

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

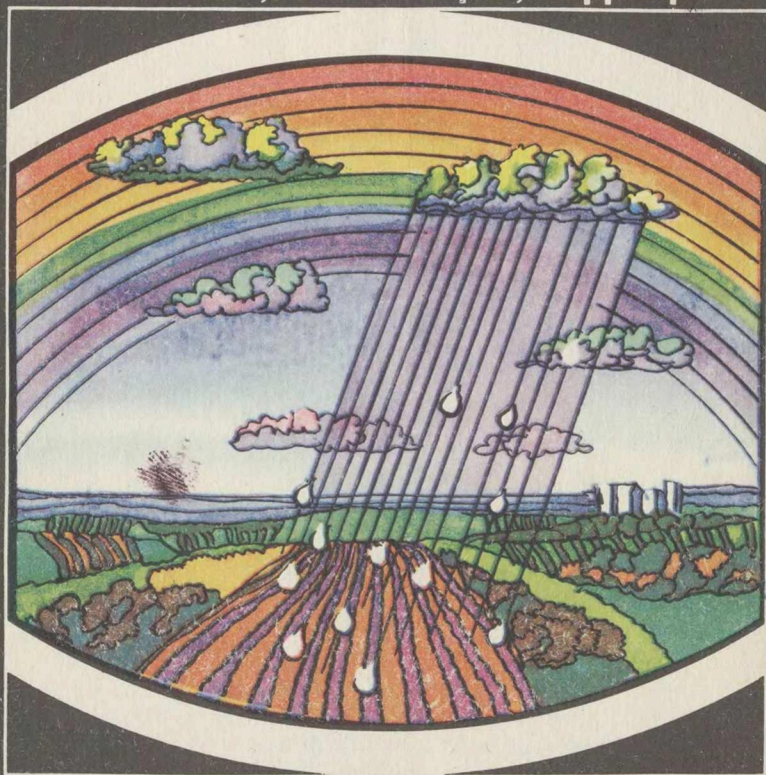
ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ



1985/12

**В.М.Котляков,
М.Г.Гросвальд,
А.Н.Кренке**

**КЛИМАТ ЗЕМЛИ:
ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ, БУДУЩЕЕ**



ЗНАНИЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

Подписная научно-популярная серия

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

12/1985

Издается ежемесячно с 1966 г.

В. М. Котляков,
член-корреспондент АН СССР

М. Г. Гросвальд,
доктор географических наук

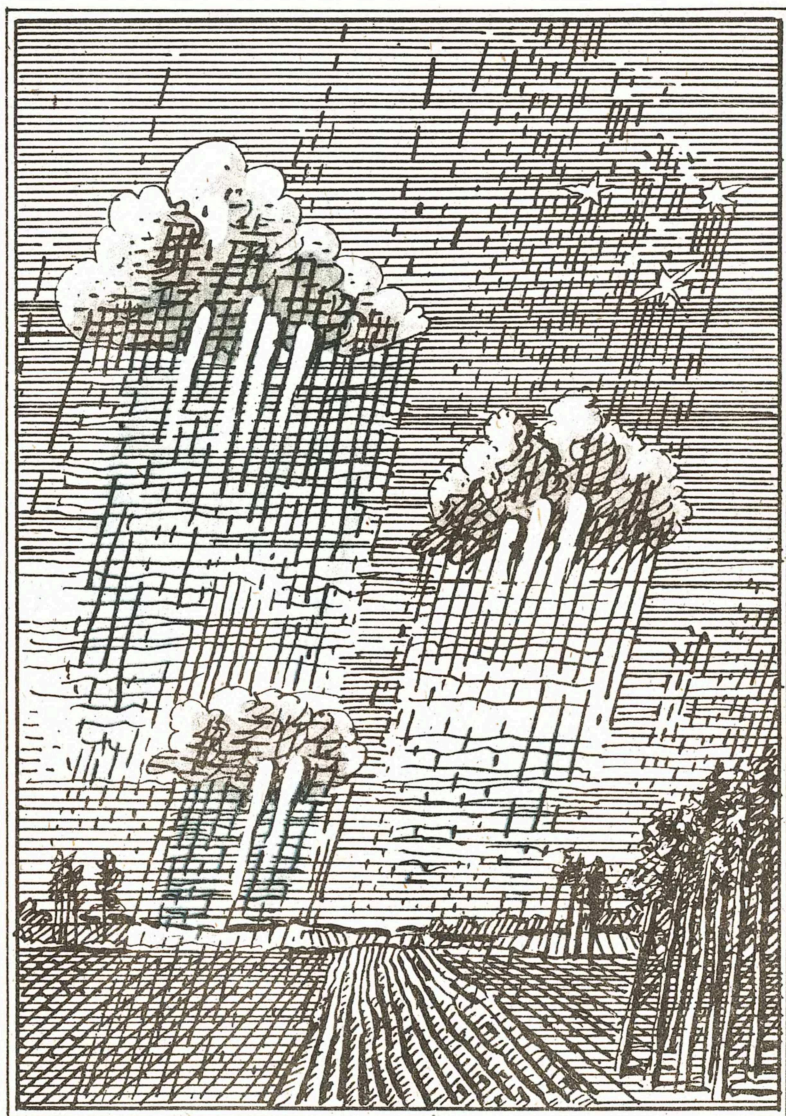
А. Н. Кренке,
доктор географических наук

КЛИМАТ ЗЕМЛИ: ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ, БУДУЩЕЕ

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ЧТО ТАКОЕ КЛИМАТ?	4
КЛИМАТЫ ПРОШЛОГО И ОЛЕДЕНЕНИЕ	20
АНТРОПОГЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА КЛИМАТ	42
ЛИТЕРАТУРА	47

Издательство «Знание»
Москва 1985



Владимир Михайлович КОТЛЯКОВ, член-корреспондент АН СССР, заведующий отделом гляциологии Института географии АН СССР, вице-президент Географического общества СССР, член бюро Международной комиссии снега и льда МГГС. Сфера научной деятельности — физическая география, гляциология, гидрология суши. Автор монографий «Снежный покров Антарктиды и его роль в современном оледенении материка», «Снежный покров Земли и ледники», «Изотопная и геохимическая гляциология», «Гляциологический словарь», а также ряда научно-популярных книг и брошюр, многих статей.

Михаил Григорьевич ГРОСВАЛЬД, доктор географических наук, старший научный сотрудник Института географии АН СССР, член бюро Секции гляциологии МГК СССР. Сфера научной деятельности — гляциология, палеоклиматология, геоморфология. Автор монографий «Развитие рельефа Саяно-Тувинского нагорья», «Оледенение Земли Франца-Иосифа», «Покровные ледники континентальных шельфов» и других, автор многих статей.

Александр Николаевич КРЕНКЕ, доктор географических наук, заведующий лабораторией климатологии Института географии АН СССР, член бюро Секции гляциологии МГК СССР. Сфера научной деятельности — климатология, гидрология суши, гляциология. Автор монографий «Оледенение Земли Франца-Иосифа», «Массообмен в ледниковых системах на территории СССР», автор многих статей.

Введение

В июне 1985 г. в Ленинграде в Государственном гидрологическом институте 190 специалистов из 37 научных институтов собрались на Всесоюзное совещание по проблеме антропогенных, т. е. вызванных человеком, изменений климата.

Как правильно подойти к волнующей всех людей проблеме?

Во-первых, надо рассмотреть, каким образом человек может влиять на климат — поставлять в атмосферу отсутствующие или редкие газы, обогащать ее продуктами горения — углекислым газом, увеличить содержание в ней пыли, которая может поглощать и отражать солнечное тепло, а также служить ядрами конденсации для капелек воды, образующих облака, которые, в свою очередь, влияют на тепловые потоки. Выбросы продуктов сгора-

ния авиационного топлива влияют на озоновый слой в атмосфере, вступая с ним в сложные химические реакции. Осушение болот, распашка степей, сведение лесов, орошение пустынь, застройка городов меняют потоки тепла и влаги, направленные от поверхности суши в атмосферу. Разлитая в океане нефть покрывает пленкой часть его поверхности, препятствуя испарению.

Во-вторых, необходимо выяснить с помощью теоретических расчетов и модельных экспериментов вопрос о том, как такие изменения могут повлиять на важные для человечества характеристики климата: температуру атмосферы, выпадение осадков, характер циркуляции воздушных масс.

