне достоверную основу. Так, в 1883 г. при взрыве вулкана Кракатау в Зондском проливе, уничтожившем большую часть одноименного острова, в атмосферу на высоту до восьмидесяти километров было выброшено такое грандиозное количество пеп-

ла, что связанные с ним необычайно красные закаты повсеместно отмечались на протяжении двух лет. Причем, судя по данным тщательных измерений, рост вулканогенного запыления атмосферы ощутимо снижал среднюю температуру планеты. Климатические условия пришли в норму только после того, как пепел осел и атмосфера снова стала чистой. Однако если допустить, что повторяемость подобных извержений повышалась, то температурные эффекты каждого из них могли суммироваться, и — как знать? — не срабатывал ли при этом эффект снежного кома, превращая череду отдельных похолоданий в глубокий и устойчивый холод ледниковой эпохи?

Весьма важно, что прослойки вулканической пыли могли сохраняться в погребенных почвах, в толщах льда существующих ледников, в слоях донных осадков озер и океана, образованных во время извержений. Ведь именно благодаря этому появляется возможность проверить данную теорию путем сравнения хронологии ледниковых климатов с датированными разрезами, содержащими включения вулканического материала. Однако на практике пока еще никому не удалось провести такую проверку: не хватает точности в определениях возраста слоев, недостаточно обширны области, в которых ведутся исследования и сопоставления.

Согласно еще одной теории, разработанной в XIX веке Чарлзом Лайелем, причиной оледенений были вертикальные движения земной коры. Эта теория учитывала, что общий подъем материков должен был вызывать снижение температур, поскольку общеизвестно, что с увеличением высоты атмосфера становится холоднее. Более детальный вариант данной теории был изложен в 1894 году американским геологом Джеймсом Дэна, по идее которого глобальные поднятия охватывали не только области суши, но и некоторые участки морского дна. В результате возникала среди прочего «...новая суша или полоса мелководья, которая проходила вдоль южной границы Норвежского моря и соединяла Скандинавию с Гренландией, так что арктические области оказывались отрезаны от того притока тепла, который ныне поступает в них с Гольфстримом. С другой стороны, ограничение сферы действия последнего лишь средними широтами Северной

Атлантики должно было приводить к концентрации тепла в этой части океана, к ее общему разогреву и росту связанных с ней атмосферных осадков».

Однако эта теория вызвала серьезные возражения шотландского геолога Джеймса Гейки, брата Арчибальда Гейки; еще в 1874 году он указал на нереалистичность гипотезы, предполагающей столь «внутренние осцилляции земной коры за такое короткое время. Нелегко представить себе воздымания коры, которые бы охватывали всю сушу Северного полушария, но эти трудности должны еще более возрасти, как только мы возьмемся за объяснение ледниковых явлений и Южного полушария». Все данные, собранные в последующие десятилетия, только подтверждают обоснованность отрицательной реакции Дж. Гейки. И уж у нас-то тем более нет оснований для защиты теории Лайеля — Дэна.

Последняя группа теорий выдвинута сравнительно недавно. Их авторы едины в одном: все они пытались объяснить ледниковые эпохи, выделив и рассмотрев отдельные элементы климатической системы, которые они считали ключевыми. Наибольшую известность среди них, пожалуй, приобрела теория, предложенная в 1964 году новозеландским ученым Алексом Уилсоном. По идее Уилсона, первопричиной похолоданий, ввергавших мир в ледниковые эпохи, были внезапные спуски крупных частей Антарктического ледникового покрова в океан. Если традиционные схемы предполагают, что те массы снега и льда, которые накапливаются на поверхности этого покрова и медленно стекают к его периферии, ежегодно компенсируются откалыванием айсбергов, то, по теории Уилсона, приход и расход льда могут быть и совсем не сбалансированными. Уилсон допускал, что в истории Антарктического ледникового покрова чередуются длительные периоды накопления его массы с кратковременными этапами разгрузки льда в океан. При этом само увеличение массы льда, в ходе которого толщина ледникового покрова растет, его придонные части подвергаются таянию и под ними образуется прослойка воды, как раз и оказывается причиной последующего сброса, или ледникового сёрджа. Уже довольно давно известно, что внезапные, периодически повторяющиеся подвижки-пульсации, во многом похожие на

эти сёрджи, характерны и для некоторых горных ледников, так что Уилсон, по существу, только распространил на Антарктиду идею, которую он заимствовал из горной гляциологии. Климатические эффекты антарктических сёрджей, вероятно, были бы действительно очень большими, ведь в результате каждого из них окружающий океан покрывался бы толстым слоем плавучего льда — циркумантарктическим шельфовым ледником со свойственной ему высокой отражательной способностью, или альбедо. Так что совсем не исключено, что изменения в тепловом балансе, которые последовали бы за появлением такого плавучего ледника, могли стать причиной ледниковой эпохи.

Но, к разочарованию многих исследователей, яркая теория Уилсона до сих пор не нашла фактического подтверждения. В самом деле, если такие сёрджи действительно имели место, то они неизбежно вызывали бы драматические повышения уровня океана. И тогда выходит, что каждой ледниковой эпохе должно было предшествовать внезапное повышение этого уровня. Однако, увы, никаких следов подобных событий не обнаружено. Скорее наоборот: инициация каждого нового оледенения совпадала не с повышением, а с началом этапа снижения уровня океана, о чем мы уже говорили в главе 3. Кроме того, можно ожидать, что после таяния таких огромных шельфовых ледников на дне океана оставались бы какие-то специфические отложения. И тот факт, что они никем не найдены, также заметно снижает доверие к этой теории.

Вторая теория данной группы была предложена в 1956 году двумя сотрудниками Ламонтской геологической обсерватории Колумбийского университета Морисом Юингом и Уильямом Донном. По их мнению, современные температурные условия Арктики вполне благоприятны для развития покровного оледенения, и если оно не возникает, то только потому, что для этого не хватает осадков. Отсюда один из главных тезисов теории: решающее условие оледенения Арктики — это усиление притока несущих влагу воздушных масс и рост интенсивности снегопадов. А с расширением площадей снега и льда должен включаться и механизм самопроизвольного охлаждения, связанный с усилением отражательной способности зем-

ной поверхности. Но что же это за фактор, который способен повысить влажность Арктики и стать причиной общей тенденции, или тренда, к похолоданию?

Ответ на этот вопрос составляет самую соль теории Юинга—Донна, он—в их идее, что для начала арктического оледенения необходимо лишь одно: чтобы Северный Ледовитый океан хотя бы на короткое время освободился от ледяного покрова и открылся для притока теплой воды из Северной Атлантики. При отсутствии в покрове морских льдов этот океан должен был становиться мощным испарителем, воздух над ним—«заряжаться» водяным паром, а интенсивность снегопадов над окружающей сушей—резко возрастать. Остальное довершается взаимодействиями в системе «оледенение—радиационный баланс», которые усиливают похолодание и доводят этот тренд до установления условий ледниковой эпохи. Что же касается дегляциации, то, по Юингу и Донну, она начиналась после того, как указанное похолодание достигало точки, на которой Северный Ледовитый океан вновь замерзал. Потеряв главный источник атмосферного питания, ледниковые покровы должны были убывать, уровень океана—повышаться, а ветви теплого Северо-Атлантического течения—прорываться в Арктику и растапливать ее морские льды.

Если верить этой изобретательной теории, то природные климатические циклы прошлого, в которых теплые межледниковья чередовались с эпохами оледенений, возникали без вмешательства каких-либо внешних сил и были чистым результатом динамических взаимодействий внутри системы «оледенение—океан—атмосфера». Теория Юинга—Донна в принципе поддается проверке, так как ею предсказывается определенная последовательность событий, которые вполне могли оставить материальные следы в разрезах глубоководных осадков Северного Ледовитого океана. Так, вполне очевидно, что в слоях, сформированных в самом начале ледниковой эпохи, должны были бы содержаться остатки морской фауны, приспособленной к жизни в условиях хорошей освещенности. Но вот тут-то и наступает разочарование: такой фауны в этом океане не найдено. Наоборот, по данным комплексного изучения донных осадков, за последние миллионы

лет он ни разу не освобождался от покрова морских льдов.

Остальные теории, базирующиеся на внутренних свойствах климатической системы, анализировать еще труднее, чем теории Уилсона и Юинга – Донна. Среди них достойна упоминания так называемая стохастическая теория, которая в последние годы приобрела немало сторонников. Ее исходным постулатом служит допущение, что одним из самых изначальных, глубинных свойств климата является крупномасштабная изменчивость.

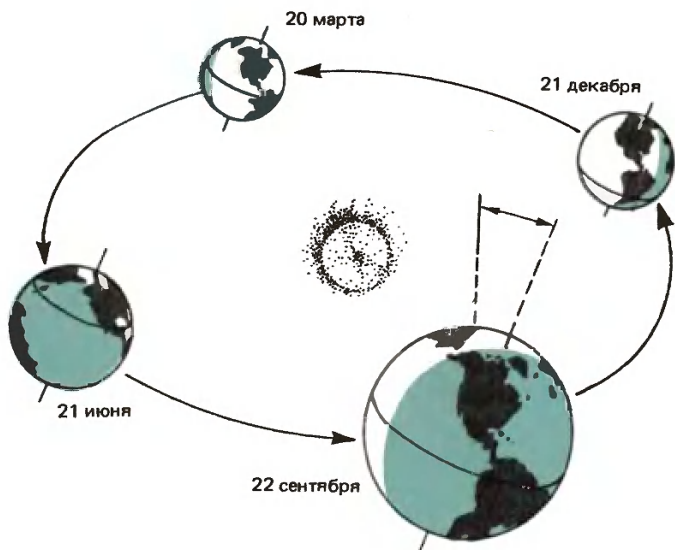
Известно, что в коротких масштабах времени случайные изменения климатических характеристик происходят из месяца в месяц и из года в год. Стохастическая же теория еще и утверждает, что чем продолжительнее изучаемый интервал времени, тем амплитуда этих изменений больше. Причем делаются ссылки на тот факт, что климатические различия, наблюдаемые между соседними десятилетиями, обычно превосходят различия между соседними годами, входящими в те же десятилетия. Теория предполагает, что этот тренд сохраняется безгранично, то есть что если брать все более длительные интервалы времени, то размах наблюдаемых изменений будет непрерывно нарастать. И уж конечно, все это подкрепляется изощренными математическими аргументами.

Каков же общий итог? Не очень обнадеживающий. Из восьми крупных теорий, предложенных для объяснения древних оледенений, три пришлось отвергнуть, а остальные пять отнести к числу неопределенных, не поддающихся проверке. Однако наше дело отнюдь не проиграно, так как имеется еще одна теория – теория, которая впервые заявила о себе всего лишь через пять лет после Невшательского трактата Агассиса.

5. РОЖДЕНИЕ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

История астрономической теории открывается в 1842 году, когда появилась книга «Революции океана». Ее автором был математик Жозеф Альфонс Адемар, работавший тогда воспитателем в Париже. Именно Адемару принадлежит идея, что в роли главных возбудителей древних оледенений могли выступать нарушения в закономерном ходе обращения Земли вокруг Солнца.

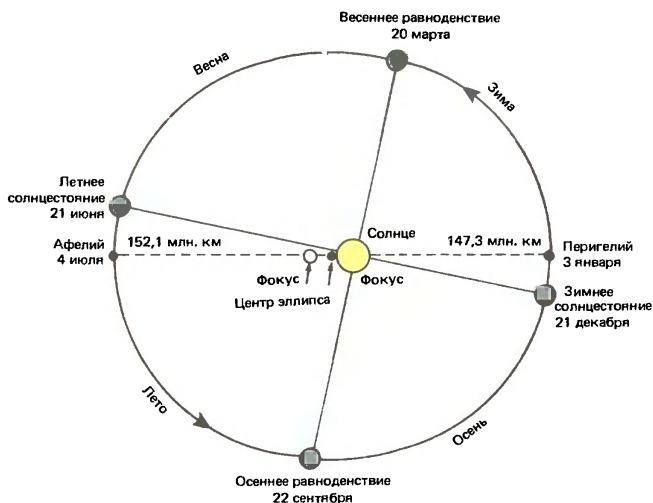
Адемар был в курсе достижений современной ему астрономии. Уже после работ Иоганна Кеплера (рис. 13),



13. Чередование сезонов. Из-за наклона оси вращения Земли ее движение по орбите сопровождается закономерными изменениями в распределении инсоляции, что приводит к последовательной смене сезонов года (рис. предоставлен Дж. Куклой).

то есть с XVII века, было известно, что земная орбита имеет форму не круга, а эллипса. Было также известно, что ось вращения Земли на $23,5^\circ$ отклонена от перпендикуляра, опущенного на плоскость орбиты, и что смена сезонов происходит потому, что в ходе движения Земли по ее орбите ориентировка этой оси остается постоянной. Так что, когда Северный полюс оказывается обращенным к Солнцу, в Северном полушарии наступает лето, а когда он обращен в противоположную сторону — зима.

Еще Кеплер доказал, что положение Солнца совпадает с одним фокусом земной орбиты, тогда как второй ее фокус остается вакантным (рис. 14). В процессе годового движения по эллиптической орбите Земля то несколько приближается к Солнцу, то удаляется от него. Каждый год, приблизительно 3 января, Земля достигает перигелия, то есть точки орбиты, которая расположена на кратчайшем расстоянии от



14. Даты равноденствий и солнцестояний. При равноденствиях земная ось и падающие на Землю солнечные лучи образуют прямой угол, поэтому день и ночь на всей планете имеют равную продолжительность. В летнее солнцестояние северный конец оси наклонен строго к Солнцу, поэтому в Северном полушарии день 21 июня самый длинный в году. В зимнее солнцестояние северный конец оси наклонен в сторону, противоположную Солнцу, поэтому в Северном полушарии день 21 декабря самый короткий в году.

Солнца, а около 4 июля она оказывается в афелии, лежащем на наибольшем удалении от Солнца. Дистанция от Земли до Солнца в афелии на 4,8 млн. км больше, чем в перигелии.

Каждый сезон начинается в момент прохождения Землей точки орбиты, называемой кардинальной. Наша планета достигает таких точек ежегодно около 21 декабря, 20 марта, 21 июня и 22 сентября. В Северном полушарии 21 декабря знаменует начало астрономической зимы, так как в это время Северный полюс сильнее всего отклоняется от Солнца, а день во всем полушарии имеет минимальную продолжительность; здесь этот пункт орбиты называется зимним солнцестоянием. В Южном полушарии, наоборот, тот же пункт называют летним солнцестоянием, так как там день 21 декабря — самый длинный в году, и именно с него начинается лето.

Через шесть месяцев, 21 июня, Земля достигает противоположной кардинальной точки, в которой лето начинается в Северном полушарии, а зима — в Южном. В этот момент Северный полюс наклонен строго в сторону Солнца, что делает 21 июня самым длинным днем Северного полушария.

Только два раза в год, 20 марта и 22 сентября, оба полюса Земли оказываются на равном расстоянии от Солнца. В эти дни в любой точке земного шара светлое время суток по своей продолжительности точно равно темному, в связи с чем соответствующие кардинальные точки получили название равноденствий. В Северном полушарии весеннее равноденствие (20 марта) означает начало астрономической весны, а осеннее равноденствие (22 сентября) является началом осени. В Южном полушарии, естественно, начала этих сезонов меняются местами.

Две прямые — одна, соединяющая точки равноденствий, и другая, проведенная через точки летнего и зимнего солнцестояния, — пересекаются под прямым углом, образуя крест, в центре которого находится Солнце. Более короткая из этих линий делит земную орбиту на две неравные части. Соответственно, та часть орбиты, по которой Земля проходит между 22 сентября и 20 марта, имеет меньшую длину, чем ее вторая часть, по которой планета движется между 20 марта и 22 сентября. По этой причине в Северном полу-

шарии весна и лето на целых семь суток длиннее осени и зимы. Это значит, что в этом полушарии светлое время по своей суммарной продолжительности превосходит темное время суток на 168 часов в год. В Южном полушарии положение обратное: холодные сезоны на семь дней длиннее теплых, и темное время преобладает над светлым.

Адемар утверждал, что климат Южного полушария с характерным для него преобладанием темного времени над светлым должен становиться с каждым годом холоднее; подтверждение этому он видел в Антарктическом ледниковом покрове, который считал свидетельством царящего там сейчас ледникового периода.

Найдя, как он сам решил, причину современных низких температур и частичного оледенения Южного полушария, Адемар сделал попытку объяснить также и оледенения Северного полушария. В своем рассуждении он опирался на тот факт, что ориентировка оси вращения Земли испытывает длиннопериодные колебания, которые были открыты еще в 120 году до н.э. Гиппархом в результате сравнения его собственных астрономических наблюдений с данными Тимохариса, полученными на 150 лет раньше.

Известно, что точка на небосводе, вокруг которой совершается кажущееся вращение звезд, в наше время находится—если смотреть из Северного полушария—вблизи Полярной звезды, входящей в созвездие Малой Медведицы. Однако в 2000 году до н.э. Северный полюс «смотрел» в точку, которая лежит на полпути между созвездиями Малой и Большой Медведицы, а в 4000 году до н.э.—в конец рукоятки ковша Большой Медведицы.

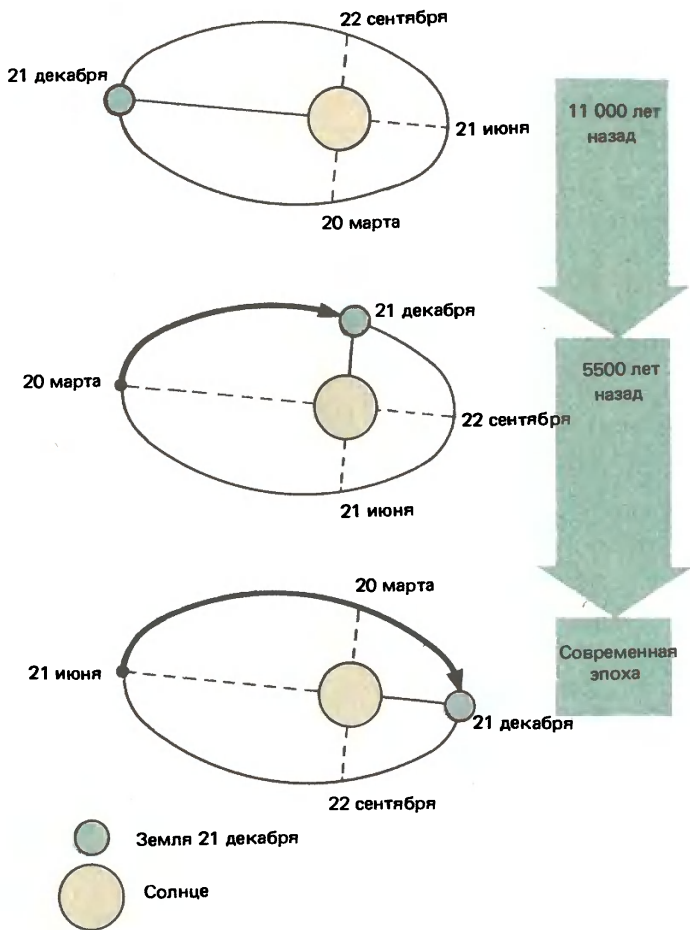
После нанесения всех этих точек на звездную карту астрономы древности смогли доказать, что ориентировка Северного полюса относительно звезд непостоянна. Стало ясно, что ось вращения Земли испытывает своеобразное качание, подобное периодическим отклонениям верхушки запущенного волчка, то есть что она движется по круговому конусу, ось симметрии которого перпендикулярна плоскости эклиптики (рис. 15). Это движение, получившее название прецессии, или предварения равноденствий, происходит очень медленно, так что на завершение одного



15. Осевая прецессия Земли. Благодаря притяжению, оказываемому Солнцем и Луной на экваториальный пояс Земли, ее ось вращения совершает очень медленное круговое движение, описывая полный круг за 26 000 лет. Независимо от этого цикла осевой прецессии наклон земной оси (ее угол с вертикалью), в среднем равный $23\frac{1}{2}^\circ$, периодически изменяется в сторону увеличения и уменьшения на $1\frac{1}{2}^\circ$.

оборота земной оси уходит 26 000 лет. Еще в 1754 году исследованиями французского математика Жана Лерона Д'Аламбера было строго доказано, что явление прецессии объясняется воздействием гравитационных полей Луны и Солнца на приэкваториальные части земного шара.

В результате прецессии кардинальные точки испытывают медленное смещение по орбите. Для наблю-



16. Предварение равноденствий. Благодаря осевой прецессии и другим астрономическим движениям пункты равноденствий (20 марта и 22 сентября) и солнцестояний (21 июня и 21 декабря) испытывают медленное смещение вдоль эллиптической орбиты Земли, совершая полный оборот приблизительно за 22 000 лет. Например, если 11 000 лет назад зимнее солнцестояние имело место на одной стороне орбиты, то теперь оно случается на ее противоположной стороне. В результате этого расстояние от Земли до Солнца, измеренное 21 декабря, меняется.

дателя, смотрящего со стороны Северного полюса, это смещение направлено по часовой стрелке (рис. 16). Одновременно с этим движением и независимо от него сама эллиптическая орбита также вращается, причем гораздо медленнее и в той же плоскости, но в противоположном направлении. Так что фактическое смещение кардинальных точек по орбите представляет собой результат сложения этих двух движений. В данном смещении как раз и состоит климатический эффект прецессии.

Как было показано Д'Аламбером, полный цикл смещения равноденствий по орбите занимает 22 000 лет. Это значит, что если сейчас зимы в Северном полушарии начинаются, когда Земля находится на ближнем к Солнцу конце эллиптической орбиты, то 11 000 лет назад они начинались в противоположных условиях — когда Земля оказывалась на максимальном удалении от Солнца, на другой стороне эллипса. А вот 22 000 лет назад зимы опять-таки начинались в условиях максимальной близости к Солнцу, при орбитальной позиции Земли, которая была аналогична современной. По теории Адемара, ледниковые климаты как раз и были функцией этого 22 000-летнего цикла, причем оледенения должны были поочередно, через каждый полуцикл в 11 000 лет, охватывать то одно полушарие, то другое — в зависимости от того, на какое из них приходились периоды длинных зим.

В своих основных частях теория Адемара была хорошо продумана и логична. Однако среди ее выводов был один, который выглядел столь экстравагантно, что внушал недоверие и ко всем остальным. Адемар утверждал, что Антарктический ледниковый покров должен был оказывать чрезвычайно сильное гравитационное воздействие на водную массу всего Мирового океана — достаточно сильное, чтобы притягивать воду из Северного полушария и образовывать из нее огромное циркумантарктическое поднятие. А перейдя к событиям, которые должны сопровождать позднеледниковый рост температур, Адемар смелыми мазками нарисовал апокалипсическую картину катастроф: теплые воды подъедают ледниковый покров у его основания, так что он приобретает форму огромного гриба; чудовищный ледяной гриб рушится в океан, порождая приливную волну цикло-

пических масштабов; эта гигантская и к тому же перегруженная айсбергами волна распространяется на север и поглощает материки...

Если современники Адемара могли просто отмахнуться от этих «революций» океана как от явной фантазии, то им было совсем не просто критиковать астрономическую часть его теории. Первым это смог сделать лишь выдающийся немецкий натуралист и географ Александр Гумбольдт, который в 1852 году указал на ошибочность основополагающей идеи Адемара — что Северное и Южное полушария Земли нагреваются и охлаждаются поочередно. Средняя температура любого из полушарий определяется не числом часов дневного света и темноты, а количеством калорий солнечной энергии, которое оно получает за год. И как уже давно показали расчеты Д'Аламбера, некоторое снижение прихода этой энергии, имеющее место в том сезоне, когда Земля находится на максимальном удалении от Солнца, строго уравновешивается ее усиленным поступлением в другом сезоне, когда Земля, наоборот, сильнее всего приближается к Солнцу. Поэтому суммарное количество тепла, получаемое одним из полушарий за год, равно тому же количеству, поступающему на поверхность другого.

Истинная причина сравнительно низких температур Южного полушария и современного покровного оледенения Антарктиды была открыта лишь через много лет. Эта причина — в южнополярном положении Антарктиды, в ее изоляции от других континентальных масс и удаленности от смягчающих климат теплых течений. К тому же и сам ледниковый покров шестого материка, отражающий в космос значительную долю поступающей радиационной энергии, способствует дополнительному выхолаживанию всего полушария.

В общем, несмотря на то что теория Адемара оказалась неверной, она означала важный шаг на пути к разгадке тайны ледниковых эпох. Мы должны помнить: ему, Адемару, принадлежит идея, что определенные астрономические явления — такие, как предвращение равноденствий, — могут оказывать существенное влияние на климат планеты. Сейчас уже ясно, что именно эта идея подготовила почву для будущих открытий.

6. АСТРОНОМИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ДЖЕЙМСА КРОЛЛЯ

В 1842 году, когда появились «Революции океана», человек, которому было суждено подхватить идею Адемара и развить ее в новую астрономическую теорию климата, еще работал механиком в шотландском городке Банхори близ Абердина. Уже в юношеские годы Джеймс Кролль обладал глубоко научным складом ума, однако жизнь обходилась с ним сурово. Позже он рассказывал: «Все время мотался с фермы на ферму, так что каждую неделю ночевал в среднем на трех-разных постелях, и все они были не из самых удобных. Мы, механики, обычно останавливались в лачугах деревенских рабочих... и ночами нередко приходилось прятаться под куртку, чтобы уберечься от крыс».

Детство Кролля прошло на ферме родителей в маленькой деревне Вульфхилл. Отец был каменщиком, и большую часть года сын его не видел. В тринадцать лет Джеймсу пришлось оставить школу и помогать матери. Однако он занялся самообразованием и очень скоро увлекся книгами по философии и теологии. Но вот его впечатление от первой прочитанной книги по физической науке: «Сначала я был сбит с толку, но вскоре простота и прелесть излагаемых понятий вызвали во мне такое восхищение и изумление, что я взялся всерьез за изучение предмета». Кролль решил непременно понять законы природы, и очень скоро его усердие перешло в настоящую одержимость. Позже он писал:

«Чтобы понять тот или иной закон, мне, в общем случае, приходилось знакомиться и с предыдущим законом, от которого он зависел. Я хорошо помню, как, прежде чем продвинуться вперед в физической астрономии, я должен был вернуться назад, чтобы проштудировать законы движения и фундамен-

тальные принципы механики. Таким же образом я познавал основы пневматики, гидростатики, учения о свете, теплоте, электричестве и магнетизме».

К шестнадцати годам Кролль приобрел, по его собственным словам, «довольно-таки сносные познания в области общих принципов перечисленных физических наук». Однако, чтобы стать ученым-профессионалом, он должен был получить университетское образование, последнее же оставалось недостижимым из-за ограниченности семейных средств. Между тем необходимость выбрать профессию встала перед ним уже летом 1837 года.

«После нескольких дней размышлений я решил стать механиком. Я думал: раз мне нравится теоретическая механика, то, вероятно, придется по душе и эта профессия... Но как я понял несколько позже, это было ошибкой; хоть я и знал теорию, как механик-практик я едва дотягивал до среднего уровня. По-видимому, моя врожденная склонность к абстрактному мышлению вступала в противоречие с мелкими задачами, возникавшими в ходе рутинной работы».

Конфликт между простой потребностью в заработке и неумемной жаждой научных знаний на протяжении многих лет омрачал жизнь Кролля. Только осенью 1842 года его научные устремления как будто бы взяли верх — он оставил работу механика и вернулся домой, чтобы посвятить себя математике и философии. Однако ему по-прежнему приходилось заботиться о хлебе насущном. И в последующие годы он был и плотником, и приказчиком в чайной лавке, и агентом страховой компании. Даже став владельцем собственного магазина, он должен был стоять за прилавком, а сделавшись хозяином гостиницы — мастерить для нее мебель.

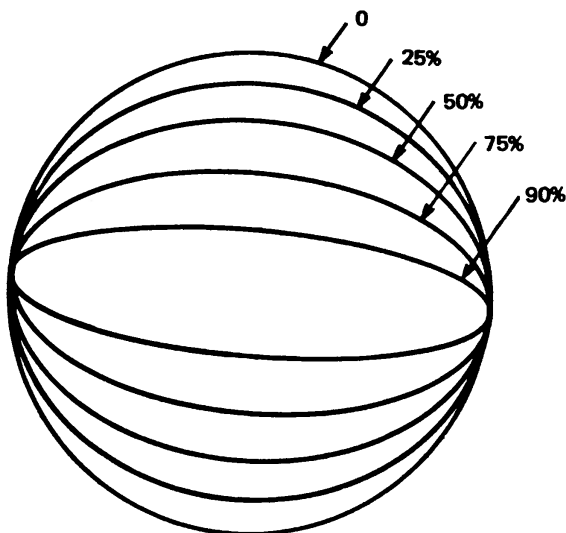
В 1857 году в связи с болезнью жены Кролль оказался в Глазго. Работы там для него не было, и он использовал вынужденный досуг для приведения в порядок своих заметок по метафизике теизма. В результате была написана книга «Философия теизма», увидевшая свет через два года в Лондоне. А еще через пару лет он стал привратником в Андерсоновском колледже с музеем. «Сравнив все плюсы и минусы, — писал он впоследствии, — я вижу, что еще никогда не имел работы, которая подходила бы мне так хоро-

шо... Конечно, жалование маленькое, и его хватает только на то, чтобы не умереть с голоду; однако это компенсируется преимуществом совсем другого рода». Это преимущество – свободный доступ к хорошей научной библиотеке, возможность удовлетворять свою «почти неодолимую тягу к научной работе, ту тягу, которая была готова поглотить всю мою энергию, ничего не оставив для других родов занятия».

Сначала Кролль вплотную занялся физикой, и в 1861 году вышла его статья об электрических явлениях. Вскоре, однако, его интересы сместились в сторону геологии. «В тот период, – рассказывал Кролль, – геологи заинтересованно обсуждали вопрос о причине ледниковых эпох. Весной 1864 года и я обратил на него внимание». Тогда он и натолкнулся на книгу Адемара, опубликованную на двадцать пять лет раньше. И сразу понял, что утверждение французского математика о связи древних оледенений с изменением продолжительности холодных и теплых сезонов ошибочно. Однако сама идея о том, что эти оледенения были вызваны какими-то астрономическими механизмами, показалась ему и здравой, и плодотворной.

Кролль знал новые работы выдающегося французского астронома Урбена Леверье, в которых было доказано, что степень удлиненности земной орбиты, или, как говорят специалисты, ее эксцентриситет, испытывает медленные, но непрерывные изменения. Именно в этом Кролль увидел тот астрономический фактор, который ускользнул от внимания Адемара. Ведь последний, как было показано выше, построил всю свою теорию ледниковых эпох на одних лишь прецессионных качаниях земной оси, считая форму самой орбиты постоянной. Кроллю же пришлось в голову, что, может быть, как раз ее изменения – изменения эксцентриситета орбиты – и были подлинной причиной оледенений. Эта догадка стала темой его статьи, вышедшей в августе 1864 года в «Философском журнале». Вот его воспоминания:

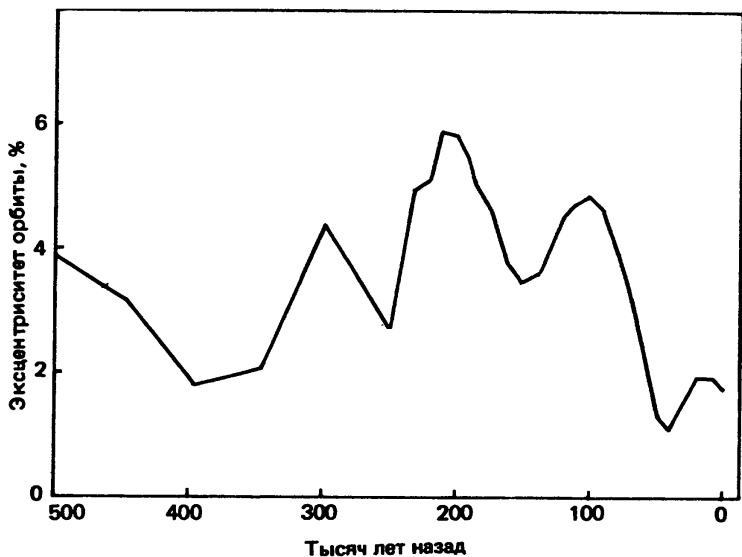
«Та статья привлекла довольно широкое внимание, и я получил много советов дать более полное изложение предмета; и поскольку ее идея самому мне казалась новой и интересной, я решил это сделать. Но в тот момент я не мог и подозревать, что



17. Эллипсы с разным эксцентриситетом.

вступаю на такой трудный путь, что смогу выпутаться лишь спустя целых двадцать лет».

Прежде всего Кролль решил сам познакомиться с математической теорией, на основе которой были сделаны расчеты Лаверьё. Эта теория оказалась результатом прямого приложения ньютоновского закона всемирного тяготения: Земля испытывает притяжение со стороны планет Солнечной системы, и это притяжение искажает нормальную форму ее эллиптической орбиты. А так как каждая планета вращается вокруг Солнца со своей собственной скоростью, суммарное притяжение, оказываемое на Землю всеми планетами, испытывает сложные, но предсказуемые изменения во времени. Что касается Лаверьё, то он взял имевшиеся тогда данные по орбитам и массам планет и рассчитал те изменения, которые должна была претерпеть орбита Земли (а заодно и наклон ее оси к плоскости эклиптики) за период последних ста тысяч лет. Целых десять лет ушло на сложные расчеты, прежде чем французский математик смог указать размах орбитальных изменений и их возраст. Эти расчеты использовали информацию по семи известным в то время плане-



18. Эксцентриситеты орбиты Земли, рассчитанные Джеймсом Кроллем. По теории Кролля, оледенения приходились на эпохи высокого эксцентриситета (по Дж. Кроллю, 1867).

там; мы знаем, что их публикация, имевшая место в 1843 году, повлекла за собой открытие планеты Нептун.

Леверье выражал эксцентриситет орбиты через отношение, в процентах, расстояния между фокусами эллипса к размеру его длинной оси. Если эллипс приближается к кругу, его фокусы сближаются, а эксцентриситет стремится к нулю (рис. 17). И наоборот, если эллипс вытягивается, его фокусы расходятся и эксцентриситет стремится к 100%. В настоящее время земная орбита вытянута очень незначительно (около 1%), но, по данным Леверье, за последние сто тысяч лет степень ее эксцентриситета колебалась от еще более низкой, близкой к нулю, до высокой, составлявшей около 6%.

Используя формулы Леверье, Кролль рассчитал эксцентриситет земной орбиты для ряда моментов последних трех миллионов лет и проиллюстрировал его изменения графиками (рис. 18). Кстати, это была первая кривая, построенная для изучения истории ор-

битальных изменений. В результате Кролль установил, что изменения эксцентриситета имеют циклический характер, а именно что интервалы высокой степени вытянутости орбиты, длившиеся по нескольку десятков тысяч лет, чередовались с длительными интервалами низкой степени эксцентриситета. Заметив, что примерно сто тысяч лет назад орбита Земли имела высокую степень эксцентриситета, а в последние десять тысяч лет – низкую, он пришел к заключению, что причина ледниковых эпох должна быть непременно как-то связана с условиями максимально вытянутой орбиты. И он занялся поисками этой связи.

Первые шаги на этом пути оказались обескураживающими, поскольку из работы Лавуазье следовало, что общее количество тепла, получаемое Землей за *весь год*, практически не зависит от изменений эксцентриситета орбиты. Это, однако, лишь на время смутило Кролля, и вскоре он смог доказать, что интенсивность радиации, которая поступает на Землю в каждый из *сезонов*, от этих изменений зависит весьма заметно. Он начал разрабатывать собственную теорию, которая базировалась на сезонных эффектах изменений эксцентриситета орбиты.

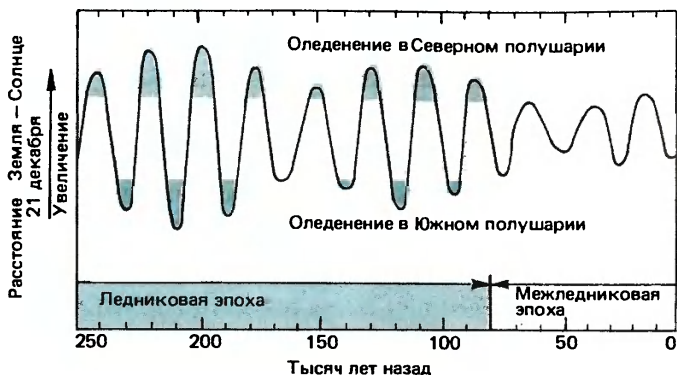
Кролль рассуждал так: если уменьшение количества солнечной энергии, получаемой за зиму, способствует накоплению снега, то любое, даже самое небольшое начальное расширение площади снежного покрова должно приводить к дополнительной потере тепла, связанной с усилением отражательной способности земной поверхности. Отсюда следует, что любое, даже незначительное изменение солнечной радиации, вызванное астрономическими причинами, будет неизбежно усилено климатическим воздействием снежных полей. Таким образом, Кролль стал первым ученым, выдвинувшим важнейшую идею о тех механизмах климатообразования, которые сейчас называют «положительными обратными связями».

Покончив с обоснованием вывода о том, что сезонном, имеющим критическое значение для инициации ледниковых эпох, является зима, Кролль занялся выяснением характера тех астрономических факторов, от которых зависит количество поступающего за этот сезон тепла. По его расчетам, решающую роль в изменениях прихода солнечной энергии за зиму играет

явление предварения равноденствий. Если зимы приходятся на период, когда Земля располагается ближе всего к Солнцу, то есть когда ситуация аналогична той, которая наблюдается в Северном полушарии сейчас, эти сезоны будут несколько теплее, чем обычно. Если же, наоборот, они приходятся на периоды, когда наша планета максимально удалена от Солнца, температуры зимы будут ниже обычных; Кролль полагал, что примером этапа таких, холодных, зим может служить время около 11 000 лет назад.

Итак, по Кроллю, в результате прецессионных циклов каждые 11 000 лет зимы одного полушария оказывались холоднее зим другого; это значит, что его вывод по существу совпал с выводами Адемара, сделанными двадцать пять лет назад, хотя и тот и другой оперировали совершенно различными аргументами. Но Кролль пошел дальше, продемонстрировав, что эффективность прецессионных качаний как инструмента изменения сезонных температур целиком определяется текущим состоянием земной орбиты. Например, если форма последней близка к правильному кругу, то климатический эффект прецессии будет нулевым, так как все сезоны будут начинаться в условиях одинакового удаления Земли от Солнца. В подобные эпохи нулевого эксцентриситета температуры зим должны быть средними – ни чересчур низкими, ни чересчур высокими. Кролль обратил внимание на то, что современные условия соответствуют именно этому случаю – как мы уже говорили, сейчас орбитальный эксцентриситет не превышает 1%. В подобные эпохи зимние сезоны оказываются недостаточно холодными, чтобы вызывать оледенения, причем независимо от того, на какой пункт орбиты приходится зимнее солнцестояние. Зато в эпохи высокой степени удлиненности орбиты зимы будут либо ненормально теплыми, либо ненормально холодными – в зависимости от того, на какие точки орбиты падает зимнее солнцестояние: близкие к Солнцу или удаленные от него.

Таким образом, теория Кролля использовала два астрономических фактора – прецессионные циклы и циклы изменения формы орбиты. Она предсказывала, что условия для начала оледенения в одном из полушарий могут появиться тогда, когда произойдет совпаде-



19. Кроллевская теория ледниковых эпох. Кролль считал, что причиной ледниковых эпох были изменения расстояния между Землей и Солнцем во время зимнего солнцестояния. Когда это расстояние превышало критическое, зимы Северного полушария становились столь холодными, что начиналось оледенение, а когда оно оказывалось меньше критического, оледенения охватывали Южное полушарие. Переходы расстояния Солнце-Земля через критические значения и связанные с ними оледенения были возможны в периоды высокого эксцентриситета земной орбиты.

ние двух условий: высокой степени эксцентриситета орбиты и расположения кардинальной точки зимнего солнцестояния на максимальном удалении от Солнца. Рис. 19 как раз и иллюстрирует представления Кролля о совместном воздействии этих двух факторов на климат Земли через изменение расстояния Земля-Солнце; когда 21 декабря приходится на момент максимального значения указанного расстояния, оледенением охватывается Северное полушарие, а когда эта дата падает на момент близости к Солнцу — оледенение происходит в Южном полушарии. Отдельные оледенения продолжаются по 10 000 лет и образуются сначала в одном полушарии, потом во втором — в ответ на 22 000-летние ритмы прецессии. Кролль внес точность и в определение понятий: длительные интервалы высоких значений эксцентриситета орбиты, на которые приходились оледенения того или иного полушария, он называл ледниковыми эпохами, а разделяющие их интервалы — межледниковыми эпохами. Согласно его представлениям, последняя ледниковая эпоха началась около 250 000 лет назад и закончилась около 80 000 лет назад, а все последующее время от-

носится к межледниковой эпохе, которая продолжается до сих пор.

Кролл не сомневался в справедливости астрономической теории климатических изменений, однако его смущало, что амплитуда этих изменений, реконструируемая по геологическим данным, выглядит несоразмерно большой по сравнению с предлагаемыми для ее объяснения механизмами – и с прямыми эффектами колебаний геометрии орбиты, имеющими, в общем-то, очень небольшие значения, и с результатами усиления этих эффектов через обратные связи температур со снежным покровом. В самом деле, можно ли полагать, что увеличение эксцентриситета орбиты на какие-то 2 или 3% было способно вызывать к жизни ледниковые покровы столь грандиозных размеров, что они погребали большую часть Европы и Северной Америки? Эти опасения Кролля предвосхитили возражения, которые позже выдвигались многими исследователями. Взвзвись за решение данной проблемы, Кролл со свойственной ему остротой ума быстро понял, что главная роль, которую фактически играют орбитальные изменения, – это роль специфического триггера, или спускового крючка, приводящего в действие особые механизмы климатической системы. А поиск этих механизмов привел его к идее о климатическом значении теплых течений Атлантического океана.

Известно, что крупнейшие из этих течений ориентированы на запад; в настоящее время одно из крупнейших течений такого рода – Южное Пассатное – отклоняется к северу берегами Бразилии, пересекает экватор и присоединяется к Гольфстриму. Вместе с ним из Южного полушария в Северное поступает и большое количество тепла. Но если бы некая сила сдвинула это течение таким образом, чтобы оно подходило к материку Южной Америки не севернее мыса Кабу-Бранку, как теперь, а южнее, то его водная масса отклонялась бы на юг и пополняла Бразильское течение, а транспортируемое им тепло оставалось бы в Южном полушарии.

Чтобы ответить на вопрос о возможной природе этой силы, Кролл разработал оригинальную (и в принципе верную) гипотезу, которая объясняла географию течений Мирового океана. Он, в частности, показал, что движущей силой всех течений – и тех, которые

направлены вдоль экватора на запад, и тех, которые, подобно Гольфстриму, несут воду к полюсам, — являются пассатные ветры и что скорость этих ветров в свою очередь зависит от температур полярных областей. Таким образом, чем холоднее полюса и чем больше температурный контраст между полярными и низкими широтами, тем сильнее пассаты. На этом основании Кролль сделал вывод, что когда в силу описанных выше прецессионных циклов происходило разрастание ледниковых покровов, охватывая, как он считал, поочередно то одно полушарие, то другое, то так же поочередно — сначала в одном, а потом в другом полушарии — усиливались и пассатные ветры. А усиление этих ветров в одном полушарии вело к отклонению теплых экваториальных течений в противоположное полушарие, вследствие чего общие тепловые потери «ледникового» полушария еще более возрастали. По мысли Кролля, особенно благоприятные условия для проявления этих эффектов существовали в низких широтах Атлантического океана, где клиновидный выступ побережья Бразилии мог отклонять теплое течение к югу или к северу. Следовательно, по идее Кролля, прямой климатический эффект астрономически обусловленных изменений инсоляции испытывал двойное усиление: и через обратные связи температур со снежным покровом, и через изменения в теплообмене между полушариями, связанные со смещением океанских течений.

При всем желании Кролль не мог бы выбрать более благоприятного момента для публикации своей теории. К этому времени — 1864 году — Уильям Бакленд и Чарлз Лайель успели стать решительными сторонниками ледниковой теории. Теория получила широкое признание и среди других геологов, так что на передний план выступила задача поиска причин циклических повторений ледниковых эпох. Кролль же как раз и предложил геологам тщательно продуманную теорию, которую к тому же можно было проверить путем сравнения геологических данных истории климата с результатами астрономических расчетов.

Неудивительно, что многие серьезно задумались над идеями, высказанными в статье Кролля, и среди них был Арчибальд Гейки, накануне занявший пост директора Геологической службы Шотландии. В 1867 го-



20. Фотография Джеймса Кролля (из Дж. Айронса, 1896).

ду по приглашению Гейки Кролля перешел на работу в Геологическую службу; он оставил Глазго и переехал в Эдинбург, где продолжил свои исследования.

В 1875 году Кролля опубликовал монографию «Климат и время», в которой не только суммировал свои идеи о причинах оледенений, но и развил их дальше, рассмотрев возможные эффекты еще одного астрономического фактора – колебаний наклона земной

оси к плоскости эклиптики. Эти колебания были также установлены Леверье, который показал, что указанный наклон, который сейчас составляет $23,5^\circ$, периодически изменяется от своего минимума в 22° до максимума в 25° . По гипотезе Кролля, развитию оледенения благоприятствовали минимальные углы наклона оси, так как с ее приближением к вертикали количество солнечного тепла, поступающее в полярные области, должно уменьшаться. К сожалению, Леверье не выяснил хронологию данных изменений, в связи с чем и соответствующая часть разработок Кролля не могла быть доведена до конца.