В-третьих, надо постараться понять, как меняется климат сейчас, т. е. поставить диагноз изменений климата и оценить, в какой степени эти изменения можно объяс-

нить влиянием человеческой деятельности.

В-четвертых, необходимо восстановить изменения климата в прошлом до начала инструментальных метеонаблюдений, то есть до того, как человек начал серьезно воздействовать на климат, чтобы оценить особенности и размах естественных колебаний климата.

Наконец, в-пятых, на основании этих разработок необходимо составить прогноз возможных изменений климата, в том числе и вызванных человеком.

Все эти пять направлений работы нашли отражение на совещании. К ним добавилось и шестое направление — оценка вероятных глобальных климатических последствий ядерной войны.

Совещание подвело итоги работ последнего десятилетия, обратив главное внимание на возможность потепления из-за накопления в атмосфере углекислого газа. Но важнейшим результатом совещания мы считаем данную им оценку обмена углеродом между атмосферой и сушей (растительностью и почвой) и между атмосферой и океаном. Более глубоко сущность проблемы можно понять, рассмотрев структуру климатической системы в целом и ее изменения, чему посвящена настоящая брошюра.

Что такое климат?

С первобытных времен люди наблюдали и запоминали погоду. Записи об изменениях погоды можно найти в «Одиссее» (восстановленное по ней поле ветров в Средиземноморье близко к современному), Библии и других древних текстах. Уже тогда люди мечтали о прогнозе погоды и климата.

Для того чтобы зафиксировать наблюдения о погоде в количественной форме, понадобилось изобретение метеорологических приборов — термометра, барометра и др. В Европе их стали применять 300—350 лет назад, в XVII в. Первые сохранившиеся записи инструментальных метеорологических наблюдений в Москве были выполнены военным врачом Лерхе с сентября 1731 г. по февраль 1732 г. Затем эти наблюдения неоднократно прерывались и возобновлялись. Только с мая 1820 г. начались регулярные наблюдения погоды при Московском университете. В 1853 г. была организована магнитно-метеорологическая обсерватория при Межевом институте, а в 1879 г., немногим более 100 лет назад, начала наблюдения, не прерывающиеся до сих пор, метеорологическая обсерватория при Петровской земледельческой академии (ныне Сельскохозяйственной академии им. К. А. Тимирязева).

Наверное, на всем протяжении истории люди говорили о том, что погода или климат меняются, так как ни один день не повторял предыдущий и тем более ни один год не оказывался похожим на только что прошедший. Всегда выделялись годы с необычными на память поколения особенностями погоды. Действительно, погода непрерывно меняется, и эти изменения, их описание и прогноз представляют особую важную проблему. Прежде чем ответить на вопрос, насколько обоснованы суждения об изменении климата, определим само понятие «климат».

Климат — греческое слово, означающее «наклон». Этим подчеркивается ведущее значение

меняющегося с широтой и по сезонам года наклона солнечных лучей в условиях погоды разных участков нашей планеты. Пять «климатов» — две полярные, две умеренные и одну тропическую зоны выделил по наклону солнечных лучей астроном Гиппарх во II в. до н. э. Однако наклон солнечных лучей в данном месте практически не меняется от года к году, оставаясь одинаковым в определенные даты. Между тем условия погоды от года к году и даже от эпохи к эпохе различаются. Можно ли говорить в таком случае об изменениях климата и что понимать тогда под этим словом? Долгое время под климатом понимали набор средних многолетних значений характеристик погоды — давление воздуха, его температуру, количество осадков или повторяемость типов погоды. Многолетним периодом называли возможно более продолжительный интервал, охваченный наблюдениями.

Известно, однако, что в далеком прошлом климат Земли был совсем иным. Вспомним ледниковые отложения на Русской равнине или отпечатки растений в углях Шпицбергена. Вряд ли имеет смысл сопоставлять те климатические условия с современными. Для выбора периода осреднения был построен «спектр» колебаний погоды разной продолжительности, т. е. график, сопоставляющий амплитуды колебаний метеорологических элементов в разные по продолжительности циклы. Оказалось, что различаются не только колебания с периодом в один год или в несколько лет, но и с периодом в сотни и тысячи лет. Колебания же с периодами в 30—40 лет имеют мини-

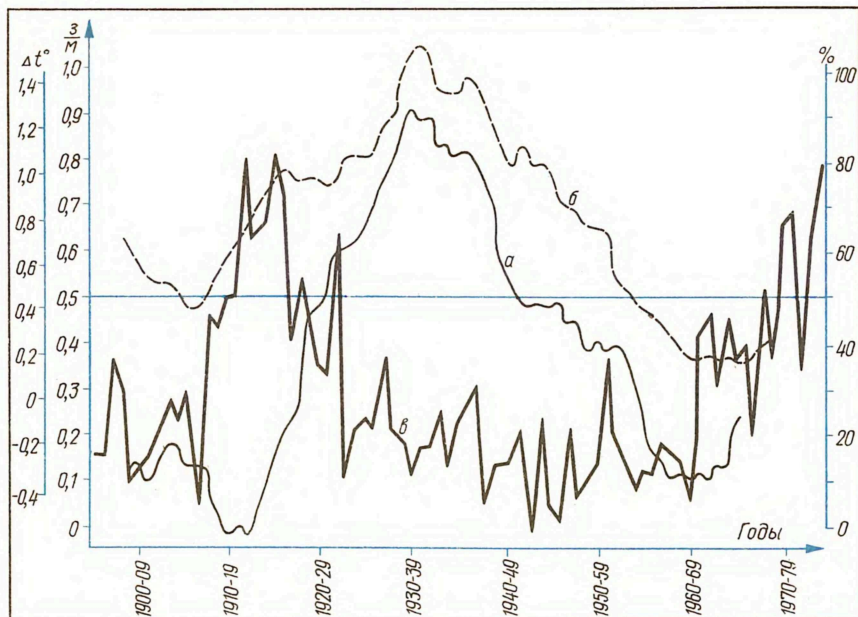
мальную амплитуду, и поэтому средняя за такой период достаточно хорошо характеризует соответствующую эпоху. Этот период и принято считать оптимальным для климатического осреднения погод.

Характеристика климата теперь не ограничивается средними, а включает, с одной стороны, статистические показатели изменений более короткого периода (от года к году, например), а с другой — взаимосвязи между изменениями разных элементов климата в одной точке и этими изменениями в разных точках. В результате членкорреспондент АН СССР А. С. Монин определил климат как статистический ансамбль состояний атмосферы за период порядка 30—40 лет (климатическую эпоху). Ниже мы увидим, что эти состояния определяются многими явлениями не только в атмосфере, но и вне ее, например, в океане. Поэтому понятие «климатическая система», включающее факторы, влияющие на климат, много шире понятия «климат атмосферы». Изменениями климата следует считать изменения от тридцатилетия к тридцатилетию или еще более длительного периода.

Изменение климата за тысячу лет

Посмотрим теперь, что нам известно об изменениях климата в настоящем и относительно недавнем прошлом. Начнем с результатов инструментальных наблюдений. Данные по температуре воздуха за последние 100 лет удалось представить в виде кривых, осредненных по всему северному полушарию для широт умеренного пояса (рис. 1, а). Что же оказалось?

От года к году отмечаются силь-



Р и с. 1. Многолетний ход годовых значений: а — аномалий температуры воздуха в широтной зоне $87,5^{\circ}$ — $72,5^{\circ}$ с. ш., Δt ; б — отношения продолжительности зональных процессов к меридиальным, z/m ; в — доли наступающих и стационарных ледников Швейцарии от общего их количества, %

ные температурные, в несколько градусов, колебания. В этих колебаниях для температур и особенно осадков во многих районах наблюдается квазидвухлетняя цикличность. Такую цикличность объясняют как эффект удвоения периодов годовых сезонных колебаний. Однако двухлетняя цикличность удерживается лишь 5—7 лет. Затем происходит перебой — аномалии одного знака два раза подряд, после чего цикличность восстанавливается вновь на 5—7 лет. Эта цикличность наиболее четко проявляется в смене направления циркуляции в нижнем слое стратосферы в экваториальном поясе — с западного на восточное и обратно.

Поэтому и фазы циклов получили название «западная» и «восточная», хотя, если принять гипотезу о резонансе с сезонными колебаниями, правильнее было бы говорить о «зимней» и «летней» фазах и ожидать сдвига циркуляции в течение соответствующих лет к зимнему или летнему типам.

Наряду с сильными межгодовыми существуют меньшие, но устойчивые изменения между климатическими эпохами длиной порядка 30 лет. Их амплитуда — доли градуса, но речь идет о средних за десятки лет на площади в десятки миллионов квадратных километров. В 1960—1980-е годы в умеренном поясе и, по-видимому, на всей Земле произошло

небольшое похолодание относительно предыдущих десятилетий 1930—1950-х годов. Но температуры на земном шаре в современную эпоху в среднем на $0,5^{\circ}$ выше, чем в начале XX столетия. В сравнении с предыдущими десятилетиями намного усилилась изменчивость условий погоды.

Это, как показал советский климатолог профессор Б. Л. Дзержеевский, отражает изменения типа циркуляции атмосферы. Если возмущения поля давления — циклоны и антициклоны — передвигаются вдоль широты, а вместе с ними перемещаются и воздушные массы, то мы говорим о зональной форме циркуляции. Если же широтная полоса атмосферных фронтов разрывается, а циклоны и воздушные массы смещаются по меридиану между широтами, то следует говорить о меридиональной форме циркуляции. Усиление меридиональной циркуляции приводит к частым северным и южным вторжениям и усиливает изменчивость погод. На рис. 1, б отражена повторяемость зональной и меридиональной форм циркуляции. Из сопоставления с температурной кривой (см. рис. 1, а) видно, что в умеренных широтах в среднем за год зональная циркуляция сопровождалась потеплением, а меридиональная — похолоданием. Заметно также, что в начале века и в последние десятилетия меридиональная циркуляция повторялась чаще, а в середине века — реже, чем в среднем за столетие.

Подобное учащение перемен погоды (рост частоты аномалий) в современную эпоху — не исключение. Анализ разрозненных метеорологических данных позволяет предполагать большие анома-

лии и в прошлом. Вспомним «Евгения Онегина»: «Снег выпал только в январе, на третье... (т. е. на пятнадцатое по новому стилю) в ночь». И произошло это где-то в Твери.

Заглянем глубже в прошлое. Сведения о погодных явлениях содержатся в исторических документах. Летописцы сообщают о засухах, наводнениях, морозах, полегании хлебов от дождей. В Москве уже с 1650 г. караульные стрельцы Приказа тайных дел Московского Кремля вели записи о погодных явлениях по балльной системе («мороз не велик», «морозец», «мороз», «великий мороз», «мороз непомерно лют»). Известно 2000 таких записей. Сохранилось 7000 походных журналов эпохи Петра Первого, содержащих также записи о погоде. Сотрудником Института географии АН СССР М. Е. Ляховым сделана попытка количественной интерпретации летописей. Разность холодных и теплых аномалий за обозримый период он связал со средними температурами и осадками и по разности аномалий восстановил эти средние осадки и температуры по сезонам для Центральной России и Киева с 1200 г.

Другой пример. В Японии известны даты цветения вишни за последние 1100 лет. Они испытывали колебания по годам в десятки дней, но и в среднем, например, в XII—XIV в. вишня зацветала на 6 дней позже, чем в IX—X веках. Потепление в IX—X вв. охватило все северное полушарие. Известны исторические данные об уменьшении в это время льдов в Северной Атлантике (плавания Эрика Рыжего и его сына до Америки), смещение земледелия на север

вплоть до Гренландии. Уменьшалась ледовитость и в XVI в., когда западноевропейские путешественники проникли на крайний север Западной Сибири и основали здесь богатый город Мангазею. Новое уменьшение ледовитости пришлось на середину XX в., создав благоприятные условия для развития Северного морского пути. И наоборот, ледовитость увеличивалась, а земледелие в Европе отступало к югу в холодные эпохи XIII—XIV и XVII—XIX вв. В теплый же XVI в. Москва снабжалась хлебом из Вологодчины, а не с Поволжья и Черноземья, как впоследствии. В XII в. славились английские вина, виноделие распространялось до северной Германии. Затем северная его граница резко отступила. Однако, например, в Саксонии оно процветало и в XVI в. и вновь зарождается в XX в., т. е. в века потеплений. Список таких исторических примеров можно продолжать долго.

О многих изменениях природы, вызванных колебаниями климата, мы можем судить не по историческим документам, а по «записям», оставляемым самой природой. Высоко в горах и в полярных странах сохраняются ледники — скопления льда из выпадающего там снега, не успевающего стаять за короткое лето. Наблюдения за инструментальный период показывают, что колебания «языков» ледников связаны с изменением типов циркуляции атмосферы и средней температуры воздуха (рис. 1, в). Действительно, доля наступавших ледников в Альпах, которая была значительной в холодный период начала XX в., оказалась ничтожной при потеплении середины века и снова увеличи-

лась в последние десятилетия.

Значит, и по данным о наступании ледников в прошлом мы можем судить о прежних климатических условиях. Следы ледников — морены — иногда удается датировать по радиоуглеродному возрасту находящихся в них или перекрытых ими древесных стволов, остатков торфа или другой органики¹. Дополнительные данные о возрасте морен, образованных за последние 700—1500 лет, получают по диаметру «пятен» (слоев) некоторых видов лишайников, растущих столетиями на камнях. Далекие от нынешних ледников морены имеют возраст более десятка тысяч лет и относятся, следовательно, к ледниковой эпохе, а ближайшие к ледникам морены датируются XVII—XX, XIII и I—II вв. (но очень редко промежуточными датами). Очевидно, именно на эти периоды приходились стадии наступания ледников, а следовательно, они были холодными и (или) богатыми снегом.

Однозначно разделить вклад похолоданий или роста осадков в продвижение ледников на основании только наблюдений за ними невозможно. Но есть и другой признак изменений климата — ширина, плотность, изотопный состав древесных колец. Все эти характеристики зависят от климатических условий, собственного возраста, здоровья, местных усло-

¹ Метод состоит в измерении относительной концентрации радиоактивного изотопа углерода ¹⁴C в образцах органических материалов. Животные и растения, части которых представлены в образцах, при жизни ассимилировали ¹⁴C из атмосферы, а после смерти, прекратив углеродный обмен с окружающей средой, постепенно теряют его вследствие распада. Период полураспада радиоуглерода равен 5570 ± 30 лет, в связи с чем этот метод применим к отложениям, возраст которых лежит в интервале от 500 до 40 тыс. лет.

вий питания, освещенности дерева и т. д. Климатический вклад выделяется при осреднении данных по многим деревьям или на отдельных деревьях-великанах, выживших благодаря оптимальным местным условиям.

Совмещение характерных аномалий ширины или плотности колец на разных деревьях позволяет составить типовые «дендрохронологические» шкалы за тысячи лет. Сложен вопрос об их климатическом истолковании. Так же как и рост ледников, прирост деревьев может зависеть от колебаний и тепла и влаги. Но в целом к теплу более чувствительны деревья, растущие в условиях его дефицита, т. е. у полярной или верхней (в горах) границы леса. К влаге же чувствительны деревья, растущие в условиях ее дефицита, — в Евразии на южной, степной границе леса.

Наконец, источником информации о климатических условиях прошлого служит состав растительных остатков (семян, пыльцы и др.), сохраняющихся в отложениях озер и торфяников. Колебания доли влаго- и суклолюбивых, теплолюбивых и морозоустойчивых растений указывают на соответствующие изменения климата. Сходство наборов видов растений, определяемое по составу пыльцы, собранной в древних отложениях, с их набором в современной растительности других местностей указывает на сходство климата прошлого с современным климатом там, где такие растения живут теперь. О количестве осадков в прошлом судят и по степени разложения торфа в его глубоких слоях.

Все перечисленные здесь методы восстановления климата, взятые в отдельности, недостаточно

надежны. Но если применение нескольких методов дает согласные результаты, такая надежность намного возрастает. Кривые изменения состава пыльцы, ширины древесных колец, числа упоминаний об аномалиях климата в летописях, изотопного состава льда для северной половины европейской территории СССР за последнее тысячелетие согласно свидетельствуют об основных климатических изменениях. Начало тысячелетия отмечалось потеплением более сильным, чем в нашем столетии, затем в XII—XV вв. последовало похолодание, в XVI в. новое потепление, сравнимое с современным, в XVII—XIX вв. — новое похолодание, когда обычным стало передвижение на коньках по редко замерзающим ныне голландским каналам, а в XX в. — новое потепление. Эпоху XIII—XIX вв. нередко называют «малым ледниковым периодом», хотя фактически было два холодных периода, разделенных теплым XVI столетием.