Через год после выхода книги Кролля стал членом Лондонского Королевского общества, а затем и почетным доктором университета Сент-Эндрюс. Таким образом, человек, который начал как простой механик, затем без особых успехов заведовал чайной лавкой и гостиницей и, наконец, был привратником в Глазго, сделался всемирно известной фигурой в науке (рис. 20).

Однако судьба недолго была к нему благосклонна. В 1880 году, в возрасте пятидесяти девяти лет, Кролля серьезно заболел и был вынужден уйти из Геологической службы. Последующие десять лет жизни ушли на безуспешные попытки добиться полагавшейся ему полной пенсии...

В конце концов, получив денежные пособия от нескольких научных обществ, Кролля смог поселиться в скромном доме вблизи Перта; здесь, преодолевая мучительные головные боли, он еще некоторое время пытался продолжить занятия развитием ледниковой теории. Но в 1885 году он окончательно отошел от естественных наук и вернулся к своему раннему увлечению — философии. В 1890 году, незадолго до смерти, последовавшей на семидесятом году его жизни, Кролля подвел итог этому этапу, выпустив небольшую книгу «Философская основа эволюции».

7. СПОРЫ ВОКРУГ ТЕОРИИ КРОЛЛЯ

Теория Кролля произвела глубокое впечатление на мир науки. Все понимали: она дает долгожданное объяснение ледниковых эпох, которое не только выглядит правдоподобным и логичным, но и может быть проверено с помощью объективных методов. На протяжении последующих тридцати лет идеи Кролля подвергались широкому обсуждению и проверке: в разные части света рассылались научные экспедиции для поиска новых данных о строении ледниковых отложений, детали теории анализировались в многочисленных статьях, многие страницы учебников по геологии заполнялись аргументами за и против этой теории.

К числу первых, кто встал на решительную защиту теории Кролля, принадлежал Джеймс Гейки, занимавший пост профессора Эдинбургского университета в Шотландии. Его монография «Великий ледниковый период», увидевшая свет в 1874 году, была первым крупным трудом по проблеме древних оледенений, вышедшим после 1840 года, то есть после «Исследований ледников» Агассиса. В ней были тщательно проанализированы, а затем и отвергнуты несколько конкурировавших теорий, в том числе и гипотеза Лайеля о связи оледенений с вертикальными движениями земной коры, поскольку «все они одинаково противоречат геологическим данным». И наоборот, Гейки сделал заключение, что эти данные решительно подтверждают выводы Кролля об астрономических причинах ледниковых эпох.

В своем анализе Гейки опирался на недавно выявленные факты, которые свидетельствовали, что «дрифт» — это не простой продукт геологической деятельности одного ледникового покрова, как думал Агассис, а сложно построенная осадочная толща, состоящая из большого числа отдельных моренных

слоев, каждый из которых представляет собой материальный след особого наступания льда. Кроме того, он знал, что во многих случаях индивидуальные моренные горизонты отделены друг от друга прослойками торфа с семенами и листьями теплолюбивых растений, которые никак не могли произрастать в условиях ледникового климата. Таким образом, разрезы ледниковых отложений не оставляли места для сомнений: Земля пережила не одну, а значительно большее число ледниковых эпох, которые чередовались с интервалами теплого, неледникового климата. Но ведь именно такие циклы многократных оледенений предсказывала и теория Кролля!

Правда, в некоторых местах было найдено только по два горизонта морены, зато в других имелись доказательства по меньшей мере шести отдельных ледниковых эпох, за каждой из которых следовало теплое межледниковье. В основной своей массе такие данные относились к Европе, однако Гейки включил в книгу и специальную главу об оледенении Северной Америки, которую написал американский геолог Томас Чемберлен. По Чемберлену, в разрезах североамериканского «дрифта» выделяются как минимум три моренных горизонта, а в некоторых местах возможно и больше. Чтобы подчеркнуть важность этих данных, Гейки поместил фотографию обнажения Стоун-Крик в штате Индиана, на которой отчетливо видны три налегающих друг на друга слоя морены, имеющие разный цвет.

Пока Гейки и его коллеги пытались прочесть ис-



21. Последовательность напластования горных пород по Чарльзу Лайелю. Лайель подразделил историю Земли на геологические периоды и предложил для них названия. Каждый из этих периодов представлен пачкой слоев осадочных пород, самый древний период был назван лаврентийским (по Ч. Лайелю, 1865).

торию оледенений по их следам в чехле рыхлых поверхностных отложений, другие ученые были заняты расшифровкой всей предшествующей геологической истории, которая «записана» в коренных осадочных толщах земной коры (рис. 21.) В период между 1830 и 1865 годами Чарлз Лайель ввел в употребление систему терминов, с помощью которых он предложил обозначать крупные подразделения этого времени – периоды и эры, имевшие еще неизвестную, но, как он предполагал, весьма большую продолжительность (рис. 22). Естественно, что с выявлением многократности ледниковых эпох и значительной длительности всего ледникового периода встал и вопрос об общем

| Периоды | Эры |
|--|---------------|
| Современный Постплиоценовый Плиоценовый Миоценовый Эоценовый | Кайнозойская |
| Меловой Юрский Триасовый | Мезозойская |
| Пермский Каменноугольный Девонский Силурийский Кембрийский | Палеозойская |
| Лаврентийский | Докембрийская |

22. Лайелевская схема истории Земли. Геологические периоды, показанные на рис. 21, сгруппированы в эры. В более раннем варианте этой схемы Лайель использовал термин «плейстоцен», применив его для обозначения периода, который непосредственно следовал за плиоценом. Однако к 1865 году этот термин был исключен (по Ч. Лайелю, 1865).

стратиграфическом положении моренных комплексов, то есть об их месте в той схеме геологической истории Земли, которая была разработана Лайелем. Конечно, уже тогда можно было думать, что оледенения приходились на какую-то часть самой молодой из лайелевских эр, кайнозойской. Однако все-таки как далеко в глубь веков уходят эпохи великих оледенений?

Идеи на этот счет стали высказываться весьма рано. Еще в 1846 году Эдуард Форбс пришел к выводу, что ледниковые и межледниковые слои принадлежат постплиоценовому периоду, и рекомендовал обозначать его термином «плейстоцен», который использовался и Лайелем, но совсем в ином смысле. Предложение Форбса было принято, именно оно до сих пор остается в основе понимания этого термина. Кроме того, широкое распространение получил и другой термин — «голоцен» (вместо термина «современный период»), которым стали обозначать послеледниковое, или послеплейстоценовое, время. В данном употреблении голоцен и плейстоцен в сумме составляют четвертичный период — время, в ходе которого климати-

| | Эпохи | Периоды | Эра |
|---------|------------|--------------|--------------|
| Время ↑ | Голоцен | Четвертичный | Кайнозойская |
| | Плейстоцен | | |
| | Плиоцен | Третичный | |
| | Миоцен | | |
| | Оligоцен | | |
| | Эоцен | | |
| | Палеоцен | | |

23. Современное деление кайнозойской эры *. Термин «плейстоцен» в настоящее время применяется для обозначения интервала времени, сразу следующего за плиоценовой эпохой.

* После 1960 г. в схемах деления кайнозойской эры место третичного периода занимают палеогеновый период (палеоценовая, эоценовая и олигоценовая эпохи) и неогеновый период (миоценовая и плиоценовая эпохи). — *Прим. перев.*

ческие условия испытывали неоднократные колебания между ледниковыми и межледниковыми состояниями (рис. 23).

Дальнейший прогресс в познании геологической истории Земли увенчался выявлением еще одного аспекта тайны ледниковых эпох – следов оледенений в палеозойских и докембрийских толщах, образованных за сотни миллионов лет до плейстоцена. Так что геологическая наука оказалась перед необходимостью найти объяснение не только сравнительно недавних – плейстоценовых – оледенений, но и оледенений гораздо более древних эпох. Вместе с тем еще острее встал вопрос о природе длительных теплых интервалов, разделявших периоды оледенений. Решение всех этих вопросов удалось получить очень не скоро – лишь во второй половине следующего столетия, о чем мы расскажем в эпилоге. Между тем перед геологами стояла гораздо более неотложная (и, в общем, совсем не простая) задача проверки теории плейстоценовых оледенений, предложенной Кроллем.

Большинство геологов быстро согласились, что факт многократности плейстоценовых оледенений явно свидетельствует в пользу астрономической теории, однако оставалось и немало сомневающихся. Последние указывали, что то немногое, что известно о климатической истории Южного полушария, идет с этой теорией вразрез. Ведь как мы помним, согласно концепции Кролля, мощные разрастания оледенений, приурочивавшиеся к периодам высокой степени эксцентриситета орбиты, поочередно, с интервалами в 11 000 лет, охватывали то одно полушарие Земли, то другое. Так что достаточно доказать одновременность оледенений обоих полушарий, и теория Кролля будет опровергнута. И наоборот: если бы удалось обнаружить доказательства противофазности ледниковых событий Северного и Южного полушарий, то это бы означало ее решительное подтверждение.

К сожалению, проверка правильности этих двух исторических сценариев выходила за пределы возможностей науки XIX века. Чтобы провести корреляцию осадочных толщ сильно разобщенных регионов, геологи того времени могли сделать лишь одно – непосредственно проследить хотя бы один горизонт сопоставляемых толщ из одного региона в другой. Есте-

ственно, что для увязки ледниковых отложений Северного полушария с моренами Южной Америки, Африки и Австралии, разобщенными бескрайними пространствами океанов, этот метод был неприменим. Единственный способ корреляции ледниковых событий разных полушарий, к которому могли прибегнуть Гейки и его современники, состоял в оценке возраста тех или иных моренных горизонтов по степени их выветрелости; по понятным причинам подобные оценки были малонадежны.

Сравнение верхних горизонтов морены из районов разных полушарий привело некоторых геологов к заключению, что степень сохранности материала этих горизонтов, а значит, и их возраст практически одинаковы. Это вроде бы опровергало теорию Кролля. Другие, однако, призывали к осторожности, подчеркивая, что степень выветрелости отложений определяется не только их возрастом, но также увлажненностью, пористостью, температурными условиями и прочими факторами среды, результаты воздействия которых практически не поддаются учету. И до тех пор, настаивали они, пока не будет доказано, что точность возрастных определений по степени выветрелости достаточна для разделения слоев с разницей возраста лишь в 11 000 лет, возражения против теории Кролля не будут убедительны. Легко видеть, что мнения по этому критическому вопросу весьма сильно разошлись. Сам Гейки верил, что оледенения разных полушарий происходили в разное время. Однако он был достаточно осторожен, чтобы признавать, что его точка зрения остается недоказанной. В противоположность ему американский геолог Джеймс Дэна утверждал, что «...до сих пор не известно ни одного факта, который бы указывал на неодновременность ледниковых эпох разных полушарий».

Как мы уже указывали, самым убедительным экспериментом по проверке теории Кролля было бы сравнение вычисленного им возраста конкретных ледниковых эпох с независимыми данными о том же возрасте, полученными с помощью геологических методов. И если бы удалось показать, что фактическая последовательность оледенений соответствовала той последовательности, которая предполагается теорией, то последнюю можно было бы считать доказанной. Но как

же определить точный возраст ледниковых отложений? И вновь мы видим, что технические возможности науки XIX века не могли обеспечить решения подобных задач, хотя тогда уже понимали, что выяснение точной хронологии ледниковых эпох может сыграть ключевую роль в проверке астрономической теории. Лишь значительно позже — через многие десятилетия — была разработана хронология этих эпох, которая была достаточно точной, чтобы обеспечить убедительную проверку теории Кролля.

Однако ученые XIX века все же не сидели сложа руки. По крайней мере одна из сделанных тогда попыток обогатила науку важной возрастной вехой, полезной для выяснения хронологии ледникового периода. Этот успех был связан с именем Роберта Бейквелла, работавшего в районе Ниагарского водопада. Еще в 1829 году он выяснил, что русло реки Ниагары выработано в покрове «дрифта» (который он, естественно, считал осадками Всемирного потоп), и заключил, что Ниагарская долина могла появиться лишь после отложения этого покрова. Бейквелл также видел, что река эродировала скальный пласт — порог знаменитого водопада — и что он постепенно отступает вверх по течению, оставляя позади себя живописный каньон. Сопоставив сведения о положении порога в разные годы, полученные от местных старожилов, он определил, что скорость отступления порога и связанного с ним водопада близка к трем футам в год, а измерив длину каньона и разделив ее на указанную скорость, подсчитал, что интервал времени, прошедший после образования «дрифта», примерно равен 10 000 лет. Когда же еще через двенадцать лет тот же район обследовал и Чарлз Лайель, было выяснено, что весь материал этого «дрифта» является не водным, а типично ледниковым, так что по скорости отступления водопада можно судить не о возрасте потоп, а о хронологии отступления ледникового покрова. Определенные коррективы были внесены и в полученные Бейквеллом цифры. Сочтя скорость отступления порога равной лишь одному футу в год, Лайель пришел к выводу, что убывание оледенения в районе Ниагары началось около 30 000 лет назад.

Весь этот материал благополучно пылился на полках, пока не развернулись споры вокруг теории Кролля,

сделавшие проблему длительности послеледникового времени остроактуальной. Когда же к этой проблеме вернулись, Лайель вспомнил, что обе оценки возраста последней дегляциации – его собственная и Бейквелла – сильно расходились с числом в 80 000 лет, полученным Кроллем. Столь же обескураживающими для приверженцев астрономической теории были и результаты специальных исследований, организованных для уточнения хронологии завершающих стадий оледенения. Полученные при этом оценки времени отступления льда лежали в пределах от 6000 до 32 000 лет назад, и, хотя никто не скрывал, что здесь возможны значительные ошибки, их публикация вызвала массовое разочарование геологов США в теории Кролля. А после того, как геолог штата Миннесота Ньютон Уинчелл исследовал скорость отступления водопада Св. Антония на реке Миссисипи у Миннеаполиса и сделал вывод, что длительность послеледникового времени не превышает 8000 лет, ряды сторонников астрономической теории оледенения еще более поредели.

Можно констатировать, что к 1894 году отношение большинства ученых Америки к теории Кролля стало отрицательным. Их точка зрения, на которую, конечно же, повлияли данные по районам водопадов Ниагары и Св. Антония, была следующим образом суммирована в авторитетном учебнике Джеймса Дэна: «Американские геологи не могут согласиться с теорией Кролля, так как по геологическим данным, полученным в Америке, ледниковый период окончился не более 10 000 лет назад, максимум – 15 000 лет назад, а отнюдь не 150 000 или 80 000 лет назад, как того требует гипотеза эксцентриситета».

В то же время большинство европейских геологов, следуя за Джеймсом Гейки, оставались сторонниками теории Кролля. Обосновывая свою позицию, сам Гейки писал так:

«Несмотря ни на что, астрономическая теория дает наилучшее решение ледниковой загадки. Она способна объяснить все главные факты, включая и чередование холодных и теплых эпох, и характерные особенности ледниковых и межледниковых климатов. К тому же она не требует ни изменений в распределении материков и океанов, ни движений земной коры, охватывающих весь мир». Эти – чисто геологические – аргументы были

решительно поддержаны и ирландским астрономом сэром Робертом Боллом, который в 1891 году выпустил книгу, защищавшую теорию Кролля.

Однако даже Гейки должен был признать, что данные о длительности послеледниковья, полученные по отступанию американских водопадов, представляют серьезную проблему. Если эти данные верны, то есть если в самом деле высвобождение Северной Америки из-под покрова льда произошло лишь 6000 или даже 10 000 лет назад, то основы теории Кролля были бы подорваны. Но и в этом случае Гейки был готов защищать ее, отступив, правда, на резервный рубеж, а именно допустив, что астрономическая теория пригодна лишь для объяснения климата Европы: он был глубоко убежден, что, судя по археологическим данным, отступление льда с территорий Европы и Азии завершилось много раньше, чем 6000 лет назад. «Ни один европейский геолог, — писал Гейки, — не рискнет утверждать, что огромный Балтийский ледник еще существовал на заре цивилизации Египта». И тем не менее он видел, что теория Кролля объясняет далеко не все геологические факты. Поэтому его книга заканчивается следующими пророческими словами:

«Таким образом, вопрос о первопричине всех этих удивительных изменений крайне запутан, и следует сознаться, что полное решение ледниковой проблемы до сих пор не найдено. Но совершенно очевидно, что теория Кролля проливает целое море света на наши трудности, и может случиться, что один из новых вариантов его концепции в конце концов развеет тайну ледниковых эпох. Пока же приходится довольствоваться одним — ждать и трудиться».

Со временем, однако, все большее число геологов не только в Америке, но и в Европе разочаровывались в теории Кролля; они видели ее несоответствие новым данным, по которым последнее оледенение завершилось не 80 000, а 10 000 лет назад. К тому же свое слово сказали и метеорологи, по расчетам которых изменения в инсоляции, постулированные Кроллем, были слишком незначительны, чтобы оказать заметное воздействие на климат. В общем, к концу XIX века научный интерес к астрономической теории Кролля практически угас и на нее стали смотреть как на некий музейный экспонат, представляющий только

историческую ценность. И очень скоро о ней почти забыли.

Почти, но не совсем, так как пройдут годы, и она возродится в трудах югославского астронома Милутина Миланковича. А в 1890 году, когда Джеймс Кролль умирал в Шотландии, Миланкович, которому было лишь одиннадцать лет, не мог и догадываться, что именно ему предстоит взять в свои руки сложно сплетенную систему аргументов Кролля, добавить к ней нити собственных идей и создать новую неповторимую композицию...

8. ЧЕРЕЗ ДАЛЕКИЕ МИРЫ И ВЕКА

Пошел двадцать второй год после смерти Кролля, еще бóльший срок минул со времени развенчания его орбитальной теории оледенений... И вот мы видим в Белграде, за столиком небольшого кафе, двух молодых людей, из которых один — поэт, а второй — инженер. Поводом для маленького праздника был выход книжки патриотических стихов молодого поэта; виновник торжества — небольшой синий томик — лежал тут же, на столе, между чашками кофе. А другом автора был Милутин Миланкович, который и рассказал об этом вечере спустя много лет в своем автобиографическом очерке.

Даже по такому торжественному случаю друзья могли позволить себе только кофе, но скромность их стола компенсировалась приподнятым настроением. Их оживленная беседа привлекала внимание окружающих, и, когда к ним подошел хорошо одетый незнакомец, они охотно согласились и чтобы он присел, и чтобы посмотрел книгу стихов. Человек оказался директором крупного банка и горячим сербским патриотом; стихи растрогали его, и он тут же заказал десяток экземпляров книги и расплатился за них.

Теперь друзья имели не только повод, но и деньги для настоящего пира. Вместо кофе на столе появились закуски и бутылки красного вина. «И когда с первой бутылкой было покончено, — вспоминал потом Миланкович, — нас охватило чувство ликования. У нас выросли невидимые крылья, мы приподнялись над землей, горизонт с каждой минутой становился шире. И, оглянувшись с этой высоты на свою жизнь и прежние успехи, мы вдруг ощутили, как они мелки и ограничены». А к концу третьей бутылки вино «заставило нашу южную кровь вскипеть, мы почувствовали себя уверенными, как Александр Македонский. Как и ему,

нам оставалось лишь найти область, достойную завоевания, как и ему. Македония казалась слишком маленькой».

Поэт решил сменить жанр и, покончив с короткими поэмами, взяться за эпический роман: «Я изображу в нем все наше общество, всю нашу страну и душу народа». Не уступал ему и Миланкович: «Меня влечет бесконечность. Я не ограничусь очерченными тобой рамками и не остановлюсь, пока не пойму всю вселенную, осветив ее отдаленнейшие уголки». Воодушевленные и счастливые, они расстались, и лишь будущее могло показать, насколько осуществимы их чаяния.

Миланкович получил докторскую степень в 1904 году в Венском технологическом институте. Первые пять лет он работал инженером, занимаясь проектированием и строительством сооружений из бетона. Эта деятельность приносила удовлетворение, и все же Миланковича не оставляло чувство, что его удел — работа над более фундаментальными проблемами. Поэтому, когда Белградский университет предложил ему должность профессора прикладной математики, он охотно согласился. Миланкович был рад вернуться на родину, в Сербию (которая позже стала частью Югославии), хотя большинство венских друзей считали, что, меняя жизнь в столице на преподавание в провинциальном Белграде, он совершает глупость. Однако он понимал, что Сербия нуждается в опытных инженерах, а главное — что ему пора браться за более общие проблемы, чем проектирование бетонных перекрытий. В 1909 году он переехал в Белград и начал читать курсы теоретической физики, механики и астрономии. Однако в нем зрело то «влечение к бесконечности и космическим проблемам», которое и вылилось в уже известное нам полушуточное решение, что спустя два года было принято в белградском кафе.

Касаясь этого решения в своих воспоминаниях, Миланкович пытался найти причину той давней вспышки вдохновения. Возможно, что какую-то роль в нем сыграло вино, однако главным было другое: он увидел сверхзадачу, по которой давно тосковал и которая вдруг приобрела полную конкретность — создать математическую теорию, пригодную для описания климата Земли, Марса и Венеры, причем не только для совре-

менной эпохи, но и для прошлого. Он не сомневался: это проблема, соответствующая его таланту и энергии.

Однако все попытки изложить ее коллегам по университету встречали лишь недоумение. «Наш крупнейший географ вытаращил глаза, когда я сказал ему о намерении рассчитать температуру на всех широтах Земли... Разве у нас не построены тысячи метеостанций, которые дают гораздо более надежную и точную информацию о... температурах, чем любая, даже самая совершенная теория?»

Однако для теоретика, каковым был Миланкович, преимущества математического прогноза перед простыми отсчетами по термометру были очевидны. Он ясно видел, что только теоретические расчеты могут создать возможность изучения температурных условий в местах, которые недоступны для прямых наблюдений — в верхних слоях атмосферы, на мириадах планет и лун солнечной системы. «Ведь тот самый источник тепла, который снабжает энергией нашу Землю, Солнце, обогревает и другие свои планеты, покрытые твердой корой. Так что результаты новой теории можно будет приложить и к ним. Она даст нам первые научные данные о климате всех этих далеких миров».

И это еще не все. Ведь если можно решить первую часть задачи и рассчитать климат планет для их современного состояния, то ничто не мешает взяться и за вторую часть задачи, а именно рассчитать их климаты для тех эпох прошлого, когда и форма орбиты, и наклон оси вращения Земли были другими. Одним словом, новая теория «дает возможность выйти далеко за рамки наших прямых наблюдений как во времени, так и в пространстве». Однако Миланкович был осторожен. В качестве своего первого шага он решил обстоятельно ознакомиться с работами других исследователей. И он очень скоро понял, что выдвинутые им идеи пока никем не осуществлены. Климатологи, подобно его коллегам из университета, не желали ничего лучшего, чем продолжать наблюдения за температурами, атмосферными осадками и скоростями ветра. Астрономы же ограничивали свои задачи выяснением формы планетных орбит для современной эпохи и прошлого, и никто из них не собирался рассчитывать распределение инсоляции по поверхностям вращающихся и раскачивающихся планет. Правда, пионеры

астрономической теории ледниковых эпох Адемар и Кролль говорили о климатических эффектах орбитальных изменений, однако ни тот ни другой не имел достаточной математической подготовки, чтобы оценить эти эффекты с необходимой точностью.

И только теперь, когда стало ясно, что намеченный им путь никем не пройден, Миланкович составил детальный план будущих исследований, своей экспедиции в «далекие миры и века». Совершенно очевидно, что даже задумать такое предприятие мог только могучий интеллект. Для того же, чтобы его осуществить, потребовался не только интеллект, но и, как показало будущее, тридцать лет неустанного труда.

Миланкович работал над своей теорией по несколько часов ежедневно, включая воскресенья и праздники. Даже выезжая с женой и маленьким сыном за город, он брал с собой чемоданы книг, а главным, что ему требовалось на новых местах, был письменный стол для работы. Будучи в Белграде, Миланкович трудился в основном дома, в большом кабинете, все стены которого были заняты книжными полками (сейчас это музей, находящийся в ведении Сербской академии наук). По вторникам и средам он читал лекции в университете, затем шел в свой клуб для недолгих встреч с друзьями. Обедал всегда дома, причем неизменно в восемь часов вечера; обеденные разговоры касались только музыки и мировой политики. Все это занимало пару часов, еще час отдавался чтению. Наконец свет выключался, Миланкович садился в кресло и думал.

Разработанные им планы штурма вершин науки отличались той тщательностью, с которой штабной генерал организует военное вторжение. Для начала он решил описать геометрию орбиты каждой из планет и показать, как она изменилась за последние столетия. Миланкович, как и задолго до него Кролль, убедился, что распределение инсоляции по поверхности любой планеты зависит от трех орбитальных характеристик: эксцентриситета орбиты, наклона оси вращения и положения точек равноденствия в ее прецессионном цикле.

Не иначе как предзнаменованием успеха стали для Миланковича обнаруженные работы немецкого математика Людвиг Пильгрима, который всего лишь семь

лет назад, в 1904 году, выполнил необходимые ему астрономические расчеты. Если в распоряжении Кролля были только работы Леверье, освещавшие изменения эксцентриситета и циклы прецессии за последние 100 000 лет, то Миланкович теперь получил возможность использовать данные Пильгрима по вариациям всех трех астрономических факторов — эксцентриситета, прецессии и наклона оси вращения — за весь последний миллион лет. Таким образом, первая крупная задача научной кампании Миланковича оказалась, по существу, уже решенной.

Теперь казалась вполне достижимой и вторая его цель — рассчитать количества солнечной энергии, которые поступают на поверхности каждой планеты солнечной системы в каждый сезон и на каждой широте. Ведь еще за два столетия до него Исаак Ньютон разработал общую теорию солнечной радиации и показал, что конкретные значения инсоляции определяются двумя геометрическими факторами: расстояниями от планет до Солнца и углами, под которыми солнечные лучи падают на интересующие нас участки поверхности этих планет. И поскольку названные геометрические факторы могли быть получены из расчетов Пильгрима, Миланкович не видел принципиальных трудностей в математическом описании распределения искомой инсоляции.

Однако эти расчеты, будучи в принципе простыми, на практике оказались чудовищно сложными, так как планеты непрерывно движутся, вращаются вокруг Солнца и собственных осей, раскачиваются и меняют наклоны в сумасшедшем небесном танце, каждое движение которого отражается на количестве получаемой ими солнечной радиации. Но Миланкович едва достиг тридцати двух лет и был уверен в своих силах. Позже он писал: «Я начал кампанию в свои наилучшие годы. Будь я тогда моложе, у меня не было бы необходимых знаний и опыта. Будь я старше, мне уже не хватало бы той самоуверенности, которую дает только юность с присущей ей стремительностью».

На первых порах работа Миланковича шла успешно. «Однако когда я попытался проникнуть в проблему глубже, — писал он впоследствии, — то натолкнулся на серьезные трудности, и все затормозилось. Затем (в 1912 году) вспыхнула Первая Балканская война. Рано

утром Дунайская дивизия сербской армии, к которой я был приписан, пересекла границу тогдашней Турецкой империи с задачей захватить горный массив Старац». Молодой математик мог видеть, как солдаты сербского полка пробивались к вершине горы, а его мысли по какой-то странной ассоциации обратились к его собственной научной атаке и остановившим ее теоретическим препятствиям. И в тот самый момент, когда гора была захвачена, пришло и решение его математической задачи — внезапно, единым броском, он тоже «овладел вершиной» на своем внутреннем поле сражения.

Через два дня Турция капитулировала. Наступило перемирие, и Миланкович смог продолжить личную баталию в белградской библиотеке. Работа шла успешно, однако было ясно, что свою вторую крупную задачу он сможет решить не ранее чем через несколько лет. Между тем обстановка на Балканах оставалась напряженной, поэтому он решил приостановить дальнейшие исследования и заняться публикацией того, что уже удалось сделать. Предварительные результаты работ были изложены в трех коротких статьях, увидевших свет в 1912 и 1913 годах. В начале 1914 года Миланкович опубликовал еще одну работу, которую он назвал «О проблеме астрономической теории ледниковых эпох». Будучи написана по-сербски, да еще в самый разгар политического кризиса в Европе, она много лет оставалась почти совершенно неизвестной. И все же эти публикации сделали свое дело. Они пролили новый свет на проблему ледниковых эпох, показав средствами математики, что изменения эксцентриситета орбиты и прецессия достаточно велики, чтобы быть причиной разрастаний и убываний ледниковых покровов. Кроме того, стало ясно, что климатические эффекты колебаний угла наклона земной оси фактически более значительны, чем предполагал Кроль.

Обеспечив таким путем свой арьергард, Миланкович взялся за продолжение исследований. Теперь он надеялся, что уж ничто не помешает их успешному окончанию, для завершения расчетов нужно было только одно время. Однако все планы снова рухнули: началась новая война, на сей раз первая мировая. Она застала Миланковича на родине, в городе Даль,

куда он приехал летом 1914 года. Даль был захвачен австро-венгерской армией в первые дни войны, и Миланкович как военнопленный был заключен в крепость Эсseg. Позже он писал:

«За мной захлопнулись тяжелые железные двери. Ключ со скрежетом повернулся в ржавом замке... Пытаясь приспособиться к своему новому положению, я отключил мозг и апатично уставился в пустоту. Но вот мой взгляд упал на небольшой чемодан... и мозг снова заработал. Я вскочил и откинул крышку... Под ней лежали мои заметки по космической проблеме... Я пролистал страницы рукописи... затем вынул из кармана свою верную авторучку и начал писать и делать расчеты... Когда после полуночи я поднял голову, то не сразу понял, где нахожусь. Камера оказалась временным приютом на долгом пути сквозь вселенную».

В сочельник 1914 года пленник получил неожиданный, но желанный подарок – свободу. Телеграмма военного министра Австро-Венгрии предписывала направить его в Будапешт. А там Миланкович был освобожден из-под стражи с условием, что он будет каждую неделю отмечаться в полиции. Стала известна и причина столь неожиданного освобождения: о находящемся среди военнопленных талантливом математике узнал некий профессор Чубер, который и добился его свободы «в интересах науки».

Оказавшись в Будапеште и на свободе, Миланкович сунул под мышку свой старый кожаный портфель и постучал в дверь библиотеки Венгерской академии наук, где его с распростертыми объятиями встретил коллега – венгерский математик Коломан Силли. В читальном зале этой библиотеки Миланкович в основном и провел последующие четыре года, работая, как он потом писал, «без спешки и обдуманно планируя каждый шаг». Первые два года ушли на разработку математической теории, способной описать современный климат Земли. А за третий и четвертый годы он завершил описание климатических условий Марса и Венеры.

Война тем временем кончилась. Миланкович сложил труды четырех лет все в тот же издававший виды портфель, сел на белый дунайский пароход и вернулся домой в Белград. Несмотря на все созданные

войной помехи, ему удалось-таки осуществить вторую из поставленных целей – дать математическое описание современных климатов Земли, Марса и Венеры. Уже в 1920 году это описание было опубликовано в книге «Математическая теория тепловых явлений, обусловленных солнечной радиацией». Работа была очень быстро оценена метеорологами как крупнейший вклад в познание современного климата. Книга представляла огромный интерес и для исследователей климатов прошлого, так как в ней доказывалось, что размах колебаний орбитальных параметров был достаточно большим, чтобы связанные с ними изменения географического и сезонного распределения инсоляции становились причиной ледниковых эпох. Здесь же Миланкович показал, что он может рассчитать значения инсоляции земной поверхности и для любого интервала времени в прошлом.

Книга осталась незамеченной большинством геологов, однако она сразу привлекла внимание Владимира Петровича Кёппена, одного из крупнейших климатологов того времени. Кёппен, как известно, составил карты географического распределения температур и атмосферных осадков во всем мире, классифицировал климаты и выделил климатические зоны, объясняющие географическое распределение растительности земного шара.

Поэтому открытка, однажды прибывшая от знаменитого Кёппена, вызвала немалое волнение в семье Миланковича. Позже последний вспоминал:

«Как-то я получил простую открытку, которую храню как реликвию. Она пришла из Гамбурга, от климатолога Владимира Кёппена, и касалась недавно опубликованной «Математической теории». За ней последовали многие другие, так что общим итогом нашей переписки стало около сотни писем и открыток. Во втором письме Кёппен сообщил, что он совместно со своим зятем Альфредом Вегенером работает над книгой о климатах геологического прошлого. Этот ученый, которому тогда было уже семьдесят шесть лет, раньше других осознал ту пользу, которую может принести моя математическая теория проблеме палеоклиматов, и предложил мне сотрудничество».

Миланкович охотно согласился, и между югославским математиком и двумя немецкими учеными зна-

менитым климатологом и ведущим европейским геологом – начался плодотворный обмен идеями. Вегенер, тогда еще молодой человек, уже получил широкую известность своей теорией дрейфа континентов. Как и предвидел Кёппен, теория Миланковича оказалась неоценимым инструментом, позволяющим проникнуть в глубь истории климатов прошлого. Но польза от сотрудничества была взаимной, так как в лице Кёппена и Вегенера Миланкович также приобрел компетентнейших консультантов. Они могли лучше кого бы то ни было помочь ему в преодолении трудностей, связанных с познанием геологической истории климата.

Очень скоро Кёппен смог решить одну из очередных проблем, стоявших перед Миланковичем. Создав математическую методику расчета инсоляции для любой широты и сезона, последний намеревался приступить к расчету древних климатов Земли. Одной из центральных задач этой работы было построение графика, демонстрирующего изменения в поступлении солнечной энергии, которые могли быть причиной повторных оледенений. Однако она осложнялась тем, что каждый широтный пояс Земли и каждый сезон в нем имел свою собственную, неповторимую историю радиационного климата. Так что Миланкович столкнулся с необходимостью найти ответ на вопрос: какая широта и какой сезон были критическими, то есть играли определяющую роль в инициации оледенений? Как мы помним, Адемар и Кролль полагали, что такую – критическую – роль играла инсоляция, получаемая высокими широтами в зимние сезоны; по их мнению, ледниковые эпохи наступали тогда, когда интенсивность зимней инсоляции полярных областей снижалась. Миланковичу этот вывод казался сомнительным, однако, не будучи специалистом, он попросил совета у Кёппена. «После исчерпывающего обсуждения всех возможностей –, писал он впоследствии, – Кёппен решил, что критическим фактором оледенения должно быть снижение температур не зимних, а летних полугодий». Будучи климатологом, он рассуждал так: колебания зимней инсоляции не могут сильно влиять на годовой баланс снега, поскольку в полярных областях зимние температуры и сейчас достаточно низкие, чтобы обеспечивать накопление твердых атмос-

ферных осадков. Зато в летние сезоны современной эпохи на ледниках идет таяние. А при снижении летней инсоляции это таяние должно ослабевать, создавая тенденцию к изменению знака баланса снега с отрицательного на положительный и способствуя, таким образом, росту оледенения.

Логичность доводов Кёппена была очевидна, и Миланкович сразу сел за расчеты кривых, которые показали бы изменения инсоляции на 55° , 60° и 65° северной широты за последние 650 000 лет. Даже эта, сравнительно ограниченная задача была далеко не простой. Дадим слово самому Миланковичу: «Я занимался расчетами целых сто дней, работая с утра до позднего вечера, а полученные результаты представил в виде графика — трех кривых с рядом острых зубцов, показывающих изменения летней инсоляции за весь этот длительный период времени». Естественно, этот график (рис. 24) был сразу же отправлен Кёппену.

Ответ не заставил себя ждать. Реакция Кёппена была быстрой и весьма положительной. Зубцы на графике, указывавал в своем письме знаменитый климатолог, совсем неплохо увязываются с главными событиями ледниковой истории Альп, которые пятнадцать лет назад реконструировали немецкие географы Альбрехт Пенк и Эдуард Брюкнер. Кёппен решил включить кривые инсоляции в книгу по климатам прош-



24. Инсоляционная кривая Миланковича для 65° с. ш. Эта кривая, показывающая изменения в интенсивности инсоляции за последние 600 000 лет, представляет собой существенный элемент теории ледниковых эпох Миланковича. В настоящем варианте, который впервые увидел свет в 1924 году, наиболее низкие зубцы кривой соответствуют древним оледенениям Европы. Интенсивность инсоляции выражена в значениях широтных эквивалентов. Например, инсоляция, поступавшая на Землю на 65° с. ш. 590 000 лет назад, сейчас характерна для 72° с. ш. (из В. Кёппена и А. Вегнера, 1924).

лого, которую он и Вегенер как раз готовили к печати. А сам Миланкович получил приглашение ближайшей же осенью приехать в Австрию и навестить Кёппена в Инсбруке.

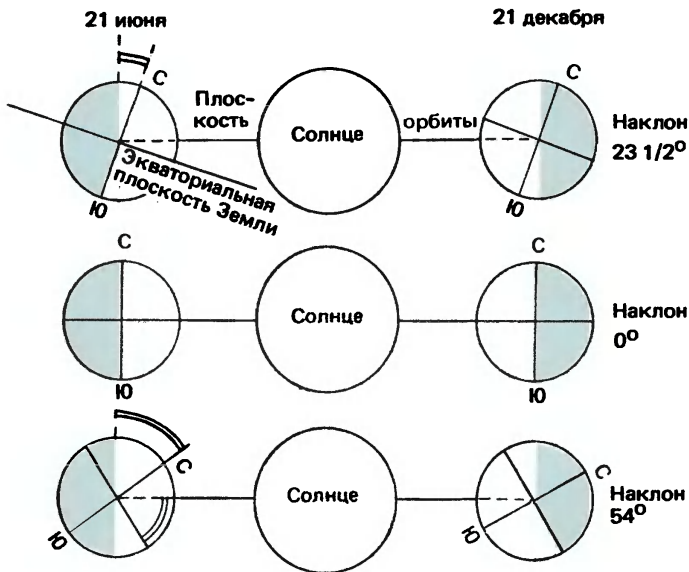
Итак, по мнению Кёппена, геологические данные подтверждали теорию Миланковича. Понятно, это не могло не воодушевить его. Миланкович с радостью принял приглашение и в сентябре 1924 года прибыл в Инсбрук – как раз вовремя, чтобы успеть к началу научной конференции, которая открывалась докладом Альфреда Вегенера «Климаты прошлого». Не теряя времени на представления и знакомства, Миланкович вскарабкался в верхний ряд амфитеатра и весь превратился в слух. Первая часть доклада касалась вегенеровской теории дрейфа континентов и климатов отдаленных геологических периодов. При этом Вегенер держался «с величайшей скромностью и говорил, выбирая самые простые слова... хотя он и опирался на колоссальное количество фактов». Но все изменилось, когда он перешел к вопросу о климатах плейстоцена. «...теперь, – вспоминает Миланкович, – Вегенер имел дело с работой другого исследователя. Спроектировав на экран мои инсоляционные кривые, он забыл о сдержанности; голос докладчика зазвенел от возбуждения. Он с таким увлечением излагал данные моих расчетов, что я почувствовал себя смущенным. Съездившись на своем стуле, я пытался сделаться маленьким и незаметным, чтобы Вегенер, упаси бог, не обнаружил моего присутствия».

Вечером он ощутил себя триумфатором, ему казалось, что ложе его выстлано пухом и лаврами. Остальные дни в Инсбруке были посвящены далеко не одной лишь работе. Как писал об этом сам Миланкович, со старым другом, коллегой прежних – еще инженерских – дней, он «ухитрился обследовать чуть ли не все пивные города».

Книга Кёппена и Вегенера «Климаты прошлого» увидела свет в том же, 1924 году. Важное место в ней заняли инсоляционные кривые, представившие результаты многолетних расчетов Миланковича. Благодаря этой публикации они сразу приобрели широкую известность. Правда, отношение к ним со стороны геологов было неоднозначным – некоторые из ученых, как Кёппен и Вегенер, согласились, что кривые хорошо

согласуются с геологическими данными, тогда как другие пришли к выводу, что такая увязка отсутствует.

Сам Миланкович в достоверности своих выводов не сомневался. Вернувшись из Инсбрука в Белград, он снова с головой окунулся в работу. Как мы помним, до сих пор он составил кривые только для трех параллелей— 55° , 60° и 65° северной широты, относящихся к зоне, которая, как предполагалось, наиболее чувствительна к изменениям радиационного баланса. Теперь он решил рассчитать такие же кривые и для низких широт, в которых колебания инсоляции считались менее эффективными. Рассудив, что эти колебания все же могут оказывать влияние на местный климат, Миланкович взялся за расчет для целых восьми

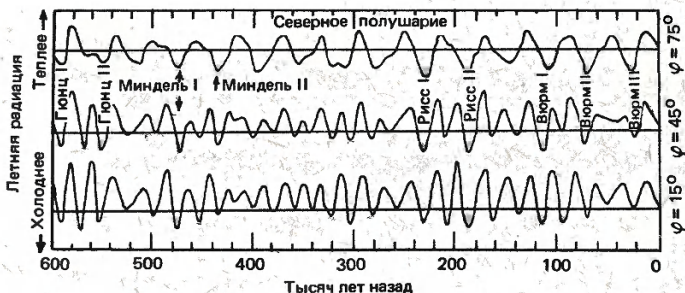


25. Влияние наклона земной оси на распределение инсоляции. В настоящее время этот наклон составляет $23\frac{1}{2}^\circ$, когда он уменьшался, поступление солнечной энергии в полярные области Земли снижалось, а когда увеличивался—это поступление возрастало. Возможные пределы инсоляционных эффектов наклона оси, которые фактически никогда не достигались,—это нулевая инсоляция в полярных областях при наклоне в 0° и одинаковое количество солнечной энергии, поступающее за год ко всем точкам земной поверхности при наклоне земной оси, равном 54° .

широтных поясов, располагающихся между 5° и 75° северной широты.

Эта работа, составлявшая третий пункт его программы боевых действий, была завершена к 1930 году. Она вошла как особый том в «Руководство по климатологии» Кёпшена. Название тома «Математическая климатология и астрономическая теория изменений климата» выразило поставленную Миланковичем задачу так ясно, что теперь ее важность уже никак не могла ускользнуть от внимания геологов.

С публикацией новых кривых инсоляции геологи действительно наконец смогли понять, каким образом поступление на Землю энергии солнечной радиации регулируется влиянием двух астрономических циклов. Им стало ясно, что уменьшение угла наклона оси вращения планеты должно снижать летнюю инсоляцию, о чем, как мы помним, совершенно правильно писал еще Кролль (рис. 25), а сокращение удаленности Земли от Солнца в то или иное время года означает увеличение инсоляции в эти периоды. Кроме того, теперь выяснилось, что сила обоих влияний закономерно, причем неодинаково для каждого из них, меняется с широтой (рис. 26). Влияние периодических изменений наклона земной оси, для которых характерна 41 000-летняя цикличность, наиболее сильно у полюсов и постепенно ослабевает к экватору. И наоборот, влияние



26. Инсоляционные кривые Миланковича, построенные для разных широт. Эти кривые, опубликованные в 1938 году, показывают изменения летней инсоляции на 15 , 45 и 75° с. ш. На двух из них, относящихся к низким широтам, ясно выражены эффекты 22 000-летних циклов прецессии. Крупные нижние зубцы «высокоширотной» кривой соответствуют главным стадиям четырех ледниковых эпох Европы (по М. Миланковичу, 1941).

22 000-летних циклов предварения равноденствий, oznaчающих периодические изменения расстояния от Земли до Солнца, является слабым у полюсов, но возрастает с приближением к экватору. И поскольку значения инсоляции на каждой широте и в каждый сезон зависят и от наклона земной оси, и от расстояния Земля – Солнце, общий вид кривых инсоляции с движением от полюсов к экватору систематически изменяется. На характере кривых, построенных для высоких широт, сильнее всего сказываются 41 000-летние циклы колебаний наклона оси, тогда как на кривых, рассчитанных для низких широт, – 22 000-летние циклы прецессии.

После этого Миланкович приступил к решению своей четвертой и последней задачи – к расчетам, которые должны были определить конкретную реакцию ледниковых покровов на то или иное изменение в инсоляции. Главная сложность здесь заключалась в необходимости учета обратных связей между площадями оледенения и альбедо, то есть отражательной способностью, поверхности Земли. В том, что такие связи играли существенную роль в усилении похолоданий или потеплений, связанных с колебаниями инсоляции, никто – после работ Кролля – не сомневался, однако все попытки выразить эту роль количественно оставались безуспешными. Миланкович был первым, кто эту задачу решил, для чего он привлек данные о глобальном распределении высот снеговой линии, то есть такого уровня, выше которого летнее таяние оказывается не в состоянии уничтожить весь выпавший за год снег. Вблизи экватора и особенно в тропиках снеговую линию можно наблюдать только в горах, на абсолютных высотах порядка пяти-шести километров, а в полярных областях она сильно снижается, во многих случаях достигая уровня океана. Миланкович сформулировал математическую зависимость между летней инсоляцией и высотами снеговой линии, которая позволила установить связи между любыми заданными изменениями в летней инсоляции и суммарной площадью снежного покрова.

Результаты этой работы он изложил в 1939 году в книге, получившей название «Астрономические методы исследования истории климата Земли». Приведенные в ней кривые по своей форме мало отличались от инсоляционных кривых, публиковавшихся ранее, однако

теперь геологи получили в свое распоряжение графики, по которым можно было судить о широтном положении краевых зон ледниковых покровов для любых этапов всего периода — последних 650 000 лет. Кроме того, Миланкович провел дополнительные расчеты, благодаря которым его кривые заметно изменили свою форму, превратившись из зубчатых в плавно изгибающиеся.