Исходя из анализа изменений климата за последнее тысячелетие, можно считать, что потепление XX в. подходит к концу. Оно не является исключительным, и поэтому его нельзя приписывать росту индустриализации. Вековые колебания климата за 1000 лет составляли около 1,5—2,0°С, что отвечает колебаниям границ природных зон и условий земледелия на 200—300 км по широте или на 250—300 м по высоте в горах. В начале нашей эры в холодную эпоху Ливия служила хлебной житницей древнего Рима.

Таким образом, вековые колебания климата в прошлом происходили так же, как и в наше время, и они влияли не только на

хозяйство, но и на ход истории.

На протяжении всего тысячелетия не обнаружено ясного тренда в изменениях климата, который колебался около некоторого среднего, что свидетельствует о постоянстве условий на суше за это время. Вспомним, что ветра в Средиземноморье не изменились со времен плавания Одиссея, т. е. за 3000 лет. Распашка лесов шла достаточно далеко и 1000 лет назад, о чем можно судить, например, по большой плотности земледельческих культур поздних «дьяковцев» на месте Москвы 1500 и более лет назад². Наконец, в последнее тысячелетие не замечено правильных колебаний климата. Эти колебания отражают случайные аномалии стационарного процесса, причем их энергия возрастает с ростом периода подобно амплитуде колебаний молекул в броуновском движении.

Однако, как мы уже говорили, судя по геологическим данным, климат не остается стационарным вечно. Если колебания климата в силу обратных связей приводят к изменению влияющих на него факторов, например, к расширению заснеженных площадей и появлению ледниковых покровов на равнине, стационарность климата нарушается, он попадает в неустойчивое состояние, чреватое климатическими катастрофами, т. е. переходами из одного устойчивого стационарного состояния в другое. Такое же неустойчивое состояние может быть вызвано и резким внешним вмешательством — астрономической катастрофой или ядерной войной.

Случайность очень важных для человечества колебаний климата делает крайне затруднительным их определенный прогноз с указанием даты и размаха. Такой прогноз станет возможным только на основе достаточно полного моделирования климатической системы, по оценкам экспертов, лишь примерно через 50 лет, хотя попытки такого моделирования с учетом отдельных факторов уже делаются. Зато случайный характер колебаний делает возможным вероятностный прогноз — оценку вероятности тех или других аномалий климата на основе его изученной истории. Внедрение такого прогноза в практику планирования народного хозяйства так, как это уже сделано с вероятностным прогнозом речного стока, — дело ближайшего будущего.

Пределы вероятностному прогнозу кладутся допущением о неизменности факторов, формирующих климат и его изменения. Учет физических основ климата и их изменений может коренным образом повлиять на вероятностный прогноз.

Физические факторы климата

Основу формирования климата на Земле составляет энергия Солнца. Как мы уже видели, изменение ее распределения по сезонам года приводит к годичному (сезонному) и квазидвухлетнему в резонанс к годичному циклам погод, т. е. к климату в его начальном понимании. Колебания годовых величин поступления солнечной энергии, заметные в геологическом масштабе времени, незначительны в масштабах столетий и десятилетий и не могут

² Дьяковцы — культура, выделенная по раскопкам у села Дьяково в Москве около Коломенского.

объяснить вековые колебания климата. Влияние других внешних факторов — солнечных (электронные потоки и магнитные излучения, отражающиеся в числе пятен на Солнце) или лунных (приливные силы, колеблющиеся с периодом в 1800 лет из-за колебаний расстояния до Луны) не объяснено физически и не доказано статистически. Однажды выявленные статистические связи устанавливались и менялись затем на обратные, циклы оказывались неустойчивыми во времени. Да и термически в такой многокомпонентной, со сложными и разнообразными связями системе, как климатическая, трудно предположить периодическую реакцию на слабые периодические внешние воздействия.

Гораздо более ощутимыми выглядят изменения условий усвоения или отражения и излучения солнечной энергии Землей. Эти условия определяются характером подстилающей поверхности и составом атмосферы, особенно содержанием в ней двуокиси углерода CO_2 . Этот газ поступает в атмосферу из земных недр при гниении (окислении) и сгорании органических остатков, при сгорании топлива, при дыхании растений, выделяется из океана и других природных вод при повышении их температуры. Он поглощается растениями при фотосинтезе, природными водами, в том числе океаном при понижении температуры, при химических реакциях в самой атмосфере. Двуокись углерода хорошо пропускает к Земле коротковолновую солнечную радиацию и поглощает излучаемую Землей длинноволновую (тепловую) радиацию. Возникает так называемый парниковый эффект.

На простых и сложных моделях показано, что удвоение количества CO_2 в атмосфере приведет к повышению средней температуры воздуха на $2\text{—}3^\circ\text{C}$. Это очень большая величина, превышающая исторически известные колебания климата.

Однако суждения о значительном влиянии двуокиси углерода на рост глобальной температуры воздуха отличаются излишней категоричностью. Даже в сложных моделях оценки влияния CO_2 не учитывается рост испарения с поверхности океана с последующим нарастанием облачности, уменьшающей поступление солнечной радиации, что сдерживает, если не прекращает, рост температуры воздуха. С другой стороны, увеличение водяных паров в атмосфере увеличивает парниковый эффект, что требует специального моделирования и расчетов. Климатическая система обладает и другими отрицательными обратными связями, обеспечивающими ее устойчивость. Например, наблюдаемое более сильное потепление в полярных районах по сравнению с тропиками должно привести к ослаблению зональной циркуляции, что вызывает некоторое похолодание. Учет таких связей может снизить ожидаемый эффект от роста CO_2 или даже изменить его знак. Анализ фактических колебаний температуры воздуха показал, что повышению средней температуры до некоторых пределов соответствует сильный ее рост в Западной Арктике, повышение там осадков, их уменьшение в зерновой зоне СССР, малые изменения температуры на юге нашей страны.

Аналогично двуокиси углерода

влияют на атмосферу так называемые малые газовые примеси. Их суммарный эффект приблизительно равен эффекту CO_2 . Расчеты И. Л. Кароля по радиационной (без учета циркуляции) модели показывают, что удвоение содержания CO_2 повысило бы температуру атмосферы на $2,5^\circ$, закиси азота (N_2O) на $0,7^\circ$, метана (CH_4) на $0,4^\circ$, водяного пара (H_2O) на $0,3^\circ$, хлорфторуглеродных соединений — фреонов (CFCl_3 , CF_2Cl_2 и др.) на $0,8^\circ$ и т. д. Почти две трети поступления метана дает биосфера, в том числе половину — сельскохозяйственные, в основном рисовые поля, животноводство, сгорание топлива. Природные источники — это болота, термитники, выделяющие огромное количество метана. Источники N_2O находятся в основном в природной биосфере, антропогенный источник не превышает 20%. Расходятся метан и закись азота на химические реакции в атмосфере и в океане. Окиси азота (NO и NO_2) образуются на 95% за счет наземных естественных и антропогенных источников, на 3—4% за счет химических процессов в атмосфере и на 1—2% за счет выбросов реактивных двигателей авиации и спутников. Основной источник фреонов — химическая промышленность. Природные источники содержат главным образом CCl_4 . Хлоруглеродные соединения расходуются главным образом в атмосферных химических реакциях.

Важнейший фактор формирования климата атмосферы — взвешенные в ней частицы — жидкие и твердые аэрозоли. Они могут быть разделены на четыре основные группы: сернистые ($\text{NH}(\text{SO}_4)$ и H_2SO_4 — вулканического и про-

мышленного происхождения), морские (соединения морских солей), минеральные (пыль с земной поверхности) и углеводородные (в основном сажа) промышленного происхождения. Сернистый и морской аэрозоли в основном рассеивают солнечное тепло и понижают температуру атмосферы, минеральный рассеивает и поглощает тепло, сажевый главным образом интенсивно поглощает. Рассеяние тепла аэрозолями приводит к уходу его в космос и охлаждению всей системы «Земля — атмосфера». Поглощение нагревает слои атмосферы, богатые аэрозолем, но уменьшает поступление тепла к земной поверхности. В целом аэрозоли и вообще запыление атмосферы понижают температуру земной поверхности.

Аэрозоли распространены в стратосфере и тропосфере. Характерный срок их жизни в тропосфере — неделя, обычно они накапливаются в нижних слоях, хотя во время пыльных бурь поднимаются и в среднюю тропосферу. В стратосфере аэрозоли держатся годами. Радиоактивная пыль от термоядерных взрывов в атмосфере лишь на второй год переносилась в южное полушарие и оседала в снегах Антарктиды.