Таким образом, все четыре цели, поставленные Миланковичем, были достигнуты. Он был убежден, что тем самым оказалась решенной и вся его космическая проблема. Между тем еще за десять лет до того Миланкович начал писать популярные статьи, которым он придавал форму писем, обращенных к безымянной молодой женщине. Фактически это началось даже раньше, во время его поездки в Австрию. В его «письмах» можно найти немало автобиографических данных, но их главное назначение — подвести широкого читателя к восприятию начал астрономии и исторической климатологии. Первые письма появились в разных литературных журналах, однако они были встречены с таким интересом, что в 1928 году их переиздали в едином сборнике, который получил название «Через далекие миры и века: письма от путника во вселенной». Впервые этот сборник вышел на родном языке Миланковича — сербскохорватском, однако в 1936 году его расширенный вариант был опубликован на немецком языке. Личность анонимного адресата этих писем осталась нераскрытой, впрочем, жена Миланковича утверждала, что молодая дама — лицо вымышленное.

В конце 1930-х годов Миланкович взялся за обстоятельную сводку главных результатов своей работы, которую он решил назвать «Канон инсоляции и проблема ледниковых эпох». Но случилось так, что в тот самый день, когда последние страницы этой книги пошли в набор, а именно 6 апреля 1941 года, Югославия была оккупирована войсками фашистской Германии. Во время последовавших затем беспорядков белградское издательство было разрушено, и заключительную часть книги пришлось перепечатывать заново.

Сама война мало волновала Миланковича, так как он не сомневался в конечном поражении фашизма. К тому же он испытывал глубокое удовлетворение



27. Милутин Миланкович. Портрет кисти П. Йовановича, 1943 год (предоставлен Васко Миланковичем).

оттого, что результаты его многолетних трудов как раз в те годы получили международное признание как крупное достижение науки. Конечно, среди ученых были и скептики, не принимавшие теорию Миланковича, однако сам он в дискуссии не вступал и позже об этом не жалел, «так как некоторые ученые и без моей помощи нашли, как правильно ответить на выдвинутые против нее возражения». И он добавил: «Сейчас я имею в своей личной библиотеке пять специальных научных работ и свыше сотни учебных пособий и руководств, которые используют мои инсоляционные кривые в качестве основы для изучения ледниковых эпох и их хронологии».

В 1941 году, в возрасте шестидесяти трех лет, Миланкович завершил работу над математической теорией инсоляции и ее приложением к проблеме ледниковых эпох. Спустя много лет Васко Миланкович, рассказывая об отце, вспоминал его слова:

«Если ты поймал большую рыбу, тебя перестает интересовать всякая мелочь. Целых двадцать пять лет я трудился над своей теорией солнечной радиации, и теперь, когда в этой работе поставлена точка, я, по существу, остался без дела. Я слишком стар, чтобы браться за новую теорию, к тому же проблемы такого масштаба, как только что решенная, не растут на деревьях».

Однажды вечером, во время обеда, он объявил жене и сыну: «У меня есть занятие на время немецкой оккупации. Я напишу историю своей жизни и работы. Ведь после моей смерти кто-то захочет дать их описание и сделает это почти наверняка неверно». В 1952 году он завершил свои воспоминания, а в 1957 году закончил работу над кратким синтезом итогов научных исследований. Через год после этого в возрасте семидесяти девяти лет он умер. Человек, который в своих расчетах и воображении десятилетиями странствовал через далекие миры и века, отбыл в последнее путешествие...

9. ТЕОРИЯ МИЛАНКОВИЧА: ЗА И ПРОТИВ

Уже первая заметная публикация Миланковича, появившаяся в 1924 году, вызвала новую вспышку интереса ученых мира к проблеме древних оледенений. Вновь – причем еще сильнее, чем после 1837 года, когда Агассис впервые заявил о своей ледниковой теории, – внимание мировой науки сфокусировалось на этой проблеме, и вновь вопросы геологической истории Земли и ее климата стали предметом споров, которые по своему накалу и широте были сравнимы лишь с памятным диспутом между Агассисом и Баклендом.

В основе всех этих споров лежали противоречивые факты, которые были накоплены геологической наукой за шестьдесят лет, прошедших с того времени, когда Джеймс Гейки смог решить проблему происхождения дрейфта. Выше говорилось, что работы Гейки вдохновили два поколения геологов, которые провели беспрецедентный по своему размаху и целеустремленности поиск, облавив и перекопав самые удаленные уголки суши для сбора данных, способных пролить свет на древние климаты Земли. В итоге было накоплено колоссальное количество фактов. Но теперь геологи особенно остро ощутили отсутствие теории, которая могла бы обобщить все эти факты и дать исчерпывающее объяснение причин ледниковых эпох. Миланкович как раз и предложил такую теорию.

Самая ценная особенность теории Миланковича – это ее пригодность для прогнозирования климатов прошлого, поддающегося геологической проверке. В частности, теория предсказала, какое количество ледниковых горизонтов будет вскрыто будущими исследованиями и на каких хронологических «этажах»

650 000-летнего периода окажутся эти горизонты.

Главным инструментом этого прогноза стали те самые три – почти идентичные по форме – инсоляционные кривые Миланковича, которые были построены для демонстрации колебаний поступления радиационного тепла в летние сезоны на 55° , 60° и 65° северной широты (см. рис. 24). В теории каждому крупному инсоляционному минимуму отвечала особая ледниковая эпоха. Всего же на тех кривых можно видеть девять минимумов, выраженных в виде узких зубцов с концами, спускающимися значительно ниже среднего уровня инсоляции. Кёппен и Вегенер обратили особое внимание на факт, что распределение этих минимумов было не равномерным, а каким-то неправильно «гнездовым». Одно из таких гнезд объединяло последние три минимума, которые образовали характерный трезубец с остриями, соответствующими хронологическим уровням около 25 000, 72 000 и 115 000 лет назад. Остальные шесть минимумов были собраны в три пары. Сам Миланкович обратил внимание на необычайно длительный интервал высокой инсоляции, выявившийся в средних частях всех трех графиков. По его предположению, в геологических разрезах этот интервал должен соответствовать межледниковой эпохе особенно большой длительности.

Естественно, что геологи, знакомые со стратиграфией ледниковых отложений, сразу предприняли попытки проверить эту теорию путем подсчета известных горизонтов морены и определения времени их формирования. Однако обе эти задачи оказались трудно разрешимыми. Каждое наступание ледников, как правило, уничтожало отложения, связанные с предыдущими оледенениями, благодаря чему «наборы» моренных горизонтов в большинстве древнеледниковых районов отличаются неполнотой. Кроме того, в распоряжении геологов не было и методов, пригодных для достаточно точного датирования таких горизонтов. Лучшее, что они могли сделать, – это предложить приблизительные оценки длительности ледниковых эпох и межледниковий, базирующиеся на сведениях о толщине и площадях соответствующих слоев морены и межледниковых почв.

Несмотря на все эти трудности, американские геологи во главе с Томасом Чемберленом из Чикагско-



28. Теоретическая схема, показывающая последовательность ледниковых эпох Северной Америки. К концу девятнадцатого столетия здесь также были выделены моренные горизонты - небраска, канзасский, иллинойский и висконсинский, соответствующие четырем плейстоценовым оледенениям Европы. Работы последующих лет показали, что фактическое число ледниковых эпох было значительно бóльшим.

го университета и Френком Ливереттом из Геологической службы смогли сделать вывод, что Северная Америка испытала четыре крупных оледенения. Каждое из них, а также соответствующие моренные горизонты получили названия штатов, в которых они были изучены с наибольшей полнотой. Вот их последовательность (снизу вверх): небраска (самое древнее), канзасское, иллинойское и висконсинское (самое молодое). Еще несколько географических названий были использованы для обозначения межледниковий (рис. 28).

Вооружившись внушительным арсеналом фактических данных и терминов, геологи разделились на группы сторонников и противников теории Миланковича. Первым казалось, что четыре моренных горизонта Северной Америки прекрасно увязываются с четырьмя инсоляционными минимумами — одним тройным и тремя двойными, — которые следовали из теории. А ее противники подчеркивали, что возраст этих горизонтов пока известен настолько приблизительно, что ни-

как не может говорить о действительном совпадении хотя бы одного из упомянутых минимумов с ледниковой эпохой. А это значит, что такого рода проверка ледниковой теории не могла быть убедительной.

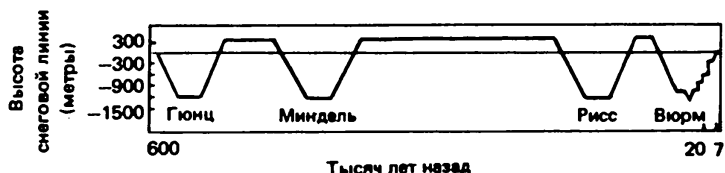
Совершенно иной подход к расшифровке хронологии древних оледенений был предложен в 1880 году Альбрехтом Пенком — немецким геоморфологом, изучавшим речные долины северного склона Альп. Пенк установил, что днища нижних участков этих долин представляют собой плоские поверхности галечной аккумуляции, в которые врезаны современные русла. А на бортах долин он обнаружил по три яруса террас — плоских разновысотных ступеней, отделенных друг от друга обрывистыми участками склонов и выстланных такими же галечниками, что и днища долин. Пенк рассудил, что каждый галечный слой должен был образоваться в условиях ледникового климата, когда интенсивное морозное выветривание и отсутствие растительности создали условия для ускорения эрозии. А когда климат становился более теплым, накопление гальки прекращалось, реки начинали блуждать из стороны в сторону и вырабатывать широкие плоские поверхности днищ. Таким образом, по Пенку, террасовые площади — это участки таких днищ, образовавшиеся в прежние межледниковые эпохи, и чем эти площадки выше, тем древнее возраст соответствующих им эпох. Что же касается галечных толщ, то в каждой из них Пенк видел остаток более мощного и обширного слоя, сформированного в одну из ледниковых эпох.

Если все это верно, то комплекс галечных толщ, изученных Пенком в долинах северного склона Альп, мог дать науке то, чего нельзя ждать от моренных разрезов, — лишенную пропусков «летопись» ледниковых событий Европы. И раз там отмечено четыре галечных слоя, то таким же должно быть и количество древних оледенений. Причем многие геологи на этом не остановились; не дожидаясь появления доказательств, они стали утверждать, что четыре ледниковых эпохи, выявленные по моренным горизонтам Северной Америки, представляют собой трансатлантические эквиваленты аналогичных событий Европы.

Ледниковые эпохи Европы получили названия речных долин, в которых изучались их следы. Для удобства геологов, которые уже начинали путаться в непрерывно множющихся терминах, эти названия были расположены в порядке латинского алфавита – гюнц, миндель, рисс и вюрм. Следы древнейшего оледенения, гюнцского, были представлены галечниками самых высоких террас, а следы самого молодого оледенения, вюрмского, – галечниками долин, в которые врезались современные реки. Этим терминам – гюнц, миндель, рисс и вюрм, – вычеканенным Пенком и Брюкнером, было суждено долго звучать в аудиториях университетов и глубоко запасть в память поколений и поколений студентов-геологов.

Кроме того, Пенк и Брюкнер дали оценку времени, прошедшего с момента дегляциации Швейцарии. С этой целью они, во-первых, собрали сведения о толщине послеледниковых осадков, накопившихся в швейцарских озерах, и, во-вторых, определили приблизительные скорости наслаивания этих осадков. Разделив толщину этих осадков на скорость их накопления, они пришли к выводу, что длительность послеледникового этапа Швейцарии была близка к 20 000 лет.

Затем, приняв послеледниковое время равным 20 000 лет, Пенк и Брюкнер сделали смелую попытку определить длительность и более древних межледниковий, для чего они провели сравнение глубин эрозионных врезов, которые образовались за послеледниковье и за каждый из более ранних теплых интервалов. Из их расчетов следовало, что межледниковье, предшествую-

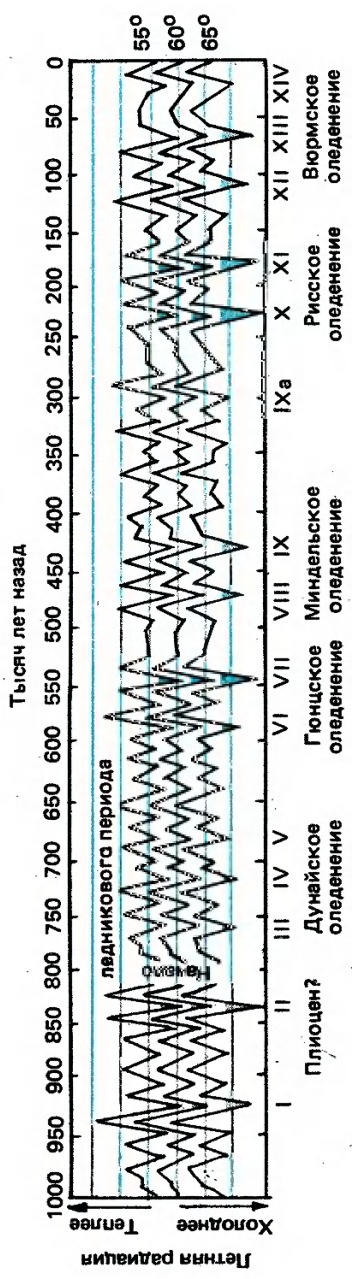
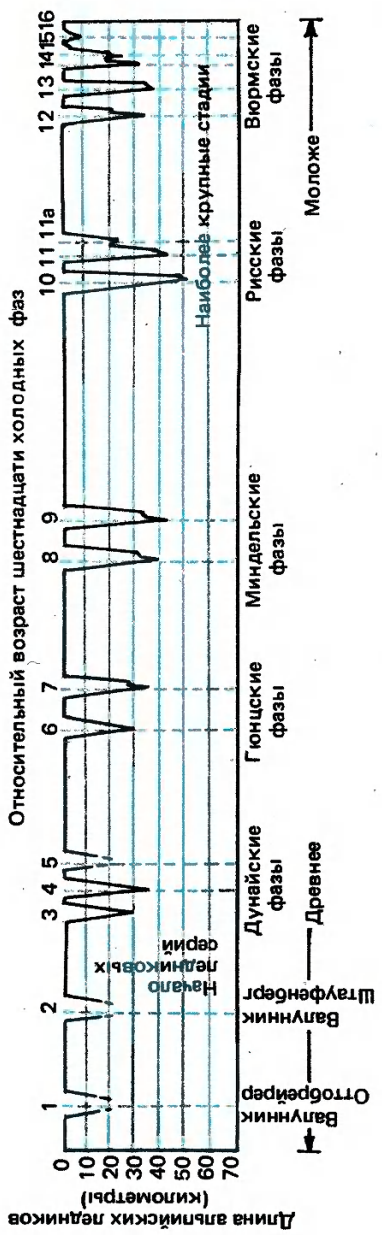


29. Теоретическая последовательность ледниковых эпох Европы, соответствующая климатической истории, восстановленной в работе А. Пенка и Э. Брюкнера (1909). По их определению, во время каждого из четырех оледенений, получивших названия гюнц, миндель, рисс и вюрм, снеговая граница в Альпах снижалась более чем на 1000 м относительно ее современного уровня (по М. Миланковичу, 1941).

вавшее последнему (вюрмскому) оледенению, длилось около 60 000 лет, а еще одна теплая эпоха, которая разделяла рисское и миндельское оледенения и получила название Великого межледниковья, растянулась на целые 240 000 лет. Продолжительность же всего плейстоцена, по их оценке, составила 650 000 лет.

В 1909 году Пенк и Брюкнер опубликовали кривую, которая наглядно представляла историю плейстоценового климата (рис. 29). Так что когда – спустя пятнадцать лет – Кёппен получил письмо с инсоляционными кривыми Миланковича, он сразу понял, что лучшим способом проверки астрономической теории будет сравнение этих кривых со схемой Пенка и Брюкнера. В главе 8 уже указывалось, что Кёппен и Вегенер, проведя такое сравнение, в 1924 году пришли к выводу об удивительно хорошем соответствии теории и геологических фактов. Как на инсоляционных кривых Миланковича, так и на палеоклиматическом графике Пенка и Брюкнера ледниковые эпохи запечатлелись в виде коротких резких пульсаций, отделенных друг от друга длинными интервалами. И хотя в деталях совпадение хронологии ледниковых эпох и инсоляционных минимумов было далеко не полным, форма обоих графиков была в общем очень сходной. Особенно большое значение Кёппен и Вегенер придавали тому факту, что Великое межледниковье Пенка и Брюкнера занимало на графике палеоклиматов то же место, что и длительный теплый интервал, который был постулирован Миланковичем. Производил впечатление и факт, что дата 20 000 лет назад, указанная Пенком и Брюкнером как время окончания последнего оледенения, достаточно хорошо согласовывалась с возрастом в 25 000 лет, определенным для последнего инсоляционного минимума.

Убедившись, что астрономическая теория Миланковича находит подтверждение в независимых геологических данных, Кёппен, как мы помним, сообщил об этом ее автору, а затем и включил кривые инсоляции в свою книгу. В последующие пятнадцать лет немецкие геологи Бартель Эберль и Вольфганг Зёргель провели новые исследования северных предгорий Альп и выяснили, что террасы швейцарских рек, ранее исследовавшиеся Пенком и Брюкнером, представляют собой сложные образования; по их данным, каж-



дая из этих террас образована не одним, а двумя-тремя галечными слоями. Тем не менее создавалось впечатление, что после уточнений, внесенных Эберлем и Зёргелем, палеоклиматический график Пенка и Брюкнера стал лучше прежнего совпадать с кривыми инсоляции. Поэтому сам Миланкович счел нужным включить резюме работ этих геологов в свою сводку, опубликованную в 1941 году (рис. 30).

В 1930-х и 1940-х годах большинство европейских геологов стали сторонниками астрономической теории оледенения. Как с очевидным удовлетворением заметил сам Миланкович, «постоянно растущее число ученых взялось за классификацию... ледниковых отложений в соответствии с новым методом, стремясь сперва увязать их с инсоляционными кривыми, а затем и датировать на основе этих кривых». Шаг за шагом стали смещаться и акценты, и там, где еще недавно геологические данные использовались для проверки теории, теперь теория применялась для объяснения геологических разрезов. «Таким путем, — говорил Миланкович, — ледниковый период получил свой календарь». Одним из творцов этого календаря стал Фредерик Цейнер, профессор геохронологии Лондонского университета. Дважды — в 1946 и 1959 годах — он выпустил по книге, в которых календарь Миланковича использовался для датирования всех главных событий плейстоцена Земли.

Американские геологи, которым альпийские террасы казались и далекими и не очень понятными, относились к теории более скептически. Да и в самой Европе ее одобрение не было единодушным. Против нее, в частности, выступил немецкий геолог Инго Шефер. Основательно изучив террасы альпийских долин, Шефер пришел к выводу об ошибочности фундаментального принципа схемы Пенка и Брюкнера. В этом его убедил

30. Проверка теории Миланковича по реконструкции Б. Эберля. Сопоставление климатической истории Европы, представленной Б. Эберлем (верхний график), с инсоляционными кривыми Миланковича, рассчитанными для 55, 60 и 65° с. ш. (нижний график). Масштаб времени, использованный в графике Эберля, довольно неопределенный, тем не менее Миланкович верил, что хорошая корреляция обоих графиков может служить одним из доказательств правильности его теории ледниковых эпох (по М. Миланковичу, 1941).

ли находки раковин теплолюбивых моллюсков в разрезах ряда галечных толщ, считавшихся, как мы помним, ледниковыми. Как же могло случиться, задал он вопрос, что отложения, включающие подобные раковины, сформировались в ледниковые эпохи? Этот неприятный вопрос грозил подорвать самую основу теории Миланковича. Однако европейские геологи в своем большинстве попросту игнорировали проблему, отмахнувшись от шеферовских моллюсков как от мелкого исключения из общего правила.

Но вскоре зазвучали и другие голоса, поднятые против теории Миланковича. Среди них – голоса метеорологов, заметивших, что данная теория рассматривает только радиационный баланс Земли и упускает из виду процессы переноса тепла, связанные с циркуляцией атмосферы и океана. Другие специалисты выявили несообразности в самих расчетах Миланковича. Судя по ним, летние температуры в ледниковые эпохи должны были падать на $6,7^{\circ}\text{C}$ ниже современных, что выглядело достаточно правдоподобным. Однако зимние температуры, по тем же расчетам, были тогда в среднем на $0,7^{\circ}\text{C}$ выше, чем в настоящее время, что многим ученым представлялось совершенно невероятным. Правда, самого Миланковича их критика нисколько не трогала. «В мои обязанности не входит ликвидация чьего-то невежества, – писал он не без высокомерия, – и я никого не принуждаю признавать мою теорию, к которой до сих пор никто не мог придраться».

И в самом деле, несмотря на возражения метеорологов и противоречащие данные, полученные Шефером, большинство ученых вплоть до 1950-х годов оставались сторонниками астрономической теории. Однако в начале этого десятилетия мы стали свидетелями драматического поворота – поворота буквально на 180° , так что уже к 1955 году теория потеряла практически всех своих сторонников! Виновником столь быстрого заката теории, которая еще совсем недавно пользовалась почти всеобщим признанием, стало развитие принципиально нового подхода к проблеме датирования органических остатков, извлекаемых из плейстоценовых отложений.

Новый подход стал возможным благодаря появлению радиоуглеродного метода абсолютной геохроноло-

гии, который был разработан в 1946–1949 годах Уиллардом Либби из Чикагского университета. Либби установил, что одним из следствий воздействия космических лучей на атмосферу является постоянное образование небольших количеств радиоактивного углерода, или радиоуглерода. Атомы последнего поглощаются всеми живыми организмами – растениями и животными – и участвуют в строении их тел. Однако поглощение продолжается лишь до тех пор, пока организмы функционируют, и прекращается с их отмиранием. Затем атомы радиоуглерода, входящие в состав тканей организмов, постепенно распадаются (с образованием инертных атомов азота), причем скорость данного процесса поддается измерению. По идее Либби, именно эту скорость следует использовать для расчета времени, прошедшего с момента гибели организмов: нужно только измерить, какую часть углерода из датированного органического материала еще составляет его радиоактивный изотоп. Широкая проверка метода радиуглеродного датирования показала, что он действует замечательно надежно. Правда, с его помощью удавалось достаточно точно рассчитывать возраст лишь образцов, которые были не старше 40 000 лет.

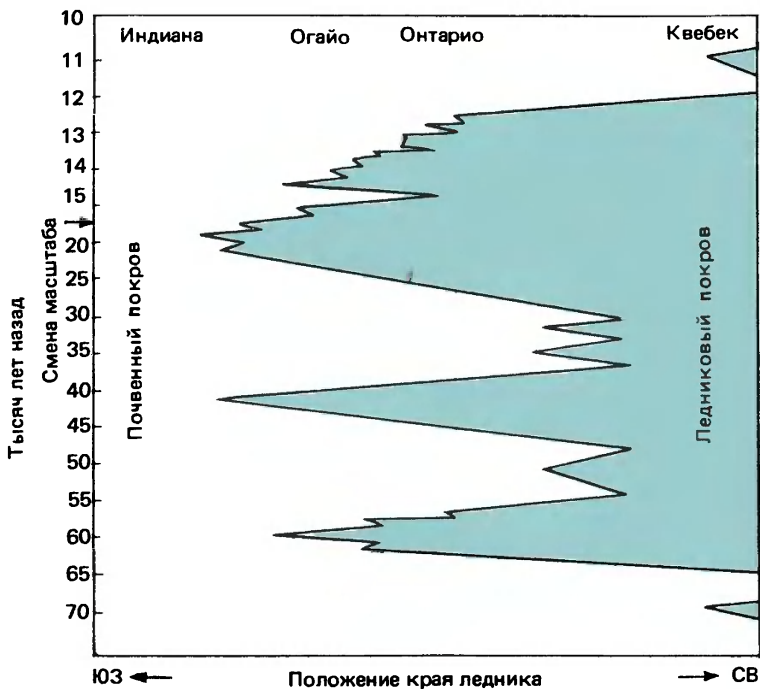
Уже в 1951 году радиоуглеродный метод был взят на вооружение геологами, причем первым крупным проектом, осуществленным на его основе, стало выяснение геохронологии последней ледниковой эпохи, точнее, ее второй половины. Эти работы быстро приобрели глобальный размах, во многих учреждениях ряда стран появились радиоуглеродные лаборатории; особую известность приобрели лаборатории Йельского и Колумбийского университетов, Геологической службы США, Гронингенского и Упсальского университетов. Пионерами радиоуглеродного анализа стали геохимики Ханс Зюсс, Мейер Рубин, Хессел Де-Вриз и Ингрид Ульсен. Очень скоро на их лаборатории обрушилась лавина полевого материала. Образцы для датирования – древесина, торф, раковины и кости – отбирались из моренных и водно-ледниковых толщ, террасовых песков и галечников, из болотных и озерных разрезов во всех концах света. «Встретил органику – собирай и датировуй» – таким был лозунг дня. Количество датировок стало расти столь быстро, что для их публикации пришлось создать специальное издание – ежегодник «Ра-

диокарбон».

Одним из первых геологов, осознавших важность сбора и систематизации радиоуглеродных дат, стал профессор Йельского университета Ричард Флинт. Уже первая крупная партия образцов, собранных Флинтом из висконсинского дрифта восточных и центральных районов США и проанализированных Рубином, во многом обогатила науку. Было выяснено, что морены этих районов представляют собой отложения по меньшей мере двух, а возможно, и большего числа оледенений. Прежняя гипотеза, согласно которой они связывались с одним-единственным оледенением, оказалась ошибочной. Возраст нижней морены лежал за пределами возможностей радиоуглеродного метода, зато верхняя морена вполне поддавалась датированию. В итоге ее изучения Флинт и Рубин показали: последний ледниковый покров Северной Америки достигал своего максимального распространения 18 000 лет назад, а около 10 000 лет назад быстро деградировал.

Сначала казалось, что результаты, полученные в ходе «радиоуглеродной революции», хорошо согласуются с теорией Миланковича. В самом деле, хотя возраст в 18 000 лет, определенный для последнего ледникового максимума, был на 7 000 лет моложе последнего инсоляционного минимума, отнесенного Миланковичем на 25 000 лет назад, это несовпадение можно было легко объяснить: инертный лед не сразу реагировал на изменение радиационного баланса Земли. Известно, что Миланкович и сам предсказывал запаздывание данной реакции и даже определил, что его величина должна составлять около 5 000 лет.

Однако очень скоро вера в теорию Миланковича была поколеблена, чему прежде всего способствовала находка в Фармдейле (Иллинойс) торфяного слоя с возрастом в 25 000 лет. Такой торф мог образоваться только в условиях теплого климата. Насколько теплого — оставалось неясным, зато датировка соответствующего интервала вполне определенно совпадала с возрастом последнего инсоляционного минимума Миланковича. Когда же отложения того же возраста и такого же «теплого» типа были обнаружены и в других пунктах Среднего Запада США, восточной Канады и Европы, то создалось впечатление, что данные, идущие вразрез с астрономической теорией, преобладают



31. Колебания южного края Североамериканского ледникового покрова между штатом Индиана и провинцией Квебек. Его географическое положение для каждого из моментов последней ледниковой эпохи зафиксировано по широте границы, отделявшей моренный горизонт от одновозрастного ему почвенного покрова. Хронология этих колебаний, восстановленная по радиоуглеродным датировкам с максимальными значениями до 70000 лет назад, пока плохо согласуется с теорией Миланковича (по Р. П. Голдтвейту и др., 1965).

над фактами, которые с ней согласуются.

С дальнейшими успехами радиоуглеродного метода все большее число геологов получало возможность для «привязки» данных, собранных при исследованиях плейстоценовых отложений, к абсолютной шкале времени. Среди прочего это позволило получить и датированную палеоклиматическую кривую, пригодную для прямого сопоставления с кривой инсоляции. Правда, для ее построения пришлось осуществить специальную программу, датировав десятки образцов из ледниковых

(моренных) и приледниковых (лѣссовых) отложений, которые были целенаправленно отобраны по ряду меридиональных профилей. Затем изменения в широтном положении границы между мореной и лѣссами представлялись графически как функция времени, так что получались зигзагообразные линии, которые показывали изменения позиции южного края ледникового покрова в ходе его наступаний и отступаний по определенной долготе за период, охватывающий многие тысячелетия.

При этом мало кто устоял перед искушением использовать радиоуглеродные даты не только в интервале надежного действия метода, то есть в пределах последних 40 000 лет, но и за его пределами. В итоге к середине 1960-х годов появилось несколько графиков, демонстрирующих колебания южных краев ледниковых покровов Европы и Северной Америки за последние семьдесят или даже восемьдесят тысяч лет. Одна из самых детальных схем этого рода была составлена Ричардом Голдтвейгом, Алексисом Дрейманисом и их сотрудниками (рис. 31). Она базировалась на данных датирования морен и лѣссов на профиле, идущем от штата Индиана к провинции Квебек. Анализ этой, а также других схем того же рода показал, что отраженный на них ход климатических изменений почти во всех своих деталях расходится с астрономической теорией. По схеме, составленной для Северной Америки, например, 72 000 лет назад ледниковый край располагался в южной части Квебека, то есть значительно севернее, чем в максимум последнего оледенения, хотя это было время крупного инсоляционного минимума. И наоборот, крупномасштабные наступания ледниковых покровов происходили шестьдесят и сорок тысяч лет назад, то есть в интервалы времени, для которых никаких инсоляционных минимумов не предполагалось; лишь ледниковый максимум, пришедшийся на 18 000 лет назад, оказался в согласии с астрономической теорией, о чем мы уже говорили выше.

И такие результаты получались практически всякий раз, когда геологи использовали радиоуглеродный метод для изучения древнеледниковых отложений. В общем получалось, что за последние 80 000 лет, или, лучше сказать, за интервал времени, который считали

равным 80 000 лет, выявлялось существенно бóльшее число ледниковых наступаний, чем следовало из теории Миланковича. По этой и некоторым другим причинам к 1965 году астрономическая теория ледниковых эпох потеряла почти всех своих сторонников.

10. ОКЕАНСКИЕ ГЛУБИНЫ И ПРОШЛОЕ

Если бы дело о теории Миланковича слушалось в суде, то можно было бы с полным основанием заявить протест, поскольку все аргументы обвинения базировались лишь на данных, собранных на поверхности суши. Между тем в осадочных образованиях материков следы древних климатов сохраняются лишь фрагментарно, так что любой свидетель, который выступил бы на таком процессе, мог быть уличен не только в предвзятости, но и в плохом знании фактов.

Одним из первых, кто сумел понять принципиальную неполноту наземной летописи древних климатов, был Джеймс Кролль. Он же пророчески предсказал, что более полные данные по истории ледниковых эпох будут получены лишь тогда, когда геологи обратят свои взоры на осадки океанского дна. «В глубочайших уголках океана, захороненные под сотнями футов песка, ила и гравия, нас ждут растительные и животные остатки, которые... были во множестве вынесены туда реками с суши. А вместе с ними должны покоиться скелеты, раковины и панцири созданий, благодеествовавших тогда в самом океане». Однако эти слова Кролля лишь плод абстрактных размышлений. И это понятно: в его время научные знания об океанских глубинах почти полностью отсутствовали, во всяком случае об океанском дне знали меньше, чем о поверхности Луны.

Однако океан не мог вечно хранить свои тайны. В 1872 году британское правительство снарядило кругосветную экспедицию на 2360-тонном паровом корвете «Челленджер», которая была рассчитана на три с половиной года. Группой из шести ученых, работавших на «Челленджере» под руководством Уайвилла Томсона, были созданы методы промера глубин, сбора проб воды, отлова морских животных и растений,

драгирования дна на всех глубинах. И уже к 1875 году, когда экспедиция вернулась в Англию, многие тайны океана были развеяны.

Наблюдения, выполненные с борта «Челленджера», подтвердили большинство предсказаний Кролля. Если исключить отдельные участки, где были встречены выходы массивных базальтов, дно океана оказалось действительно покрыто плащом осадочного материала. У краев материков в составе этого плаща резко преобладал материал, вынесенный реками и перераспределенный морскими течениями. Здесь дно океана покрыто слоями песка и ила, в которые включены фрагменты сухопутных растений и других организмов. Однако вдали от материков основные площади дна, как выяснилось, были выстланы вязкими тонкозернистыми илами. Исследовав их под микроскопом, геологи с «Челленджера» обнаружили, что они часто почти целиком состояли из окаменелых остатков мельчайших животных и растений. Немногим раньше был открыт и живой источник этих организмов. На специальных сетках, которые протаскивались через приповерхностную водную толщу океана, биологи экспедиции увидели бесчисленное множество плавучих организмов, собирательно называемых планктоном; минерализованные остатки с океанского дна были аналогичны этим планктонным организмам. Таким образом, стало ясно: образование органогенных илов было связано с длительным процессом выпадения скелетов таких организмов из водной толщи на дно.

Участники экспедиции установили, что обширные площади океанского ложа покрывались особым типом глубоководного ила, который состоял из известковых остатков планктонных животных, называемых фораминиферами. Этот тип осадков явно преобладал в умеренных и тропических зонах океана, в тех их частях, глубины которых не превышали 4000 метров. А в более холодных — арктических и антарктических — районах океана широким развитием пользовались органогенные илы другого типа. Они состояли главным образом из опала — стекловидного минерала, который извлекают из воды особые планктонные организмы: мельчайшие животные — радиолярии, и водоросли — диатомеи. Когда экспедиция закончилась и ее результаты предстали в виде карты донных осадков, ученые впер-

вые поняли, что эти два типа илов занимают половину дна Мирового океана, или распространены на площади, равной всем материкам Земли. Однако в частях океана, глубины которых превосходили 4000 метров, донные осадки были представлены не органическими илами, а коричневой глиной, в которой никаких окаменелостей не было. Исследователи решили, что на столь больших глубинах морская вода обладает особыми свойствами, благодаря которым кремневые и известковые скелеты растворялись, не успев достичь дна. А этих глубин достигали только тончайшие частицы глины, принесенные морскими течениями и ветром.

Для обработки колоссальной массы данных, собранных экспедицией на «Челленджере», была создана международная группа специалистов во главе с английским ученым Джоном Мёрреем. Лишь к 1895 году эти данные были проанализированы и результаты работы опубликованы в виде пятидесятитомного отчета. Из него исследователи климатов прошлого смогли впервые узнать, что морская микрофауна и флора пригодны для определения палеотемператур океана. В самом деле, экспедиция выяснила, что одни виды фораминифер и прочих планктонных организмов обитают только в холодной воде, тогда как другие — только в теплой. Благодаря этому появилась возможность воплотить в жизнь мечту Кролля, а именно научиться читать историю климата, анализируя слои глубоководных осадков океана. Ведь в ответ на изменения климата должны были сдвигаться границы ареалов распространения тех видов планктонных организмов, которые чувствительны к колебаниям температур. Поэтому каждый конкретный разрез донных осадков должен навсегда запечатлеть в себе летопись всех событий ледникового периода.

Но оставалось решить еще одну проблему. Ведь прежде чем начать расшифровку истории климата по сменам окаменелостей в глубоководных осадках, надо было еще научиться извлекать эти осадки с океанского дна. Было сделано немало попыток создать соответствующие устройства, причем все их проекты основывались на одном и том же принципе: предлагался снаряд в форме полый стальной трубы, который должен сначала заглубляться в дно, а затем извлекаться наружу вместе с вошедшей в него грунтовой

колонкой. Первые такие устройства назывались ударными трубками; они вдавливались в дно под действием одной лишь силы тяжести. Такие снаряды подвешивались на тросах над поверхностью дна, а затем отпускались, и инерция падения заставляла их войти в толщу донных осадков. К сожалению, ударные трубки могли брать лишь колонки, длины которых редко превышали один метр; этого обычно не хватало для получения летописи всего ледникового периода. Для увеличения длины колонок прибегали к разным средствам. Трубки утяжеляли дополнительными грузами, однако выигрыш при этом был небольшим: слишком велики были силы трения, препятствовавшие их заглоблению. Испытывались и другие устройства, в частности снаряд, изобретенный Шарлем Пигго, в котором использовался динамит. Однако и он оказался неудовлетворительным, так как взятые с помощью взрывов осадки оказывались сильно дислоцированными.

Несмотря на малую глубину проникновения ударных трубок, собранные ими колонки уже могли стать предметом научного анализа. Пионером такого рода работ стал немецкий палеонтолог Вольфганг Шотт, который взялся за изучение колонок, поднятых в экваториальных районах Атлантического океана в 1925–1927 годах немецкой экспедицией на пароходе «Метеор». Результаты исследований Шотта, опубликованные в 1935 году, стали моделью последующих работ по плейстоценовому планктону. Шотт начал с составления карт распространения 21 вида планктонных фораминифер в современных донных осадках. Затем он изучил и описал образцы, отобранные через равные промежутки из «метеоровских» колонок. В итоге он смог выделить три слоя, из которых первый (верхний), имевший в большинстве случаев толщину 30–40 сантиметров, вмещал сообщество фораминифер, которое сильно отличалось от такого же сообщества нижележащего (второго) слоя, но было аналогично современному. Второй слой включал в себя многие виды микроорганизмов, характерные для первого, но их количественные соотношения были иными. Главная же разница состояла в том, что в первом слое преобладали «теплые» виды фораминифер, а во втором значительную роль играли их «холодные» виды. Был, правда, один

вид, который присутствовал в слоях 1 и 3, но полностью отсутствовал в слое 2. Названию этого вида фораминифер — *Globorotalia menardii* — было суждено надолго попасть в фокус усиленного внимания геологов. По заключению Шотта, слой, который не содержал *menardii*, образовался в последнюю ледниковую эпоху, когда поверхностные воды экваториальной Атлантики охлаждались; первый слой, богатый фораминиферами *menardii*, был отложен в послеледниковье, а слой 3, также включавший много *menardii*, — в межледниковье, которое предшествовало последнему оледенению.

Результаты Шотта разожгли аппетиты палеонтологов. Вместе с тем они показали настоятельную необходимость получения более длинных колонок. В самом деле, если метровые разрезы, вскрытые ударными трубками, несли с собой информацию, которая охватывала все время от современности до последнего межледниковья, то сколько же нового можно узнать из колонок десятиметровой длины?

Проблема взятия таких колонок была решена в 1947 году шведским океанографом Бьёре Кулленбергом. Последний ввел в конструкцию трубок особый поршень, благодаря которому в них создавалось разрежение, и донные осадки не просто вдавливались, а всасывались в их полости. Кулленберговские — ударно-поршневые — трубки могли брать колонки длиной до 10–15 метров, что означало новую эру в изучении истории климата.

Первую «обкатку» эти трубки прошли в 1947–1948 годах, в Шведской глубоководной экспедиции на исследовательском судне «Альбатрос». Совершив кругосветное плавание, ученые «Альбатроса», во главе которых стоял Ханс Петтерссон, подняли длинные колонки со дна всех океанов. Колонки из Тихого океана были направлены в Скриппсовский институт океанографии (Калифорния) Густафу Аррениусу. Химический анализ образцов грунта, взятых из этих колонок, позволил установить, что для содержания карбоната кальция (известки) в них характерны циклические изменения: слои с высокой концентрацией известковых окаменелостей чередовались со слоями, в которых их концентрация была низкой. Не ограничившись установлением факта этих изменений, Аррениус предложил и его объяснение; по его мнению, колебания в кон-

центрации карбоната кальция в изученных им колонках должны отражать изменения в интенсивности циркуляции вод Тихого океана, которые были связаны с чередованием ледниковых и межледниковых эпох.

Эти исследования показали, что для познания климата плейстоцена, во всяком случае климата, характерного для плейстоцена Тихого океана, могут быть полезны данные не только палеонтологов, но и химиков. Впрочем, вслед за тем такие же, циклические, изменения содержания карбоната кальция удалось выявить и в атлантических колонках, которые изучались в другом университете США – Колумбийском. Однако в Тихом и Атлантическом океанах цикличность оказалась противоположной: если в Тихом океане «холодные» слои имели относительно высокую концентрацию карбоната, а «теплые» – низкую, то в Атлантике их соотношение было обратным. Оставалось допустить, что названные океаны по-разному реагировали на глобальные изменения климата.

Судя по работе Аррениуса, осадконакопление в Тихом океане шло с очень низкой скоростью – около одного миллиметра в столетие. С одной стороны, это давало определенное преимущество для палеонтологов, так как даже сравнительно короткие колонки могли содержать палеоклиматическую информацию по всему плейстоцену, но, с другой стороны, было и недостатком, поскольку низкая скорость седиментации почти полностью исключала возможность детального выяснения климатической истории.

В Атлантическом океане, как выяснилось, накопление осадков шло в два-три раза быстрее, поэтому можно было ожидать, что климатическая летопись, заключенная в атлантических колонках, отличается значительно большей полнотой. Естественно, что геологи с особым интересом следили за ходом работ, которые велись над 39 длинными колонками, взятыми Хансом Петтерссоном в Атлантике. Анализ этих колонок был поручен сотрудникам Скриппсовского института Фреду Флегеру, Френсису Паркеру и Джин Пирсон. Его итогом явилась монография, изданная в 1953 году. Она содержала сенсационный вывод: в колонках глубоководных осадков Атлантического океана присутствуют следы по меньшей мере девяти ледниковых эпох. В ходе этого анализа также выяс-

нилось, что палеоклиматическая интерпретация разрезов донных отложений имеет ряд специфических трудностей. В частности, в нескольких колонках, поднятых с больших глубин, были обнаружены прослойки песка с мелководными фораминиферами, которые, очевидно, каким-то образом переотложились из прибрежных районов океана. Механизм, при помощи которого этот песок оказался включенным в разрезы тонких органогенных илов, образовавшихся за счет «планктонного дождя», тогда казался необъяснимым.

Прежде чем стать профессором океанографии Скриппсовского института, Флегер провел несколько лет в Океанографическом институте Вудс-Хол на мысе Код. Именно тогда его ассистентом стал Дейвид Эриксон, уже давно, еще в годы его работы в Геологической службе Флориды, убедившийся в необходимости изучения морских осадков. В Вудс-Холе работал и геофизик Морис Юинг, делавший тогда первые шаги на пути, который в конце концов привел его к открытиям, бросившим свет на природу земной коры под океаном. В 1949 году Юинг как раз готовил экспедицию к Срединно-Атлантическому хребту, и ему был нужен помощник, имеющий опыт и знания в области морской палеонтологии. Таким помощником и стал Эриксон.

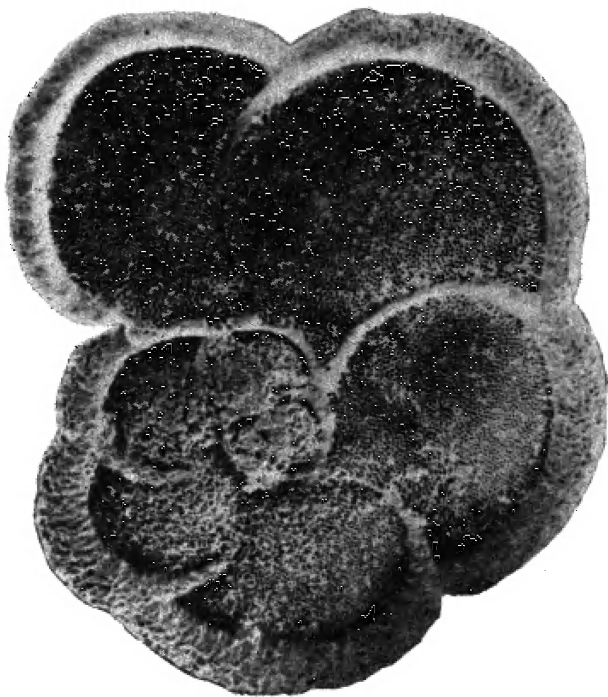
В 1950 году Юинг стал работать в Колумбийском университете; он перебрался в Нью-Йорк, забрав с собой весь запас образцов донных осадков. Как позже писал Эриксон, «Юинг переехал вместе со своими колонками». Вскоре вокруг Юинга сплотилась группа ученых, техников и студентов, которые были привлечены его планами исследований происхождения океанских бассейнов. Очень скоро Юингу и его «команде» стало тесно в отведенном им помещении. К счастью, именно тогда университет получил в дар от известного промышленника и мецената Томаса Ламонта усадьбу в Палисейдс, штат Нью-Йорк. Группа расположилась в усадьбе, и через несколько лет на ее базе вырос всемирно известный центр океанографических и геофизических исследований, получивший название Ламонтской геологической обсерватории.

Понимая потенциальную важность изучения мелководных колонок, Юинг настоял на том, чтобы суда обсерватории, независимо от их конкретных исследовательских заданий, повседневно зондировали дно и бра-

ли колонки. Благодаря этому у него скапливались новые и новые сотни колонок, которые в ожидании своей очереди в лабораторию складировались в хранилищах. В итоге ламонтская коллекция морских геологических образцов стала богатейшей в мире, так что Эриксон получил великолепные возможности для исследований истории климата. Будучи знаком с работами, ранее выполненными Шоттом и группой из Скриппсовского института, он горел нетерпением продолжить их, добившись большей точности и детальности. Но ему было известно, что в некоторых районах океана серьезную проблему представляли слои переотложенных осадков, подобных тем, которые поставили в тупик Флегера.