Следующий фактор формирования климата — свойства подстилающей поверхности, т. е. распределение суши, океанов и снежно-ледяных покровов, рельеф и природные зоны суши, температура океанов. За последние столетия и даже тысячелетия распределение океанов и суши, а также рельеф суши практически не менялись. Поэтому, хотя перечисленные факторы чрезвычайно важны для формирования климата и вызывают

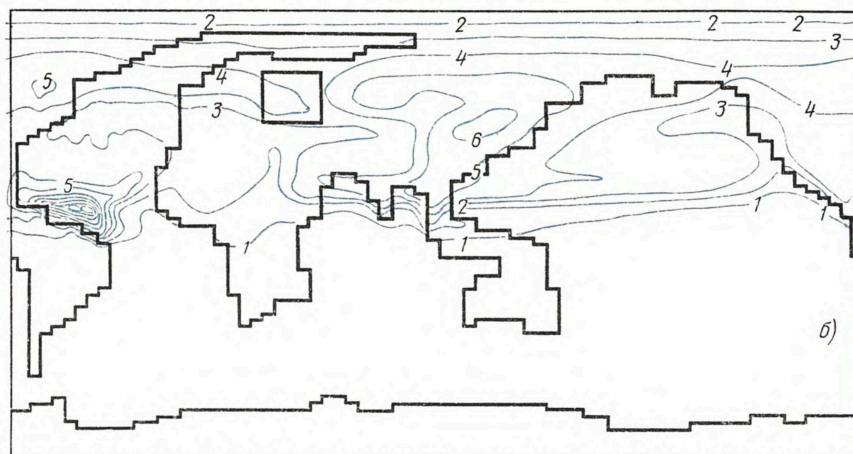
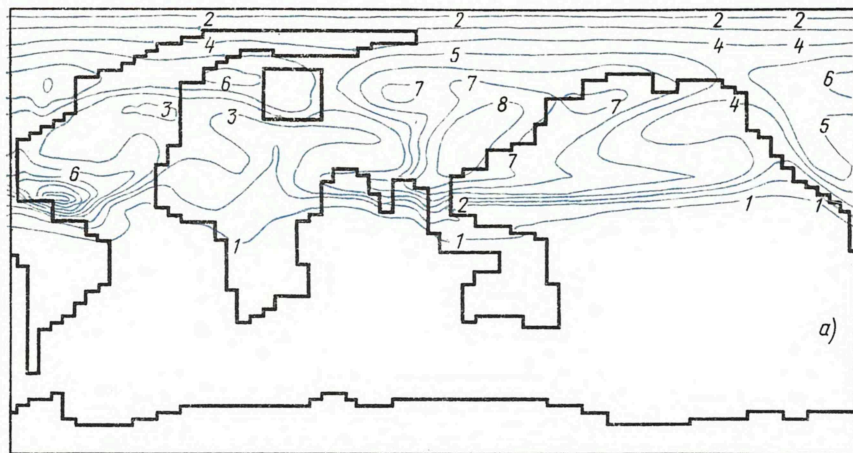
основные особенности циркуляции атмосферы и распределения давления, ветра, осадков и температур на континентах, мы их здесь рассматривать не будем. Переменными являются температуры и течения в океане, распространение снега и льда, положение и свойства природных зон.

Океаны занимают более двух третей поверхности Земли, обладают массой, в 400 раз большей массы атмосферы, и соответственно гораздо большей тепловой инерцией, еще усиливаемой большой теплоемкостью воды. Они поглощают почти все падающее на них солнечное тепло (их альбедо, т. е. отношение отражения к поступлению тепла, равно лишь 8%). Основной расход тепла приходится на радиационное излучение (51%) и испарение (440 тыс. км³ воды, на что тратится 42% солнечного тепла). Прямой теплообмен с воздухом имеет меняющееся направление. В среднем океан нагревает воздух, но результирующий расход тепла составляет лишь 7% прихода и лишь $\frac{1}{6}$ от затрат тепла на испарение. Однако, по-видимому, именно этот прямой и скрытый (через тепло испарения) теплообмен океана с воздухом объясняет основные колебания погоды и климата, реализуемые через колебания циркуляции атмосферы.

Благодаря большой инерционности океана создаются условия для собственных колебаний в системе «океан — атмосфера» без всяких внешних изменений. Случайно возникшая аномалия в морских течениях, например флуктуация струи Гольфстрима, вызывает изменение нагрева атмосферы, что, в свою очередь, отражается в температуре воды и со сдвигом

во времени вновь отразится в условиях атмосферы. Яркий пример — связь «южной осцилляции», т. е. колебаний давления с периодом три года между районами острова Пасхи и Индонезией с ответной реакцией океана — нагонов воды от Соломоновых островов к берегам Южной Америки (течение Эль Ниньо). Аномально большой размах этих колебаний (усиление «Эль Ниньо») вызывает резкие аномалии погоды в Америке, а возможно, и на всей Земле. Подобные же прямые и обратные связи со сдвигом в полтора-два года обнаружены и между аномалиями в атмосфере и в океане на севере Атлантики.

Академик Г. И. Марчук показал (рис. 2), что аномалии погоды на Русской равнине при сдвиге в полмесяца находятся под наибольшим влиянием условий в районе Исландии, где тепло переходит из океана в атмосферу, чему способствуют сильные ветры, волны и большой контраст температур воды и воздуха. При сдвиге на полгода и год наибольшую связь с аномалиями на Русской равнине имеют аномалии в районе Мексиканского залива и Карибского моря, т. е. там, где зарождается Гольфстрим и формируются его свойства. Области океана, где процессы взаимодействия океана и атмосферы особенно активны, Г. И. Марчук назвал энергоактивными зонами. Аналогичные энергоактивные зоны, процессы в которых определяют колебания погоды в Америке, существуют в Тихом океане. В энергоактивных зонах организованы сейчас крупные экспедиции с участием многих научных судов. Советская программа этих исследований называется «Разрезы», американская в Тихом



Р и с. 2. Изолинии равной интенсивности влияния поля температуры Земли на аномалию температуры воздуха на Русской равнине через а) 5 месяцев; б) 6 месяцев.

океане — «ТОГА».

Есть все основания считать, что подобные же связи аномалий в океане и атмосфере существуют и на временных интервалах с характерным временем в сотни лет. Реконструированные по измерениям температуры воды с ан-

глийских парусников XVIII в. поля температур и давления в Атлантике во время «малого ледникового периода» заставляют предполагать ослабление в то время направленной к Европе ветви Гольфстрима, раздвоение исландского минимума давления со сме-

щением его на запад и общим ослаблением, одновременное ослабление азорского максимума. Одна из причин — быстрое углубление циклонов уже у берегов Америки, где было больше, чем сейчас, снега и резче контраст с океаном. При этом преобладал меридиональный тип циркуляции атмосферы. Так условия на суше усиливали аномалии в море. Можно полагать, что именно аномалии климата в районе Кубы, связанные с изменениями силы осцилляций течения Эль Ниньо, несут информацию о будущих аномалиях в нашей стране. Подобным образом возникают глобальные цепочки колебаний в климатической системе.

Особое значение имеют снежный покров, ледяной покров моря и оледенение суши. Все три играют роль усилителя в колебаниях климатической системы. Понижение температуры воздуха ведет к распространению льдов и снегов, повышающих альбедо поверхности в несколько раз, что вызывает дальнейшее похолодание. Противоположная, но также положительная обратная связь возникает при повышении температуры. Однако разные нивально-гляциальные системы усиливают колебания разного периода. Сезонный снежный покров — усилитель в системе межгодовых колебаний, покровные ледники обладают колоссальной инерцией в силу медленного распространения в них тепла, больших его затрат на таяние, медленного по сравнению с атмосферой и океаном движения. Поэтому они, воздействуя на климат своей формой, альбедо и захватом тепла из воздуха, создают собственные колебания в климатической системе с периодами в тысячи или даже десятки тысяч

лет, приводящие к ледниковым периодам. Усилителем же вековых и внутривековых колебаний климатической системы служит ледяной покров арктических морей. Именно поэтому анализ наблюдений вековых колебаний свидетельствует, что небольшой их средней амплитуде соответствует в 5—10 раз большая их амплитуда в Западной Арктике, в районе Шпицбергена, находящемся в зоне сменяющимся распространением морских льдов.