Однако в 1952 году, когда книга Флегера и соавторов была еще в печати, загадка этих слоев была решена. Главная заслуга в ее раскрытии принадлежала коллегам Эриксона по Ламонтской обсерватории — Брюсу Хизену и все тому же Морису Юингу. Изучая следы землетрясения, происшедшего в 1929 году на Большой Ньюфаундлендской банке, они установили, что одним из его следствий был гигантский оползень осадочной толщи, покрывавшей соседний материковый склон. Огромные массы донных осадков были при этом взмучены, подняты придонным турбулентным слоем воды и транспортированы вниз, в глубоководную область в виде мощных мутьевых потоков. Последние, двигаясь со скоростью экспресса, порвали подводные телефонные кабели и отложили песок и ил на обширной площади дна, внося нарушения в нормальный процесс глубоководной седиментации.

Получив, таким образом, объяснение природы переотложенных слоев, Эриксон смог взяться за разработку методов их выявления, которые позволили бы очистить климатический сигнал от того «шума», который вносился процессом осадконакопления. Вместе со своим ассистентом Гёста Воллином он начал просматривать подряд все колонки из ламонтского хранилища, что было совсем не простым делом, так как их поступление уже шло со скоростью до двухсот штук в год. Чтобы ускорить работу, Эриксон взял на вооружение упрощенную методику лабораторного анализа, предложенную еще Шоттом. Вместо подсчета всех особей микрофауны, относящихся ко всем видам, представлен-



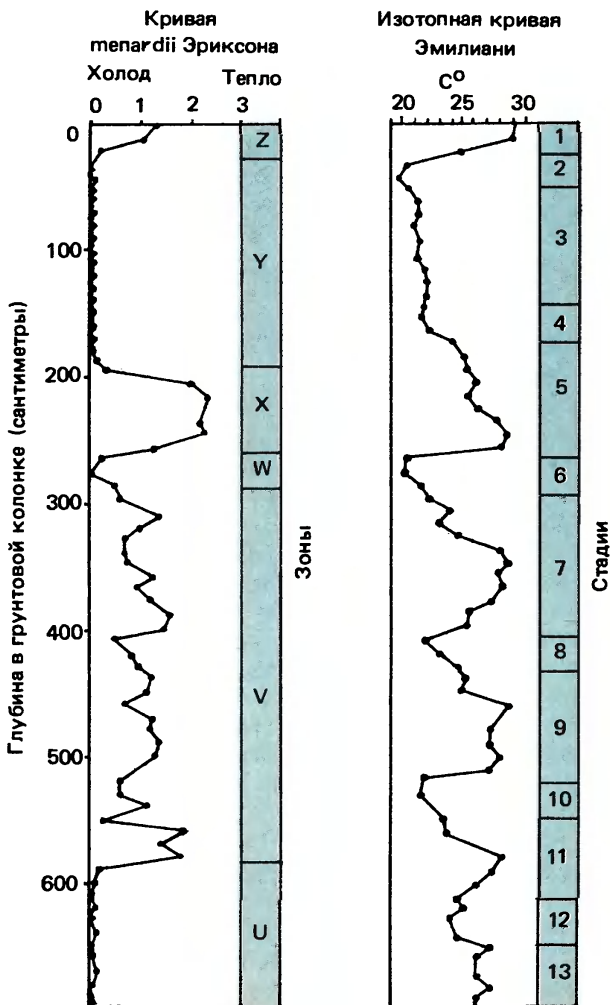
32. Представитель микрофауны из глубоководных отложений океана. Скелеты многих представителей морской фауны и флоры, обитающих в приповерхностном слое океана, после смерти погружаются на дно, где накапливаются, образуя толстые слои донных осадков. Показанная на рисунке раковина принадлежит *Globorotalia menardii* – виду планктонных фораминифер, который широко использовался Д. Б. Эриксоном для индикации плейстоценовых климатов. Поперечник раковины – около одного миллиметра (фото предоставлено А. Би).

ным в образцах, Эриксон и Воллин сосредоточили внимание лишь на тех видах фораминифер, которые считались особенно чувствительными к изменениям климата (рис. 32). Вначале они просто оценивали степень обилия таких видов-индикаторов. Впоследствии же, когда потребовались более точные результаты, пришлось перейти к настоящим подсчетам. В низких широтах первым кандидатом на роль вида-индикатора был тот самый вид *Globorotalia menardii*, который, как мы помним, присутствовал только в «теплых» слоях Шот-

та и отсутствовал в его «ледниковом» слое. Анализ колонок из низких широт Атлантики, проведенный Эриксоном, подтвердил вывод Шотта, что в теплых зонах океана колебания в количестве *menardii* могут служить надежным показателем изменений климата. Но в колонках, взятых в более высоких и холодных широтах, *menardii* вообще отсутствовали. В этих широтах роль индикаторов климата прошлого должны были играть другие виды.

К 1956 году Эриксон убедился, что его упрощенный метод палеоклиматических реконструкций дает хорошие результаты. Этот вывод подтверждался и данными других исследователей, прежде всего работами коллег по Ламонтской обсерватории геохимиков Уоллеса Брэккера и Лоренса Кальпа. Датируя границу между двумя верхними слоями Эриксона – самым молодым, включавшим *menardii*, и вторым сверху, их не содержащим, – они установили: изменение условий на этой границе было исключительно резким и произошло около 11 000 лет назад. Полученная ими дата оказалась очень близкой ко времени столь же внезапного потепления суши, датированного с помощью радиоуглеродного метода. В статье, вышедшей в 1956 году, Эриксон, Брэккер, Кальп и Воллин писали: «Материал колонок с полной очевидностью свидетельствует, что короткий интервал времени, который начался чуть раньше и кончился чуть позже 11 000 лет назад, сыграл критическую роль в истории оледенения. Продолжение работ по увязке событий этого времени, имевших место в океане и на суше, по-видимому, прольет свет на некоторые факты, вызывавшие оледенения». Эта статья была результатом сотрудничества палеонтологов и геохимиков; она носила междисциплинарный характер, что в последующем стало отличительной особенностью большинства работ, вышедших из стен Ламонтской обсерватории.

Независимых подтверждений палеоклиматических выводов Эриксона можно было ожидать и от ряда других исследований, в частности от разработки принципиально нового метода определения температур плейстоценового океана. Такой метод, базировавшийся на изотопном составе атомов кислорода из ископаемых фораминифер, был создан в 1955 году в Чикагском университете Чезаре Эмилиани. Причем применение



33. Последовательность ледниковых эпох по колонке A179-4, поднятой со дна Карибского моря, — интерпретации Эриксона и Эмилиани. Эриксон восстанавливал изменения климата по количеству раковин *Globorotalia menardii* на разных стратиграфических уровнях, вскрытых колонкой. Холодные интервалы он назвал зонами U, W и Y, а теплые интервалы — зонами V, X и Z. Палеоклиматические выводы Ч. Эмилиани основывались на изотопно-кислородных измерениях, проведенных по образцам из той же колонки; теплые интервалы Эмилиани назвал стадиями 13, 11, 9, 7, 5, 3 и 1, а холодные интервалы — стадиями 12, 10, 8, 6, 4 и 2 (по Ч. Эмилиани, 1955, и Д. Б. Эриксону и др., 1961).

обоих методов – микропалеонтологического и изотопно-кислородного – к изучению одних и тех же колонок дало вполне удовлетворительные результаты – правда, лишь пока речь шла о приповерхностных частях разрезов донных осадков. Однако при переходе к их более глубоким частям данные разных методов явно расходились, чему еще было суждено стать предметом длительных дискуссий.

К 1961 году Эриксон успел изучить более ста колонок и был готов к составлению обобщенной схемы климатической истории плейстоцена. Для облегчения дела он ввел собственную систему терминов, которая устранила необходимость в таких тяжеловесных фразах, как «третья сверху зона, в которой отсутствуют *Globorotalia menardii*». Это упрощение предложил вечно спешащий редактор, работавший над рукописью статьи Эриксона, Юинга, Воллина и Хизена; для обозначения главных слоев в ней использовались буквы латинского алфавита. Например, «теплый» слой, сформированный на новейшем этапе истории океана, получил название зоны Z Эриксона. Слой, образованный в последнюю ледниковую эпоху, стал зоной Y, а слой, отвечающий предшествующему межледниковью с его температурами, близкими к современным, – зоной X (рис. 33). Теперь было легко увидеть существенную особенность климатической кривой Эриксона: его зона V с характерной для нее высокой концентрацией *menardii* была ненормально длинной, а расположенная под ней зона U – необычно короткой. Эриксон не мог не заметить, что его длительная зона V по своей позиции соответствовала Великому межледниковью Европы, выделенному Пенком и Брюкнером. И хотя сам он не относился к сторонникам Миланковича, кривая *menardii* стала немалым утешением для горстки приверженцев астрономической теории.

Со временем Эриксон все острее ощущал конфликт между его схемой и данными, получаемыми на основе метода изотопной палеотермометрии. Пытаясь разрешить его, Эриксон и Эмилиани подвергли параллельному анализу одни и те же образцы из трех колонок, поднятых со дна Карибского моря (рис. 33). При этом результаты измерений Эмилиани были выражены в градусах Цельсия, а данные Эриксона показывались кривыми, отражавшими лишь общие температурные

тенденции. Следуя Аррениусу, Эмилиани обозначил свои палеотемпературные стадии порядковыми номерами, следующими сверху вниз. Черты сходства и различий графиков, построенных на базе этих двух методов, будут подробно рассмотрены в главе 11, здесь же отметим, что в том интервале, который соответствовал зонам W–Z схемы Эриксона и стадиям 6–1 схемы Эмилиани, они были в общем похожими. Но при более тщательном сравнении и здесь проступали досадные несоответствия. Так, зона X первой схемы оказалась короче стадии 5 Эмилиани, а во многих колонках последнего выявился отчетливый теплый интервал внутри стадии 3, которому не было аналога в зоне Y. Что же касается более древних частей колонок, то в их интерпретации было больше различий, чем сходства. Ненормально длинная зона V Эриксона на схеме Эмилиани не выглядела единой, а распадалась на несколько самостоятельных флуктуаций, а зона U, по Эриксону единая и холодная, на схеме Эмилиани состояла из трех стадий, две из которых – 11 и 13 – были теплыми. Причем на поиск удовлетворительного объяснения этих расхождений еще предстояло затратить почти целое десятилетие.

К 1963 году Эриксон, Юинг и Воллин добились значительных успехов в документации климатической истории плейстоцена. Проанализировав «более 3000 колонок, поднятых со дна всех океанов и краевых морей в 43 океанографических экспедициях, начиная с 1947 года... мы смогли обнаружить восемь, в которых была четко выражена граница резких изменений в составе ископаемых планктонных организмов». По их заключению, эта граница маркировала начало первой ледниковой эпохи плейстоцена. Одним из самых примечательных событий, приуроченных к данной границе, было вымирание океанских звездообразных водорослей – дискоастеров, что, по их определению, произошло около полутора миллионов лет назад.

Однако основная масса геологов продолжала сомневаться в правильности выводов, сделанных Эриксоном и его коллегами. Хронология Эриксона, базировавшаяся на целом ряде труднодоказуемых утверждений, казалась проблематичной. Не вызывала особого доверия и предложенная им климатическая интерпретация всей последовательности зон *menardii*. Этот

скептицизм не был развеян и выпущенной в 1964 году книгой «Океанские глубины и прошлое», в которой Эриксон и Воллин дали подробное описание своих методов. Ведь было известно: наряду с их концепцией существует и совсем другая, принадлежащая Эмилиани и основанная на данных по тем же океанам, а часто и по тем же самым колонкам.

11. ПЛЕЙСТОЦЕНОВЫЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

В 1949 году, когда Эриксон и Юинг уже приступили к подъему колонок из района Срединно-Атлантического хребта, Чезаре Эмилиани еще только стал аспирантом Чикагского университета и начал свои палеонтологические исследования. Он приехал из Италии, захватив с собой образцы горных пород, взятые в северных Апеннинах, где после окончания в 1945 году университета Болоньи он работал геологом-нефтяником. Эмилиани намеревался провести в Чикаго лишь год, надеясь расширить за это время свой научный кругозор, а главное – решить интригующие вопросы, связанные с его апеннинскими образцами.

В Чикагском университете он познакомился с группой молодых ученых, которые работали под руководством нобелевского лауреата Гарольда Юри над развитием геохимических методов решения фундаментальных проблем истории Земли. Один из членов этой группы, Самюэль Эпстайн, впоследствии писал: «Когда я прибыл в Чикаго, университет был охвачен возбуждением. Ежедневно возникали новые идеи. Нас вдохновлял не только Гарольд Юри, генераторами идей были и другие интеллектуальные звезды, такие, как Уиллард Либби и Энрико Ферми». Заметим, что Либби вскоре был удостоен Нобелевской премии по химии, а Ферми уже тогда был Нобелевским лауреатом по физике.

Эпстайн помогал Юри воплотить в жизнь его идею, выдвинутую в 1947 году. Она предполагала существование теоретической возможности использовать атомы кислорода для определения температур воды древнего океана. Принцип метода базировался на том факте, что кислород, входящий в состав морской воды, представлен не одним, а двумя изотопами, из которых один, ^{18}O , является более тяжелым, чем второй, ^{16}O . Оба типа атомов присутствуют и в известковых ске-

летах морских организмов, в том числе планктонных. По теоретическим соображениям Юри, относительное количество тяжелых атомов кислорода, извлекаемых этими организмами из морской воды, должно зависеть от ее температуры, причем чем эта вода холоднее, тем более высоким должно быть содержание тяжелого изотопа в скелетах. Поэтому, рассуждал Юри, измерив соотношение тяжелого и легкого изотопов кислорода в ископаемых остатках морских организмов, можно будет рассчитывать температуры, которые имела морская вода в период их жизни.

Эпстайн и Эмилиани не сомневались, что метод Юри способен открыть новые горизонты для геологии. Однако прежде чем браться за его разработку, надо было преодолеть два препятствия. Первое из них было теоретическим; дело в том, что соотношение изотопов в скелетах морских организмов зависело не только от температуры воды, но также и от ее изотопного состава, так что если этот состав непостоянен, то задача правильного расчета палеотемператур была бы неразрешимой. Однако Юри и его коллеги были уверены — как показал опыт, даже слишком уверены, — что в ходе дальнейших исследований этот вопрос решится сам собой. Второе препятствие было техническим: для высокоточного измерения изотопного состава воды требовалось создать новые приборы, разработать специальную методику. Этой задачей как раз и занимались Эпстайн и его сотрудники Ральф Бухсбаум и Хейнц Лоуэнстам. Несколько лет их упорной работы увенчались успехом — появился лабораторный метод, позволявший с большой точностью измерять соотношения изотопов. Теперь уже ничто не мешало взяться за проверку возможностей палеотемпературного метода Юри.

Сам Юри вскоре почувствовал, что палеонтологические познания Эмилиани будут полезны, когда дело дойдет до практического применения его новых геохимических методов. Так что Эмилиани получил заманчивое предложение заняться изучением изотопного состава фораминифер, которое он без колебаний принял. Ему было ясно: это как раз тот — единственный в жизни — случай, когда у исследователя появляется возможность приоткрыть завесу неведомого. И вот в то время, когда другие члены чикагской группы уже

начали получать обнадеживающие результаты приложения «изотопного термометра» к окаменелостям из древних толщ, Эмилиани берется за палеотемпературный анализ панцирей фораминифер, извлеченных из гораздо более молодых – плейстоценовых – осадков. Объектом его первых измерений стали донные, или бентосные, фораминиферы, собранные в 1951 году в Калифорнии. Но вскоре Ханс Петтерссон предложил ему заняться восемью длинными колонками, поднятыми во время экспедиции «Альбатроса», и Эмилиани решил переключиться на изучение планктона, который представлялся более перспективным материалом. Затем Юинг передал ему несколько колонок из хранилища Ламонтской обсерватории, а Эриксон, хотевший проверить свой палеоклиматический метод, отправил в Чикаго ещё четыре колонки, которые перед тем проанализировал сам.

К августу 1955 года Эмилиани успел обработать восемь колонок глубоководных осадков. Свои результаты он опубликовал в статье «Плейстоценовые температуры», появившейся на страницах *Journal of Geology* (1955) и ставшей заметной вехой в познании природы ледниковых эпох. Согласно его выводам, изменения изотопного состава планктонных фораминифер из колонок, поднятых со дна Карибского моря и экваториальной Атлантики, свидетельствуют о том, что на последние 300 000 лет пришлось семь полных ледниково-межледниковых циклов. Кроме того, из данных Эмилиани следовало, что в типичном случае поверхностные температуры Карибского моря снижались в ледниковые эпохи на 6°C (см. рис. 33). Наконец, Эмилиани заметил, что ход колебаний палеотемператур, определенных по соотношениям изотопов кислорода, довольно хорошо соответствует инсоляционным кривым Миланковича. Это позволило ему сделать вывод – правда, весьма осторожный, – что его наблюдения, по-видимому, могут служить подтверждением астрономической теории ледниковых эпох.

Опубликовав эту статью, Эмилиани сразу оказался в центре целых трех дискуссий. Прежде всего, дискуссии с Эриксоном. Был поставлен вопрос: является ли ход изотопной кривой действительным отражением изменений температур? И не следует ли, реконструируя историю климата, отдать предпочтение эриксо-

новской кривой *menardii*? Вторая дискуссия касалась точности использованной Эмилиани хронологической шкалы — Брёккер и Эриксон подвергали ее сомнению. Третье и последнее возражение выдвигалось теми геологами — а их было большинство! — которые отвергали теорию Миланковича; по их мнению, та корреляция между изотопной кривой и инсоляционными графиками Миланковича, о которой писал Эмилиани, является простым совпадением.

Первое противоречие было во многих отношениях самым важным. Если прав Эриксон и фактической причиной изменений изотопного состава воды были не колебания температур, а какой-то другой фактор, то все споры по остальным вопросам практически теряли смысл. Уже к 1964 году всем стало ясно, что палеоклиматология плейстоцена не сдвинется с места, пока спор между Эриксоном и Эмилиани не будет разрешен. Поэтому авторитетные сотрудники Йельского университета в лице Ричарда Флинта и Карла Турекиана и Колумбийского университета в лице Уоллеса Брёккера убедили Национальный научный фонд США выделить деньги на проведение специальной конференции, посвященной этой проблеме. Предполагалось, что конференция решит ее, заставив Эриксона и Эмилиани изложить свои выводы и их обоснование перед лицом небольшой группы специалистов. Эта конференция состоялась в январе 1965 года в Нью-Йорке, в гостинице «Американа» и в Ламонтской геологической обсерватории.

В число ее участников входил и Джон Имбри, бывший тогда профессором геологии Колумбийского университета. К тому времени он уже имел десятилетний опыт изучения ископаемых бентосных организмов и их использования для цели восстановления климатов отдаленных геологических периодов. При этом он широко использовал один из статистических методов, называемый факторным анализом; последний оказался пригодным для определения реакции морских животных на совместное воздействие нескольких факторов окружающей среды.

Долгожданная дискуссия между Эриксоном и Эмилиани не привела к однозначному решению проблемы. С одной стороны, Эриксон смог доказать, что схема его зон находит подтверждение в фактических данных по сотням атлантических колонок и что его

главный вид-индикатор – *menardii* – действительно чутко реагирует на изменения температур океана. С другой стороны, он подверг критике основное допущение Эмилиани, согласно которому «нетемпературные» изменения изотопного состава морской воды в плейстоцене были очень малы и не могли заметным образом влиять на определение палеотемператур. Эриксон подчеркнул, что, по мнению ряда геохимиков, положение с этими изменениями как раз обратное: ледниковые покровы, возникавшие и исчезающие в плейстоцене и, соответственно, изымавшие воду из океана и возвращавшие ее назад, имели столь высокую относительную концентрацию легкого изотопа ^{16}O , что ледниково-межледниковые циклы должны были заметно влиять на изотопный состав воды океана. Поэтому вполне возможно, что изменения изотопного состава, выявленные Эмилиани, были совсем не результатом колебаний температур океана, а лишь отражением изменений в объеме ледниковых покровов Земли.

Эмилиани в свою очередь указал, что главная слабость схемы Эриксона заключалась в узости ее палеонтологической основы, а именно в том, что она базировалась на данных лишь по одному виду фораминифер. В подкрепление собственных выводов он представил материалы Луиса Лидса, который, проведя изучение большого числа видов фораминифер из двух колонок Эмилиани, пришел к выводу, что колебания в их численности хорошо коррелируются с изотопно-кислородными кривыми. Вдобавок к этому Эмилиани не согласился с мнением о ненормально высокой концентрации легкого изотопа ^{16}O в плейстоценовых ледниковых покровах и продолжал настаивать на правильности своих температурных определений.

Имбри был скорее наблюдателем, чем участником всех этих споров. Тем не менее он не мог не отметить, что оба оппонента, и Эриксон и Эмилиани, упускали из виду возможность того, что изменения в концентрации фораминифер могли быть связаны не только с температурой, но и с некоторыми другими факторами. Например, популяции фораминифер вполне могли расти или сокращаться под влиянием колебаний в солености или в количестве питательных веществ. Он высказал также идею, что приложив статистические методы к обработке данных по целым сообществам, состоящим

из разных видов фораминифер, можно будет отделять эффекты температурных изменений от результатов воздействия других природных факторов. Эта конференция не успела закончиться, как у Имбри созрело решение: он займется данной проблемой сам.

Эриксон был готов помочь материалами и советом; по его предложению Имбри взялся за детальное исследование одной колонки, для которой Эриксон и Воллин уже получили данные об изменениях в содержании *menardii*. Эта колонка числилась под номером V12-122; последний означал, что она была поднята на станции 122 в 12-м рейсе ламонтского исследовательского судна «Вима». Ассистентом Имбри стала студентка Колумбийского университета Нильва Кипп, которая привлекла его внимание своей курсовой работой, содержащей глубокий анализ разногласий между Эриксоном и Эмилиани. В итоге трех лет совместной работы, проводившейся сначала в Колумбийском, а затем в Брауновском университетах, Имбри и Кипп создали многофакторный метод палеоклиматического анализа, который использовал данные об изменениях в численности всех 25 видов планктонных фораминифер. Во многих отношениях их подход был не чем иным, как компьютеризованным вариантом методики, которая еще в 1935 году применялась Вольфгангом Шоттом. Как мы помним, Шотт начинал с составления серии карт, отражавших современное распределение отдельных видов планктонных фораминифер. Имбри и Кипп начали с того же, а затем вывели уравнения, выражающие соотношения между обилием каждого конкретного вида фораминифер в современных донных осадках океана и основными характеристиками поверхностного слоя его воды. Эти характеристики включали летние и зимние температуры и соленость. На следующем этапе работы они, анализируя все более глубокие слои из колонок, использовали свои уравнения для определения летних и зимних поверхностных температур воды и ее солености для различных эпох прошлого.

К лету 1969 года Имбри и Кипп накопили достаточно данных, чтобы убедиться в надежности результатов, полученных с помощью их многофакторного метода. Тогда же Уоллес Бреккер и Ян ван Донк подвергли ту же колонку, V12-122, изотопно-кислород-

ному анализу. В результате появилась возможность сравнить данные трех методов — Эриксона, Эмилиани и Имбри-Кипп — на основе одного и того же разреза. Это сравнение окончательно убедило Имбри и Кипп, что Эриксон ошибался, а Эмилиани был прав лишь наполовину. В самом деле, в слоях, которые, по данным Эриксона, образовались при низких температурах, изотопно-кислородный и многофакторный методы выявляли «теплые» интервалы. Становилось все более ясно, что не температурные условия, а какой-то другой фактор среды (который, однако, часто коррелировался с температурой) заставлял *Globorotalia menardii* периодически появляться и исчезать в открытых частях Атлантического океана.

В то же время имелся один фундаментально важный пункт, по которому данные многофакторного анализа не вязались с выводами Эмилиани. По расчетам Имбри и Кипп, температуры поверхностного слоя воды Карибского моря в начале каждой ледниковой эпохи снижались не на 6°C, как следовало из работ Эмилиани, а только на 2°C. Причем, по данным многофакторного метода, популяция фораминифер этого моря испытывала влияние не только температур поверхностного слоя, но и изменений его солености. Таким образом, выходило, что Эмилиани, посчитав все изменения морской микрофауны, установленные Лидсом, за результат колебаний температур и игнорируя возможные влияния других факторов, сильно переоценил размах плейстоценовых изменений температур. В случае правоты Имбри и Кипп можно было сделать важный вывод, что основная часть изменений изотопного состава морской воды была связана не с температурными колебаниями, а с изменениями объема ледниковых покровов.

Теперь Имбри горел желанием поведать о своих результатах ученому миру. Поэтому он с радостью принял предложение Эмилиани сделать доклад на международной научной конференции, которая должна была состояться в сентябре 1969 года в Париже. Но случилось так, что на эту конференцию Имбри прибыл с опозданием, и его доклад пришлось перенести на более позднее, чем намечалось, время — на вечернее заседание в пятницу. Представьте себе: теплый сентябрьский вечер в Париже, где более чем достаточ-

но развлечений, способных заставить забыть о лекционном зале даже самых преданных науке людей. Так что стоило ли удивляться, что когда Имбри наконец взшел на трибуну, он увидел перед собой лишь двух слушателей, из которых половина не понимала английского. К счастью, второй половиной был Николас Шеклтон — молодой британский геофизик, уже успевший опубликовать свои данные, судя по которым значительная часть наблюдаемых изменений изотопного состава океана отражала разрастания и сокращения ледниковых покровов. Впрочем, об этом Имбри тогда еще не знал.

Встретившись после заседания, Имбри и Шеклтон, к взаимному удовольствию, убедились, что выводы, к которым они пришли независимо друг от друга и на основе разных методов исследований, оказались одинаковыми. Оба они понимали, что эти выводы носят лишь предварительный характер и для их надежного доказательства потребуются масса нового экспериментального материала. И тем не менее в них крепла уверенность, что изотопные кривые Эмилиани рассказывали совсем не о том, что думал их автор, и что ход этих кривых отражал в первую очередь изменения не температур, а объема глобального оледенения.

Некоторым ученым, возможно и самому Эмилиани, такой результат мог показаться разочаровывающим. Ведь многие надеялись, что геохимический метод Юри станет тем термометром, который измерит температуры плейстоценового океана. Но Имбри и Шеклтон верили: значение изотопных кривых только возрастет, если они станут надежным инструментом определения объема ледниковых покровов Земли. Действительно, что может быть важнее для исследователей плейстоцена, чем данные об изменениях масштабов оледенения во времени? Ведь вооружившись изотопным методом измерения объемов льда и многофакторным методом регистрации палеотемператур океана, наука сможет открыть и новые пути для проверки некоторых конкурирующих теорий, выдвинутых для объяснения плейстоценовых ледниковых эпох.

12. И ВНОВЬ – ТЕОРИЯ МИЛАНКОВИЧА

Как мы уже указывали, к 1969 году большинство ученых разочаровались в теории Миланковича, что произошло главным образом под влиянием результатов радиоуглеродного датирования ледниковых отложений. Лишь очень немногие продолжали поиски путей проверки достоверности теории. Среди этого меньшинства был и Родс Фейрбридж – геолог, выполнивший детальные исследования древних уровней океана. Особенно большое значение Фейрбридж придавал наблюдениям на южном побережье Австралии, где он обнаружил девятнадцать параллельных песчаных валов, которые маркировали древние береговые линии, образованные на тех этапах истории океана, когда уровень был выше современного. Валы располагались на равных расстояниях друг от друга, и, хотя определить их возраст не представлялось возможным, данный факт позволял думать: повышения и снижения уровня океана подчинялись регулярному ритму. Фейрбридж, естественно, знал, что колебания уровня океана были связаны с появлением и таянием ледниковых покровов, поэтому он увидел в древних береговых линиях Австралии свидетельство того, что и сами ледниковые эпохи повторялись через равные интервалы времени. Причем в его глазах эти факты и следствия приобрели роль весомого довода, свидетельствовавшего в пользу правильности астрономической теории древних оледенений. «Мне пришло в голову, – писал он впоследствии, – что механизмы, предложенные Миланковичем, выглядят весьма логично, и астрономические циклы, образующие основу этой теории, имели примерно ту самую продолжительность, которая лучше всего подходит для объяснения песчаных валов южного побережья Австралии».

Доводы Фейрбриджа казались довольно правдоподобными, однако его оппоненты тут же указали, что они носят чисто качественный характер и фактическая продолжительность циклов колебаний уровня океана остается совершенно неясной. В самом деле, какому из астрономических циклов они соответствовали — 41 000-летнему, связанному с периодическими изменениями наклона земной оси, или 22 000-летнему, обусловленному явлением прецессии, или не тому, не другому, а какому-то особому циклу иной продолжительности? Стало ясно, что данные о древних уровнях океана можно будет использовать для проверки теории Миланковича лишь в том случае, если станет известен их возраст. Между тем все береговые валы, о которых писал Фейрбридж, были заведомо древнее 40 000 лет, откуда следовало, что их возраст лежал за пределами возможностей радиоуглеродного метода.

Однако к тому времени уже началась вторая революция в методах датирования геологических образований. В нескольких геохимических лабораториях подходили к концу разработки методов абсолютной геохронологии, использовавших не радиоуглерод, а радиоактивные изотопы урана, тория и калия. И вскоре появился целый десяток новых методов, точность которых зависела от типа и возраста датируемого материала. Так, например, если калиево-аргоновый метод позволял получать сравнительно точные результаты для вулканических пород практически любого возраста, то другой метод, использовавший радиоактивный элемент протактиний, мог давать лишь приблизительные данные и был пригоден только для глубоководных илов с возрастом менее 150 000 лет.

В 1956 году Джон Бэрнс с коллегами из Лос-Аламосской лаборатории разработали ториевый метод датирования, пригодный для получения точного возраста древних коралловых рифов — при условии, что они не старше 150 000 лет. Этот метод оказался особенно перспективным для датирования береговых линий океана, и именно ему было суждено создать первую реальную возможность для критической проверки теории Миланковича.

Одним из лидеров этой революции в датировании стал Уоллес Брэккер. С 1952 года, когда он поступил

в аспирантуру Колумбийского университета, Брёккер целиком посвятил себя проблеме уточнения геологического календаря. Будучи специалистом-геохимиком, он сначала занялся применением радиоуглеродного метода для определения возраста событий позднего плейстоцена. Брёккер стал одним из тех, кто вместе с Эриксоном, Кальпом и Воллином смог убедить геологов, что короткий интервал времени, имевший место около 11 000 лет назад, был переломным моментом в истории глобального климата. С этим интервалом стали связывать такие события, как резкое падение уровней озер в аридной области юго-запада Северной Америки, быстрое отступление ледниковых покровов и скачкообразное поднятие уровня океана. А в начале 1960-х годов Брёккер с группой студентов занялся совершенствованием ториевого метода и его применением для датирования образцов, возраст которых лежит за пределами возможностей метода, использующего радиоуглерод.

В 1965 году Брёккер выступил на международном конгрессе в Боулдере, штат Колорадо, с обзорным докладом о состоянии изученности колебаний уровня Мирового океана. Теперь, говорилось в докладе, мы можем наконец установить на геологической шкале времени, которая до сих пор была лишь относительной, некоторое число строго фиксированных точек. Брёккер, действительно, уже имел возможность рассказать о ряде важных результатов, так как вместе со своим учеником Дейвидом Тёрбером он успел датировать древние рифы атолла Эниветок, островов Флорида-Кис и Багамских островов. Судя по этим результатам, около 120 000 лет назад уровень океана поднимался на шесть метров выше современного. Кроме того, они (точнее, лишь одна датировка) позволяли предполагать, что еще одно повышение этого уровня имело место 80 000 лет назад – до отметки, остававшейся невыясненной. Брёккер составил график, судя по которому три эпизода высокого стояния океана – современный и два других, отстоявших от него на 80 000 и 120 000 лет, – довольно точно совпадали с тремя из четырех инсоляционных максимумов, рассчитанных Миланковичем для 65° северной широты. И хотя Брёккер назвал свой анализ предварительным, он выразил уверенность, что уже в ближайшие годы должны появиться вполне

определенные данные по хронологии колебаний уровня океана.

Весной того же 1965 года профессор Брауновского университета Робли Мэтьюз сел в самолет, чтобы отправиться на крошечный карибский остров Гренада. Среди группы курортников, предвкушавших беззаботные недели отпуска на теплом море, он был единственным, кто летел по делу. Будучи специалистом по известнякам, Мэтьюз занимался процессами поробразования в этих породах, что чрезвычайно существенно для формирования коллекторов нефти. И отправился на Гренаду, прослышав о том, что известняковые скалы острова могут быть хорошим объектом такого исследования.

Самолет сделал посадку на острове Барбадос, и Мэтьюз с удовольствием заметил, что он изобилует выходами известняков. Когда же он увидел Гренаду, то еще до посадки понял: полученная им информация неверна. Остров слагался толщами вулканических пород, среди которых известняки практически отсутствовали. Поэтому он с первым же обратным рейсом вернулся на Барбадос.

С высоты птичьего полета видно, что береговая зона острова отчетливо террасирована и местами напоминала гигантскую многоступенчатую лестницу, причем на обрывистых уступах террас можно было наблюдать просто великолепные известняковые обнажения. Поэтому Мэтьюз вернулся в свой университет довольным: он не сомневался — прекрасный район для будущих полевых исследований найден.

Взявшись за литературу по геологии Барбадоса, Мэтьюз быстро узнал, что вокруг вопроса о происхождении его террас уже не первый год идут споры. Все исследователи считали, что остров находится в состоянии прерывистого поднятия. Согласно одной гипотезе каждый этап такого поднятия, сопровождавшийся осушением определенной полосы прибрежной зоны, приводил к тому, что населявшие ее кораллы гибли, а у новой береговой линии, уже на более низком уровне, другие кораллы начинали строительство новых рифов. Таким образом, по этой гипотезе, каждая коралловая терраса острова представляет собой след отдельного этапа рифообразования, связанный с особым эпизодом в истории колебаний

относительно уровня океана. А по другой гипотезе, все террасы были выработаны действием волн в едином древнем рифовом массиве. Ее сторонники считали, что при поднятиях острова новые рифы не образовывались, а волновая эрозия, или так называемая абразия, формировала террасу за террасой на все более низких уровнях.

Мэтьюз поставил перед собой задачу: разрешить этот спор и выяснить, как возникли террасы острова — за счет последовательного прироста новых рифов или в результате «чистой» абразии. Летом того же года он вернулся на Барбадос, пригласив с собой аспиранта по имени Кеннет Месолелла. Практически на каждой террасе Мэтьюз и Месолелла могли наблюдать обнажения известняков с хорошими разрезами древних коралловых рифов. В ряде мест им встретились древовидные колонии коралла *Acropora palmata*, которые еще сохраняли свое прижизненное положение. А в немногих метрах от берега, в море, живые представители того же вида деятельно наращивали мелководные рифы, совершенно неотличимые от коралловых построек, обнажающихся в обрывах террас. Еще не кончилось лето, а Мэтьюз и Месолелла, облазив выходы известняков острова, пришли к убеждению, что все его террасы образовались в результате поэтапного, последовательного нарастания кораллов и что каждая из них представляла особую генерацию рифов, связанную с каким-то одним конкретным уровнем океана. Для удобства описания они пронумеровали террасы снизу вверх, начиная с Террасы I.

Другой профессор Брауновского университета, Томас Матч, предложил использовать данные о высотах и возрасте террас Барбадоса для изучения истории колебаний уровня океана. И хотя Мэтьюз сомневался, что его любимый остров, носящий все признаки молодого поднятия, пригоден и для этой цели, он все же убедил Брёккера провести датирование нескольких образцов, взятых им с барбадосских террас.

Какой риф следует датировать первым? После некоторых колебаний Мэтьюз решил послать образцы кораллов из первой и третьей генераций рифов, с Террас I и III. Брёккер, Джон Годлард и аспиранты Дейвид Тербер и Телунг Ку принялись за работу. К лету первые лабораторные измерения были закончены,

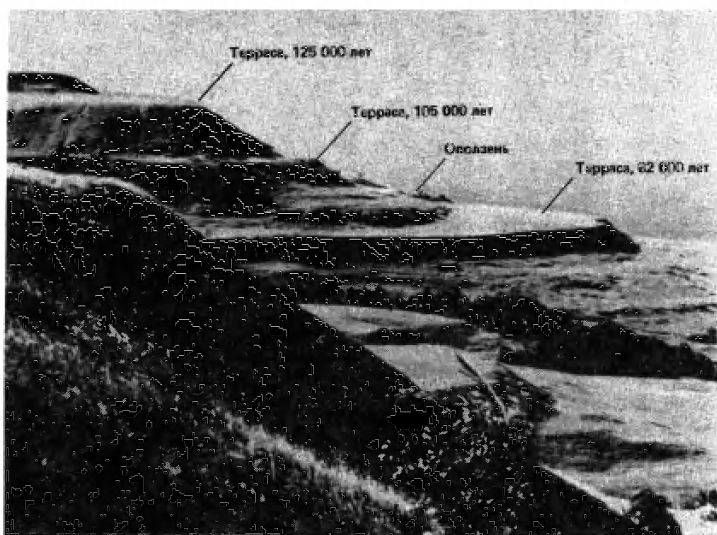
возраст рифов оказался равным 80 000 и 125 000 лет. Естественно, Бреккер был очень доволен: эти результаты прекрасно совпали с датировками, которые ранее он получил по кораллам с Багамских островов и островов Флорида-Кис, и, как и те, довольно хорошо соответствовали по времени обоим инсоляционным максимумам, указанным Миланковичем для периода последних 130 000 лет.

Однако когда Брёккер узнал, что в промежутке между двумя датированными террасами Барбадоса имеется еще одна, Терраса II, от его благодущия не осталось и следа. Он потребовал образцы с этой — промежуточной — террасы и, датировав их, получил ее возраст, который оказался равным 105 000 лет.

На инсоляционной кривой, рассчитанной для 65° северной широты, особого пика, приходящегося на 105 000 лет назад, не было, поэтому Бреккер обратился к другим кривым Миланковича. И очень скоро ему удалось сделать важное открытие: на кривых, построенных для низких широт, в частности для 45° северной широты, присутствовали отчетливые пики, которые имели возраст, соответствующий датировкам всех трех барбадосских террас: 82 000, 105 000 и 125 000 лет!

Чему же научил этот опыт? До Брёккера сторонники теории Миланковича, имевшие дело с материалами по средним широтам, обращали внимание, по существу, лишь на кривую по 65° северной широты. Как известно, она отражала в первую очередь эффекты изменений в наклоне земной оси, и потому ее пики повторялись через каждые 40 000 лет. Однако в низких широтах возрастало значение и другого астрономического фактора — 22 000-летних циклов прецессии, причем возрастало настолько, что они начинали заметным образом модулировать эффекты изменений наклона оси. Таким образом, датировки, полученные для коралловых террас Барбадоса, позволили предполагать, что палеоклиматическая роль циклов прецессии была намного важнее, чем допускал сам Миланкович.

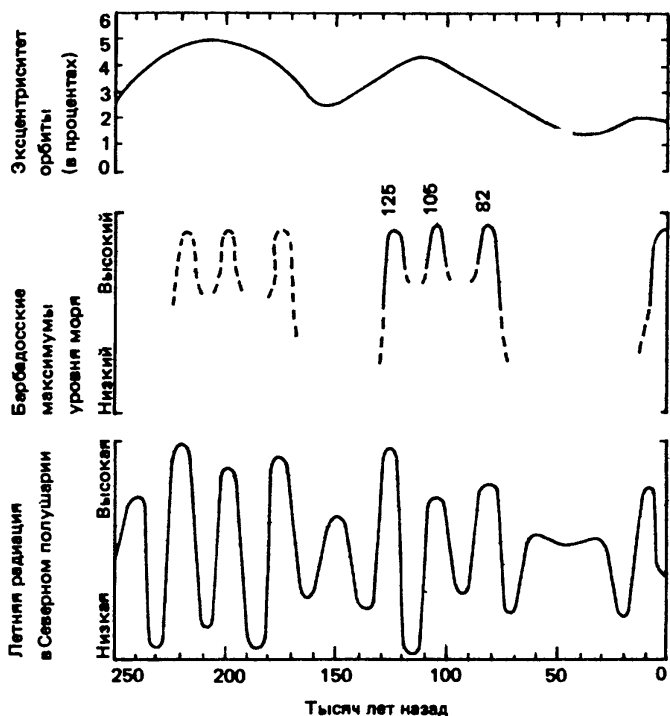
Эти выводы были опубликованы в 1968 году, а через несколько лет они были подтверждены данными независимых исследований, проведенных на Новой Гвинее и Гавайских островах (рис. 34). Одним из их главных следствий было возрождение общего инте-



34. Коралловые террасы острова Новая Гвинея. Морские террасы, выработанные в плейстоценовых коралловых рифах. Первые определения абсолютного возраста подобных террас были сделаны на карибском острове Барбадос (фото предоставлено А. Блюмом).

реса к теории Миланковича: ведь Брёккер, Мэтьюз и Месолелла с фактами в руках показали, что астрономическая теория, вернее ее усовершенствованный вариант, который учитывал эффекты прецессии, смогла дать объяснение эпизодам высокого стояния океана, имевших место 82 000, 105 000 и 125 000 лет назад (рис. 35).

Однако оживление интереса к теории Миланковича еще не значило ее прочного признания. Сами Брёккер и Мэтьюз указывали, что совпадение датировок, полученных для трех коралловых террас, со значениями расчетного возраста трех инсоляционных пиков могло быть случайным, а вовсе не причинно-следственным, как они предполагали. Чтобы убедительно подтвердить астрономическую теорию, надо получить более длинную цепочку подобных совпадений, которая бы исключила статистическую вероятность их случайности. Настоятельно требовался новый геологический календарь – гораздо более длинный, чем шкала времени, которую удалось получить с помощью ториевых датировок древних коралловых рифов.



35. Астрономическая теория, объясняющая «барбадосские» уровни океана. На среднем графике представлены хорошо датированные моменты высокого стояния уровня океана (сплошной линией) и такие же моменты с менее определенным возрастом (штриховой линией). Установленный возраст высоких уровней соответствует интервалам, для которых были характерны высокая интенсивность летней инсоляции и большие значения эксцентриситета орбиты (по Месолелла и др., 1969).

13. МАГНИТНЫЙ СИГНАЛ ЗЕМЛИ

Между тем открытие, которому предстояло сыграть ключевую роль в решении хронологических проблем плейстоцена, было сделано еще в 1906 году на одном из французских кирпичных заводов, и сделал его Бернар Брюнес — геофизик, занимавшийся изучением магнитного поля Земли. Брюнес установил, что, когда только что обожженный кирпич остывал, заключенные в нем обломки железистых минералов принимали предпочтительную ориентировку, параллельную силовым линиям геомагнитного поля. При этом сам кирпич приобретал слабую намагниченность. А второе открытие Брюнеса имело уже совсем очевидную важность для геологии: он обнаружил, что в остывающих потоках вулканической лавы происходило то же, что и в остывающих кирпичах, — они намагничивались в соответствии с магнитным полем Земли. А отсюда уже совсем недалеко и до вывода, что древние лавовые потоки должны содержать информацию по истории земного магнетизма.

Увлеченный этой идеей, Брюнес начал измерять ориентировки остаточной намагниченности в древних вулканических толщах. К его удивлению, некоторые лавовые потоки оказались намагничены в направлении, противоположном современному геомагнитному полю. Значит, в определенные эпохи прошлого, решил Брюнес, это поле испытывало инверсии. И если это действительно так, то наблюдатель, попавший на машине времени в эпоху обратной полярности, увидел бы, что северный конец магнитной стрелки его компаса указывает на юг! Эта идея показалась столь невероятной, что большинство современников Брюнеса отвергли ее, что называется, с порога.

Однако не прошло и четверти века, как японский геофизик Мотонори Матуяма показал, что Брюнес

вовсе не ошибался. Исследовав толщи молодых лав в Японии и Корее, он получил доказательства того, что в плейстоцене магнитное поле Земли минимум один раз сменило свою ориентировку на обратную. А несколько позже он же установил, что в более древние геологические периоды такие инверсии повторялись неоднократно. Матуяма понял, что его концепция многократных инверсий поля, окажется она правильной, могла бы открыть необозримые горизонты для исторической геологии. Ведь эти инверсии, в одни и те же моменты запечатленные в «памяти» лавовых потоков всех континентов, как раз и дали бы геологам тот долгожданный метод точной корреляции, в котором они так остро нуждались для сопоставления разрезов, разобценных тысячекилометровыми пространствами суши и океанов.

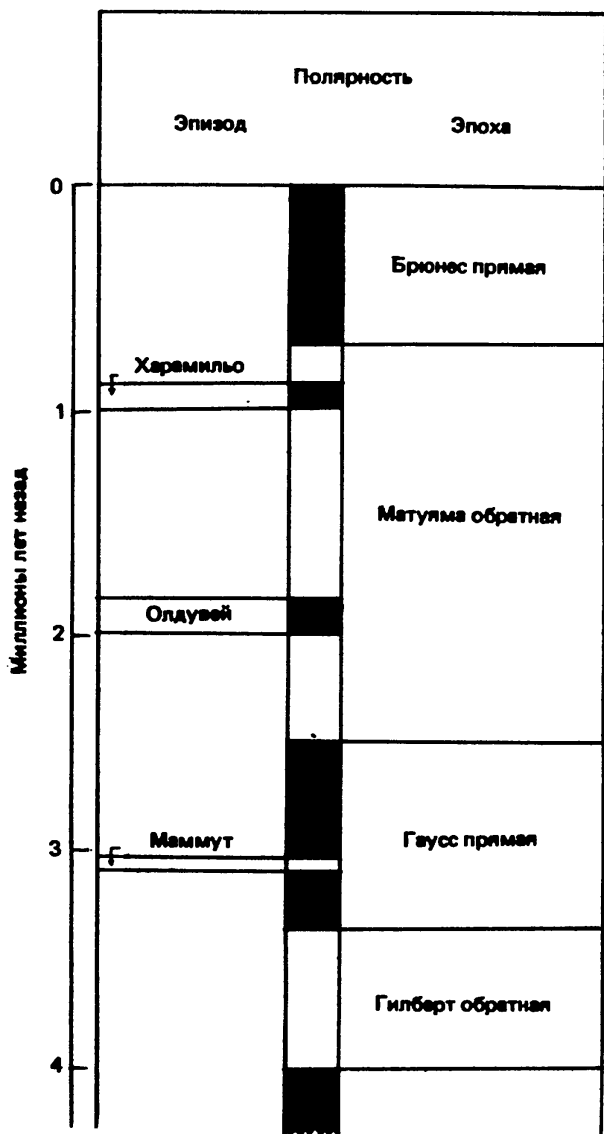
Но если и в одну инверсию почти никто не поверил, то уж идея многократных инверсий показалась вообще невысказанной, так что работы Матуямы встретились со всеобщим скептицизмом. Тем более что вскоре появилось и другое, гораздо менее экстравагантное объяснение тех же фактов. Стало известно, что в определенных минералах при их нагреве и охлаждении в специфических условиях, создававшихся в лабораториях, сама собой возникала обратная магнитная полярность. И если этот механизм самоинверсии мог работать в лаборатории, то почему бы ему не действовать и в древних лавах. Правда, минералов, способных к самоинверсии, в лавах практически не было, тем не менее почти всем специалистам, занятым проблемой палеомагнетизма, было легче принять на вооружение гипотезу самоинверсии, чем неожиданную идею Матуямы, согласно которой все магнитное поле Земли периодически целиком меняло свою полярность.

Однако в конце 1950-х — начале 1960-х годов геофизики, работавшие в СССР (А. Н. Храмов), Исландии (Мартин Руттен) и на Гавайских островах (Айан Макдаугал и Дональд Тарлинг), все-таки доказали правоту Брюнеса и Матуямы. Природа действительно предоставила в распоряжение геологов удобный метод глобальной корреляции, что окончательно выявилось в 1963 году, когда была завершена специальная работа Аллана Кокса и Ричарда Доуэлла из Геологи-

ческой службы США и Брента Далримпла из Калифорнийского университета в Беркли. В память о пионерах палеомагнитного метода текущий этап прямой, или «нормальной», магнитной полярности стали называть эпохой Брюнеса, а предшествующий ей этап обратной полярности – эпохой Матуямы.

В чем же состояли главные доводы, представленные Коксом и его соавторами? Прежде всего в установленной ими глобальной синхронности каждой геомагнитной инверсии. В самом деле, если каждая из этих инверсий в любой точке планеты имела один и тот же возраст, то это должно было полностью исключить возможность их самопроизвольности. Проект Кокса предусматривал определение абсолютного возраста большого числа образцов лав, взятых вблизи – как выше, так и ниже – установленных инверсий. Непосредственными исполнителями программы датирования стали исследователи из Калифорнийского университета с Гернисом Кертисом и Джеком Эвернденом во главе; возраст образцов определялся с помощью калиево-аргонового метода, который особенно хорошо зарекомендовал себя именно при работе с лавами. В итоге удалось не только доказать глобальную синхронность геомагнитных инверсий, но и привлечь внимание к датировкам этих событий. Эти датировки становились теми долгожданными контрольными точками, опираясь на которые можно было строить надежную хронологию плейстоцена Земли.

Вскоре геологи представили историю геомагнитного поля и в графической форме (рис. 36). Интервалы «нормальной» полярности, характерной для современной эпохи, или эпохи Брюнеса, стали показывать черными полосами, а интервалы обратной полярности, подобные эпохе Матуямы, – полосами белого или светлого цвета. Вскоре внутри эпохи обратной полярности Матуямы были обнаружены два коротких интервала «нормальной» полярности – эпизоды Олдувей и Харамильо. Первый из них, более древний, получил свое название по африканской долине, в которой он был впервые выделен, а второй, более молодой, – по небольшой реке в штате Нью-Мексико. В целом чередование эпох и эпизодов истории магнитного поля Земли выглядит на графике как серия черных и белых



36. Палеомагнитная история Земли. Черными прямоугольниками показаны эпохи и эпизоды прямой («нормальной») магнитной полярности, белыми прямоугольниками – эпохи и эпизоды обратной полярности.

полос разной длины, напоминая сообщение, записанное с помощью азбуки Морзе. Причем два из серии этих сигналов оказались жизненно важны для геологов, занятых тайной ледниковых эпох плейстоцена. Один из них — это граница эпох Брюнеса и Матуямы, получившая датировку в 700 000 лет. Второй — эпизод «нормальной» полярности Олдувей, возраст которого был определен в 1,8 миллиона лет.

Однако записаны ли эти сигналы в слоях глубоководных осадков Мирового океана? Первая попытка ответить на этот вопрос была сделана в 1956 году Морисом Юингом и Маником Талвани. Талвани отвез две ламонтские колонки в Вашингтон, в Институт Карнеги, где их магнитные свойства были измерены Джоном Грээмом. «Нам действительно удалось выявить несколько инверсий, — рассказывал позже Талвани, — однако все они были очень неясные». Одна из трудностей работы с колонками состояла в том, что их материал был полужидким. После нескольких дополнительных попыток, которые были столь же малоудачны, работа была прекращена.

Через десять лет геологи Скриппсовского института Кристофер Харрисон и Брайан Фаннел обнаружили границу палеомагнитных эпох Брюнеса и Матуямы в двух колонках, поднятых со дна Тихого океана. И хотя геологам Ламонтской обсерватории эти данные показались малоубедительными, сами они решили возобновить работы, когда-то начатые Талвани, и прочесть палеомагнитный сигнал в донных осадках. Конечно же, им очень хотелось, чтобы выводы Харрисона и Фаннела подтвердились. Ведь в хранилище Ламонтской обсерватории лежало более трех тысяч длинных колонок, поднятых со дна всех океанов мира, и в каждой из них заключалась богатейшая информация о древних климатах. Чтобы использовать ее, нужно было только одно — надежная хронологическая привязка палеоклиматических событий, то есть то, что как раз и мог дать календарь инверсий геомагнитного поля.

К счастью, в Ламонтской обсерватории теперь был свой специалист по палеомагнетизму — Нил Опдаик. Однако он имел опыт исследований лишь коренных пород, поэтому для работы с глубоководными осадками пришлось привлечь и аспиранта Джона Фостера,

которому было поручено конструирование приборов для их анализа. А вскоре в группу Опдайка вошел еще один аспирант — Билли Гласс. Это трио решило в первую очередь заняться колонками из высокоширотных районов океана, где крутизна магнитных силовых линий возрастала, что должно было облегчить выявление инверсий геомагнитного поля. К тому же они знали, что осадки океанского дна нередко эродируются придонными течениями и их разрезы, представленные в колонках, могут иметь существенные пропуски. Поэтому было решено делать анализ лишь колонок, которые уже детально изучены палеонтологами.

За помощью в отборе колонок, которые отвечали бы этим требованиям и были достаточно длинны, чтобы вскрывать границу палеомагнитных эпох Брюнеса и Матуямы, группа Опдайка обратилась к специалисту по антарктическим радиоляриям Джеймсу Хейсу. Хейс был сотрудником той же обсерватории; еще в студенческие годы, проведенные в Университете Огайо, он увлекся проблемами Антарктики, особенно геологической историей Южного океана. А Ламонтская обсерватория, с ее лучшей в мире коллекцией колонок глубоководных осадков, была единственно желанным местом его работы. Первым, чем Хейс занялся в обсерватории, стала разработка детальной схемы новейшей истории Южного океана, основанной на радиоляриях. Имея этот опыт, он мог без труда выполнить просьбу Опдайка, его радиоляриевые зоны создали возможности для независимой проверки палеомагнитных корреляций.

Результаты анализа были неоспоримо положительны: магнитный сигнал был ясно различим во всех изученных колонках. Кроме того, корреляция, построенная на базе палеомагнитных инверсий, прекрасно совпала со схемой увязки глубоководных разрезов, которая базировалась на радиоляриевых зонах Хейса. Таким образом, работа ламонтской группы решительно подтвердила выводы Харрисона и Фаннела, более того — она открыла новый этап в развитии методов стратиграфии и геологических корреляций, который часто называют «палеомагнитной революцией». Впервые в истории геология получила инструмент для определения возраста климатических событий прошло-

го, оставивших след в разрезах донных осадков океана. Только теперь можно было в полной мере понять ценность ламонтской коллекции грунтовых колонок. Используя ее запасы и не дожидаясь новых поступлений, Опдайк, Хейс и Эриксон с коллегами смогли за период 1966–1969 годов трансформировать то, что было лишь довольно расплывчатым «рассказом» о геологических событиях прошлого, в четко датированную историю климата Земли.

Начать им пришлось с определения длительности плейстоцена. Раньше мы уже говорили, что Миланкович, следуя Пенку и Брюкнеру, принимал эту длительность равной 650 000 лет и именно таким интервалом времени ограничивал свои первые расчеты. В последующем, уже после смерти Миланковича, Эриксон и его коллеги по Ламонтской обсерватории пришли к выводу, что продолжительность плейстоцена была близка к полутора миллионам лет. Так это было или иначе, но все понимали, что убедительная проверка теории Миланковича станет возможной лишь после того, как будет датировано начало плейстоценовой эпохи.

Фактически для решения этой проблемы надо было ответить на два вопроса: с какого события геологической истории начинался отсчет плейстоцена и когда это событие произошло? На первый из них несколько ответов было предложено еще в прошлом столетии. В частности, в 1839 году Чарлз Лайель рекомендовал относить к плейстоцену все осадочные слои, окаменелости которых были не менее чем на 90–95% представлены современными видами. В этом предложении не было ни слова ни о ледниковом периоде, ни о следах холодного климата. И только несколько позже, в работе Эдуарда Форбса, было сформулировано другое – климатическое – определение: к плейстоцену следует относить осадочные толщи, которые были сформированы в условиях холодного климата. Однако что это значило: холодного?

Первое недвусмысленное, хотя и несколько произвольное определение плейстоцена было принято авторитетным международным комитетом геологов в 1948 году. За начало этой эпохи было решено принять стратиграфический рубеж, на котором отмечено первое появление холодолюбивых видов морской

и наземной фауны в хорошо обнаженных осадочных толщах юга Италии. Однако на практике использовать это определение было очень непросто. Поставим себя, например, на место исследователя, занимавшегося грунтовыми колонками со дна Тихого океана. Легко ли ему было выделить слои, которые следовало коррелировать с первым похолоданием в южной Италии!

И вот эта сложнейшая проблема – определение возраста основания плейстоцена и его глобальные корреляции – была успешно решена благодаря палеомагнитному методу. Уильям Берггрен из Океанографического института Вудс-Хол и Джеймс Хейс доказали, что появление холодолюбивых видов южной Италии совпало с эпизодом «нормальной» магнитной полярности Олдувей. Таким образом, в итоге ста лет упорных трудов геологи наконец могли констатировать, что начало плейстоценовой эпохи отстоит от современности на 1,8 миллиона лет. После этого они получили возможность извлечь пользу и из прочих магнитных инверсий, происходивших внутри плейстоцена, в особенности той из них, с которой началась палеомагнитная эпоха Брюнеса. Именно на основе этих инверсий был вскоре создан календарь для той части плейстоценовой истории, которую Миланкович стремился объяснить с помощью своей теории.

14. ПУЛЬС КЛИМАТА

Пока Брёккер и Мэтьюз занимались историей уровней океана, а Хейс и Опдайк создавали палеомагнитную шкалу времени, другой геолог, Джордж Кукла, работавший в Чехословакии, с великими усилиями подходил к решению той же проблемы с другого конца. Большой шурф, выкопанный им в карьере на Красном холме, расположенном в районе Брно, вскрыл прекрасный разрез мощной толщи древней золотой пыли – лёсса, который издавна использовался в тех местах для производства кирпича. Исследовав стенки этого шурфа, Кукла смог установить этапы образования как самих лёссовых слоев, так и разделяющих их горизонтов погребенных почв.

Интерес к лёссам появился у Куклы не случайно, он возник в результате его многолетних работ по изучению чехословацких пещер. В этих пещерах он видел тонкие слои лёсса, занесенного туда ветром во время оледенений, причем в ряде случаев лёссовые слои вмещали кости неандертальцев и представителей других человеческих рас, населявших Европу в палеолите. В свое время археологи провели сопоставление горизонтов пещерного лёсса с такими же, но более мощными слоями, покрывавшими склоны соседних холмов, и установили принадлежность включенных в них артефактов, то есть предметов древней материальной культуры, к ледниковым эпохам.

Ледниковые покровы, надвигавшиеся на Западную Европу из центров в Скандинавии и Альпах, ни разу не доходили до района Брно, однако их неоднократные вторжения не могли не отразиться на его климате: в истории этого климата должны были проявиться ряды резких, циклично повторявшихся похолоданий и потеплений. Положение внеледниковых областей Чехословакии и Австрии было идеальным для регистра-

ции колебаний плейстоценового климата, на что Джордж Кукла и его коллега Войен Ложек указали еще в 1961 году. В самом деле, при наступаниях ледниковых покровов Центральная Европа становилась полярной пустыней — холодной, сухой и безлесной. Там должны были свирепствовать жестокие ветры, развеивавшие ледниковые отложения и отлагавшие толщи лёсса. А в межледниковые эпохи, когда климат становился более теплым и влажным, чем в настоящее время, большие площади здесь покрывались широколиственными лесами, на лёссовых равнинах формировались плодородные почвы, и охотники каменного века могли жить в очень благоприятных (умеренно теплых) условиях. В общем, по мере того как ледниковые покровы скандинавского и альпийского центров разрастались и сокращались, граница, отделяющая зону сухих степей от зоны лесов, неоднократно перемещалась взад и вперед по свободному от льдов коридору Центральной Европы.

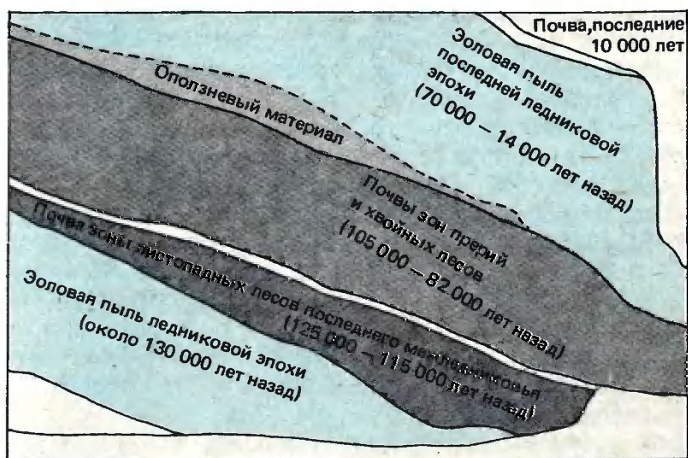
Все это позволило чехословацким геологам убедительно доказать, что в поверхностных отложениях района Брно запечатлелось по меньшей мере десять повторяющихся циклов «лёсс — почва». Но, поскольку первые публикации по данной проблеме были сделаны задолго до появления палеомагнитной шкалы времени, определить длительность каждого такого цикла в то время представлялось невозможным. И только в 1968 году, когда Кукла и его коллеги по Академии наук Чехословакии вновь занялись своими лёссовыми карьерами и нашли в них следы пяти инверсий геомагнитного поля, им удалось рассчитать среднюю продолжительность плейстоценового цикла «лёсс — почва». Они установили, что главный пульс климата Земли постоянно бьется в ритме один цикл за сто тысяч лет.

Еще в предшествующее десятилетие было выяснено, что цикличность осадконакопления в районе Брно состояла не в простом чередовании почв (слой 1) и лёссов (слой 2), дающем симметрию типа 1-2-1-2. На самом деле каждый цикл здесь оказался четырехчленным, представленным пачкой из трех типов почв (слоев 1, 2 и 3) и слоя лёсса (4), так что всю последовательность циклов можно было описывать асимметричным пилообразным графиком (1-2-3-4, 1-2-3-4). Первая почва каждого такого цикла — лесная,

отражающая условия теплого и влажного климата. Второй почвенный слой идентичен чернозему, характерному для современных сравнительно влажных частей зоны степей Азии; он содержит окаменелости, которые свидетельствуют о несколько более сухом и прохладном климате, чем условия предшествующей лесной фазы. Наконец, третья почва, перекрывающая слой чернозема, имеет бурый цвет; она подобна современным почвам, преобладающим в относительно умеренных районах Арктики. Окаменелости из этого – третьего по счету – слоя показывают, что климат времени его отложения был суше и холоднее, чем климат степей. Но он был всё же более теплым и влажным, чем климат, в условиях которого образовался следующий слой пачки – венчающий ее лёссовый горизонт. Таким образом, горизонты лёсса – это самые верхние части рассматриваемых пачек – представляют собой следы заключительных, наиболее холодных и сухих фаз климатических циклов, повторявшихся в районе Брно не менее десяти раз.

Наблюдения в Чехословакии привели Куклу к важному выводу: фазы похолоданий в каждом климатическом цикле были значительно продолжительнее фаз потепления. Кроме того, он смог убедиться, что переходы от фаз полярной пустыни с характерным для них обилием пыли к фазам листопадных лесов столь резки, что их следы в стенках карьеров имеют вид очень четких границ. Эти границы, названные Куклой «маркирующими линиями», дают возможность легко отличать один седиментационный цикл от другого, а также проводить сопоставление таких циклов, выделенных в разных, иногда сильно удаленных друг от друга районах (рис. 37).

Обнаружив биение пульса климата Центральной Европы и убедившись в его регулярности, Кукла обратился к вопросу о хронологии альпийских террас. Выше уже говорилось, что изучение этих террас привело Пенка и Брюкнера к выводу, что изменения плейстоценового климата происходили в неправильном ритме и что его холодные периоды были отмечены накоплением толщ террасовых галечников, получивших названия гюнцской, миндельской, рисской и вюрмской. Не сомневаясь в существовании альпийских террас, Кукла считал необходимым проверить пра-



37. Климатическая история, «записанная» в стенке карьера чехословацкого кирпичного завода. В чередовании слоев золотого алеврита (лёсса) и погребенных почв, изученном в карьере у Ново-Место, отразились основные климатические события последних 130 000 лет (фото и рис. предоставлены Дж. Куклой).

вильность их климатической интерпретации, данной Пенком.

Пенк исходил из предположения, что галечниковые толщи формировались только в эпохи оледенений.

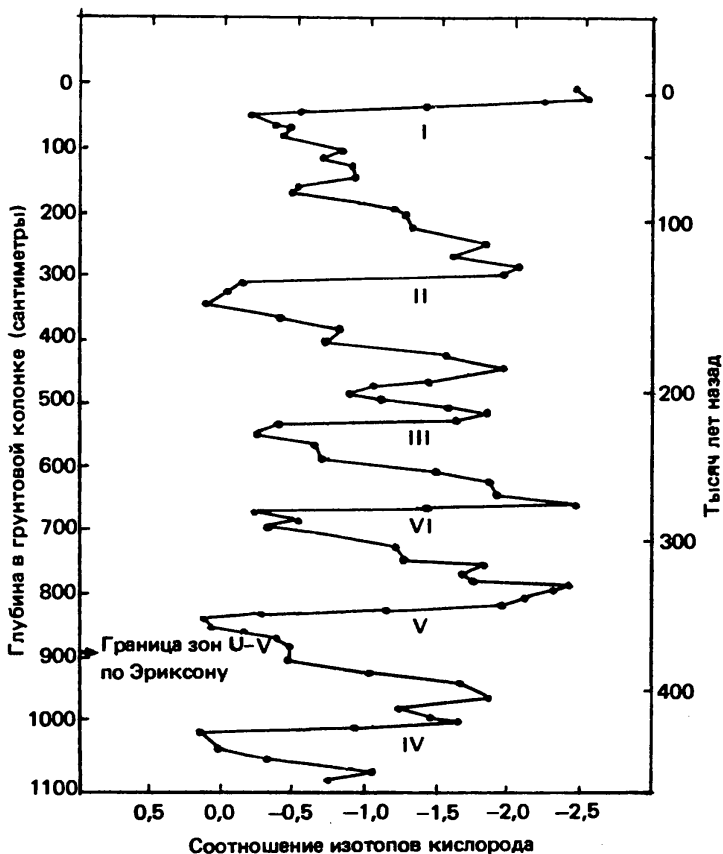
Однако Кукла довольно скоро обнаружил факты, могущие служить, по его собственным словам, «ярким подтверждением идеи о межледниковом возрасте галечниковых скоплений», которая за много лет до того была выдвинута немецким геологом Инго Шефером. Например, в галечнике нижней террасы Ульма, относимом, по Пенку, к эпохе вюрмского оледенения, были обнаружены древесные стволы, которые, согласно данным радиоуглеродного анализа, имели послеледниковый, или голоценовый, возраст. А в галечниках района Вены, тоже считавшихся вюрмскими, удалось найти кирпичи эпохи римлян. Но, как писал Кукла,

«...авторитет Пенка был еще столь велик, что во всех находках межледниковых слоев, заключенных в толщах террасовых галечников, большинство исследователей видели лишь местные аномалии, а не доказательства того, что все альпийские террасы имеют частично межледниковый возраст... Так, например, галечники низкой террасы района Остравы издавна картировались как вюрмские, каковыми они фактически и являются. Однако стоило известному чешскому стратиграфу Тирачеку найти в их ненарушенной толще проржавевшие остатки велосипедного руля, как эти галечники целиком «перекрестили» в голоценовый аллювий... Но очевидный вывод, логически вытекающий из этих и подобных им данных, так и не был сделан: галечники нижней террасы определяются как вюрмские, и это положение не может быть изменено находками велосипедов или римских кирпичей».

Сейчас ясно, что ряд галечниковых толщ, относимых к вюрму, фактически сформировался в позднеледниковое время.

Уже к 1969 году стало очевидно, что основанная на альпийских террасах климатическая схема, которая была разработана Пенком и Брюкнером, усовершенствована Эберлем, а затем принята целым поколением геологов, являлась зданием, построенным на песке или, точнее, на сыпучем галечнике. А когда это здание наконец рухнуло, вместе с ним распалась и вся система доводов, использовавшаяся Кёппеном и Вегенером для подтверждения теории Миланковича.

Пока в Европе Кукла пересматривал схему Пенка – Брюкнера, в США в Ламонтской обсерватории Ян



38. Пульс климата — его биение в 100 000-летнем ритме. Показанные на графике климатические изменения установлены по данным о соотношениях стабильных изотопов кислорода в колонке глубоководного грунта V 12-122, поднятой в Карибском море. Определив приблизительную шкалу времени, У. С. Брёккер и Я. ван Донк пришли к выводу, что основной закономерностью плейстоценовых изменений климата является их 100 000-летняя цикличность. Римскими цифрами обозначены шесть интервалов быстрой дегляциации, названных терминациями (по У. С. Брёккеру и Я. ван Донку, 1970).

ван Донк завершал работу по измерениям изотопного состава фораминифер из колонки V12-122, поднятой со дна Карибского моря (рис. 38). Работая вместе с Брёккером, ван Донк поставил перед собой цель

уточнить геологическую шкалу времени. Однако колонка V12-122 не доходила до основания эпохи Брюнеса, поэтому он не мог прямо использовать палеомагнитную шкалу. Зато в ней присутствовала граница между зонами U и V Эриксона, возраст которой составлял 400 000 лет. Последнюю цифру Эриксон получил путем интерполяции в длинных колонках, включавших в себя инверсию на границе Брюнес-Матуяма. Возрастной рубеж 400 000 лет назад был определен Брёккером и ван Донком как среднее из нескольких довольно сильно различающихся дат, полученных урановым и ториевым методами, и стал краеугольным камнем их хронологии. В итоге эти исследователи сделали заключение, что главные климатические циклы плейстоцена, отразившиеся в изотопном составе изученных ими фораминифер, имеют 100 000-летний период и описываются графиком асимметричной пилообразной формы: «периоды разрастания оледенений, длившиеся в среднем по 100 000 лет, внезапно завершались быстрым распадом ледниковых покровов». Эпизоды быстрого потепления, завершавшие ледниковые эпохи, эти исследователи назвали «терминациями».

Вплоть до сентября 1969 года, когда Брёккер и Кукла встретились на международном научном конгрессе в Париже, ни тот ни другой не понимали, что непохожие пути, по которым каждый из них шел в своих исследованиях, привели их, по существу, к одним и тем же выводам: ледниковые эпохи плейстоцена имели примерно 100 000-летнюю ритмичность, развивались медленно и заканчивались внезапно. Теперь стало ясно, что маркирующие линии в лёссовых карьерах Чехословакии соответствовали терминациям в грунтовых колонках со дна Карибского моря.

Пока Брёккер и Кукла обсуждали характер климатических циклов плейстоцена, а Имбри и Шеклтон обменивались опытом определения плейстоценовых температур, Уильям Раддиген и Эндрю Макинтайр из Ламонтской обсерватории упорно работали над новым методом изучения истории океана. Отобрав колонки глубоководных грунтов по меридиональному профилю в Северной Атлантике, изучив в них фауну планктонных фораминифер и распределение ее видов, чувствительных к изменениям температур, они смогли проследить историю смещения Гольфстрима на разных

этапах плейстоцена. При этом выяснилось, что в межледниковые эпохи Гольфстрим пересекал Атлантический океан в «косом», северо-восточном направлении, следуя от мыса Хаттерас к Британским островам, а во время оледенений он поворачивал на восток, так что его воды двигались от названного мыса к Пиренейскому полуострову. Так что по мере того, как ледниковые покровы разрастались и сокращались, а границы евразийских лесов и степей сдвигались то к северу, то к югу, это течение колебалось взад и вперед подобно створке гигантских ворот, навешенной на столб у мыса Хаттерас. Определив число «взмахов» Гольфстрима и сопоставив их следы с палеомагнитной шкалой времени, Раддиген и Макинтайр установили, что палеомагнитная эпоха Брюнеса вместила в себя восемь климатических циклов. Тем самым было доказано, что не только размеры полярных ледниковых покровов и положение природных зон Евразии, но и ориентировка океанических течений испытывала изменения, подчинявшиеся 100 000-летнему ритму.

К началу 1970-х годов достоверность и важность климатических циклов, имеющих 100 000-летний период, стали совершенно очевидными. Однако причина их возникновения все еще оставалась неясной. Теория Миланковича предсказать эти циклы не могла: судя по расчетам, выполненным для 65° с. ш., летняя инсоляция испытывает циклические изменения с периодом не 100 000, а около 40 000 лет, то есть варьирует в соответствии с циклами колебаний наклона земной оси.

И тем не менее два исследователя, Кеннет Месолелла из Брауновского университета и Джорж Кукла из Чехословакии, все же сумели использовать теорию Миланковича для объяснения 100 000-летних циклов. Они с самого начала верили, что между климатическими циклами такой длительности и изменениями эксцентриситета орбиты существует причинно-следственная связь, хотя, может быть, и не прямая, а лишь опосредствованная. Не случайно же основные колебания климата и формы орбиты имели одну и ту же периодичность. Кукла и Месолелла выдвинули, по существу, те же доводы, что и Джеймс Кролль на столетие раньше: мы знаем, говорили они, что интен-

сивность инсоляции в любой конкретный сезон почти целиком определяется циклом прецессии, но ведь последняя-то по своей амплитуде строго пропорциональна эксцентриситету орбиты! (см. рис. 35). Они подчеркивали, что раз на периоды наибольшего удлинения орбиты приходятся этапы максимальных межсезонных контрастов, то есть этапы, когда температуры зим ниже, а температуры летних сезонов выше средних, и что раз главной причиной расрастания или сокращения ледниковых покровов служат температуры одного из сезонов, то 100 000-летние циклы изменений эксцентриситета орбиты должны неизбежно отражаться на истории климата.

После этого, однако, точки зрения обоих теоретиков разошлись. Месолелла, как и Миланкович, считал, что критическое значение для развития оледенений имели температуры летних сезонов, а по мнению Куклы, их непосредственной причиной было снижение зимней инсоляции в высоких широтах Северного полушария. В 1967 году Кукла предсказывал: «Когда мы доживем до решения этой проблемы и поймем истинную палеоклиматическую роль зимы, нам станет ясно, что представление о главной роли летних сезонов — это самая серьезная ошибка, допущенная геологами-четвертичниками за все последние годы».

Что касается Брёккера и ван Донка, то они от каких-либо высказываний по поводу причин возникновения 100 000-летних циклов воздерживались. Для них эти причины оставались неясными, поскольку по их данным терминации одной группы, объединяющей четыре последних, отчетливо совпадали со «вмятинами» на кривой изменений эксцентриситета, а для других, в частности для двух более древних терминаций, такого совпадения не выявлялось.

Итак, к 1969 году важность палеомагнитной шкалы времени как основы для изучения хронологии ледниковых эпох была доказана. Именно она позволила установить, что главная особенность пульса четвертичного климата состоит в 100 000-летнем ритме его биения. Однако на первых порах эта шкала слабо способствовала укреплению позиций астрономической теории оледенений. Скорее наоборот: к немалому своему смущению, сторонники идей Миланковича убедились, что основная периодичность изменений климата не следо-

вала из сути его теории. И только после того, как все факты были выяснены и их сопоставления закончены, Месолелла и Кукла смогли указать тот способ модификации теории Миланковича, который позволял объяснить эту периодичность.

Во всех этих сложностях была и своя польза, так как они сделали очевидным: астрономическая теория лишь в том случае завоеует доверие большинства ученых, если будет ясно, что она успешно предсказывает климатические изменения, «наложенные» на 100 000-летние циклы. В самом деле, если бы удалось доказать, что эта – «наложенная» – периодичность соответствует 41 000-летним циклам изменений наклона земной оси и 22 000-летним циклам прецессии, то теория Миланковича была бы подтверждена. Но установление такого соответствия, то есть демонстрация параллелизма в ходе астрономической и палеоклиматической кривых, требовало высокоточных и детальных данных. Во всяком случае, указанные кривые должны были быть настолько детальными, чтобы 22 000- и 41 000-летние циклы получили бы на них достаточно ясное выражение. Таким образом, проблема астрономической теории ледниковых эпох вновь упиралась в необходимость повышения точности геологической шкалы времени.

15. МЕТРОНОМ ЛЕДНИКОВЫХ ЭПОХ

Весной 1970 года Джеймс Хейс решил: пора вновь взяться за проблему древних оледенений. Теперь он был великолепно вооружен – плейстоценовую шкалу времени удалось «посадить» на надежную палеомагнитную основу, а по данным морской микропалеонтологии научились реконструировать древние течения океана и его палеотемпературы, так что колонки глубоководных грунтов превратились в действенный инструмент мониторинга глобального климата. Геология поднялась на новую ступень. Она уже была в состоянии определять хронологию и размах плейстоценовых изменений разных частей океана. И если бы оказалось возможным уточнить шкалу времени для эпохи Брюнеса, то ничто не могло бы помешать организации решающей проверки теории Миланковича.

Однако после пятилетней работы с колонками из Южного и Тихого океанов Хейс убедился: задача создания достоверной реконструкции истории океана слишком грандиозна, чтобы быть по плечу одному исследователю или одному научному учреждению. Для ее решения нужен целый творческий коллектив, включающий палеонтологов, минералогов, геохимиков и геофизиков. Высказав эту идею Джону Имбри при встрече в кафетерии Колумбийского университета, Хейс заметил, что все методы, необходимые для решения проблем истории океана, уже созданы и используются специалистами, работающими в десятке известных ему лабораторий. Сейчас же не хватает только организации, которая скоординировала бы эти разрозненные усилия.

Что касается Имбри, то он уже давно искал возможности применить свой метод многофакторного анализа к более широкому спектру видов, чем одни

фораминиферы, так что он с большой охотой согласился на участие в предложенном проекте. Тем более что он знал: группа исследователей во главе с Эндрю Макинтайром уже включилась в составление карты «ледниковой» Атлантики, для чего ими изучались фораминиферы и кокколиты (мельчайшие планктонные водоросли) из колонок глубоководных осадков. Можно было не сомневаться, что если многофакторный анализ окажется применимым также к радиоляриям и диатомеям, то конкретные методы, уже разработанные Макинтайром и его группой, были бы применимы и для более высоких широт, а это в свою очередь позволило бы составить палеогеографическую карту на весь океан. У Имбри оставалось лишь одно опасение, связанное с трудностями в управлении таким громоздким междоуведомственным проектом. «Не волнуйтесь,—успокоил его Хейс,—все, что нам нужно,—это лишь деньги на авиабилеты и телефонные переговоры».

Оптимизм Хейса был оправдан. Уже к 1 мая 1971 года задуманный им междисциплинарный, междоуведомственный проект начал действовать. Первоначально перед этим проектом, получившим название КЛИМАП, была поставлена задача реконструировать историю северных частей Атлантического и Тихого океанов в палеомагнитную эпоху Брюнеса. Проект получил финансовую поддержку из средств, ассигнованных Национальным научным фондом США на программу Международного десятилетия исследований океана (МДИО). В 1973 году КЛИМАП был реорганизован и перед ним поставлены две более широкие цели: создать палеогеографическую карту поверхности Земли в эпоху последнего оледенения и определить колебания плейстоценового климата.

На первых порах к участию в программе МДИО были привлечены три учреждения: Ламонтская геологическая обсерватория Колумбийского университета (или, как ее теперь называли, Геологическая обсерватория Ламонта-Дохерти), Брауновский университет и Университет штата Орегон. В руководящий орган программы, Исполнительный комитет, вошли Джеймс Хейс, Джон Имбри, Эндрю Макинтайр, Тед Мур и Нил Опдайк. Несколько позже к проекту КЛИМАП присоединились Мэнский и Принстонский универси-

теты, и Исполнительный комитет МДИО пополнился Джорджем Дентоном, Россом Хисом, Уорреном Преллем и Уильямом Хатсоном. На Джорджа Куклу, ставшего сотрудником Ламонтской обсерватории, возложили ответственность за корреляцию морских и наземных осадочных толщ, содержащих данные по истории климата. Николасу Шеклтону и Яну ван Донку поручили продолжать изотопно-кислородные исследования, а Робли Мэтьюзу — вести сбор и анализ материалов по колебаниям океанского уровня. Центральная администрация проекта устроила свою штаб-квартиру в Ламонтской обсерватории, и задача по координации всей его разнородной деятельности легла на плечи Роз-Мари Кляйн. В разгар работ по проекту к нему были привлечены до ста исследователей, в том числе специалисты из Дании, Франции, ФРГ, Великобритании, Норвегии, Швейцарии и Нидерландов. В 1976 году они опубликовали карту температур поверхности океана и распределения ледниковых покровов 18 000 лет назад, то есть в максимум последнего оледенения. К 1977 году общие расходы, связанные с проектом, составили 6 630 500 долларов.

Однако если вернуться к весне 1971 года, то тогда перед участниками проекта КЛИМАП стояла одна настоятельная, первоочередная задача: произвести стратиграфическое расчленение 700 000-летней эпохи Брюнеса, то есть разделить ее на зоны, с тем чтобы соответствующие им слои можно было распознать в разных колонках и коррелировать друг с другом. Получив в свое распоряжение такую стратиграфическую схему, геологи обрели бы инструмент, позволяющий понять, где картина накопления глубоководных осадков отражает общую историю климата океана, а где она искажена такими местными процессами, как эрозия дна глубинными течениями, накопление турбидитов и т.п. А уж коль скоро эти искажения выявлены, их можно учесть и скорректировать. Мы помним, что в 1968 году данная стратиграфическая проблема была почти решена Эриксоном, который подразделил палеомагнитную эпоху Брюнеса на десять зон *menardii* — от Q до Z. Но в основу выделения этих зон было положено наличие или отсутствие лишь одного тепловодного вида форамини-

фер, в связи с чем за пределами Карибского моря и экваториальной Атлантики схема Эриксона оказалась практически неприменимой. КЛИМАП же нуждался в стратиграфической схеме, пригодной для картирования всего океана.

Решение этой проблемы возложили на группу исследователей глубоководных колонок, в которую входили Цунемаса Саито, Ллойд Бёркл и Аллан Би. Первоначально группа рассчитывала, что все необходимые для глобальной стратиграфической схемы рубежи можно будет установить по изотопно-кислородной кривой Эмилиани. Однако в связи с тем, что даже самая длинная из карибских колонок этого исследователя, имеющая номер Р6304-9, не доходила до границы Брюнес–Матуяма, все семнадцать изотопных стадий Эмилиани оставались в хронологической неопределенности, пребывая «где-то внутри эпохи Брюнеса».

Между тем колонка, необходимая Саито и его коллегам, должна была не только содержать богатые комплексы фораминифер, но и обладать достаточной длиной, чтобы охватить и эпоху Брюнеса, и последнюю магнитную инверсию, с которой она начиналась. Успех к Саито пришел в декабре 1971 года, когда среди материала, доставленного из рейса ламонтского научно-исследовательского судна «Вима», он обнаружил колонку V28-238, поднятую Джоном Лэддом в западной части экваториальной зоны Тихого океана.

Судя по комплексам фораминифер из ее нижних слоев, она действительно имела требуемую длину. У участников КЛИМАПа захватило дух: может быть, наконец удалось обнаружить тот долгожданный «розеттский камень», который создаст возможность для расшифровки истории климата за всю эпоху Брюнеса! Определение остаточной намагниченности, проведенное Нилом Опдайком, устранило последние сомнения: Саито прав, граница Брюнес–Матуяма была налицо, располагаясь на 12 м ниже верхнего конца колонки.

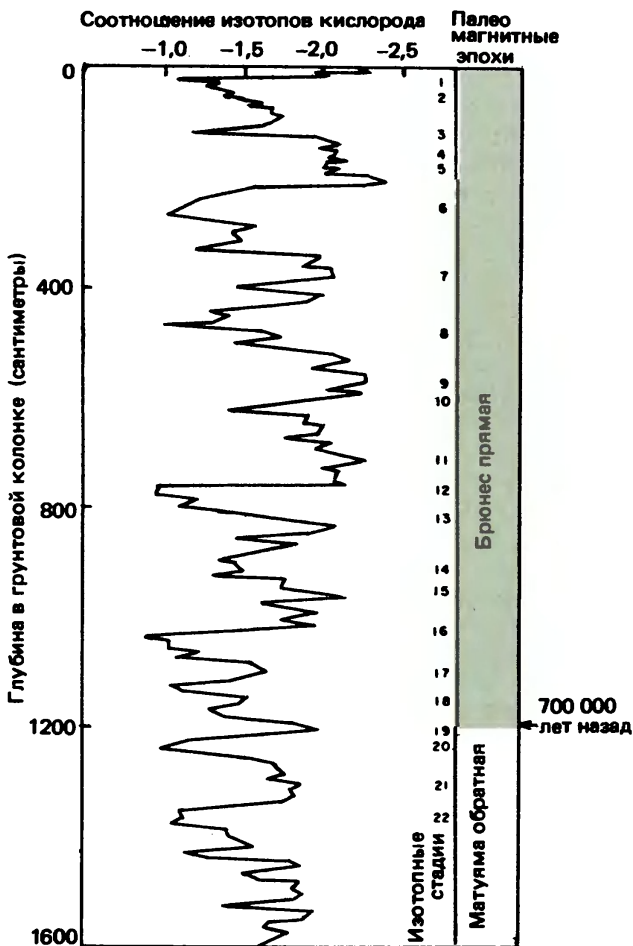
Понимая важность этого открытия, Хейс немедленно отправил образцы в Кембридж на изотопный анализ, который должен был провести Николас Шеклтон.

Знакомство Хейса с молодым английским геофизиком Шеклтоном состоялось еще несколько лет на-

зад. Ему запомнилась лаборатория Шеклтона в Кембридже и те впечатляющие усовершенствования, которые он внес в методику изотопно-кислородного анализа. В 1961 году, получив приглашение профессора Гарри Годвина работать на ботаническом факультете Кембриджского университета, Шеклтон начал с установки масс-спектрографа для изучения изотопного состава плейстоценовых окаменелостей. Уже с первых шагов своих исследований он убедился в особой важности данных по соотношениям стабильных изотопов кислорода в остатках бентоса, то есть организмов, обитавших на морском дне. Однако такого материала в осадках обычно настолько мало, что его сбор в количестве, достаточном для выполнения точных анализов, всегда представлял проблему. Именно это обстоятельство и побудило Шеклтона заняться усовершенствованием аппаратуры, с тем чтобы можно было делать точные определения по считанному числу особей микрофауны. Эта работа обошлась ему в десять лет жизни.

Когда в июне 1972 года Шеклтон прибыл в Ламонтскую обсерваторию на конференцию участников проекта КЛИМАП, он уже смог продемонстрировать две изотопные кривые, построенные по результатам анализа колонки V28-238. Первая из них отражала изменения изотопного состава скелетов планктонных организмов, населявших приповерхностный слой океана. Эта кривая, доходящая до уровня последней магнитной инверсии, могла помочь в решении главной стратиграфической задачи КЛИМАПа: судя по ней, эпоха Брюнеса отчетливо распадается на девятнадцать изотопных стадий. При этом выяснилось, что семнадцать верхних стадий точно соответствуют стадиям Эмилиани, которые он выявил при исследовании своей длинной карибской колонки, а две дополнительные, обнаруженные Шеклтоном, представляют собой то самое неизвестное звено, которого недоставало для заполнения промежутка между нижним концом кривой Эмилиани и границей Брюнес-Матуяма (рис. 39).

Все, однако, понимали: данную стратиграфическую проблему можно считать решенной лишь в том случае, если будет доказана глобальная синхронность всех выделенных стадий. Поэтому коллеги Шеклтона



39. «Розеттский камень»* позднплейстоценового климата. График, показывающий результаты изотопно-кислородных и палеомагнитных измерений, выполненных в 1972 году Н. Дж. Шеклтоном и Н. Д. Опдайком по образцам из тихоокеанской колонки V 28-238. Ими доказано, что изотопная стадия 19 совпадает с границей палеомагнитных эпох Брюнеса и Матуямы, чем была создана основа для точной хронологии климатических изменений позднего плейстоцена (по Н. Дж. Шеклтону и Н. Д. Опдайку, 1973).

* Камень с идентичными текстами на греческом и древнеегипетском языках, исследование которых позволило французскому лингвисту и историку Ж. Ф. Шампольону создать принципы дешифровки иероглифического письма древних египтян. — *Прим. перев.*

испытали чувство, близкое к восторгу, когда они увидели вторую кривую, построенную по результатам изотопно-кислородного анализа бентосных фораминифер, — она оказалась идентичной первой, то есть «планктонной», кривой! Было и другое важное обстоятельство, к которому Шеклтон привлек внимание коллег: температуры придонных вод океана всегда близки к точке замерзания, а потому не могли сильно снижаться и в эпохи оледенений. Это позволило верить, что обе кривые отражают не колебания температур воды, а изменения в относительном содержании легких изотопов в океане. Впрочем, к данной точке зрения Шеклтон и Имбри пришли еще три года назад, после их встречи и споров в Париже. Поскольку же морская вода все время перемешивается течениями, любые изменения ее химического состава, происшедшие в какой-то одной части океана, сравнительно быстро — менее чем за тысячу лет — сказываются на составе воды и в остальных его частях. Так что кривая Эмилиани явно несла с собой химическую информацию о древних ледниковых покровах. При росте этих покровов происходило предпочтительное извлечение легких атомов кислорода из океана и их накопление во льду, что изменяло изотопный состав океана. А при деградации ледниковых покровов задерживавшиеся в них легкие атомы вновь возвращались в океан, восстанавливая его первоначальный изотопный состав. Что же касается локальных изменений температур, то их эффекты были слишком малы, чтобы поддаваться измерению.

Работа Шеклтона и Опдайка не только решила стратиграфическую проблему КЛИМАПа, но и дала его участникам новую, гораздо более точную, чем прежде, шкалу времени для событий позднего плейстоцена. Теперь, когда хронологические рамки всего «комплекта» из девятнадцати изотопных стадий Шеклтона были достаточно надежно определены с обоих концов — радиоуглеродными датировками сверху и магнитной инверсией снизу, абсолютный возраст каждой конкретной стадии можно было оценить путем простой интерполяции, проведя ее внутри 700 000-летнего интервала эпохи Брунеса.

Итак, хронологическая шкала для изотопной кривой была наконец создана. Затем Шеклтон решил

проверить, соответствуют ли сравнительно мелкие «стадиальные» колебания данной кривой климатическим изменениям, предсказанным теорией Миланковича. Он рассуждал следующим образом: если астрономическая теория верна, то указанные колебания должны отражать ход изменений наклона земной оси и циклы прецессии, а значит, в них неизбежно проявятся 41 000-летние и 22 000-летние циклы как «волны», наложенные на главный, 100 000-летний пульс. Однако Шеклтону ждало разочарование: 100 000-летние циклы доминировали столь явно, что остальные частоты были подавлены, и их определение оказалось практически невозможным.

И все-таки, причем за шесть лет до попытки Шеклтона, статистическое решение этой проблемы было найдено. Голландский исследователь по имени Э. П. ван ден Хойфель применил метод, получивший известность как спектральный анализ, и выяснил, что кривая Эмилиани может быть разложена на два частотных компонента: главные 40 000-летние циклы и менее четко выраженные 13 000-летние циклы. Методика этой работы была в принципе аналогична тем приемам, к которым прибегает музыкант при выделении отдельных нот из музыкального аккорда. Расчленив isotopный «аккорд» на определенное число «нот», каждая из которых представляла одну из частот колебаний, он нанес их относительные значения на график, или спектр. При этом 40 000-летние циклы дали отчетливый пик, явно свидетельствующий о том, что именно эти циклы играли роль доминирующего климатического пульса.