Наконец, существенную роль в изменениях климата могут сыграть изменения на поверхности суши. Особенно важна отражательная способность поверхности, а разные природные зоны обладают неодинаковым альбедо:

сухой снег на ледниках	0,80 и более
тающий снег на ледниках	0,60
лед на ледниках	0,30
песчаная пустыня	0,35
каменная пустыня	0,30
лиственный лес	0,23
хвойный лес	0,14
степь	0,16
обнаженная пашня	0,10
культурная растительность	0,16
тундра	0,15

Приведенные цифры показывают, что замена леса на гарь или черную пашню, а также орошение пустыни приведут к нагреву земли, большому усвоению солнечного тепла, а замена леса на культурную растительность — к повышению альбедо и охлаждению.

Различные типы поверхности суши по-разному испаряют влагу и неодинаково распределяют теплопередачу от суши к воздуху скрытым теплом испарения и прямой теплоотдачей. Если на поверхности океана турбулентный пря-

мой нагрев воздуха в 6 раз меньше, чем теплоотдача в скрытом виде через атмосферу, то для суши это соотношение увеличивается приблизительно до одной второй. На испарение расходуется две трети и на прямую теплоотдачу одна треть радиационного тепла. В таблице сравниваются доли некоторых типов поверхности в площади суши и в типах теплоотдачи от нее.

Тропические леса выступают в роли энергоактивной зоны, выделяющей в атмосферу влагу и скрытое тепло испарения. Пустыни, в особенности тропические, также играют роль энергоактивной зоны, выделяющей явное тепло, которое нагревает приземный слой атмосферы. Ледники представляют собой энергоактивные зоны, поглощающие тепло. В остальных зонах доля в теплообмене близка к их доле в поверхности суши. Роль энергоактивных зон суши соизмерима с ролью энергоактивных зон океана.

Итак, среди всех факторов, формирующих климат, наиболее подвержены изменениям малые примеси газов, пыли и аэрозолей в атмосфере, температура океана как следствие колебаний его течений, типы поверхности суши и среди них в основном типы растительного покрова, а также распространение снега и льда. В качестве примера влияния на климат особенностей поверхности суши остановимся подробнее на климатической роли снежного покрова.

Снежный покров и климат

Когда суша или ледовитое море покрываются снегом, процессы тепловлагообмена над ними кар-

динально меняются по сравнению с бесснежной сушей и безледным океаном. Различия вызываются особыми климатообразующими свойствами снежного покрова. Это прежде всего малая теплопроводность снега, его высокая отражательная и излучательная способность, низкое давление водяного пара у поверхности и большие затраты тепла на таяние снега.

Свежий сухой снег служит прекрасным изолятором. С течением времени и ростом плотности снежного покрова его изолирующая способность уменьшается, но на протяжении зимы толщина снега продолжает увеличиваться, так что он остается надежным укрытием для растительности и почвы. А на море существенно снижаются потери тепла из океана в атмосферу, как только темный молодой лед покрывается снегом.

В яркий безоблачный день на свежий снег невозможно смотреть — так ярко блестит он под лучами солнца. Это происходит оттого, что чистый и сухой снежный покров отражает около 95% коротковолновой радиации в диапазоне 0,3—0,9 мкм, включая и видимую часть спектра. Высокая отражательная способность снега быстро меняется с длиной волны поступающей радиации, так что при более длинных волнах снег становится плохим отражателем, но зато хорошим излучателем. Излучательная способность снега приближается к единице и лишь немного падает с увеличением размера зерен. Чаще всего она равна 0,98—0,99, т. е. близка к излучательной способности абсолютного черного тела. В результате поверхность снега охлаждается гораздо быстрее, чем выше-

Доля типов поверхности суши в площади и теплоотдаче в атмосферу

Типы поверхности	Доля в площади, %	Доля в испарении (конденсация), %	Доля в прямом нагреве воздуха (охлаждение), %	Доля в суммарной теплоотдаче в атмосферу, %
Тропические и экваториальные леса	14	47	-9	27
Леса субтропического и умеренного поясов	22	23	15	20
Саванны	10	7	15	10
Степи	13	7	14	9
Тропические пустыни и полупустыни	15	8	48	23
Пустыни и полупустыни субтропического и умеренного поясов	8	5	19	10
Тундры и лесотундры	8	4	6	6
Ледники	10	-1	-8	-4

лежащий воздух, и развиваются температурные инверсии.

Такие особенности снежного покрова были подмечены еще выдающимся русским климатологом А. И. Воейковым, который в конце XIX в. пришел к выводу, что температура поверхности снежного покрова почти всегда ниже температуры поверхности почвы, не покрытой снегом, и ниже температуры поверхностных слоев воздуха, это отражается даже на средних температурах воздуха зимой.

Особенно сильные радиационные охлаждения, обязанные снежному покрову, случаются в Сибири, на северо-востоке Северной Америки и в Антарктиде. В результате формируются очень холодные воздушные массы со слабыми ветрами и ясным небом, и в их нижнем 1—2-километровом слое температура растет с высотой. Из-за устойчивой инверсионной стратификации атмосферы эти воздушные массы, называемые

континентальными полярными, плохо рассеивают загрязнители и туман. В системе общей циркуляции атмосферы в Северной Америке и Евразии они движутся в юго-восточном направлении и способствуют охлаждению умеренных широт.

Давление пара у поверхности снега не может быть больше максимального давления при 0°C, равного 610 Па. Это относительно низкая величина, и она становится еще меньше при отрицательных температурах снежного покрова. В результате по мере понижения температуры воздуха водяной пар сублимируется на поверхности снега или снежные кристаллы формируются прямо в воздухе. Следовательно, снежный покров «выжимает» атмосферную влагу и благодаря этому процессу зимой еще больше увеличивает альбедо поверхности.

Над снегом сильно уменьшен или совсем отсутствует конвективный прогрев тропосферы из-за

ограничения температуры поверхности 0°C ; вследствие высокого альбедо снега примерно втрое снижается поглощенная коротковолновая радиация. Если принять среднюю за год площадь снежного и ледяного покрова в обоих полушариях равной 62 млн. км^2 , то при неизменной облачности и некоторых других допущениях окажется, что приход солнечной радиации из-за снежного покрова снижается на $13 \cdot 10^{19} \text{ кДж/год}$, или более чем на 4% радиации, поглощаемой всей планетой, что способствует широтной дифференциации климата.

С началом снеготаяния некоторые из отмеченных свойств снежного покрова изменяются. Заметно возрастают теплопроводность снега и давление водяного пара у поверхности. Существенным фактором в энергетическом балансе Земли и атмосферы становится удельная (скрытая) теплота фазовых переходов снега. Ведь переход снега в воду требует около 80 кал/г (334 Дж/г), а расход тепла при испарении снега или выделение его при конденсации составляет 676 кал/г (2834 Дж/г).

Над тающим снегом резко возрастает содержание водяных паров в нижнем слое атмосферы. На высоте $0,5 \text{ м}$ над поверхностью снега оно иногда увеличивается вдвое. Влажный слой воздуха становится теплее вышележащей атмосферы. Подобный крупномасштабный процесс происходит каждое лето в Центральной Арктике. Над снегом, покрывающим паковый лед, образуются плотные низкие слоистые облака. Они поглощают приходящую коротковолновую радиацию, прогреваются на один — два градуса и направ-

ляют тепло к снежной поверхности.

Сегодня не подлежит сомнению, что снег оказывает сильное охлаждающее и высушивающее влияние на прилегающий воздух и способствует превращению морских полярных воздушных масс в континентальный полярный воздух. Это особенно заметно в аномальные по снежности годы. Низкие показатели средней месячной температуры часто связаны с исключительно сильными снегопадами, причем особенно низкие температуры отмечаются в течение нескольких дней, следующих за снегопадом.

Исследования в СССР, выполненные еще в 50-х годах, показали влияние снежного покрова Евразии на формирование сибирского антициклона. Аналогична роль снежного покрова Северной Америки в возникновении канадского антициклона. Замечено, что пути циклонов в Евразии и Америке часто следуют вдоль южной границы снежного покрова и здесь выпадают новые порции снега. Свежевыпавший снег усиливает иссушающую и охлаждающую роль прежнего покрова и способствует разрастанию снега к югу. Это один из нескольких природных механизмов, благодаря которым распространение сезонного снежного покрова отличается большим постоянством. Увеличение толщины и продолжительности зимне-весеннего снежного покрова в Тибете приводит к понижению летних температур в тропосфере, запаздыванию и ослаблению летних муссонов.