Метод и результаты ван ден Хойфеля были внимательно изучены Имбри и Шеклтоном. Они поняли, что спектральный анализ идеально подходит для проверки теории Миланковича, однако к выводам голландского исследователя надо подходить критически, так как они базировались на старой хронологии плейстоцена, и что если провести повторный анализ той же кривой на основе новой хронологической шкалы, разработанной КЛИМАПом, то доминирующими циклами могут оказаться и 100 000-летние. Что касается природы относительно коротких циклов ван ден Хойфеля, то она оставалась неясной, однако можно было надеяться, что и на этот вопрос будет дан

ответ после спектрального анализа изотопной кривой, построенной по колонке V28-238.

Задача облегчалась тем, что у Имбри уже был определенный опыт работ со спектральным анализом, у него имелась соответствующая компьютерная программа. Поэтому свой первый статистический эксперимент Имбри и Шеклтон провели в Брауновском университете. Результаты эксперимента обнадеживали, в них можно было видеть подтверждение теории Миланковича—хотя на первых порах может быть и не очень ясное. В добавление к 100 000-летним циклам, которые, как и ожидалось, образовали главный пик спектра, на последнем выявились также два других, менее значительных пика, указывающих на существование климатических циклов с периодами в 40 000 и 20 000 лет. И хотя амплитуды этих двух циклов были слишком малы, чтобы полностью исключить элемент случайности, факт почти точного совпадения обеих измеренных частот с расчетными периодами циклических изменений прецессии и наклона земной оси не мог не наводить на размышления.

Итак, искомая связь казалась вероятной, оставалось ее доказать. Но с чем связаны трудности выяснения природы высокочастотных колебаний климата? Осенью 1972 года Хейс занялся этой проблемой и довольно быстро нашел ответ: глубоководные осадки из анализируемых им колонок накапливались слишком медленно. Получалось, что при скоростях седиментации, равных одному-двум миллиметрам в столетие, которые характерны для большинства тихоокеанских и карибских колонок, деятельность роющих бентосных организмов успевала настолько перемешать материал донных осадков, что следы коротких климатических циклов оказывались уничтожены. Стало ясно, что для объективной проверки теории Миланковича следовало анализировать ненарушенные осадки, накапливавшиеся со скоростью более 2 мм в столетие.

Хейс и его коллеги по проекту КЛИМАП постоянно занимались отбором глубоководных колонок в процессе сбора информации для их карты «ледникового» океана. Теперь Хейс решил заняться поиском колонки, которая бы отвечала следующим требованиям: имела достаточно высокую скорость седиментации, относилась бы к высоким широтам Южного полуша-

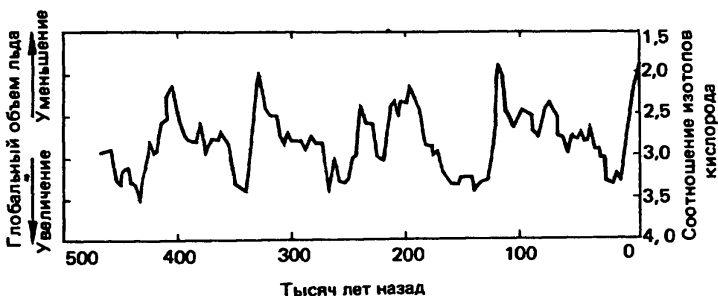
рия и содержала раковины как фораминифер, так и радиолярий. Он был уверен, что именно такая колонка даст максимум информации, поскольку вариации в изотопном составе ее фораминифер отразят изменения оледенения не только Южного, но и Северного полушария, где, собственно, и происходили основные наступания и сокращения ледниковых покровов, оказывавшие влияние на изотопный состав океана. В то же время, считал он, изменения в составе радиолярий после их обработки методом многофакторного анализа дадут ответ на вопрос об истории температур воды над местом взятия колонки. Хейс имел все основания надеяться, что, сравнив эти два сигнала – изотопный и радиоляриевый, он сможет решить проблему соотношения климатических изменений Северного и Южного полушарий, которую впервые поставил еще Джеймс Кролль, то есть поймет, были ли эти изменения однозначными или происходили контрастно.

В январе 1973 года при очередном просмотре ламонтской коллекции Хейс обнаружил колонку RC11-120, которая была взята на шесть лет раньше участниками рейса исследовательского судна «Роберт Конрад» в южной части Индийского океана. Первое впечатление было верным: после подсчета радиолярий и изотопного анализа, проведенного Шеклтоном, Хейс убедился, что осадки, представленные в этой колонке, накапливались сравнительно быстро, а именно со скоростью три миллиметра в столетие. И, достаточно было представить результаты этих подсчетов и анализа в виде графика, как ответ на вопрос Кролля стал вполне очевидным: климатические изменения в Северном и Южном полушариях происходили практически синхронно. Уже один этот вывод был настолько важен, что мог с лихвой оправдать весь затраченный на него труд. Но одно обстоятельство все же омрачало успех Хейса: колонка RC11-120 оказалась сравнительно короткой, она охватывала лишь последние 300 000 лет, доходя до основания стадии 9 (по изотопной схеме Эмилиани), тогда как для успешного применения спектрального анализа были нужны непрерывные геологические разрезы, освещавшие историю климата за интервалы времени не менее 400 000 лет.

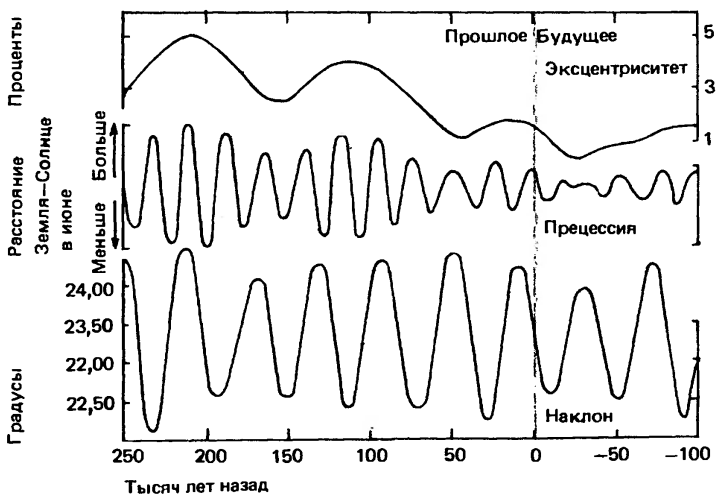
Требовалась новая колонка, и Хейс опять взялся за работу, похожую на поиск иголки в стоге сена. Убедившись, что в ламонтской коллекции подходящего материала нет, он решил обратиться в другие организации. В июле Хейс отправился в Таллахасси, где хранилось богатое собрание колонок, принадлежащее Флоридскому университету. Здесь он обратил особое внимание на образцы из южных районов Индийского океана, близких к месту взятия RC11-120. Вскоре он натолкнулся на группу колонок, поднятых в 1971 году Норманом Уоткинсом во время рейса исследовательского судна «Эльтанин». Хейс приступил к их расконсервации, в чем ему помогали два студента. Позже он вспоминал: «Материал хранился в холодных камерах, и мы дрожали в своих парках. Но когда перед нами предстала колонка E49-18, холод был забыт. Я сразу понял: она интересна, так как последовательность слоев, подчеркнутая различиями в их окраске, идеально соответствовала климатическим колебаниям, которые мы знали по изотопной кривой, составленной Шеклтоном для V23-238». Сосчитав слои, Хейс не сходя с места сделал вывод, что E49-18 достигала стадии 13, имеющей абсолютный возраст 450 000 лет. Искомая «иголка» была перед ним!

Предварительное заключение Хейса оказалось верным. Колонка E49-18 в самом деле доходила до стадии 13. Правда, слои, соответствовавшие трем верхним стадиям, были во время взятия колонки утрачены, однако достигнутый к тому моменту уровень развития изотопной стратиграфии позволил восполнить отсутствующие слои, чему помогли данные по соседней колонке RC11-120. Таким образом, дополнив друг друга, эти две колонки подарили науке детальную и неискаженную летопись климата, которая на 450 000 лет уходила в глубь геологической истории, причем скорость седиментации в них была достаточно высока, чтобы запечатлеть даже сравнительно короткие, близкие к 10 000-летним, климатические циклы.

А когда результаты обоих — и радиоляриевого и изотопного — анализов были представлены в графическом виде, Хейс и Шеклтон и впрямь возликовали: изотопная кривая по Индийскому океану в своих основных чертах повторяла графики, построенные Эмилиани для стадий 1-13 по целому ряду других коло-



40. Климат последних 500 000 лет. Изотопно-кислородный график, полученный участниками проекта КЛИМАП по двум глубоководным колонкам из Индийского океана. Эти данные, отражающие изменения суммарного объема ледниковых покровов Земли, стали одним из подтверждений правильности астрономической теории ледниковых эпох (по Дж. Д. Хейсу и др., 1976).

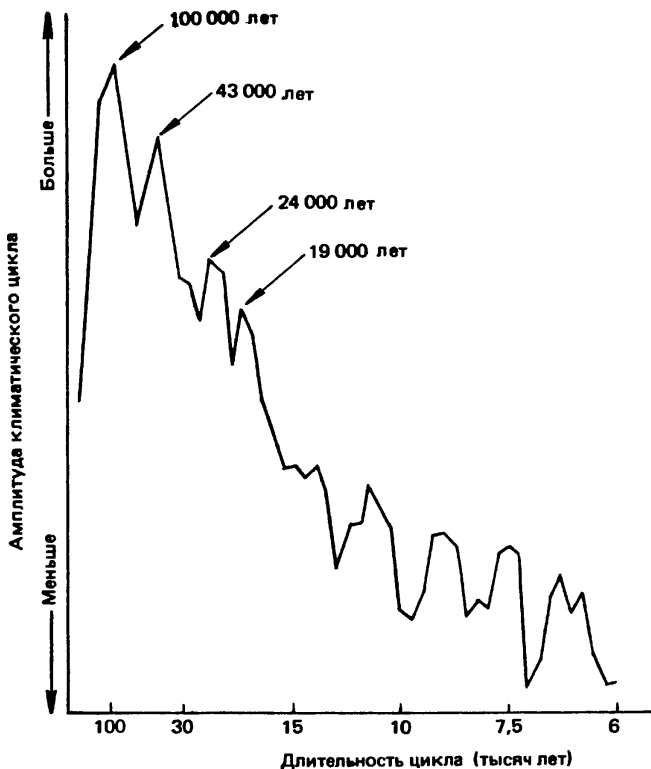


41. Колебания эксцентриситета орбиты, наклона земной оси и прецессии. Движение планет служит причиной изменений гравитационного поля, которые в свою очередь вызывают изменения в геометрии земной орбиты. Эти изменения могут быть рассчитаны как для прошлого, так и для будущего (данные А. Берже).

нок. Причем, как Хейс и ожидал, теперь были ясно видны не только 100 000-летние циклы, но и климатические колебания более высоких частот (рис. 40). Наконец появилась возможность для настоящей проверки теории Миланковича, и Хейс решил не упускать ее; он попросил Имбри подвергнуть их кривую спектральному анализу.

Прежде всего предстояло выполнить точное определение частот, характерных для изменений наклона земной оси и предварения равноденствий в последние 450 000 лет (рис. 41). Имбри понимал, что именно эти частоты, а отнюдь не периодичность изменений эксцентриситета орбиты будут иметь критическую важность для предпринимаемой проверки, так как только они были однозначно предсказаны теорией Миланковича. Ему стало известно, что необходимые для этой работы астрономические кривые недавно пересчитывались Ананду Д. Вернекаром из Мэрилендского университета, и Имбри смог получить от него еще не опубликованные данные. Подвергнув материалы Вернекара статистической обработке, Имбри установил, что в кривой изменений наклона земной оси выявляются, как и ожидалось, одни лишь 41 000-летние циклы. Зато в спектре изменений предварения равноденствий с полной определенностью выступает не одна, а две цикличности — главные циклы прецессии с частотой 23 000 лет и второстепенные циклы с частотой 19 000 лет. Опасаясь ошибки, Имбри показал свои результаты бельгийскому астроному Андре Берже. После проверки тригонометрических формул, на которых базировались расчеты прецессии, Берже заключил: обнаруженные Имбри сдвоенные циклы — не плод статистических ошибок, а отражение реальности, поскольку в изменениях расстояния Земля — Солнце действительно проявляются циклы длиной в 23 000 и 19 000 лет.

Теперь уже ничто не мешало начать долгожданную проверку. Как мы помним, по расширенному варианту астрономической теории, разработанному Куклой и Месолеллой, в колебаниях климата должны проявляться четыре группы отчетливых циклов — 100 000-летние, отвечающие изменениям эксцентриситета; 41 000-летние, связанные с изменениями в наклоне оси вращения; 23 000- и 19 000-летние, соответствующие



42. Спектр климатических изменений за последние полмиллиона лет. Этот график показывает относительное значение разных климатических циклов, выявленных по данным изотопно-кислородного анализа двух колонок из Индийского океана; он подтвердил целый ряд прогнозов, сделанных на основе теории Миланковича (по Дж. Д. Хейсу и др., 1976).

щие периодическим изменениям прецессии. Реальность вот этих циклов Имбри как раз и подверг проверке, что было сделано летом 1974 года. Его спектральный анализ показал, что роль доминирующего климатического пульса действительно принадлежит 100 000-летним циклам, которые дали одинаково крупные пики как на изотопном, так и на радиоляриевом спектрах. Однако на этих спектрах ясно выступили и три других пика — менее крупных, но вполне отчетливых (рис. 42). На изотопном спектре это были циклы с периодами в 43 000, 24 000 и 19 000 лет, а на радиоля-

риевом (палеотемпературном) спектре – циклы с периодами в 42 000, 23 000 и 20 000 лет.

Полученные результаты превзошли все ожидания Имбри и его коллег. Каждый из циклов, выявленных в колонках из Индийского океана, совпадал с циклами, предсказанными астрономической теорией, с точностью до 5%. Такое соответствие не могло быть следствием простой случайности. А вслед за тем другой исследователь, Николас Дж. Пайсиас, получил новое подтверждение астрономической теории. Применяя особую, более мощную разновидность спектрального анализа к кривой, построенной по колонке V28-238, он и в ней обнаружил статистически значащие циклы с периодом в 23 000 лет. Участники проекта КЛИМАП не могли не чувствовать удовлетворения – их изотопные кривые по Индийскому и Тихому океанам прекрасно увязались с данными, имевшимися для других океанов, и они могли с полной уверенностью заключить: первопричиной ледниковых эпох второй половины плейстоцена действительно служили изменения в эксцентриситете земной орбиты, в прецессии и наклоне оси вращения нашей планеты.

Однако возможности начатого таким образом исследования не могли сводиться к одному лишь показу того факта, что частоты астрономических изменений проявляются и на палеоклиматических кривых. Если астрономическая теория верна, она должна была также ответить на вопросы о скорости реакции ледниковых покровов на каждый тип астрономического изменения. Если, например, их реакция на колебания наклона земной оси мгновенна, то и циклы этих колебаний, и 41 000-летние климатические циклы должны совпадать по фазе. Если же, наоборот, реакция оледенения на изменения в инсоляции, связанные с колебаниями наклона оси, запаздывает, что, кстати сказать, выглядит более вероятным, то пики указанных 41 000-летних циклов должны закономерно отставать от пиков соответствующей астрономической кривой.

Узнав о существовании особого метода статистической обработки, называемого фильтрацией, который позволял рассматривать разночастотные компоненты палеоклиматической кривой по отдельности, Имбри применил его к анализу обеих индоокеанских колонок. Результат этого анализа убедительно показал:

41 000-летние циклы в самом деле отстают от колебаний в наклоне оси вращения, причем величина их «лага» составляет 8000 лет. Что касается 23 000-летних климатических циклов, то и они — во всяком случае, на большей части изученного интервала времени — с систематическим запаздыванием следуют за вариациями прецессии. В общем, все эти отставания имели настолько регулярный характер, что можно было утверждать: ритм климатических колебаний определяется изменениями наклона земной оси и прецессии.

Итак, Хейс, Имбри и Шеклтон окончательно убедились, что главные изменения климата вызываются астрономическими причинами и что климатические циклы с периодами в 41 000 и 23 000 лет следовали, закономерно запаздывая, за колебаниями в наклоне земной оси и в прецессии. Изложению и обоснованию этого вывода они посвятили статью «Вариации земной орбиты: метроном ледниковых эпох», которая была опубликована в журнале «Science» 10 декабря 1976 года.

Таким образом, спустя сто лет после появления теории Кролля и через пятьдесят лет после того, как Миланкович послал свои инсоляционные кривые Кёппену и Венегеру, две колонки со дна Индийского океана смогли наконец подтвердить правильность астрономической теории ледниковых эпох. Только теперь у геологов появились убедительные доказательства того, что импульсы для начала глобальных похолоданий, регулярно повторявшихся в плейстоцене, сообщались не чем иным, как движением Земли по ее околосолнечной орбите. Правда, конкретные механизмы преобразования слабых «космических сигналов» в глубокие изменения климата и оледенения оставались неизвестными, как были неизвестны и причины, по которым 100 000-летние циклы изменений эксцентриситета орбиты оставили столь сильный отпечаток на всей геологической истории последнего полумиллиона лет. Но это не могло заслонить главного: после многих лет поисков и сомнений мы наконец убедились, что путь к разгадке тайны ледниковых эпох, избранный Милутином Миланковичем, этим «скитальцем по далеким мирам и векам», был правильным.

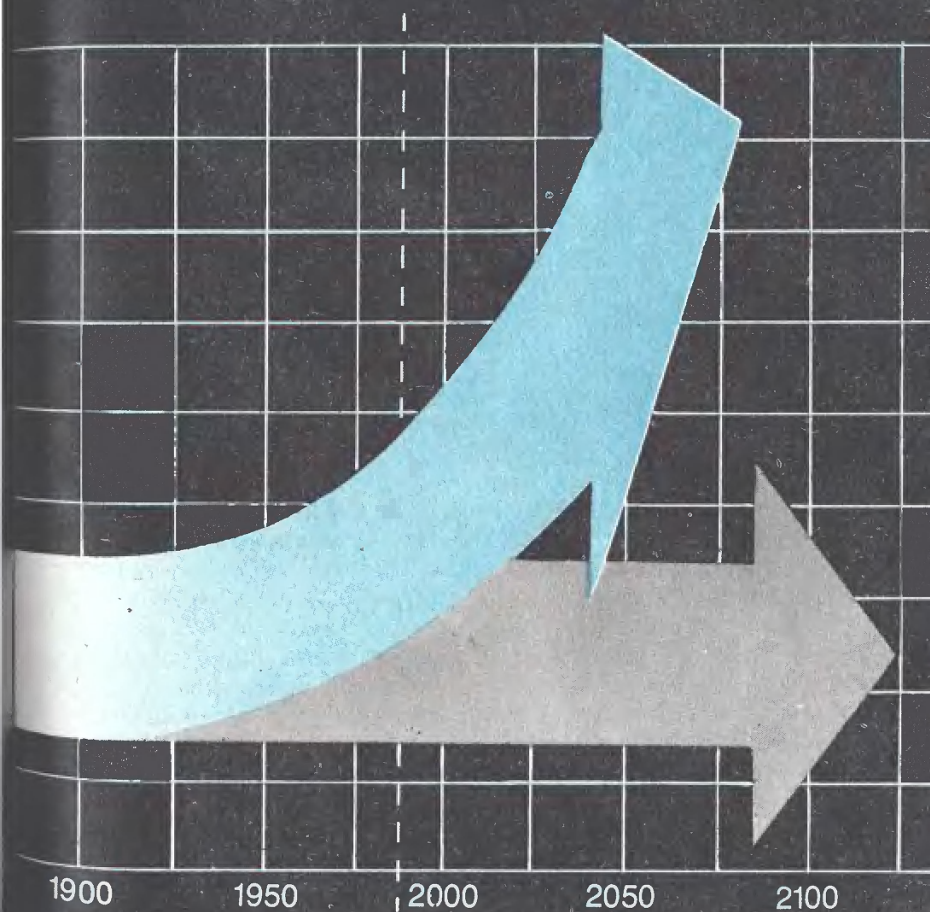
В марте 1941 года, подводя итоги собственной

жизни, отданной выяснению причин древних оледенений, Миланкович размышлял:

«Эти причины – изменения инсоляции, вызываемые взаимовлияниями планет и пертурбациями в их орбитах, – лежат далеко за рамками видения естественных наук описательного плана. Поэтому создание теории ледниковых эпох – задача точных наук, которые должны опираться на законы, управляющие Вселенной, и на наиболее совершенные математические методы. А описательные науки должны проследить, чтобы эта теория была согласована с фактическими данными, установленными геологией».

Часть III

ЛЕДНИКОВЫЕ ЭПОХИ БУДУЩЕГО



16. ПРЕДСТОЯЩЕЕ ОЛЕДЕНЕНИЕ

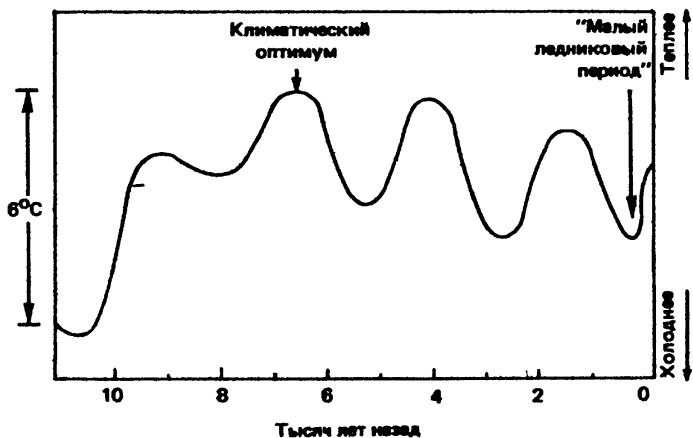
Что же можно сказать о будущем? Означает ли факт обширных оледенений, многократно повторявшихся в прошлом, что нам угрожает еще и новое наступание ледников? В этом вопросе большинство ученых, занимающихся изменениями климата, единодушны: мир действительно должен вступить в следующую ледниковую эпоху — если, конечно, его глобальная климатическая система не испытает каких-то непредсказуемых фундаментальных преобразований. Но когда? На этот счет мнения специалистов расходятся. Одни утверждают, что текущее межледниковье продержится еще не менее 50 000 лет. Другие же, принимая во внимание тенденцию к некоторому похолоданию, характерную для климата последних десятилетий, считают, что новая ледниковая эпоха уже близка; согласно одной из крайних точек зрения, она должна начаться всего лишь через несколько столетий.

Однако действительные расхождения взглядов не столь глубоки, как это может показаться, и имеют скорее терминологический, чем принципиальный характер. В самом деле, как определить начало ледниковой эпохи? До каких размеров должны вырасти ледниковые покровы и до каких значений снизиться глобальные температуры, чтобы можно было официально объявить: «с сегодняшнего дня мир вступил в новую ледниковую эпоху»? Проблема такого определения, достаточно трудная сама по себе, еще более осложняется географическими различиями. На основных площадях Гренландии, например, и сегодня господствуют условия ледникового периода. Стоит лишь Гренландскому ледниковому щиту неожиданно увеличиться на один процент, как все поселки, расположенные на ныне свободном ото льда побережье острова, будут уничтожены, и у их обитателей не будет

сомнений, что новое оледенение уже наступило. В то же время представим себе шотландского рыбака, привыкшего к постоянно холодной погоде, но живущего вдали от современных ледников: о тех же самых событиях — начале наступания ледников в Скандинавии или Гренландии — он вообще вряд ли бы догадался. И только позже, когда на вершинах Северо-Шотландского нагорья возникнут ледниковые шапки, а косяки сельди мигрируют на юг, до него может дойти, что современному межледниковью пришел конец. Еще позже это дойдет до жителей Центральной Европы: вероятно, пройдет несколько тысячелетий, прежде чем ее сады и пашни превратятся в полярную пустыню. С не меньшим опозданием дождевые леса Бразилии уступят место степям и саваннам.

Проблема определения ледниковой эпохи была решена, правда довольно произвольно, на основе анализа разрезов плейстоценовых отложений Центральной Европы. В этих разрезах древние межледниковья ограничены сравнительно четкими хронологическими рубежами. Межледниковые потепления здесь начинались внезапно, о чем говорит резкость перехода к слоям, содержащим следы широколиственных лесов, а оканчивались с исчезновением древесной растительности и ее заменой степями. В этой связи, по общей договоренности, межледниковья стали называть такие интервалы, или этапы, во время которых широкое распространение на территории Европы получали дуб и другие теплолюбивые древесные породы. А верхнюю границу межледниковий, то есть их окончание и переход к новым ледниковым эпохам, принято отождествлять с исчезновением европейских дубрав.

Если придерживаться этих принципов, то современное межледниковье, или голоцен, началось около 10 000 лет назад. Что касается времени его окончания, то его можно прогнозировать, используя для этого несколько разных, хотя и в неодинаковой степени удовлетворительных подходов. Один из них — статистический, базирующийся на имеющейся в наличии информации по хронологии предыдущих межледниковий, который в общем использует тот же принцип, что и расчеты продолжительности жизни отдельных граждан, проводимые страховыми компаниями. Судя по результатам анализа колонок глубоко-



43. Климат последних 10 000 лет. График показывает основные тенденции в изменениях глобальной температуры, определенной по данным о колебаниях ледников и изменениях растительности. Во время климатического оптимума голоцена температура была приблизительно на 2° выше современной. А около 300 лет назад, во время климатического эпизода, называемого «малым ледниковым периодом», эта температура была ниже современной.

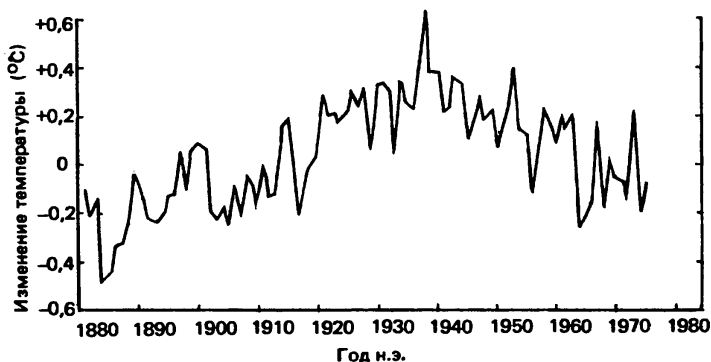
водных грунтов океанского дна (см. рис. 40), ни одно из межледниковий плейстоцена не держалось более 12 000 лет, большинство же их продолжалось примерно по 10 000 лет. Таким образом, опираясь на эту статистику, можно сделать вывод: современная теплая эпоха, начавшаяся около 10 000 лет назад, то есть имеющая критический для межледниковья возраст, явно вступила в свой заключительный этап и должна завершиться в течение ближайшей пары тысячелетий.

Однако статистические предсказания подобного рода могут полностью удовлетворять лишь страховые компании. Для прогнозирования времени окончания текущего межледниковья больше подходит метод, состоящий в экстраполяции, или проекции, тенденций, характерных для изменений современного климата, в будущее. Одна из таких тенденций — похолодание, начавшееся еще 7000 лет назад, то есть в период послеледникового климатического оптимума, когда температуры воздуха и количество осадков были заметно выше, чем сейчас. С тех пор средние температуры испытывают постепенное общее снижение (рис. 43).

На эту общую тенденцию к похолоданию накладывались сравнительно короткие эпизоды потеплений и похолоданий, образующие так называемый «цикл малого ледникового периода» (о чем еще будет сказано ниже). Суммарный эффект указанной тенденции — снижение средней глобальной температуры на 2°C . Самым очевидным свидетельством его реальности могут служить изменения географических границ распространения животных и растений. Так, например, если 7000 лет назад в Скандинавии процветали дубовые леса и съедобные моллюски-мидии, то теперь их там нет. В других районах Европы растительные зоны на равнинах неуклонно смещаются к югу, а в горах — на все более низкие уровни. Если эта тенденция сохранится и далее, то глобальные температуры достигнут значений, характерных для ледниковых эпох (на 6°C ниже современных), примерно через 18 000 лет.

Как же повлияло это двухградусное похолодание на хозяйственную деятельность человека? Его эффект пока не поддается точной оценке, однако ясно, что уменьшение количества атмосферных осадков, которое в большинстве районов сопровождалось снижением температур, не могло не отразиться на распределении сельскохозяйственного производства, а через него — и на географии населения. Немецкий геолог Михаэль Сарнтхайн, суммировавший данные по аридным районам земного шара, пришел к заключению, что со времени климатического оптимума общая площадь песчаных пустынь значительно возросла. Так, например, районы Северной Африки, которые во время этого оптимума получали большое количество осадков и там возникли великие цивилизации, теперь стали сухими и бесплодными.

Существование дополнительной тенденции к похолоданию, имеющей период значительно короче 7000 лет, было впервые обнаружено американским климатологом Мюрреем Митчеллом в 1963 году. Обобщив данные температурных измерений, выполненных на метеостанциях мира, Митчелл показал, что начиная с 1940 года глобальный климат испытывает похолодание (рис. 44). Он установил, что за 20-летний период снижение температур в Северном полушарии составило около $0,3^{\circ}\text{C}$. Если и эта тенденция сохранится, то во многих районах Земли средние темпе-



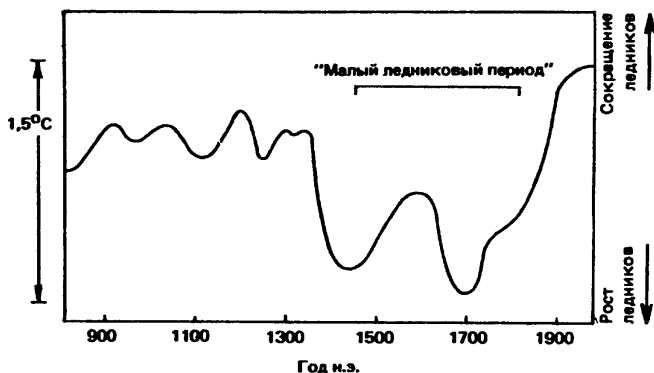
44. Климат последнего столетия. График показывает изменения средней годовой температуры Северного полушария. После 1939 года эта температура снизилась приблизительно на $0,6^{\circ}$ (по Дж. М. Митчеллу, 1977а).

ратуры снизятся до «ледникового» уровня всего лишь за 700 лет. А еще задолго до того изменения в количестве осадков неизбежно нарушат сложившуюся систему производства продуктов питания, что, конечно же, приведет к коренным преобразованиям жизни людей. Однако, как указывает тот же Митчелл, единственное свойство климатических тенденций, о которых можно судить с полной уверенностью, состоит в их способности менять знак на обратный. Ведь уже в середине 1970-х годов стало неясно, продолжается ли тенденция к похолоданию, начавшаяся в 1940 году, или она уже успела прекратиться.

Ненадежность климатических прогнозов, основанных на кратковременных тенденциях, наглядно иллюстрируют ежегодные смены сезонов. А ведь когда-то примитивные племена не понимали циклического характера смен времен года: они каждый год впадали в панику перед лицом четырехмесячных зимних похолоданий и жгли костры, чтобы умиловить Солнце и заставить его вернуть им свое благоволение. Таким образом, то изменение, которое воспринимается как тенденция, может быть одной из фаз некоторого цикла. Поэтому надежность прогнозов, базирующихся на наблюдаемых тенденциях, во многом зависит от понимания сути тех циклов, частью которых эти тенденции являются. И поскольку никто пока еще не

смог предложить убедительного объяснения для «митчелловской» тенденции, то мрачные пророки, использующие ее для предсказания близкого конца текущего межледниковья, рискуют повторить ошибку наших далеких предков, которые разжигали костры много веков назад.

Наконец, новую основу для прогноза будущих изменений климата создает астрономическая теория ледниковых эпох, — прогноза, который лишен неопределенности, свойственной предсказаниям, опирающимся на климатические тенденции. Однако, как следует из рис. 41, такой прогноз осложняется тем, что изменения эксцентриситета орбиты и наклона оси вращения Земли в настоящее время способствуют снижению инсоляции и похолоданию климата, тогда как цикл прецессии «работает» в противоположном направлении. Каким же должен быть суммарный эффект всех этих циклов? Чтобы получить ответ, Джон Имбри и Джон З. Имбри предложили математическую формулу, позволяющую выводить суммарный объем ледников Земли непосредственно из астрономических кривых Андре Берже. В результате ее применения было выяснено, что тенденция к похолоданию, начавшаяся около 7000 лет назад, в будущем продолжится и



45. Климат последнего тысячелетия. На графике представлены оценки зимних условий в Восточной Европе, основанные на анализе летописей и других исторических материалов. Во время «малого ледникового периода» (1450–1850 гг. н. э.) ледники повсеместно наступали, и их размеры значительно превосходили современные (по Х. Х. Лэму, 1969).

приведет к тому, что через 23 000 лет оледенение достигнет своего очередного максимума.

Однако не приходится сомневаться, что на долговременную тенденцию к похолоданию, следующую из астрономической теории, будут и впредь накладываться климатические колебания, имеющие периодичность, которая существенно короче циклов прецессии. Такие колебания много раз происходили в прошлом, в голоцене, и есть основания ожидать, что они будут повторяться и в будущем. Из таких – сравнительно коротких – климатических колебаний наиболее известен так называемый малый ледниковый период, имевший место между 1450 и 1850 годами нашей эры (рис. 45). За 400 лет этого периода в Альпах, на Кавказе, Аляске, в Новой Зеландии и шведской Лапландии произошла активизация ледников, которые продвинулись далеко за пределы их современных границ, а в горах Эфиопии практически ежегодно появлялся снежный покров, в настоящее время там неизвестный (рис. 46). Глобальный климат тогда был в общем на 1°С холоднее современного. В свете данных Хьюберта Лэма, сумевшего восстановить климатическую историю малого ледникового периода на основе анализа фактов из старинных летописей и кадастров, известное изображение Ханса Бринкера, бегущего на коньках по замерзшему голландскому каналу, вполне точно отражает суровость зим, характерных для Западной Европы этого периода.

В то время и в Новой Англии, на северо-востоке США, колонисты переживали чрезвычайно суровые зимы. По свидетельству Дейвида М. Ландлема, который специально занимался климатом «колониального» времени, та легендарная зима, когда армия Вашингтона, стоявшая лагерем в долине Фордж, испытывала невероятные страдания от холода, описывалась современниками как «примечательно мягкая». В самом деле, если бы эта армия оказалась там же двумя годами позже, а именно зимой 1779/80 года, то мучения солдат были бы куда более тяжелыми. Даже по меркам малого ледникового периода та зима выглядела как «самая холодная и трудная... из всех, когда-либо пережитых людьми». Гавань Нью-Йорка, расположенная несколько севернее долины Фордж, тогда полностью замерзла. Далее Ландлем пишет:



46. Ледник Аржентьер в настоящее время и в 1850 г. *Вверху*: фотография 1966 года, на которой виден лишь конец языка, занимающий самую верхнюю часть долины. *Внизу*: гравюра, относящаяся приблизительно к 1850 году, на которой изображена языковая часть ледника в регрессивную фазу «малого ледникового периода» Французских Альп (по Л. Р. Ладюри, 1971).

«Хотя все привыкли, что Гудзон и Ист-Ривер иногда покрывались льдом, никто не помнил случая, чтобы надолго замерзал весь залив Аппер-Бей... Так что во второй половине января можно было свободно пройти пешком через пятимильную бухту, отделяющую остров Статен от Манхаттена... По дорогам, проложенным на льду проливов, перетаскивались тяжелые грузы и артиллерийские орудия на остров Статен, где шло укрепление британских позиций. Эти позиции подвергались набегам мародеров с аванпостов армии Вашингтона, стоявшей в Нью-Джерси по другую сторону замерзшего пролива Артур-Килл».

Детальное исследование моренных гряд, оставленных горными ледниками, которое было проведено Джорджем Дентоном и Вибьёрном Карленом, показало, что кульминация малого ледникового периода пришлось на 1700 год н. э. и явилась последним из пяти пиков голоценовых похолоданий. «Для всего голоцена было характерно чередование холодных и теплых интервалов, когда происходило попеременное разрастание и сокращение оледенения. По-видимому, эти интервалы накладывались на длительную... тенденцию к похолоданию. Этапы активизации ледников имели длительность до 900 лет, а этапы их отступления – до 1750 лет». Опираясь на данные по абсолютному возрасту холодных пиков голоцена – 250, 2800, 5300, 8000 и 10 500 лет назад, Дентон и Карлен выдвинули гипотезу о существовании особого климатического «цикла малого ледникового периода», который имеет продолжительность в 2500 лет и систематически накладывается на более крупные ледниково-межледниковые циклы (рис. 43).

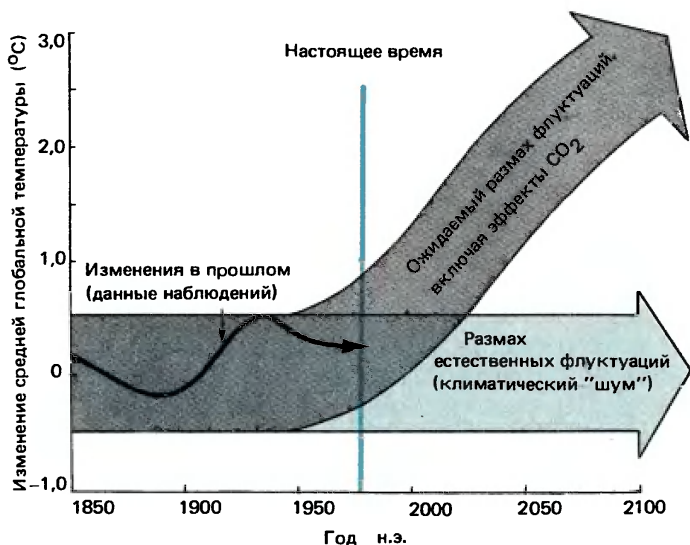
Причины, обуславливающие циклы малого ледникового периода, пока неизвестны, однако некоторые факты позволяют предполагать, что они связаны с периодическими изменениями, происходящими на Солнце. Но какими бы ни были эти причины, циклы, выявленные Дентоном и Карленом, должны приниматься во внимание при составлении прогнозов климата будущего. Правда, с точки зрения амплитуд общетемпературных изменений они оказываются примерно в десять раз слабее основных, 100 000-летних, циклов. Однако не следует упускать из виду, что все колебания, связанные с высокочастотными циклами, происходят

значительно быстрее таких же изменений, вызванных орбитальными причинами. Так что если Дентон и Карлен правы, то потепление, являющееся частью текущего цикла малого ледникового периода и ставшее ощутимым после 1700 года, должно скоро подавить охлаждающие эффекты новейшего астрономического цикла и привести к тому, что на протяжении ближайшей тысячи лет глобальные температуры будут расти. А после этого, когда оба фактора станут действовать в одном и том же направлении, возобладает длительная тенденция к похолоданию, которая и приведет через 23 000 лет к новой ледниковой эпохе.

Таков прогноз, возможный при современном уровне нашего понимания *естественных* климатических циклов: предстоит тысячелетнее потепление, за которым последуют 22 000 лет направленного похолодания. Однако этот прогноз не учитывает возможных воздействий «неестественного», или антропогенного, фактора. В данной связи Мюррей Митчелл пишет:

«Если бы природа развивалась по своим собственным законам и не подвергалась влиянию человека, то можно было бы уверенно предсказать, что климат будущего сначала испытает несколько потеплений и похолоданий, а затем решительно сдвинется в сторону очередного оледенения... Однако благодаря человеку и его деятельности развитие природной среды в ближайшие десятилетия и столетия может пойти по совсем другому сценарию, который будет сперва едва заметно, а в последующем все более сильно отклоняться от вышеприведенного. Похоже, что антропогенный фактор уже начал сказываться на глобальном климате, хотя это пока трудно доказать путем прямых наблюдений... Но если человек будет и впредь увеличивать потребление энергии, попутно увеличивая загрязнение атмосферы, то уже через считанные десятилетия температурные эффекты этого фактора «пробьются» сквозь шум естественных колебаний климата и станут легко различимы».

Влияние на климат оказывают многие виды человеческой деятельности, например такие, как земледелие, орошение, сведение лесов, строительство городов и промышленных предприятий, ведущее, среди прочего, к нагреву и задымлению атмосферы. Однако, как сейчас ясно, особенно большую климатическую роль



47. Прогноз климата на период до 2100 года н.э. С 1850 г. средняя глобальная температура (показанная белой линией) колебалась в диапазоне, равном приблизительно 1° . В будущем эта температура вероятнее всего будет возрастать, что связано главным образом с увеличением содержания углекислого газа в атмосфере. Примерно до 2000 года эффекты этого увеличения могут оставаться малозаметными, однако впоследствии они, как ожидается, примут драматические масштабы (по Дж. М. Митчеллу, 19776).

играет потребление минерального топлива, с которым связано производство все более возрастающих количеств углекислого газа — CO_2 . Загрязнение атмосферы этим газом — неизбежное следствие сжигания всех видов углеводородов, а именно каменного и бурого угля, нефти, керосина, бензина, природного газа, метана, пропана и ряда других, не столь широко распространенных веществ. Поскольку же атмосферный CO_2 действует как термоизолирующее одеяло, неизбежным следствием этого процесса является повсеместное повышение средних температур (рис. 47).

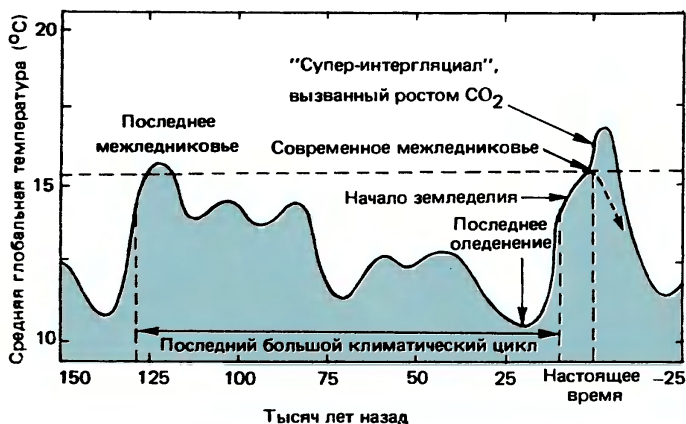
«Если человечество будет и впредь ориентироваться в своих планах развития энергетики на использование минерального топлива, — пишет Митчелл, — то в результате его сжигания климатические последствия дадут о себе знать уже к концу текущего столетия, хотя серьезной проблемой они станут лишь

по прошествии нескольких десятилетий следующего века».

Если взглянуть на данный вопрос в перспективе геологического времени, то представляется вероятным, что, израсходовав все имеющиеся запасы минерального топлива, человек ввергнет Землю в некие сверхмежледниковые, или «суперинтергляциальные», условия, то есть в такое мощное потепление, которого за последний миллион лет она не испытывала ни разу. Причем и после того, как запасы углеводородов иссякнут и их сжигание прекратится, воздействие углекислого газа на климат будет продолжаться еще не менее тысячи лет: именно такой срок потребуется для того, чтобы атмосфера освободилась от избытка CO_2 . И хотя все последствия этого суперинтергляциала пока не поддаются точному определению, Митчелл приходит к следующему заключению: «Можно ожидать, что тысячелетия необычайно теплого климата приведут к существенному таянию льда Гренландского и Антарктического ледниковых покровов и, соответственно, к столь сильному повышению уровня Мирового океана, что целый ряд крупных городов и плодородных сельскохозяйственных областей, расположенных на его побережьях, окажется затопленным». Хотя, как считает Митчелл, существуют и целые регионы, которые от потепления климата только выиграют. Так, например, весьма вероятно, что в пустынях Северной Африки и Среднего Востока в этом случае появится богатая растительность — подобная той, которая покрывала их 7000 лет назад, во время климатического оптимума голоцена.

Но если шок от будущего суперинтергляциала не внесет фундаментальных изменений в климатическую систему Земли, ее атмосфера в конце концов освободится от излишков углекислого газа. И только тогда возобладает та долговременная тенденция к похолоданию, которая должна установиться в результате сложения циклов малого ледникового периода с эффектами астрономических изменений (рис. 48). Таким образом, пройдет около 2000 лет, и начнется ясно выраженное похолодание. А еще через тысячу лет североафриканские пустыни вновь станут сухими и безжизненными и в Центральной Европе исчезнут дубовые леса, не оставив места для сомнений, что самая продолжи-

тельная межледниковая эпоха плейстоцена закончилась. Затем начнется длительный период, за время которого глобальный климат станет все сильнее охлаждаться – до тех пор, пока Земля не окажется в объятиях нового оледенения. И – как мы уже не раз указывали – это должно произойти примерно через 23 000 лет.



48. Прогноз климата на ближайшие 25 000 лет. В соответствии с астрономической теорией ледниковых эпох естественные изменения климата (показанные штриховой линией) ближайшего будущего должны состоять в похолодании, в результате которого через 23 000 лет наступит новая ледниковая эпоха. Однако тепляющее влияние атмосферной углекислоты может вызвать начало «супермежледниковья». При этом средняя глобальная температура достигнет значений, на несколько градусов превышающих температуры, имевшие место на Земле в последний миллион лет. В этом случае начало похолодания, ведущего к новому оледенению, будет отодвинуто примерно на 2000 лет, то есть примерно до тех пор, когда прекратится потепление, связанное с парниковым эффектом CO₂ (по У. С. Бреккеру, 1975, и Дж. М. Митчеллу, 19776, с изменениями).