Граница заснеженных и бесснежных площадей представляет собой довольно широкую переходную зону, которая смещается по сезо-

нам. Территория к северу от переходной зоны характеризуется отрицательной температурой поверхности, температурными инверсиями, областями высокого давления, преобладанием антициклональной циркуляции и высокой чувствительностью поверхностного тепловлагообмена к прямой солнечной радиации в ясную погоду.

В переходной зоне действует большое количество обратных связей, участвующих в формировании климата, в которых важную роль играет снежный покров. Во-первых, покрытая снегом поверхность поглощает меньше радиации и охлаждает окружающий воздух. В результате снега откладывается больше, и заснеженная площадь расширяется.

Во-вторых, радиационное охлаждение формирует области повышенного давления над снежным покровом, а холодный полярный воздух переносится в более низкие широты. Вдоль полярных фронтов выпадает снег, что приводит к еще большему распространению снежного покрова, и последующее атмосферное возмущение проникает дальше на юг. Такая связь действует осенью и зимой, когда поступление солнечной радиации к снегу относительно мало. Весной, когда инсоляция внутри континента велика, она меняется на обратную. Область высокого давления препятствует дальнейшей аккумуляции, но способствует ясной погоде и высокому приходу радиации к поверхности. В результате альbedo снежной поверхности снижается, возрастает таяние, и снежный покров разрушается.

В-третьих, испарение со снежного покрова увеличивает атмо-

сферную влажность, в результате чего растет противоиоизлучение атмосферы, ускоряется испарение и образуются облака. Они прогреваются за счет поглощенной солнечной радиации и радиации, отраженной от снега. Когда же снег под облаками тает, их альbedo растет, и облака начинают охлаждать-ся.

В-четвертых, в горах при обильном выпадении снега граница снежного покрова опускается, окружающий район охлаждается, еще больше осадков откладывается в твердой фазе и снежный покров продолжает расширяться.

Условия в переходной зоне, для которой характерны перечисленные обратные связи, играют важную роль в распространении снежного покрова. Малейшие изменения радиационного режима в этой зоне могут вызвать изменения альbedo поверхности, скорости ее прогрева и испарения. Поэтому на распространение снежного покрова может сильно влиять увеличенная замутненность атмосферы и возрастающий уровень двуокиси углерода.

Материалы космических наблюдений, впервые полученные во второй половине 60-х годов, позволили изучить современные глобальные изменения снежного покрова. За прошедшие 15 лет снежность на земном шаре несколько возросла, особенно в Азии, и это привело к изменению альbedo поверхности. В 1974—1979 гг. отмечено постепенное увеличение отражательной способности поверхности в северном полушарии и уменьшение — в южном. Такие изменения находятся в соответствии с наблюдаемым сейчас похолоданием в северном полушарии. Во второй половине 70-х годов нижний слой

тропосферы к северу от 65° с. ш. охладился почти на градус по сравнению с периодом 1949—1973 гг. В последнее время часто повторялись холодные и снежные зимы, за которыми иногда следовали исключительно холодные летние сезоны.

Подобные холодные и снежные периоды должны предвещать и сопровождать ледниковые эпохи. В механизме возникновения и деградации оледенений роль снежного покрова и свойственных ему обратных связей была очень велика. Любое продолжительное глобальное похолодание приводит к росту площадей и продолжительности залегания снежного покрова, тем самым увеличивает глобальное альbedo и способствует дальнейшему похолоданию. И наоборот, если произойдет сокращение снежного покрова на Земле, глобальное альbedo уменьшится, вызвав еще большее потепление.

Возможное распространение снежного покрова в плейстоцене мало известно (рис. 3). Однако ясно, что существование снега на суше и морском льду делает высокие широты исключительно чувствительными к климатическим изменениям. Численное моделирование энергетического баланса Земли свидетельствует о значительной чувствительности суши, покрытой снегом, к солнечной постоянной. Понижение на 4% солнечной постоянной в одной из климатических моделей сдвинуло зону максимальных ежегодных снегопадов с 70° с. ш., которую она занимает сейчас, до 50° с. ш., а пик снегонакопления — с 72° с. ш. в наше время до 55° с. ш.

Широкое распространение снежного покрова в некоторых областях земного шара могло при-

вести к формированию ледников благодаря цепочке обратных связей, действующих и сейчас. Высокое альbedo снежного покрова над обширными территориями, покрытыми снегом длительное время, вызывают тропосферные похолодания. Они, в свою очередь, приводят к формированию барической ложбины в высотной циркуляции атмосферы. Такой характер потоков ведет к преобладанию более низких температур над обширными заснеженными территориями, задержке таяния и росту снегопадов на восточных и юго-восточных окраинах этих областей. Так, по-видимому, формировался Лаврентьевский ледниковый покров, начавший расти на плато в восточной части Канадского Арктического архипелага.

Таким образом, в глобальной климатической системе снежный покров олицетворяет и причину и следствие. Он представляет собой результат циркуляции атмосферы, но, в свою очередь, и сам вносит в нее изменения. Самые небольшие изменения в средней поверхностной температуре Земли снежный покров усиливает действием обратной связи между распространением снега и планетарным альbedo. Глобальную климатическую роль снежного покрова трудно отделить от влияния на климат материковых ледниковых покровов; надо помнить, что ледниковые периоды на Земле были всегда и периодами повышенной снежности.

Климаты прошлого и оледенение

Ледниковые эры на Земле

Для понимания природы современного климата и тем более для

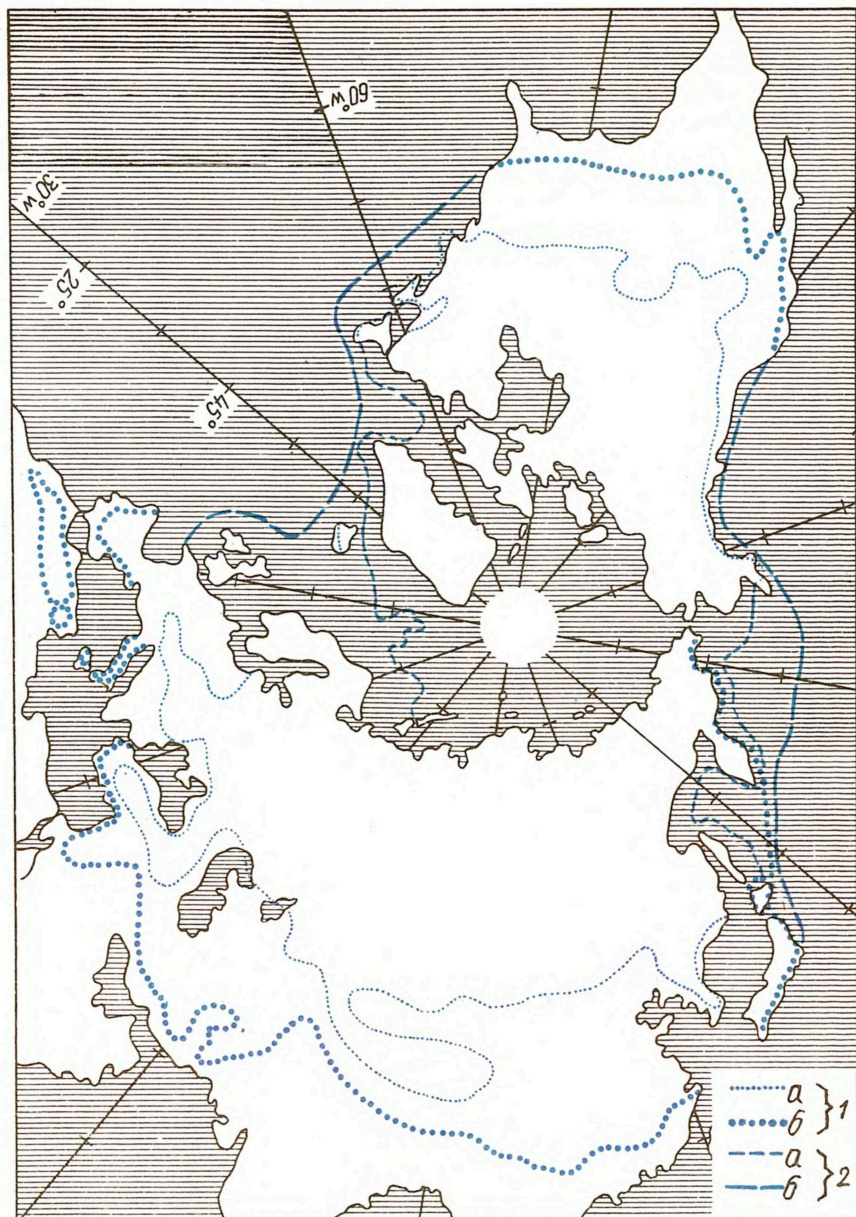


Рис. 3. Распространение сезонного снежного покрова на суше (1) и на морских льдах (2) в январе 1980 г. (а) и зимой в последнюю ледниковую эпоху 18 тыс. лет назад (б)

прогноза его предстоящих изменений необходимо знать климатическую историю. Последней занимается палеоклиматология — научная дисциплина, изучающая климаты геологического прошлого и причины их изменений в местном, региональном и глобальном масштабах.