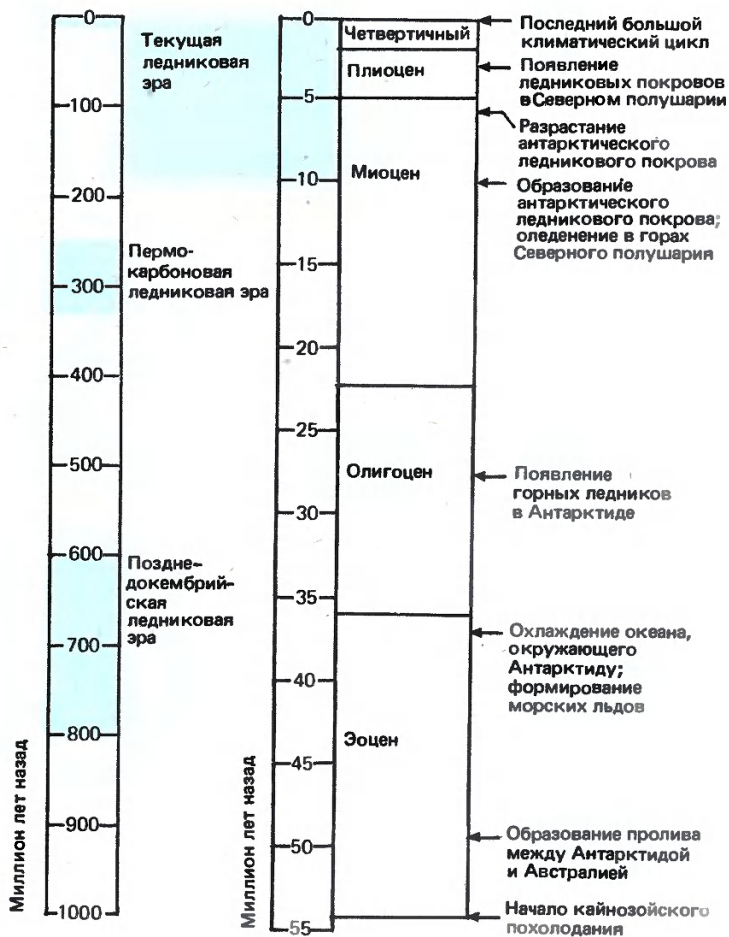
Эпилог

ПОСЛЕДНИЙ
МИЛЛИАРД
ЛЕТ
ИСТОРИИ
КЛИМАТА

Итак, мы детально рассмотрели климатическую историю последнего полумиллиона лет истории Земли. В течение этого времени на ней происходили периодические разрастания и резкие сокращения ледниковых покровов, то есть изменения, соответствовавшие ледниковым и межледниковым эпохам. Для межледниковий плейстоцена были характерны относительно высокие температуры, тем не менее на протяжении всех этих интервалов, даже самых теплых из них, на планете оставались значительные массы льда – в Антарктиде и Гренландии сохранялись ледниковые щиты, а в Северном Ледовитом океане – плавучий покров морских льдов.

Если оглянуться на более отдаленное прошлое Земли, на последний миллиард лет ее истории, то мы увидим, что на протяжении всего этого неимоверно длительного времени было лишь три интервала, когда в обеих полярных областях появлялись ледниковые покровы, по своим размерам сравнимые с плейстоценовыми. На нашей диаграмме (рис. 49) указанные интервалы обозначены как ледниковые периоды. В эти периоды в районах Северного и Южного полюсов происходило интенсивное накопление льда, и континенты, расположенные в высоких и умеренных широтах, неоднократно покрывались ледниковыми щитами. Первый период, отмеченный подобными – многократно повторявшимися – оледенениями, пришелся на докембрий, заняв интервал времени между 800 и 600 миллионами лет назад. Второй огромный ледниковый интервал, известный как пермокарбонное оледенение, имел место около 300 миллионов лет назад. Наконец, современный, или позднекайнозойский, ледниковый период начался немногим более десяти миллионов лет назад и еще далек от своего завершения.

Причины, по которым эти длительные периоды мно-



49. Климатическая история последнего миллиарда лет. Слева показаны ледниковые периоды-интервалы, во время которых в полярных областях Земли формировались ледниковые покровы. Справа обозначены наиболее существенные события кайнозойской эры, характеризующие похолодание климата.

гократного чередования ледниковых и межледниковых эпох начинались и кончались, пока еще полностью не выяснены, однако есть основания полагать, что соответствующие изменения климата были обусловлены дрейфом литосферных плит, то есть глобальным геодинамическим процессом, в результате которого

континенты Земли медленно, но постоянно изменяют свое географическое положение. Согласно данной гипотезе, способные к быстрым изменениям массы льда накапливались в приполярных областях планеты как раз тогда, когда там оказывались сосредоточены значительные по площади участки суши. В частности, все то, что мы знаем о пермокарбонном оледенении и его географии, хорошо укладывается в рамки этой гипотезы. Так, сейчас доказано, что в то далекое время вся земная суша была объединена в один гигантский суперконтинент, который геологи называли Пангеей. Центр его располагался на экваторе, однако одна из окраин достигала района Южного полюса. И именно к этой окраине принадлежали области, в которых отмечаются следы пермокарбонного оледенения, — нынешние Бразилия, Аргентина, Южная Африка, полуостров Индостан, Антарктида и Австралия. Все они лежали тогда в высоких широтах Южного полушария.

На протяжении последующих двухсот миллионов лет Земля была полностью свободна ото льда, климат был устойчиво теплым — часто значительно более теплым, чем современный. Можно думать, что причиной установления этого режима явилось общее смещение Пангеи на север, в результате чего ее южная окраина вышла из полярной области. А затем — около 55 миллионов лет назад — начался длительный период направленного похолодания глобального климата, возникла тенденция к снижению температур, продолжающаяся и поныне. Эта тенденция, обычно называемая кайнозойским похолоданием, ассоциируется с последовательным расколом Пангеи на отдельные изолированные континенты, на те материковые массы, которые продолжают существовать и в настоящее время. Антарктида отделилась от Австралии и постепенно сместилась на свою теперешнюю южнополярную позицию. В то же время Североамериканский и Евразийский континенты начали дрейфовать в сторону Северного полюса. И по мере того как в высоких широтах обоих полушарий концентрировались все более крупные массы суши, отражательная способность земной поверхности увеличивалась и глобальный климат становился холоднее. В связи с этим похолоданием около десяти миллионов лет назад на Аляске и в других высокоширотных районах Северного полушария появи-

лись небольшие горные ледники. Гораздо более драматичным было возникновение нового климатического режима в Южном полушарии, где именно в то время Антарктический ледниковый покров быстро увеличился в объеме, набрав массу, примерно равную половине современной, и после этого уже ни разу не исчезал. А около пяти миллионов лет назад он испытал повторное, еще более мощное разрастание, в результате чего приобрел размеры, которые, по-видимому, довольно сильно превосходили современные.

Три миллиона лет назад материковые ледниковые покровы появились и в Северном полушарии, где они тяготели к областям, обрамляющим Северную Атлантику. А появившись, эти ледниковые покровы должны были особенно чутко реагировать на колебания инсоляции, связанные с астрономическими факторами, должны были сразу вступить в длительный период, отмеченный серией ритмичных изменений. Детальный анализ ранней истории этих изменений при современном уровне наших знаний невозможен. Зато в климате последнего полумиллиона лет мы можем ясно видеть глубокие отпечатки циклов, имеющих периоды в 100 000, 41 000 и 22 000 лет. И это те самые циклы, которые были предсказаны и объяснены астрономической теорией ледниковых эпох.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ХРОНОЛОГИЯ ОТКРЫТИЙ

- 1815 Жан-Пьер Перроден, альпинист из Швейцарии, приходит к убеждению, что ледники Альп некогда распространялись далеко за пределы их современных границ.
- 1818 Швейцарский инженер Игнац Венец, строивший горные дороги, знакомится с Перроденом и соглашается с тем, что некоторые альпийские ледники в прошлом распространялись минимум на пять километров за рубежи их современных границ.
- 1836 Жан Шарпантье и Игнац Венец проводят полевую экскурсию с Луи Агассисом и убеждают его, что формы рельефа альпийских предгорий могли быть образованы ледниками.
- 1837 Луи Агассис излагает свою теорию великого оледенения на собрании Швейцарского общества естествоиспытателей в Невшателе.
- 1839 Тимоти Конрад применяет ледниковую теорию Агассиса для объяснения происхождения поверхностных отложений территории Соединенных Штатов.
- 1840 Луи Агассис доказывает Уильяму Бакленду, что поверхностные отложения Великобритании имеют ледниковое происхождение. Затем Бакленд убеждает в том же Чарлза Лайеля.
- 1841 Шотландец Чарлз Макларен выдвигает гипотезу о том, что во время великого оледенения поверхность океана снижалась на 800 футов ниже ее современного уровня.
- 1842 Француз Жозеф Адемар формулирует астрономическую гипотезу древних оледенений, которая основана на явлении предварения равноденствий.
- 1843 Французский астроном Урбен Леверье получает уравнения, которые позволяют рассчитывать изменения земной орбиты и реконструировать историю этих изменений за последние 100 000 лет.

- 1856 Профессор Московского университета Г. Е. Шуровский пишет о наблюдениях за эрратическими валунами района Твери и Рыбинска, делает вывод о их связи с деятельностью гигантских ледников. Несколько раньше на ледниковое происхождение суглинков и песков северо-западной России указывал профессор того же университета К. Ф. Рулье.
- 1863 Арчибальд Гейки выполняет первую сводку данных полевых наблюдений, которая убедила многих геологов в ледниковой природе поверхностных отложений Шотландии.
- 1864 Шотландец Джеймс Кролль публикует свою астрономическую теорию древних оледенений, базировавшуюся на представлениях об эффектах предварения равноденствий и изменений эксцентриситета земной орбиты.
- 1865 Томас Джемисон использует данные наблюдений за древними береговыми линиями Шотландии для обоснования гипотезы, согласно которой давление, оказываемое древними ледниковыми покровами на земную кору, было достаточным для ее существенного прогибания.
- Русский геолог Ф. Б. Шмидт публикует работу по следам оледенения Эстляндии. П. А. Кропоткин проводит наблюдения в Саянах, давшие первые указания на древнее оледенение Восточной Сибири.
- 1870 Американский геолог Гроув Гилберт доказывает, что Большое Солёное озеро представляет собой остаток гораздо более крупного водоема, занимавшего район Большого Бассейна в эпоху последнего Великого оледенения.
- Немецкий геолог Фердинанд Рихтгофен, исследовавший пустыни Центральной Азии, приходит к выводу, что толщи желтоватого алеврита (лёсса), покрывающие большие площади во внеледниковых областях Евразии, Северной Америки и Южной Америки, были отложены ветром в эпоху последнего оледенения.
- 1871 Американский геолог Амос Уорзен доказывает, что оледенения территории штата Иллинойс происходили неоднократно.
- 1872 Шведский геолог Отто Мартин Торелль публикует работу «Исследования о ледниковом периоде», обобщившую его наблюдения за следами древнего оледенения в Скандинавии, Гренландии, Исландии, на Шпицбергене. Вместе со статьями и докладами 1873–1875 годов эта работа способствовала утверждению ледниковой теории в Европе и опровержению дрифтовой гипотезы.

- 1873 П. А. Кропоткин публикует полный отчет Олекминско-Витимской экспедиции, в котором излагает выводы о материковом оледенении Сибири. Еще через год он, подводя итоги наблюдений в Северной Европе, пишет: «В ледниковый период Финляндия была покрыта сплошным ледниковым покровом, общим со Скандинавией».
- 1874 Сотрудник Геологической службы Шотландии Джеймс Гейки выпускает монографию по плейстоценовым оледенениям Земли.
- 1875 Завершена первая кругосветная океанографическая экспедиция на британском военном корвете «Челленджер», которая собрала богатую информацию по глубоким осадкам Мирового океана.
- 1876 В «Записках Русского географического общества» выходит первый том монографии П. А. Кропоткина (в то время – заключенного Петропавловской крепости) «Исследования о ледниковом периоде» – теоретическое обобщение десятилетних исследований Сибири и Северной Европы, оказавшее влияние на взгляды нескольких поколений русских геологов и географов.
- 1894 Джеймс Гейки, возглавивший кафедру геологии Эдинбургского университета, публикует новую сводку по истории плейстоцена, включив в нее карты древнего оледенения Северной Америки, Европы и Азии.
- Профессор Йельского университета (США) Джеймс Дэна публикует руководство по геологии, в котором он отвергает астрономическую теорию Кролля на том основании, что последнее оледенение Северной Америки исчезло не 80 000 лет назад, как предполагал Кролль, а лишь 10 000 лет назад.
- 1904 Немецкий ученый Людвиг Пильгрим рассчитывает изменения эксцентриситета орбиты Земли, наклона ее оси и прецессии для последнего миллиона лет.
- 1906 Изучив древние лавовые потоки Франции, Бернар Брюнес демонстрирует, что ориентировка магнитного поля Земли в прошлом изменялась.
- 1909 Немецкий геолог Альбрехт Пенк и климатолог Брюкнер используют свои наблюдения за речными террасами Альп для доказательства неоднократных оледенений горной страны в плейстоцене.
- 1920 Югославский математик Милутин Миланкович публикует формулы для расчета интенсивности поступающей солнечной радиации как функции широты и времени

года; он указывает, что аналогичные расчеты могут быть сделаны и для прошлого, а также утверждает, что климатические эффекты астрономически обусловленных изменений инсоляции достаточно велики, чтобы служить причиной ледниковых эпох.

- 1922 Советский геолог А. П. Павлов публикует работу, в которой доказывает многократность покровных оледенений территории СССР.
- 1924 Немецкие ученые Владимир Кёппен и Альфред Вегенер включают в свою книгу три кривые Миланковича, которые составили основу его теории ледниковых эпох. Эти кривые показали изменения летней инсоляции на 55° , 60° и 65° северной широты за последние 650 000 лет. Проведя исследования в Японии и Корее, геофизик Мотонори Матуюма находит доказательства инверсии магнитного поля Земли, происшедшей на одном из этапов плейстоцена.
- 1928 Советские геологи И. И. Краснов, М. А. Лаврова, К. К. Марков, Г. Ф. Мирчинк, С. А. Яковлев и другие члены созданной в 1927 году Комиссии по изучению четвертичного периода начинают планомерное изучение плейстоценовых отложений европейской части СССР.
- 1929 Шведский геолог Эрнст Антевс публикует карты плейстоценовых ледниковых покровов для всех континентов мира.
- 1930 Бартель Эберль дорабатывает схему расчленения плейстоцена, предложенную Пенком и Брюкнером, и находит, что геологические данные по истории альпийских террас хорошо согласуются с хронологией колебаний инсоляции, основанной на теории Миланковича.
- 1931 Выходит сводная работа академика В. А. Обручева «Признаки ледникового периода в северной и центральной Азии».
- 1935 Вольфганг Шотт, изучивший планктонные фораминиферы в коротких колонках, поднятых немецкой экспедицией 1925–1927 годов на пароходе «Метеор» со дна экваториальной Атлантики, обнаруживает в них палеонтологические свидетельства последней ледниковой эпохи.
- 1938 Милутин Миланкович публикует окончательный вариант астрономической теории ледниковых эпох. Из его теории следует, что главная причина этих эпох состоит в изменениях летней инсоляции в высоких широтах обоих полушарий, то есть в изменениях, которые вызываются вариациями наклона земной оси (41 000-

летние циклы), а также явлением предварения равноденствий (22 000-летние циклы). Сделав поправки на эффекты менявшегося альbedo Земли, он рассчитывает сдвиги в географическом положении границ ледниковых покровов за последний миллион лет.

1939 Советские географы И. П. Герасимов и К. К. Марков публикуют обобщающую монографию «Ледниковый период на территории СССР». Они приходят к выводу, что воздействие астрономических факторов является главной предпосылкой оледенений, хотя это воздействие всегда преломляется через влияние конкретных географических условий.

1947 Профессор Чикагского университета Гарольд Юри дает теоретическое обоснование изотопно-кислородного метода.

Швед Бьёре Кулленберг создает ударно-поршневую трубку. С ее помощью участники Шведской глубоководной экспедиции на «Альбатросе» (1947–1948 гг.) впервые берут 10–15-метровые колонки глубоководных осадков.

1951 Уиллард Либби из Чикагского университета разрабатывает радиоуглеродный метод датирования органических материалов.

Сотрудник того же университета Самюэль Эпстайн с коллегами предлагает методику определения палеотемператур океана, основанную на изотопной теории Гарольда Юри.

1952 Сотрудник Скриппсовского института океанографии Густаф Аррениус устанавливает, что изменения содержания карбоната кальция в глубоководных колонках, поднятых Шведской экспедицией в Тихом океане, отражают колебания климата.

Дейвид Эриксон и его коллеги по Ламонтской геологической обсерватории Колумбийского университета разработали метод, позволяющий распознавать слои глубоководных турбидитов.

1953 Исследовав галечники альпийских террас, Инго Шефер обнаруживает в них окаменелости, которые заставили его усомниться в правильности схемы оледенений и межледниковий, разработанной Пенком и Брюкнером.

Фред Флегер с коллегами по Скриппсовскому институту проводит микропалеонтологическое исследование длинных колонок, поднятых со дна Атлантического океана, и обнаруживает следы девяти ледниковых эпох.

1955 Сотрудник Чикагского университета Чезаре Эмилиани устанавливает, что изменения соотношения изотопов кислорода в фораминиферах из глубоководных колонок свидетельствуют не менее чем о семи ледниковых и семи межледниковых стадиях, и определяет, что главные климатические циклы плейстоцена имели длительность, близкую к 40 000 лет.

1956 Джон Бэрнс с коллегами из Лос-Аламосской научно-исследовательской лаборатории разработали ториевый метод, пригодный для датирования древних коралловых рифов.

Дейвид Эриксон и Гёста Воллин используют данные об изменениях видового состава фораминифер в колонках, поднятых со дна океана, для выявления плейстоценовых колебаний климата.

1961 Сотрудники Чехословацкой академии наук Джордж Кукла и Войен Ложек доказывают, что поверхностные отложения внеледниковой области Центральной Европы, в которых переслаиваются погребенные почвы и лёссы, содержат детальную информацию об истории плейстоценового климата.

1963 Аллан Кокс и Ричард Доуэлл из Геологической службы США подтверждают гипотезу Брюнеса и Матуямы о глобальной синхронности геомагнитных инверсий и составляют первую палеомагнитную шкалу времени.

Сотрудница Института океанологии Академии наук СССР А. П. Жузе, выполнив анализ видового состава планктонных диатомей из глубоководных колонок, поднятых советскими морскими экспедициями в Тихом и Южном океанах, реконструирует изменения климата и смещения климатических зон при переходах от ледниковых эпох к межледниковым и обратно.

1964 Сотрудник того же института М. С. Бараш определяет плейстоценовые температуры поверхностного слоя воды Северной Атлантики по составу планктонных фораминифер из колонок, поднятых с ее дна.

Геологи Скриппсовского института океанографии Кристофер Харрисон и Брайен Фаннел обнаруживают границу палеомагнитных эпох Брюнеса и Матуямы в колонках, поднятых со дна Тихого океана.

Группа исследователей из Калифорнийского университета во главе с Гернисом Кертисом и Джеком Эвернденом доказывают, что калиево-аргоновый метод дает

надежные результаты при датировании геологических событий плейстоцена.

1965 Джеймс Хейс, работающий в Ламонтской геологической обсерватории, использует данные по радиоляриям из глубоководных колонок для расшифровки плейстоценовой истории Южного океана. Сотрудник той же обсерватории Уоллес Брэккер показывает, что ториевые датировки межледниковых уровней океана, равные 120 000 и 80 000 лет, подтверждают теорию Миланковича.

1966 Чезаре Эмилиани, работающий теперь в Институте морских исследований Университета Майами, проводит анализ длинной колонки R6304-9 из Карибского моря, охвативший разрез донных отложений вплоть до изотопной стадии 17, и составляет исправленную хронологическую шкалу, из которой следует, что длительность главных климатических циклов плейстоцена составляет около 50 000 лет.

Профессор Брауновского университета Робли Мэтьюз и аспирант Кеннет Месолелла исследуют остров Барбадос и доказывают, что его террасы образованы коралловыми рифами, каждый из которых маркирует особый межледниковый уровень океана.

1967 Сотрудник Кембриджского университета Николас Шеклтон представляет данные, свидетельствующие о том, что вариации в соотношении изотопов кислорода из глубоководных колонок могут отражать изменения в суммарном объеме ледниковых покровов Земли.

Джеффри Диксон, участник экспедиции в южную часть Индийского океана на исследовательском судне «Роберт Конрад», поднимает колонку RC11-120.

Сотрудники Ламонтской обсерватории Джеймс Хейс и Нил Опдайк применяют палеомагнитный метод для определения возраста климатических стадий по глубоководным колонкам, поднятым со дна Южного океана.

1968 Уоллес Брэккер, Робли Мэтьюз и их коллеги по Колумбийскому и Брауновскому университетам публикуют ториевые датировки трех террас, выработанных в коралловых рифах острова Барбадос. Эти датировки совпали с межледниковыми интервалами, рассчитанными на основе нового (исправленного) варианта теории Миланковича.

Джордж Кукла с коллегами из Чехословацкой академии наук, применив палеомагнитную шкалу времени

к европейским лёссам и погребенным почвам, доказывают, что главные климатические циклы Европы имели 100 000-летнюю периодичность.

1970 Уоллес Брэккер и Ян ван Донк демонстрируют, что главные климатические циклы плейстоцена, выявленные ими при изотопном анализе колонок из Карибского моря, также имеют 100 000-летнюю периодичность.

1971 Американский морской геолог Уильям Раддимен, опираясь на данные палеомагнитного анализа глубоководных колонок из Северной Атлантики, доказывает, что и изменения течений этого океана происходят циклично, подчиняясь тому же 100 000-летнему ритму.

Джон Лэдд, участник рейса на исследовательском судне «Вима» в экваториальную часть Тихого океана, поднимает глубоководную колонку V28-238.

Джеймс Хейс (Геологическая обсерватория Ламонта-Дохерти) и Уильям Берггрен (Океанографический институт Вудс-Хол) устанавливают, что нижняя граница плейстоцена соответствует палеомагнитному эпизоду Олдувей и, следовательно, имеет абсолютный возраст около 1,8 миллиона лет.

Профессор Брауновского университета Джон Имбри и его сотрудница Нильва Кипп разрабатывают метод определения температур плейстоценового океана, основанный на статистической обработке данных по видовому составу морской микрофауны из глубоководных колонок. Они делают первую (безуспешную) попытку применить спектральный анализ результатов палеонтологических и изотопных исследований колонки V12-122, взятой со дна Карибского моря, для выявления климатических циклов, соответствующих вариациям прецессии и наклона земной оси.

Участники проекта КЛИМАП, учрежденного Национальным научным фондом США, начинают исследования глубоководных колонок, имеющие цель реконструировать глобальный климат плейстоцена.

1972 Сотрудник Мэрилендского университета Ананду Вернекар публикует данные по изменениям геометрии земной орбиты и интенсивности инсоляции по времени, рассчитанные для периода, охватывающего два миллиона лет прошлого и 100 000 лет непосредственного будущего.

Николас Шеклтон (Кембридж) и Нил Опдайк (Колумбийский университет) разрабатывают хронологическую

шкалу климатических событий последних 700 000 лет, положив в ее основу данные изотопного и палеомагнитного анализа образцов из тихоокеанской колонки V28-238. Они доводят число изотопных стадий до 22 и доказывают, что вариации в соотношении изотопов кислорода, участвующих в строении морской воды, отражают изменения суммарного объема ледниковых покровов Земли.

1975 Джордж Кукла, ставший сотрудником Геологической обсерватории Ламонта-Дохерти, суммирует данные по ледниково-межледниковым циклам и показывает, что их схема, предложенная Пенком и Брюкнером, а затем усовершенствованная Эберлем, не может приниматься без принципиальных поправок.

1976 Участники проекта КЛИМАП Джеймс Хейс, Джон Имбри и Николас Шеклтон проводят статистический (спектральный) анализ палеотемпературных данных, полученных по индоокеанским колонкам RC11-120 и E49-18, и устанавливают, что все крупные изменения климата последних 500 000 лет следовали за колебаниями наклона земной оси и предварения равноденствий. Тем самым была доказана правильность прогнозов, основанных на астрономической теории ледниковых эпох.

Развитие теории в период между 1976 и 1985 годами*.

Публикация работы Дж. Хейса и его коллег стала стимулом для нового наступления на проблему ледниковых эпох. К этой работе теперь подключился большой отряд специалистов, представляющих разные научные дисциплины. Она побудила Андре Берже и других астрономов вернуться к астрономическим расчетам, позволяющим уточнить историю изменений земной орбиты, а геологов – выявить новые разрезы, содержащие «записи» древних климатов, совершенствовать методы определений их возраста. Мировая наука совершила быстрый и решительный поворот в сторону признания теории Миланковича, главный принцип которой гласит: все крупные сдвиги в глобальном климате (во всяком случае, те из них, которые происходили в плейстоцене) являются следствием орбитально обусловленных изменений в радиационном балансе планеты. Удалось выяснить, что ледниково-межледниковая цикличность связана не только с колебаниями индекса прецессии (19 000- и 23 000-летние

* Дополнение, сделанное авторами для второго издания «Тайны ледниковых эпох» (Harvard University Press, 1986).

циклы) и с вариациями наклона оси вращения Земли (41 000-летние циклы), но и с изменениями эксцентриситета земной орбиты (100 000-летние циклы). В глубоководных осадках Мирового океана эти орбитальные изменения оставили ясный след в виде вариаций в соотношении изотопов кислорода, отражающих изменения суммарного объема ледниковых покровов. Они читаются и в характере окаменелостей из донных отложений, позволяющих реконструировать прошлые изменения в поверхностных течениях и температурах Атлантического, Южного, Индийского и Тихого океанов; влияние орбитальных изменений запечатлелось также в химизме глубоководных осадков океанов, проливая свет на колебания характеристик придонных вод. Колебания орбиты оставили отчетливые следы и на суше, где ими были обусловлены наступания и отступания великих полярных ледниковых покровов, повторные изменения в распределении животных и растительных сообществ, в масштабах оледенения горных стран. Все эти и подобные им эффекты циклов Миланковича весьма ярко зафиксированы в высоких и средних широтах, тогда как в тропиках они, видимо, выражены слабее, проявившись лишь в колебаниях атмосферных осадков и уровней озер – те и другие испытывали там сопряженные повышения и снижения, имевшие явно циклический характер.

Эти открытия высветили новые перспективы развития наук о Земле, выдвинули новые приоритеты. Проблемы, еще вчера казавшиеся важнейшими, сегодня утратили актуальность. Стали ненужными дополнительные подтверждения причинно-следственных связей между ледниковыми эпохами плейстоцена и орбитальными изменениями. Это стало особенно ясным после того, как геологи, проводя ревизию данных по более древним этапам истории Земли, обнаружили доказательства, что и в пермское, триасовое, эоценовое и миоценовое время изменения климата вызывались астрономическими причинами. Сейчас можно не сомневаться, что орбитальные процессы всегда в какой-то мере изменяли глобальный климат. Однако главной, наиболее важной задачей теперь становится выяснение природы физических механизмов, делающих климатическую систему высокочувствительной к умеренным колебаниям инсоляции. Уже в 1982 г. появился десяток количественных теорий, облеченных в форму компьютерных моделей. Одни из них были нацелены на объяснение колебаний ледниковых покровов и атмосферы в высоких широтах или вариаций в интенсивности азиатских муссонов, другие пытались прогнозировать начало новой ледниковой эпохи.

Однако ни одна из этих моделей не давала полного объяснения экспериментально установленной амплитуды климатических циклов, имеющих «главную» – 100 000-летнюю –

периодичность, а потому не могла считаться вполне удовлетворительной. Нашей концепции ледниковых климатов явно чего-то не хватало. Некоторые новые идеи в этой области появились в начале 1980-х годов, когда французские и швейцарские исследователи, изучив газы в воздушных пузырьках из полярных ледниковых щитов, установили, что земная атмосфера эпохи последнего оледенения отличалась пониженным содержанием углекислого газа. Это открытие позволило сделать вывод, что ледниково-межледниковая цикличность проявляется не только в форме физических и химических, но и *биологических* изменений. Напрашивалось объяснение, что вариации в глобальных запасах углекислого газа связаны с реакцией биосферы на физические изменения климата. Однако появившиеся данные по хронологии колебаний в содержании этого газа заставили отказаться от такого объяснения. Дело в том, что в 1983–1985 гг. специалисты из Англии и США установили: колебания глобального углеродного баланса *следуют* за орбитальными изменениями, но *предшествуют* сдвигам в суммарном объеме льда Земли. Поэтому колебания в количестве углекислого газа надо рассматривать как часть сложных физических, химических и биологических механизмов, с помощью которых климатическая система планеты реагирует на орбитальные изменения. В настоящее время главная проблема палеоклиматологии как раз и состоит в выяснении этих механизмов, в оценке их значения для глобального климата будущего – того климата, в котором сам человек с его способностью изменять количество углекислого газа в атмосфере стал одним из важных действующих факторов. Сегодня этой проблемой занимаются специалисты из многих стран, в том числе и из Советского Союза.

ЛИТЕРАТУРА

- Adhémar, J. A., 1842. *Révolutions de la mer*, Paris.
- Adie, R. J., 1975. Permo-Carboniferous glaciation of the southern hemisphere, in *Ice ages: ancient and modern* (A. E. Wright and F. Moseley, eds.), Seel House, Liverpool, pp. 287-300.
- Agassiz, L., 1840. *Etudes sur les glaciers*, Neuchâtel.
- Andrews, J. T., 1974. *Glacial isostasy*, Dowden, Hutchinson, and Ross, Stroudsburg.
- Arrhenius, G., 1952. Sediment cores from the East Pacific, *Swedish Deep-Sea Expedition (1947-1948) Repts.*, 5, Elander, Göteborg, pp. 1-207.
- Barnes, J. W., E. J. Lang, and H. A. Potratz, 1956. Ratio of ionium to uranium in coral limestone, *Science*, 124, pp. 175-176.
- Berger, A. 1977(a), Support for the astronomical theory of climatic change, *Nature, Lond.*, 269, pp. 44-45.
- Berger, A., 1977(b). Long-term variation of the earth's orbital elements, *Celestial Mech.*, 15, pp. 53-74.
- Berger, A., J. Imbrie, J. Hays, G. Kukla, B. Saltzman, (eds.), 1984, *Milankovitch and climate*, D. Reidel Publishing Co.
- Bernhardi, R., 1832. An hypothesis of extensive glaciation in prehistoric time, in *Source book in geology* (K. T. Mather and S. L. Mason, eds.), McGraw-Hill, New York, 1939, pp. 327-328.
- Birchfield, G. E., J. Weertman and A. T. Lunde, 1982. A model study of the role of high-latitude topography in the climatic response to orbital insolation anomalies, *J. Atmos. Sci.*, 39, pp. 71-87.
- Bloom, A. L., W. S. Broecker, J. M. A. Chappell, R. K. Matthews, K. J. Mesolella, 1974. Quaternary sea level fluctuations on a tectonic coast, *Quaternary Research*, 4, pp. 185-205.
- Broecker, W. S., 1965. Isotope geochemistry and the Pleistocene climatic record, in *The Quaternary of the United States* (H. E. Wright, Jr. and D. G. Frey, eds.), Princeton Univ. Press, Princeton, pp. 737-753.
- Broecker, W. S., 1975. Climatic change: are we on the brink of a pronounced global warming?, *Science*, 189, pp. 460-463.
- Broecker, W. S., D. L. Thurber, J. Goddard, T. Ku,

- R. K. Matthews, and K. J. Mesolella, 1968. Milankovitch hypothesis supported by precise dating of coral reefs and deep-sea sediments, *Science*, 159, pp. 1-4.
- Broecker, W. S. and J. van Donk, 1970. Insolation changes, ice volumes, and the O^{18} record in deep-sea cores, *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 8, pp. 169-197.
- Brunhes, B., 1906. Recherches sur la direction d'aimantation des roches volcaniques, *Jour. de Physique Théorique et Appliquée*, Series 4, 5, pp. 705-724.
- Calder, N., 1974. Arithmetic of ice ages, *Nature, Lond.*, 252, pp. 216-218.
- Carozzi, A. V. (editor), 1967. *Studies on glaciers preceded by the discours of Neuchâtel by Louis Agassiz*, Hafner, New York.
- Charlesworth, J. K., 1957. *The Quaternary Era with special reference to its glaciation*, 2 vols., Edward Arnold, London.
- CLIMAP Project Members, 1976. The surface of the ice-age earth, *Science*, 191, pp. 1131-1144.
- Collomb, E., 1847. *Preuves de l'existence d'anciens glaciers dans les vallées des Vosges*, Victor Masson, Paris.
- Committee for the study of the Plio-Pleistocene boundary, 1948. *Int. Geol. Congr. Rep. 18th Session, Great Britain*, 9.
- Cox, A., R. R. Doell, and G. B. Dalrymple, 1963. Geomagnetic polarity epochs and Pleistocene geochronometry, *Nature, Lond.*, 198, pp. 1049-1051.
- Cox A., R. R. Doell, and G. B. Dalrymple, 1964. Reversals of the earth's magnetic field, *Science*, 144, pp. 1537-1543.
- Croll, J., 1864. On the physical cause of the change of climate during geological epochs, *Philosophical Magazine*, 28, pp. 121-137.
- Croll, J., 1865. On the physical cause of the submergence of the land during the glacial epoch, *The Reader*, 6, pp. 435-436.
- Croll, J., 1867. On the excentricity of the earth's orbit, and its physical relations to the glacial epoch, *Philosophical Magazine*, 33, pp. 119-131.
- Croll, J., 1867. On the change in the obliquity of the ecliptic, its influence on the climate of the polar regions and on the level of the sea, *Philosophical Magazine*, 33, pp. 426-445.
- Croll, J., 1875. *Climate and time*, Appleton & Co., New York.
- Dana, J. D., 1894. *Manual of geology*, American Book Co., New York.
- Denton, G. H. and T. J. Hughes (eds.), 1981. *The last great ice sheets*, John Wiley & Sons, New York, 477 p.
- Denton G. H., Hughes T. J. 1983, Milankovitch theory of ice ages: hypothesis of ice-sheet linkage between regio-

nal insolation and global climate, *Quatern. Research*, 20, N 2, pp. 125–144.

Denton, G. H. and W. Karlén, 1973. Holocene climatic variations—their pattern and possible cause, *Quaternary Research*, 3, pp. 155–205.

Dunbar, C. O., 1960. *Historical geology*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York.

Eberl, B., 1930, *Die Eiszeitfuge im nördlichen Alpenvorlande*, Dr. Benno Filser, Augsburg.

Emiliani, C. 1955. Pleistocene temperatures, *Jour Geol.*, 63, pp. 538–578.

Emiliani, C., 1966. Paleotemperature analysis of Caribbean cores P6304-8 and P6304-9 and a generalized temperature curve for the past 425,000 years, *Jour. Geol.*, 74, pp. 109–126.

Epstein, S., R. Buchsbaum, H. Lowenstam, and H. C. Urey, 1951. Carbonate-water isotopic temperature scale, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 62, pp. 417–425.

Ericson, D. B., W. S. Broecker, J. L. Kulp, and G. Wollin, 1956. Late-Pleistocene climates and deep-sea sediments, *Science*, 124, pp. 385–389.

Ericson, D. B., M. Ewing, and G. Wollin, 1963. Pliocene-Pleistocene boundary in deep-sea sediments, *Science*, 139, pp. 727–737.

Ericson, D. B., M. Ewing, G. Wollin, and B. C. Heezen, 1961. Atlantic deep-sea sediment cores, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 72, pp. 193–286.

Ericson, D. B. and G. Wollin, 1968. Pleistocene climates and chronology in deep-sea sediments, *Science*, 162, pp. 1227–1234.

Evernden, J. F., D. E. Savage, G. H. Curtis, and G. T. James, 1964. Potassium-argon dates and the Cenozoic mammalian chronology of North America, *Amer. Jour. Sci.*, 262, pp. 145–198.

Ewing, M. and W. L. Donn, 1956. A theory of ice ages, *Science*, 123, pp. 1061–1066.

Fagan, B. M., 1977. *People of the earth*, Little, Brown & Co., Boston.

Faibridge, R. W., 1961. Convergence of evidence on climatic change and ice ages, *Annals New York Acad. Sci.*, 95, pp. 542–579.

Flint, R. F., 1965. Deep-sea stratigraphy, *Science*, 149, pp. 660–661.

Flint, R. F. 1971. *Glacial and Quaternary geology*, John Wiley & Sons, New York, 892 p.

Forbes, E., 1846. On the connexion between the distribution of the existing fauna and flora of the British Isles, and the geological changes which have affected their area, especially during the epoch of the northern drift, *Great Britain Geol. Survey, Mem.*, 1, pp. 336–432.

Frenzel, B., 1973. *Climatic fluctuations of the ice age*. (Translated by A. E. M. Nairn), Case Western Reserve Univ. Press, Cleveland and London.

Geikie, A., 1863. On the phenomena of the glacial drift of Scotland, *Geol. Soc. Glasgow, Trans.*, 1, pp. 1-190.

Geikie, A., 1875. *Life of Sir Roderick I. Murchison*, 2 vols., John Murray, London.

Geikie, J., 1874-94. *The great ice age: 1st ed.*, W. Isbister, London, 1874; *2nd ed.*, Daldy, Isbister & Co., London, 1877; *3rd ed.*, Stanford, London, 1894.

Gilbert G. K., 1890. Lake Bonneville, *U.S. Geological Survey, Monograph 1*, U.S. Government Printing Office, Washington, pp. 1-438.

Hansen, B. 1970. The early history of glacial theory in British geology, *Jour. Glaciol.*, 9, pp. 135-141.

Harrison, C. G. A. and B. M. Funnell, 1964. Relationship of palaeomagnetic reversals and micropalaeontology in two late Cenozoic cores from the Pacific Ocean, *Nature (Lond.)* 204, p. 566.

Hays, J. D. and W. A. Berggren, 1971. Quaternary boundaries and correlations, in *Micropaleontology of the oceans*, (B. M. Funnell and W. R. Riedel, eds.), Cambridge University Press, pp. 669-691.

Hays, J. D., J. Imbrie, and N. J. Shackleton, 1976. Variations in the earth's orbit: pacemaker of the ice ages, *Science*, 194, pp. 1121-1132.

Hays, J. D. and N. D. Opdyke, 1967. Antarctic Radiolaria, magnetic reversals and climatic change, *Science*, 158, pp. 1001-1011.

Heezen, B. C. and M. Ewing, 1952. Turbidity currents and submarine slumps, and the 1929 Grand Bank earthquake, *Amer. Jour. Sci.*, 250, pp. 849-873.

Hitchcock, E., 1841. First anniversary address before the Association of American Geologists, at their second annual meeting in Philadelphia, April 5, 1841, *Amer. Jour. Sci.*, 41, pp. 232-275.

Hughes T., Denton G. H., Grosswald M. G. 1977. Was there a late-Würm Arctic ice sheet? *Nature*, 266, N 5603, pp. 596-602.

Hutton, J., 1795. *Theory of the earth*, v. 2, William Creech, Edinburgh. (Reprinted 1959 in facsimile, Hafner, New York).

Imbrie, J., 1985. A theoretical framework for the Pleistocene ice ages. *Jour. Geol. Soc. London*, 142, pp. 417-432.

Imbrie, J. and John Z. Imbrie, 1980. Modeling the climatic response to orbital variations, *Science*, 207, pp. 943-953.

Imbrie, J. and N. G. Kipp, 1971. A new micropaleontological method for quantitative paleoclimatology: application

to a late Pleistocene Caribbean core, in *Late Cenozoic glacial ages*, (K. K. Turekian, ed.) Yale Univ. Press, New Haven, pp. 71–181.

Irons, J. C., 1896. *Autobiographical sketch of James Croll, with memoir of his life and work*, Edward Stanford, London.

Jamieson, T. F., 1865. On the history of the last geological changes in Scotland, *Quart. Jour. Geol. Soc. London*, 21, pp. 161–195.

Kennett, J. P., 1977. Cenozoic evolution of Antarctic glaciation, the Circum-Antarctic Ocean, and their impact on global paleoceanography, *Jour. Geophys. Res.*, 82, pp. 3843–3860.

Köppen, W. and A. Wegener, 1924. *Die Klimate der Geologischen Vorzeit*, Gebrüder Borntraeger, Berlin.

Kukla, G. J., 1968. *Current Anthropology*, 9, pp. 37–39.

Kukla, G. J., 1970. Correlation between loesses and deep-sea sediments, *Geol. Fören. Stockholm Förh.*, 92, pp. 148–180.

Kukla, G. J., 1975. Loess stratigraphy of Central Europe, in *After the Australopithecines*, (K. W. Butzer and G. L. Isaac, eds.), Mouton, The Hague, pp. 99–188.

Kullenberg, B., 1947. The piston core sampler, *Svenska Hydro-Biol. Komm. Skrifter*, S. 3, Bd. 1, Hf. 2, pp. 1–46.

Lamb, H. H., 1966. *The changing climate: selected papers*, Methuen, London.

Lamb, H. H., 1969. Climatic fluctuations, in *World survey of climatology*, 2, *General climatology*, (H. Flohn, ed.), Elsevier, New York, pp. 173–249.

Libby, W. F., 1952. *Radiocarbon dating*, Univ. Chicago Press, Chicago.

Lorius, C., J. Jouzel, C. Ritz, L. Merlivat, N. I. Barokov, Y. S. Korotkevich, and V. M. Kotlyakov, 1985. A 150,000-year climate record from Antarctic ice, *Nature (Lond.)*, 316, N 6029, pp. 591–596.

Ludlum, D., 1966. *Early American winters: 1604–1820*, American Meteorological Soc., Boston.

Lurie, E., 1960. *Louis Agassiz: a life in science*, Univ. Chicago Press, Chicago.

Lyell, C. 1830–1833. *Principles of geology*, John Murray, London; v. 1, 1830; v. 2, 1832; v. 3, 1833.

Lyell, C., 1839. *Nouveaux éléments de géologie*. Pitois-Levrault, Paris.

Lyell, C., 1865. *Elements of geology*, John Murray, London.

Maclaren, C., 1841. *The glacial theory of Professor Agassiz of Neuchâtel*. The Scotsman Office, Edinburgh, Reprinted, 1842, in *Amer. Jour. Sci.*, 42, pp. 346–365.

Marcou, J., 1896. *Life, letters, and works of Louis Agassiz*, Macmillan, New York.

Matuyama, M., 1929. On the direction of magnetisation

of basalt in Japan, Tyôsen and Manchuria, *Imperial Acad. of Japan proc.*, 5, pp. 203–205.

McDougall, I. and D. H. Tarling, 1963. Dating of polarity zones in the Hawaiian Islands, *Nature, Lond.*, 200, pp. 54–56.

McIntyre, A., W. F. Ruddiman, and R. Jantzen, 1972. Southward penetrations of the North Atlantic polar front: faunal and floral evidence of large-scale surface water mass movements over the past 225,000 years, *Deep-sea Research*, 19, pp. 61–77.

McIntyre, A. et al., 1981. Seasonal reconstructions of the earth's surface at the last glacial maximum, *Geol. Soc. Amer., Map and Chart Series*, MD-36.

Mesolella, K. J., R. K. Matthews, W. S. Broecker, and D. L. Thurber, 1969. The astronomical theory of climatic change: Barbados data, *Jour. Geol.*, 77, pp. 250–274.

Milankovitch, M., 1920. *Théorie mathématique des phénomènes thermiques produits per la radiation solaire*, Gauthier-Villars, Paris.

Milankovitch, M., 1930. Mathematische Klimalehre und astronomische Theorie der Klimaschwankungen, in *Handbuch der Klimatologie, I (A)*, (W. Köppen and R. Geiger, eds.), Gebrüder Borntraeger, Berlin, pp. 1–176.

Milankovitch, M., 1936. *Durch ferne Welten und Zeiten*, Koehler und Amalang, Leipzig.

Milankovitch, M., 1938. Astronomische Mittel zur Erforschung der erdgeschichtlichen Klimate, *Handbuch der Geophysik*, 9, (B. Gutenberg, ed.), Berlin, pp. 593–698.

Milankovitch, M., 1941. Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem, *Royal Serb. Acad., Spec. Publ.*, 133, Belgrade, pp. 1–633.

Milankovitch, M., 1957. Astronomische Theorie der Klimaschwankungen ihr Werdegang und Wiederhall, *Serb. Acad. Sci., Mono.*, 280, pp. 1–58.

Mitchell, J. M., Jr., 1963. On the world-wide pattern of secular temperature change, in *Changes of climate, Arid Zone Research XX*, UNESCO, Paris, pp. 161–181.

Mitchell, J. M., Jr., 1973. The natural breakdown of the present interglacial and its possible intervention by human activities, *Quaternary Research*, 2, pp. 436–445.

Mitchell, J. M., Jr., 1977a. The changing climate, in *Energy and climate*, Studies in Geophysics, National Academy of Sciences, Washington, pp. 51–58.

Mitchell, J. M., Jr., 1977b. Carbon dioxide and future climate, *Environmental Data Service, March, U.S. Dept. Comm.*, pp. 3–9.

Morley, J. J. and J. D. Hays, 1981. Towards a high-resolution, global, deep-sea chronology for the last 750,000 years. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 53, pp. 279–295.

Murray, J., 1895. A summary of the scientific results obtained at the sounding, dredging, and trawling stations of *H. M. S. Challenger*, *Rep. Scient. Res. Voy. H. M. S. Challenger*, Summary, 1-2.

National Academy of Sciences, 1975. *Understanding climatic change: a program for action*, National Academy of Sciences, Washington.

Neftel, A., H. Oeschger, J. Schwander, B. Stauffer, and R. Zumbunn, 1982. Ice core measurements give atmospheric CO₂ content during the past 40,000 yr, *Nature*, 295, pp. 220-223.

North, F. J., 1942. Paviland Cave, the "Red Lady", the deluge, and William Buckland, *Annals of Science*, 5, pp. 91-128.

North, F. J., 1943. Centenary of the glacial theory, *Proc. Geol. Assoc.*, 54, pp. 1-28.

Öpik, E. J., 1952. The ice ages, *Irish Astronomical Jour.*, 2, pp. 71-84.

Penck, A. and E. Brückner, 1909. *Die Alpen im Eiszeitalter*, Tauchnitz, Leipzig.

Phleger, F. B., F. L. Parker, and J. F. Peirson, 1953. North Atlantic foraminifera, *Repts. Swedish Deep-Sea Expedition 1947-1948*, 7, (H. Pettersson, ed.), Elanders, Göteborg, pp. 1-122.

Pilgrim, L., 1904. Versuch einer rechnerischen Behandlung des Eiszeitenproblems, *Jahreshefte für väterlandische Naturkunde in Württemberg*, 60.

Richthofen, F., 1882. On the mode of origin of the loess, *Geological Magazine*, 9, pp. 293-305.

Ruddiman, W. F. and A. McIntyre, 1976. Northeast Atlantic paleoclimatic changes over the past 600,000 years, in *Investigation of late quaternary paleoceanography and paleoclimatology*, (R. M. Cline and J. D. Hays, eds.), *Geol. Soc. Amer., Mem.* 145, pp. 111-146.

Rutten, M. G. and H. Wensink, 1960. Palaeomagnetic dating, glaciations and the chronology of the Plio-Pleistocene in Iceland, *Int. Geol. Congr. Sess. 21, pt. 4*, p. 62.

Sarnthein, M., 1978. Sand deserts during glacial maximum (18,000 Y.B.P.) and climatic optimum (6,000 Y.B.P.), *Nature, (Lond.)* 272, pp. 43-46.

Schaefer, I., 1953. Die donau eiszeitlichen Ablagerungen an Lech und Wertach, *Geologia Bavarica*, 19, pp. 13-64.

Schott, W., 1935. Die Foraminiferen in dem äquatorialen Teil des Atlantischen Ozeans, *Deutsch. Atlant. Exped. Meteor 1925-1927, Wiss., Ergebn.* 3, pp. 43-134.

Shackleton, N., 1967. Oxygen isotope analyses and Pleistocene temperatures re-assessed, *Nature, Lond.*, 215, pp. 15-17.

Shackleton, N. J. and N. D. Opdyke, 1973. Oxygen isotope and paleomagnetic stratigraphy of equatorial Pacific core V28-238: oxygen isotope temperatures and ice volumes

on a 10^5 and 10^6 year scale, *Quaternary Research*, 3, pp. 39–55.

Soergel, W., 1925. Die Gliederung und absolute Zeitrechnung des Eiszeitalters, *Fortschr. Geol. Palaeont.*, Berlin, 13, pp. 125–251.

Suarez, M. J. and I. M. Held, 1979. The sensitivity of an energy balance climate model to variations in the orbital parameters, *J. Geophys. Res.*, 84, 4825–4836.

Sundquist, E. T. and W. S. Broecker. (eds.), 1985. *The carbon cycle and atmospheric CO₂: natural variations Archean to present*, Geophys. Mon. 32, American Geophysical Union, Washington, D. C.

Teller, J. D., 1947. *Louis Agassiz, scientist and teacher*, The Ohio State Univ. Press, Columbus.

Urey, H. C., 1947. The thermodynamic properties of isotopic substances, *J. Chem. Soc.*, pp. 562–581.

Van den Heuvel, E. P. J., 1966. On the precession as a cause of Pleistocene variations of the Atlantic Ocean water temperatures, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 11, pp. 323–336.

Vernekar, A. D., 1972. Long-period global variations of incoming solar radiation, *Meteorological Monographs*, 12, Amer. Meteorol. Soc., Boston.

Webb P., J. E. Kutzbach and F. A. Street-Perrott, 1985. 20,000 years of global climate change: paleoclimatic research plan, in Malone, T. F. and J. G. Roederer (eds.), *Global change*, ICSU Press, New York, pp. 182–219.

Whittlesey, C., 1868. Depression of the ocean during the ice period, *Proc. Amer. Assoc. Adv. Sci.*, 16, pp. 92–97.

Wilson, A. T., 1964. Origin of ice ages: an ice shelf theory for Pleistocene glaciation, *Nature, Lond.*, 201, pp. 147–149.

Wright, H. E., Jr., 1971. Late Quaternary vegetational history of North America, in *Late Cenozoic glacial ages*, (K. K. Turekian, ed.), Yale Univ. Press, New Haven, pp. 425–464.

Zeuner, F. E. *The Pleistocene Period*, Hutchinson, London, 1959.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ

АСТРОНОМИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ОЛЕДЕНЕНИЙ – теория, связывающая происхождение ледниковых и межледниковых эпох с периодическими изменениями в геометрии земной орбиты – *угла наклона оси* вращения планеты, ориентировки этой оси относительно Солнца (явление *прецессии*) и степени вытянутости эллиптической орбиты Земли, или ее *эксцентриситета*. Эти изменения приводят к уменьшению или увеличению радиационного баланса земной поверхности, которые, испытав усиление в системе оледенение–океан–атмосфера, чувствительно сказываются на глобальном климате. Теория сформулирована М. Миланковичем, ее постулаты подтверждены при сравнении колебаний радиационного баланса, рассчитанных на основе теории, с палеоклиматическими данными, полученными геологическими методами (Дж. Имбри, Дж. Хейс и др.).

ИЗОТОПНО-КИСЛОРОДНЫЙ МЕТОД – метод определения палеотемператур или, во всяком случае, тенденций в их изменениях по соотношению тяжелого (^{18}O) и легкого (^{16}O) изотопов кислорода в воде, льду и скелетах (раковинах) водных организмов. Изотопный состав раковин из глубоководных осадков океана позволяет судить о количестве воды, изымавшемся из Мирового океана на разных этапах плейстоцена в связи с формированием ледниковых покровов. Измерение отношения $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ в ледяном керне из глубоких скважин, пробуренных на полярных ледниковых щитах, в частности на станции Восток в Антарктиде, впервые дало надежную информацию об изменениях температур за последние 150–160 тыс. лет.

КАТАСТРОФИЗМ – геологическая концепция, согласно которой преобразования земной коры, ее рельефа, а также изменения в органическом мире происходили крайне быстро и вне связи с физическими причинами. С одной из катастроф подобного рода – *Всемирным потопом* – первоначально связывались и перечисленные выше следы древних оледенений, в частности скопления морены. От-

сюда в западной литературе моренные толщи часто до сих пор именуется «*дилювиальными отложениями*» или «*дрифтом*», то есть буквально осадками потопа.

КОРРЕЛЯЦИЯ (в геологии) – сопоставление, или увязка, слоев горных пород, их пачек из разных геологических разрезов, событий прошлого как близких, так и отдаленных районов для целей выяснения их возрастных и пространственных взаимоотношений.

ЛЕДНИК – масса льда атмосферного происхождения, испытывающая течение под влиянием силы тяжести и принимающая форму потока (*долинный ледник*), обширного уплощенного купола (*ледниковый щит*) или ледяной плиты, «прикрепленной» к краю щита и плавающей в морском бассейне (*шельфовый ледник*). На ледниках выделяются области питания (где ежегодное накопление снега превосходит его таяние) и области расхода, или абляции (где таяние и другие статьи расхода превышают накопление снега). От ледников, оканчивающихся в бассейнах, откалываются *айсберги* – плавающие ледяные «горы» пирамидальной или куполообразной формы, но самые крупные из них, отделяющиеся от шельфовых ледников, имеют форму гигантских пластин (столовые айсберги Южного океана). Линия раздела между областями питания и расхода называется *границей питания*. Близкие по значению термины – снеговая граница, фирновая линия.

ЛЕДНИКОВЫЙ ПЕРИОД – интервал геологического времени продолжительностью в несколько миллионов лет, для которого характерно похолодание глобального климата и неоднократные сильные разрастания оледенения материков и океана. Текущий ледниковый период – *плейстоценовый*, в Северном полушарии он начался около 3 млн. лет назад. Судя по данным изотопно-кислородных, микропалеонтологических и палеомагнитных исследований глубоководных осадков океана, этот период включал не менее 17 ледниковых и межледниковых эпох.

ЛЕДНИКОВАЯ ТЕОРИЯ (син. *гляциализм*) – теория древних оледенений Земли. Рождение этой теории в ее современном виде связано с именами П. А. Кропоткина и Ф. Б. Шмидта в России, О. Тореллы в Швеции, братьев А. и Дж. Гейки в Шотландии, а также с трудами исследователей Антарктиды и Гренландии. Геологические доказательства древних оледенений получены в результате изучения следов *ледниковой эрозии* – *троговых долин*, *каров* (горных цирков), *бараньих лбов*, *курчавых скал* и т. п., *ледниковой аккумуляции* – холмистых и грядовых скопления *морены* (несортированных, неслоистых суглинистых отложений с валунами-ледогранниками), динамического

воздействия льда на ложе – *гляциодислокаций* осадочных пород и их *отторженцев*. Древние оледенения реконструируются также по следам ледниково-подпрудных озер (толщам «*ленточных*» глин), ложбинам стока талых ледниковых вод, песчаным и галечным толщам древних приледниковых террас и водно-аккумулятивным равнинам (*зандрам*), наконец – по формам рельефа и осадочным толщам, связанным с деятельностью ледниковых ветров прошлого – древним *материковым дюнам* и горизонтам *лэсса* (серо-желтого пористого неслоистого суглинка).

ЛЕДНИКОВАЯ ЭПОХА – подразделение ледникового периода длительностью в десятки тысяч лет, отличающееся сильным похолоданием, резким усилением оледенения, снижением уровня Мирового океана более чем на 100 м, расширением области многолетней мерзлоты и смещением границ почвенно-растительных зон в сторону экватора. Последняя ледниковая эпоха, называемая в разных областях Земли по-разному – вюрмской, валдайской, зырянской, висконсинской и т. д., окончилась около 10 000 лет назад. Она сменилась *голоценом* – межледниковой эпохой, продолжающейся до сих пор. Таким образом, *межледниковые эпохи*, или интергляциалы, – это интервалы времени внутри ледниковых периодов, разделяющие соседние ледниковые эпохи. Судя по геологическим данным, климат межледниковий был близок к современному; примерно таким же, как сейчас, было и оледенение этих эпох.

ОЛЕДЕНЕНИЕ – совокупность природных льдов различного происхождения – ледников, морских, озерных, речных, наледных и грунтовых льдов. Выделяют оледенения *покровного* типа (комплексы ледниковых щитов, ледяных потоков и шельфовых ледников, например – современное оледенение Антарктиды) и *горного* типа (главным образом долинные и каровые ледники, например – оледенение Альп и Кавказа). Термин оледенение применяется также для обозначения процесса сильного увеличения размеров ледников и других видов природных льдов, связанного с изменением глобального климата.

ПАЛЕОКЛИМАТОЛОГИЯ – учение о климатах прошлого Земли. Конкретные характеристики этих климатов получают геологическими методами.

ПАЛЕОЛИТ – эпоха в истории развития человека и его материальной культуры, иначе называемая *древним каменным веком*, во время которой первобытные люди изготавливали орудия из камня с грубой отделкой (без

шлифовки). Соответствует интервалу от начала плейстоцена до конца последнего оледенения.

ПАЛЕОМАГНИТНЫЙ МЕТОД – способ стратиграфического расчленения и датирования горных пород, основанный на использовании их естественной остаточной намагниченности. В его основе лежит способность изверженных и осадочных горных пород приобретать в процессе своего формирования и сохранять на последующие эпохи намагниченность, отражающую направление и интенсивность геомагнитного поля Земли. Последнее не постоянно во времени, а испытывает *вариации* и *инверсии* – изменения направления на обратные при одном и том же положении геомагнитной оси.

ПЛАНКТОН – сообщества растительных и животных организмов, населяющих приповерхностный слой воды Мирового океана и пассивно переносимых течениями. По размерам различают макро- и микропланктон (его остатки изучает *морская микропалеонтология*), по составу – *зоопланктон* и *фитопланктон*. В составе последнего главную роль играют кремневые *диатомовые* водоросли и известковые кокколитофоры, в составе зоопланктона – *фораминиферы*, *радиолярии*, различные рачки (*остракоды* и др.). Существует ряд методов реконструкции характеристик древнего океана – его солености, зимних и летних температур – по составу ископаемых планктонных организмов. Эти методы собирательно именуется микропалеонтологическими.

ПЛЕЙСТОЦЕН – отдел четвертичного периода истории Земли, характерной особенностью которого являются низкие температуры и неоднократно повторявшиеся оледенения высоких и средних широт. Начало плейстоцена разные исследователи датируют по-разному – от 0,7 до 2–4 млн. лет назад, его окончание связывают с завершением последнего оледенения (около 10 000 лет назад).

РАДИАЦИОННЫЙ БАЛАНС ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ – разность между *суммарной солнечной радиацией*, поглощенной земной поверхностью, и ее *эффективным излучением*. Последнее сильно зависит от *альбедо* Земли – ее отражательной способности, определяемой как отношение потока радиации, отражаемой облаками, океаном, ледниками, снежным покровом, морскими льдами, растительностью, пустынями и т. д., к потоку падающей на эти поверхности радиации. Поступление прямой и рассеянной радиации на земную поверхность называют *инсоляцией*, ее измеряют числом единиц энергии, падающей на 1 см² горизонтальной поверхности за определенное время (минута, сутки и т. п.).

СЁРДЖИ ЛЕДНИКОВЫЕ – явления внезапного ускорения движения ледников, связанные с падением сопротивления скольжению льда по ложу. Сопровождаются дроблением льда, изменением формы ледников и наступанием их концов. Ледники, оканчивающиеся в океанах и иных водных бассейнах, порождают во время сёрджей большие массы *айсбергов*.

СТРАТИГРАФИЯ – раздел геологии, занимающийся изучением последовательности напластования осадочных и вулканических пород и установлением их относительно и абсолютного возраста. Относительный возраст горных пород определяют по их соотношению со слоями известного возраста, а главное – по находимым в них остаткам древних организмов (т. е. методами *палеонтологии*). Абсолютный возраст устанавливается главным образом радиоизотопными методами – *калий-аргоновым*, *радиоуглеродным* и т. п. Совокупность полученных таким путем данных служит основой для создания *геохронологических шкал*.

КНИГА ИМБРИ, ЛЕДНИКОВАЯ ТЕОРИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛЕЙСТОЦЕНОВЫХ КЛИМАТОВ

«Тайны ледниковых эпох» – первая в мире популярная книга, рассказывающая об истории и современном состоянии *ледниковой теории*, или теории древних оледенений Земли. Интерес к ней традиционно велик, он не ослабевает и сегодня: многие страны осуществляют специальные проекты, нацеленные на раскрытие тайн современных ледниковых покровов Арктики и Антарктиды, на выяснение масштабов, геологического возраста и причин оледенений прошлого. Ледниковая теория находит широкое применение в науке и практике, она уже успела стать неотъемлемой частью общей теории современной физической географии, без нее невозможно составить материалистическую картину окружающего мира и его эволюции.

Сведения о древних оледенениях широко используются при реконструкциях климата прошлого, они создают научную основу для прогноза природно-климатических изменений будущего, в частности для суждения о вероятности и примерных сроках начала нового оледенения. Такие данные нужны для расшифровки истории Мирового океана и глубоководного осадконакопления, дрейфа литосферных плит, вертикальных движений земной коры, происхождения рельефа и поверхностных отложений суши. Они необходимы и для разработки научных основ хозяйственного освоения новых территорий и прибрежных акваторий, успешного поиска и рациональной организации добычи многих видов полезных ископаемых, проектирования строительства в районах Севера, осуществления комплекса природоохранных мероприятий.

Между тем советская литература по ледниковой теории и ее истории крайне бедна. Она исчерпывается несколькими статьями академика К. К. Маркова,

написанными десятки лет назад, и небольшим числом публикаций, посвященных разного рода юбилеям—80-летию и 100-летию выхода в свет книги П. А. Кропоткина, 50-летию Комиссии по изучению четвертичного периода и т. д. Ни одна из этих работ не давала сколько-нибудь полного обзора новейших достижений ледниковой теории, не поставила ее современные проблемы в историческую перспективу. Данный пробел чувствительно сказывается на состоянии советской четвертичной геологии и палеогеографии, которые, как известно, все еще страдают определенной узостью и несовершенством теоретических основ. В связи с этим у нас до сих пор нередки рецидивы архаичных маринистских (антигляциалистских) представлений. Выход русского перевода «Тайны ледниковых эпох», несомненно, поможет преодолеть названные недостатки.

Несколько слов об авторах книги. Первый из них, профессор Джон Имбри,— всемирно известный морской геолог и палеоклиматолог, член Национальной академии наук США. Он совмещает руководство кафедрой океанографии Брауновского университета с исследовательской работой в Геологической обсерватории Ламонта—Дохерти Колумбийского университета, является автором многих открытий, был инициатором и ведущим исполнителем проекта КЛИМАП, одна из главных целей которого состояла в реконструкции природных условий океана и континентов для холодного пика последней ледниковой эпохи, а также в установлении связей этих условий с периодическими изменениями земной орбиты. Советские ученые помнят его яркие выступления на Советско-американском симпозиуме по палеоклимату (Москва—Баку, 1976 г.) и на XI Конгрессе Международного союза по изучению четвертичного периода (ИНКВА), состоявшемся в 1982 г. в Москве. Второй автор, Кетрин П. Имбри, дочь Джона Имбри,— профессиональная писательница. Книга, созданная в итоге их сотрудничества, сочетает научную компетентность и глубину с совершенством литературной формы и увлекательностью изложения. Она хорошо иллюстрирована и, как всякий научный труд, снабжена справочным аппаратом— таблицей «Хронология открытий», кратким терминологическим словарем и списком литературы по данной проблеме, который достаточно подробен, чтобы быть полезным

не только широкому читателю, но и специалистам-палеоклиматологам.

Книга Имбри во многом поучительна. Она дает богатый материал для размышлений каждому, кто интересуется развитием науки вообще, поскольку путь, пройденный ледниковой теорией, типичен для истории практически любой крупной научной идеи. Используя огромный материал, авторы показали, как в ходе развития теории шло взаимодействие, взаимостимулирование разных звеньев исследовательского процесса: исходные гипотезы определяли постановку задач, эти задачи ускоряли разработку приборов и методов исследования, а они обеспечивали успехи в сборе фактического материала. Накопление такого материала заставляло искать новые методы его обработки, анализа, объяснения, после чего исходные гипотезы совершенствовались или изменялись, ставя на повестку дня новые проекты и программы, открывая исследователю такие горизонты, о которых он, начиная свой поиск, даже не мог догадываться... Вспомните, например, этапы, пройденные палеоклиматологией на ее пути к овладению методами реконструкции природных условий прошлого по глубоководным осадкам океана. Сначала Джеймс Кролль высказал мысль, что изменения климата должны были запечатлеться в этих осадках, а экспедиция на «Челленджере» подтвердила зависимость видового состава планктона от температур океанской воды. Возникшие при этом возможности подтолкнули конструкторов к созданию ударных трубок, а морских геологов – к их применению для массового сбора колонок глубоководных грунтов, что было сделано уже во время кругосветной экспедиции на «Метеоре». Появились колонки – потребовались методы их палеоклиматического анализа, а когда они были разработаны и применены, стало возможным и выделение в глубоководных разрезах ледниковых и межледниковых слоев. Этот успех стимулировал дальнейшее совершенствование трубок, разработку их поршневых моделей, с помощью которых можно было брать многометровые колонки, несущие с собой информацию не только о последнем крупном климатическом цикле, но и о целой серии ледниковых и межледниковых эпох плейстоцена. Но эту информацию надо было уметь читать – и возник импульс к началу нового витка науч-

ных поисков, на сей раз главным образом методических: как датировать древние слои, определять по ним палеотемпературы, изменения солености, глубин океана, его течений, суммарных запасов льда на материках планеты на разных этапах ее истории. Естественно, что успех таких поисков можно было обеспечить лишь при условии тесного взаимодействия полевых исследователей и конструкторов приборов, лабораторных аналитиков и широких теоретиков, геологов и химиков, биологов, гляциологов и специалистов по ядерной физике. Короче говоря, для этого успеха требовались комплексные, междисциплинарные исследования, требовались вклады специалистов из самых различных областей естественных и технических наук и, конечно, также специалистов из разных стран. Книга столь же ярко показывает необходимость международного сотрудничества ученых. Достаточно вспомнить, как шведские инженеры создали поршневую трубку, а океанографы взяли с ее помощью длинные колонки донных грунтов, как американские исследовательские суда охватили такими работами все океаны, после чего интернациональные группы ученых в лабораториях Ламонта, Вудс-Хола, Чикагского, Кембриджского и других университетов приспособили для изучения колонок радиоизотопные, палеомагнитный, микропалеонтологические, изотопно-кислородный и прочие методы. Ведь именно так проводится большинство современных глобальных проектов: ученые США широко привлекали к работе по проекту КЛИМАП специалистов из СССР, Франции и других стран Европы, программа изучения Антарктического ледникового щита методами радиолокации выполняется согласованными усилиями гляциологов, физиков и летчиков из Англии, США, Дании, СССР, а один из ярчайших проектов наших дней – восстановление климатической истории последних 150 000 лет на основе анализа керна из скважины, пробуренной на советской антарктической станции «Восток», – осуществлен совместно советскими и французскими гляциологами.

И хочется сказать еще об одном достоинстве книги – о том, как она написана. Выше уже говорилось, что ее чтение увлекает, причем увлекает как настоящий детектив. Да она и есть детектив, поскольку в ней присутствуют и тайна, и поиски ее разгадки,

поскольку это книга о приключениях – приключениях научных идей на их полуторавековом пути от первых догадок до построения современной теории, базирующейся на надежном фундаменте фактов. Авторы показывают, как эта теория обогащалась все новыми и новыми данными, как отдельные конкретные исследования, кажущиеся разрозненными, органично вплетались в ее ткань, так что и наблюдения Куклы за лёссовыми толщами Чехословакии, и работы Брёккера, Мэтьюза и Месолеллы по коралловым террасам Барбадоса нашли свое место в той головоломке-мозаике, которую представляет концепция древних оледенений и климатов Земли.

Конечно же, в книге есть и недостатки, главный из которых, на наш взгляд, состоит в неполном, часто одностороннем показе новейших вкладов в ледниковую теорию, сделанных неамериканской, в частности скандинавской и особенно советской, наукой. Справедливости ради скажем, что это признают и сами авторы. «Книга в ее современном виде, – писал Джон Имбри переводчику, – совершенно неудовлетворительно освещает роль русских исследований в развитии теории оледенений. Я ничего не мог поделаться: моих знаний в этой области явно не хватало». Впрочем, мы и сами историю ледниковой теории в России знаем слабо, на что не раз обращал внимание К. К. Марков, который, в частности, писал: «Наши соотечественники мало потрудились, чтобы отметить и оценить гигантский труд, вложенный в развитие ледниковой теории русскими учеными». И коль скоро это так, то вправе ли мы ожидать от американских коллег того, чего не сделали сами?

Среди немногих работ, посвященных истории ледниковой теории в нашей стране, заслуживают особого внимания известная статья В. А. Обручева «Признаки ледникового периода в северной и центральной Азии (исторический очерк и сводка наличных данных)» и работа К. К. Маркова «Ледниковая теория в России». Но ни эти, ни другие работы по рассматриваемой проблеме далеко не исчерпывают тему, так что история ледниковой теории в нашей стране все еще ждет своего исследователя. Тем не менее и сейчас можно лишь поражаться тому вкладу в эту теорию, который был сделан русскими учеными. Ведь

следует понимать, что в условиях огромной страны с труднодоступным и ненаселенным Севером и не менее труднодоступными горами установление даже таких фактов, как география следов прошлых оледенений, приобретало принципиальную важность.

Судя по историческим изысканиям К. К. Маркова, заметные успехи русской науки в области познания древних оледенений четко обозначились уже в 50–70-е годы XIX века, то есть в период становления ледниковой теории на Западе. Как и на Западе, большинство русских естествоиспытателей того времени стояли на позициях дрейфовой гипотезы: опираясь на опыт русских полярных мореплавателей, они объясняли присутствие эрратических валунов и штрихованных скал в Прибалтике и на севере Евразии действием плавучих льдов. Однако наряду с этими взглядами в первой половине прошлого века закладывались и основы теории материкового оледенения, что было связано с трудами К. Ф. Рулье, Г. Е. Щуровского, Б. Ф. Шмидта и П. А. Кропоткина.

Профессора Московского университета Рулье и Щуровский на протяжении многих лет изучали геологию окрестностей Москвы и более северных районов Русской равнины и уже к 1850-м годам пришли к определенному выводу о связи эрратических валунов и глыб, распространенных на этой территории, с деятельностью гигантских древних ледников, надвигавшихся с северо-запада. Взгляды Щуровского восприняли и впоследствии развили дальше Ф. Б. Шмидт и А. П. Павлов, слушавшие его лекции, и С. Н. Никитин, еще юношей участвовавший в его экскурсиях.

Геолог и географ Ф. Б. Шмидт стал гляциалистом в результате изучения поверхностных отложений северной Эстонии. Позже он распространил свои наблюдения на Русскую равнину, Западную Сибирь и Скандинавию, путешествовал в Альпах и других ледниковых областях. Его влияние испытали на себе многие современники, в том числе А. А. Штукенберг, описавший следы оледенения в окрестностях Петербурга, и П. А. Кропоткин, бывший спутником Шмидта в его путешествии по Финляндии. Ф. Б. Шмидт был первым исследователем ледниковых образований Прибалтики, Енисейского Севера, ряда районов Русской равнины, он занимался вопросами стратиграфии плейстоцена,

а также ледниковыми шрамами, основной мореной, озами, друмлинами и ленточными глинами, то есть широким комплексом ледниковых форм рельефа. Он пришел к выводу, что ледниковые отложения в России простираются на юг до линии Рославль—Елец—Воронеж.

Особенно важную роль в становлении ледниковой теории в России сыграл П. А. Кропоткин. Еще в 1865 г. он посетил Восточную Сибирь и был первым исследователем, отметившим следы оледенения в Восточном Саяне. Спустя год он исследовал Олекминско-Витимскую горную страну, опубликовав полный отчет об этих работах в 1873 г. В его отчете, как и в более ранних публикациях, прозвучал вывод о ледниковом периоде в Сибири, появились данные о следах геологической деятельности сибирских ледников—моренных грядах и ледниковых валунах. Его итоговое заключение гласило: «Факты, представляемые Олекминской горной страной, могут быть объяснены только при допущении ледников».

В 1874 г., подводя итоги своим наблюдениям в Северо-Западной Европе, П. А. Кропоткин сделал доклад Географическому обществу, в котором говорил: «Все валуны, рассеянные по средней и северной России, доставлены туда из Финляндии ледниками, а не плавающими льдинами, как это большей частью предполагалось доселе». Здесь же было высказано предположение, что ледниковый покров, существовавший в Восточной Европе, был сплошным и достигал Киева и Воронежа.

Но самое большое значение имел капитальный труд Кропоткина, созданный им в Петропавловской крепости, куда он вскоре был заключен,—двухтомные «Исследования о ледниковом периоде». Первый том «Исследований...» был напечатан в 1876 г. в Записках географического общества, он стал теоретическим обобщением многолетних исследований автора в Сибири и Северной Европе и оказал огромное влияние на взгляды нескольких поколений русских геологов и географов. В нем были подробно рассмотрены условия образования материковых ледников, объяснены причины их движения, показано воздействие льда на рельеф, введено понятие о ледниковом ландшафте. Таким образом, русские ученые К. Ф. Рулье, Г. Е. Шу-

ровский, Ф. Б. Шмидт и П. А. Кропоткин заложили основы теории материкового оледенения в России и, как подчеркнул К. К. Марков, сделали это на материале собственных наблюдений и в общем независимо от главных публикаций О. Торелля, Дж. Гейки и других западных исследований.

Одновременно с утверждением теории покровных оледенений северных равнин появились доказательства ледниковой природы рельефа и поверхностных отложений горных стран юга России. Г. Н. Потанин указал на присутствие моренных гряд на Южном Алтае, А. А. Чекановский привел дополнительные доводы в пользу древнего оледенения хребта Восточный Саян, Н. А. Северцев обнаружил следы оледенения в Заилийском и Киргизском Алатау, а Г. В. Абих – на Кавказе. В 1880-х годах получают дальнейшее развитие и представления о покровном оледенении северных равнин, что связано с работами А. А. Иностранцева, А. А. Штукенберга, а чуть позже – В. В. Докучаева, С. Н. Никитина, И. В. Мушкетова, В. А. Обручева, П. А. Тутковского. Тогда же появились первые стратиграфические схемы, составленные на основе ледниковой теории А. П. Павловым, Н. И. Криштофовичем и Н. Н. Боголюбовым; это направление успешно развивалось Г. Ф. Мирчинком, С. А. Яковлевым, В. Н. Сукачевым.

Важнейшей вехой в развитии ледниковой теории за послереволюционные годы стало начало исследовательской деятельности Комиссии по изучению четвертичного периода Академии наук СССР, созданной в 1927 г. по инициативе В. И. Вернадского. Ее первым председателем был А. П. Павлов, который еще в начале 1920-х годов установил многократность оледенений территории СССР и определил стратиграфическое положение материальных следов, оставленных первобытным человеком. После Павлова комиссию возглавляли Ф. Ю. Левинсон-Лессинг, И. М. Губкин, В. А. Обручев, В. Н. Сукачев, Г. И. Горецкий, в настоящее время ее председателем является вице-президент АН СССР А. Л. Яншин.

Уже в 1928 г. комиссия начала свою экспедиционную деятельность и за несколько лет провела исследования палеолита Крыма (Г. А. Бонч-Осмоловский), ленточных глин и хронологии ледниковых событий на

северо-западе СССР (К. К. Марков, И. И. Краснов), межледниковых образований Русской равнины (Г. Ф. Мирчинк, В. С. Доктуровский, В. Н. Сукачев), четвертичной истории Белого моря (М. А. Лаврова), бассейна Камы и средней Волги (Г. Ф. Мирчинк, В. И. Громов, К. К. Марков, Е. В. Шанцер и др.).

Этот период деятельности комиссии отмечен публикацией нескольких выдающихся работ, и среди них — «Поздне- и послеледниковой истории окрестностей Ленинграда на фоне поздне- и послеледниковой истории Балтики» К. К. Маркова, уже упоминавшейся сводки «Признаки ледникового периода в северной и центральной Азии» В. А. Обручева, статей Н. Н. Урванцева, В. И. Громова и других. В середине 1930-х годов центрами ледниковых исследований стали Геологический институт и Институт географии АН СССР, вскоре после этого появилась фундаментальная монография И. П. Герасимова и К. К. Маркова «Ледниковый период на территории СССР». Она подвела итог крупного этапа советских работ по ледниковой теории, включавших изучение как стратиграфии и палеогеографии ледниковых эпох, так и вопроса о причинах оледенений. Был сделан вывод, что главной предпосылкой развития оледенений и их чередований с межледниковьями были орбитальные изменения, то есть астрономические факторы, воздействие которых, однако, всюду преломляется через влияние конкретных географических условий, из-за чего пространственно-временные проявления оледенений могут быть очень неодинаковыми.

После Великой Отечественной войны в исследования древних оледенений включились новые научные коллективы, укрепилась связь с зарубежными учеными, началось углубленное изучение районов современного оледенения Арктики и Антарктиды. Работы этого периода велись в нескольких направлениях: продолжалось подведение итогов прежних исследований, создавались основы новых подходов и методов. В этот период выходят «Основы геологии четвертичных отложений Русской равнины» С. А. Яковлева (1956), трехтомный «Четвертичный период» К. К. Маркова с соавторами (1965–1967), «Древние материковые оледенения Европы» А. А. Асеева (1974), несколько монографий по истории Европейского ледникового покрова, создан-

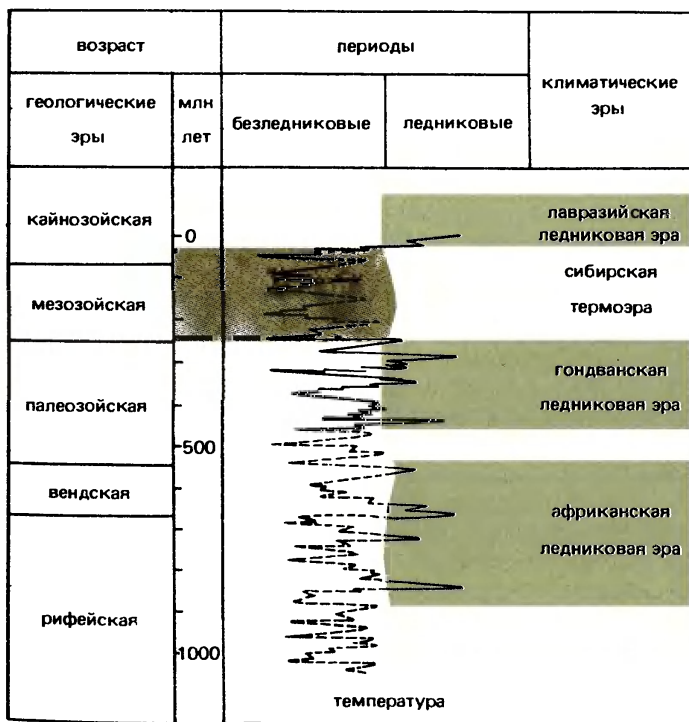
ные коллективами авторов под руководством И. П. Герасимова; в серии монографий «История развития рельефа Сибири и Дальнего Востока», выпущенных по инициативе Сибирского отделения АН СССР, были рассмотрены региональные проблемы древних оледенений восточной части СССР.

Одновременно анализировались результаты радиоуглеродного датирования позднеплейстоценовых и голоценовых отложений (Н. В. Кинд, Л. Р. Серебрянный и др.), создавались и совершенствовались способы палеомагнитной корреляции осадочных толщ (А. Н. Храмов), формировалась отечественная школа изотопно-кислородного анализа (Р. В. Тейс, С. Д. Николаев и др.), разрабатывались методы получения данных о палеоклимате путем микропалеонтологического анализа наземных (В. П. Гричук, М. И. Нейштадт, Н. А. Хотинский) и морских (А. П. Жузе, М. С. Бараш) осадков.

Особенно важную роль сыграли работы А. П. Жузе и М. С. Бараша, способствовавшие включению океана в сферу исследований оледенений и климатов прошлого. А. П. Жузе сделала решающий вклад в развитие диатомового анализа глубоководных осадков и применила его для целей климатостратиграфического расчленения отложений дна северо-западной части Тихого океана и дальневосточных морей. Этот метод позволил реконструировать сдвиги границ природных зон Мирового океана при переходах от межледниковий к оледенениям и обратно. А М. С. Бараш первым провел реконструкции плейстоценовых температур поверхностной толщи океана по комплексам планктонных фораминифер, включенным в донные осадки. Еще в 1964 г., то есть раньше Джона Имбри, он начал использовать данные по структуре таких комплексов для получения количественных характеристик термики умеренной и субтропической части Атлантического океана, а теперь, когда его группа пополнилась рядом новых сотрудников (Н. С. Блюм, Е. В. Иванова, Н. С. Оськина и др.), — таких же характеристик Тихого и Индийского океанов.

Еще одно новое направление ледниковой теории, успешно развиваемое в нашей стране (Н. М. Чумаков), связано с изучением древнейших — доплейстоценовых — оледенений. Эти работы позволили выяснить

несколько принципиальных вопросов, ранее остававшихся без ответа, в частности дать оценку глобальной климатической роли дрейфа литосферных плит, проследить влияние этого дрейфа на изменения океанских течений и климата, получить данные о климатической зональности далекого прошлого и об условиях образования ряда важных видов минеральных ресурсов. И прежде всего – помогли лучше понять место плейстоценового холодного периода в контексте климатической истории Земли, определить соотношение длительности ледниковых и теплых неледниковых интервалов этой истории за последний миллиард лет (рис. 50). Как следует из расчета Н. М. Чумакова, доля ледниковых интервалов составила лишь 18% от всего этого огромного периода времени.



50. Изменения температур и оледенения Земли за последний миллиард лет (по Н. М. Чумакову, 1986).

Некоторые наиболее существенные вехи из истории становления ледниковой теории в СССР мы включили в приложение (хронологию открытий), что было сделано по просьбе Джона Имбри.

В последние годы советские палеоклиматологи и гляциологи сосредоточили свои усилия на поиске природных механизмов, с помощью которых астрономические факторы преобразуются в изменения глобального климата. Как следует из заключительного раздела книги и приложения, это представляет наиболее актуальную проблему ледниковой теории. В СССР создаются физические и математические модели, позволяющие анализировать взаимодействия в системе «оледенение – океан – атмосфера», расширяются работы по численному моделированию указанных взаимодействий на ЭВМ. Однако наряду с этим не теряют значения и традиционные исследования, направленные на выяснение масштабов древних оледенений, баланса массы, температурного режима и климатических условий существования ледниковых покровов прошлого. Ведь совершенно ясно, что от решения вопросов о том, приурочивалось ли древнее оледенение лишь к суше или охватывало также огромные пространства полярных континентальных шельфов Евразии и Северной Америки, или, скажем, был ли Полярный бассейн ледникового времени открытым или покрывался мощным шельфовым ледником, зависят многие общетеоретические положения. И в этой области нами сделано немало: достаточно вспомнить гипотезу о Панарктическом ледниковом покрове, выдвинутую в конце 1970-х годов и ставшую стимулом для новых исследований, или только что представленные доказательства покровного оледенения Новосибирских островов и окружающего шельфа, заставляющие пересмотреть всю концепцию древних оледенений и климата восточного сектора Советской Арктики. Наши взгляды до сих пор имеют противников, однако они получают все новые подтверждения и гармонично вписываются в общую картину эволюции Северной полярной области в плейстоцене.

Итак, ледниковая теория в нашей стране, развиваемая русскими и советскими учеными и питаемая фактами, собранными главным образом на ее территории, проделала практически тот же путь, что и вся

мировая наука о ледниковых эпохах. Изучая историю этой науки, легко убедиться, что на разных ее этапах мы были где-то впереди, где-то шли в ногу, а где-то отставали, совершали ошибки. Мы думаем, что эту книгу с пользой прочтут не только географы, геологи и любители природы и естественных наук, но также специалисты, занятые освоением природных богатств страны. И надеемся, что для них она будет не только интересным чтением, но и принесет реальную пользу.

Г. А. Авсюк, М. Г. Гросвальд

- Бараш М. С. Планктонные фораминиферы в осадках Северной Атлантики. М., Наука, 1970, 103 с.
- Бараш М. С. Четвертичные палеотемпературы океанов и некоторые палеогеографические реконструкции.— В кн.: Современные проблемы геологии морей и океанов. М., Наука, 1980, с. 102–128.
- Бараш М. С. Четвертичная палеоокеанология Атлантического океана. М., Наука, 1988.
- Богданов Ю. А., Каплин П. А., Николаев С. Д. Происхождение и развитие океана. М., Мысль, 1978, 160 с.
- Величко А. А. П. А. Кропоткин как создатель учения о ледниковом периоде.— «Известия АН СССР». Серия геогр., 1957, № 1, с. 122–126.
- Взаимодействие оледенения с атмосферой и океаном. Под ред. В. М. Котлякова и М. Г. Гросвальда. М., Наука, 1987, 248 с.
- Герасимов И. П., Марков Е. К. Ледниковый период на территории СССР. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1939.
- Гернет Е. С. Ледяные лишай. М., Наука, 1981, 93 с.
- Гляциологический словарь, под ред. В. М. Котлякова. Л., Гидрометеиздат, 1984, 528 с.
- Жузе А. П. Стратиграфические и палеогеографические исследования в северо-западной части Тихого океана. М., Изд-во АН СССР, 1962.
- Захаров В. Ф. Мировой океан и ледниковые эпохи плейстоцена. Л., Гидрометеиздат, 1978, 64 с.
- Иванова И. К. К пятидесятилетию научной, научно-организационной и издательской деятельности Комиссии по изучению четвертичного периода.— «Бюллетень Комис. по изуч. четвертич. периода», вып. 50. М., Наука, 1980, с. 3–11.
- Калесник С. В. Очерки гляциологии. М., Географгиз, 1963, 551 с.
- Котляков В. М. Снег и лед в природе Земли. М., Наука, 1986, 159 с.
- Котляков В. М., Гордиенко Ф. Г. Изотопная и геохимическая гляциология. Л., Гидрометеиздат, 1982, 288 с.
- Кропоткин П. А. Исследование о ледниковом периоде.— «Записки имп. рус. географ. об-ва», СПб., 1876, т. 7, вып. 1.

- Лосев К. С. Страна вечной зимы. Л., Гидрометеиздат, 1986, 112 с.
- Марков К. К. Палеогеография и новейшие отложения (избранные труды). М., Наука, 1986, 280 с.
- Никитин С. Н. Пределы распространения ледниковых следов в Центральной России и на Урале.— «Известия Геол. комитета», 1885, т. 4, с. 185–222.
- Обручев В. А. Признаки ледникового периода в северной и центральной Азии (исторический очерк и сводка наличных данных).— «Бюллетень Комис. по изуч. четвертич. периода», 1931, № 3, с. 43–120.
- Орвику К. К. О работах академика Ф. Б. Шмидта по четвертичной геологии северной Эстонии.— «Труды Института геологии АН ЭССР», III, 1958, с. 27–50.
- Павлов А. П. Генетические типы материковых образований ледниковой и послеледниковой эпохи.— «Известия Геол. комитета», 1888, т. 7, с. 243–262.
- Сергин В. Я., Сергин С. Я. Системный анализ проблемы больших колебаний климата и оледенения Земли. Л., Гидрометеиздат, 1978, 279 с.
- Троицкий С. Л. Современный антигляциализм. Критический очерк. М., Наука, 1975, 163 с.
- Ходаков В. Г. Снега и льды Земли. М., Наука, 1969, 163 с.
- Храмов А. Н. Палеомагнитная корреляция осадочных толщ. Л., Гостоптехиздат, 1958.
- Чумаков Н. М. Какой климат типичен для Земли?— «Природа», 1986, № 10, с. 34–45.
- Штукенберг А. А. О следах ледникового периода в окрестностях Петербурга. СПб., 1874, 37 с. («Труды СПб. об-ва естествоиспытателей», т. 5, вып. 2).
- Щуровский Г. Е. Эпратические явления.— «Русский вестник», 1856, № 19, 16 с.

Оглавление

| | |
|---|---|
| Предисловие | 7 |
| Пролог. Забытый ледниковый период | 9 |

Часть I

Ледниковый период: открытие

| | |
|---|----|
| 1. Луи Агассис и ледниковая теория | 19 |
| 2. Триумф ледниковой теории | 32 |
| 3. Какова же она – природа ледникового периода? | 49 |

Часть II

В поисках причины

| | |
|--|-----|
| 4. Суть проблемы | 65 |
| 5. Рождение астрономической теории | 75 |
| 6. Астрономическая теория Джеймса Кролля | 83 |
| 7. Споры вокруг теории Кролля | 95 |
| 8. Через далекие миры и века | 105 |
| 9. Теория Миланковича: за и против | 122 |
| 10. Океанские глубины и прошлое | 136 |
| 11. Плейстоценовые температуры | 150 |
| 12. И вновь – теория Миланковича | 158 |
| 13. Магнитный сигнал Земли | 166 |
| 14. Пульс климата | 174 |
| 15. Метроном ледниковых эпох | 184 |

Часть III

Ледниковый период в будущем

| | |
|--|-----|
| 16. Предстоящее оледенение | 203 |
| Эпилог: Последний миллиард лет истории климата | 217 |

| | |
|--|-----|
| Приложение. Хронология открытий | 223 |
| Литература | 234 |
| Основные понятия и термины | 242 |
| Книга Имбри, ледниковая теория и исследование плейсто- ценовых климатов | 247 |

Дж. Имбри, К. П. Имбри
ТАЙНЫ ЛЕДНИКОВЫХ ЭПОХ

Редактор *И. М. Максимова*

Младший редактор *В. М. Казакова*

Художник *Ю. М. Гордон*

Художественный редактор *А. М. Ефремов*

Технический редактор *Е. В. Величина*

Корректор *В. В. Евтохина*

ИБ 15998

Сдано в набор 19.08.87. Подписано в печать 11.04.88. Формат 84 × 108¹/₃₂. Бумага офсетная № 2. Гарнитура Таймс. Печать офсетная. Условн. печ. л. 13,86. Усл. кр.-отт. 28,14. Уч.-изд. л. 13,20. Тираж 50 000 экз. Заказ № 982. Цена 1 р. 50 к. Изд. № 41337

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Прогресс» Государственного комитета СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли.

119847, ГСП, Москва, Г-21, Zubovskiy bulvar, 17.

Можайский полиграфкомбинат Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли.

143200, Можайск, ул. Мира, 93.

1 p. 50 κ.