Особенно много внимания палеоклиматологи уделяют изучению вариаций древних температур, особенно эпохальных, размах которых во многих случаях составлял 8—12° С. Для целей палеотемпературных реконструкций широко используются ископаемые остатки растений и животных, данные литологии (т. е. результаты изучения минералогии, петрографии и физико-химических свойств осадочных пород), палеогеографии и изотопных исследований.

Пользуясь палеонтологическими и литологическими индикаторами климата, геологи уже сравнительно давно начали составлять палеоклиматические карты материков для различных эр и периодов прошлого Земли, выделяя на них холодные, умеренные и жаркие зоны, зоны с влажным и засушливым климатом.

Особенно определенный характер имеют палеоклиматические выводы, базирующиеся на данных об изменениях ледников. О размерах и колебаниях оледенения, а значит, и об изменениях климата в отдаленном прошлом специалисты судят главным образом по геологическим следам ледников, особенно по распространению древних ледниковых отложений — морен и тиллитов. Моренами называют скопления рыхлого обломочного материала, перенесенного и отложенного ледниками. Обычно они представляют собой несорти-

рованные и неслоистые массы суглинка и песка с включениями щебня и валунов, часто принесенных издалека и имеющих форму обточенных с нескольких сторон многогранников, шероховатых штрихами и шрамами. Для «молодых», т. е. не слишком сильно размытых и не захороненных под другими толщами, морен характерен типично ледниковый — беспорядочно холмистый и грядовый рельеф, знакомый каждому, кто видел Валдай или Клинско-Дмитровскую гряду. А тиллиты — это морены, которые были образованы наиболее древними, дочетвертичными оледенениями и успели литифицироваться, т. е. стать твердой горной породой.

Присутствие морен на земной поверхности или в разрезах земной коры указывает на то, что районы их распространения покрывались ледниками, а география нахонок древних морен позволяет судить о положении и размерах этих ледников. А если вместе с моренами находят также мощные толщи галечников и песков, накопившихся у ледникового края в результате действия потоков талой воды, и ленточные глины, отложенные в приледниковых озерах, и толщи безвалунных карбонатных суглинков — лёссов, связанных с перевеванием моренных отложений ледниковыми ветрами, то выводы о древних оледенениях становятся особенно доказательными. К тому же геологи нередко могут видеть, что толщи валунных суглинков налегают на скальные поверхности, отшлифованные льдом и изборожденные ледниковыми шрамами; по ориентировке таких шрамов и по траекториям переноса ледниковых валунов удается восстанавливать направления

движения древнего льда и центры его растекания.

Установив место и масштабы оледенения, а также его геологический возраст (что делается по возрасту слоев, которые подстилают и перекрывают морену), исследователь сразу получает богатую палеоклиматическую информацию; мы сейчас хорошо знаем, при каких условиях могут существовать ледниковые покровы, подобные шпицбергенским, гренландским или антарктическим...

В самом деле, ледники, т. е. движущиеся массы природного льда, принявшие форму потоков, выпуклых щитов или плавучих плит, образуются почти исключительно за счет накопления и метаморфизма снега. Поэтому они могли возникать и развиваться только в обстановке интенсивных снегопадов и низких температур воздуха, как зимних, так и летних. Средние годовые температуры над внутренними областями Гренландии и Западной Антарктиды сейчас опускаются ниже -30°C , а над безжизненным плато Восточной Антарктиды варьируют между -50 и -57°C . Столь холодный климат этих областей обусловлен несколькими причинами: он связан с тяготением ледниковых покровов к полярным широтам и с весьма большой — до 3—4 км над уровнем моря — высотой ледниковых щитов. Он обязан также уникальным значениям отражательной способности холодных снежных поверхностей, достигающим, а нередко и превышающим 90%, и особым радиационным свойствам снега и льда, а именно их способности излучать в космос практически всю энергию, получаемую от теплообмена с атмосферой.

В результате над большими лед-

никовыми покровами формируются ледниковые антициклоны — массы холодного воздуха, для которых характерно высокое давление, нисходящее движение и высокая прозрачность. Сильное охлаждение и ледовитость характерны и для сопредельных частей Мирового океана, куда поступают внушительные массы льда в виде айсбергов (до 2000 км^3 в год из Антарктиды и около 480 км^3 от ледников Арктики) и на которые периодически распространяются антициклоны. Холодные воздушные массы, круглый год «стационарированные» над большими ледниковыми покровами, оказываются важными факторами глобальной атмосферной циркуляции. Образуются так называемые блокирующие системы, они затрудняют прохождение циклонов над такими покровами, отклоняют эти циклоны к периферии покровов и создают резкие контрасты в температурах и давлении атмосферы над областями оледенений, с одной стороны, и ближайшими к ним областями теплого океана — с другой. Анализ современных климатических карт показывает, что только по соседству с ледниковыми покровами над океаном существуют круглогодичные центры низкого атмосферного давления, которые рожают мощные циклоны. Один из таких центров — исландская депрессия, приуроченная к зоне контакта теплого Гольфстрима с холодными водами, омывающими Гренландию, второй — субантарктическая депрессия, которая возникла при столкновении теплых течений, следующих с севера, с водой ледовитых антарктических морей. Таким образом, ледниковые покровы сами создают циркуляцию атмосферы, которая благо-

приятна для их существования, ведь те самые циклоны, которые рождаются в исландской и субантарктической депрессиях, вторгаются в краевые зоны соседних ледниковых покровов и питают их снегом. Наблюдения гляциологов показывают: если во внутренних областях Антарктиды и Гренландии атмосферные осадки очень скудны и во многих местах не достигают даже 50 мм в год, то на краевых склонах тех же ледниковых покровов они возрастают до 700—900 мм в год и более.

Эпохи древних оледенений были временем глубочайших изменений климата, причем повторялись они многократно. Об этой многократности можно судить по присутствию тиллитов в разрезах осадочных толщ протерозойского, рифейского и палеозойского возраста почти всех материков, а также по обилию морен и «холодных» слоев в сравнительно молодых (верхнекайнозойских) отложениях суши и океанского дна. В соответствии с этими данными сейчас выделяют не менее четырех крупных ледниковых интервалов истории Земли, каждый из которых имел длительность от нескольких десятков до 200—300 млн. лет; такие интервалы получили название ледниковых эр.

Древнейшая ледниковая эра (рис. 4) приходилась на интервал от 2,6 до 2,2 млрд. лет назад, следующая — от 900 до 600 млн. лет назад, еще одна — от 450 до 240 млн. лет назад и, наконец, последняя, еще не закончившаяся, началась около 20—30 млн. лет назад в южном и 3 млн. лет назад — в северном полушарии. Каждая такая эра состояла из нескольких ледниковых периодов, соизмеримых по длительности с плейстоце-

ном, или четвертичным периодом, а каждый период — из большого числа ледниковых эпох.

Климаты ледниковых эпох

Вряд ли можно сомневаться, что климат каждой ледниковой эпохи имел свою специфику. Вместе с тем геологические данные свидетельствуют, что и во всех древних и древнейших оледенениях и в их климатах было много общего. Все оледенения охватывали только полярные и в меньшей степени умеренные широты, все они были временем глубоких похолоданий и более контрастной, чем современная, климатической зональности. И уж, конечно, все оледенения знаменовались резким увеличением количества природных льдов, усилением связанных со льдами явлений. Чтобы понять суть изменений природы, происходивших в эпохи оледенений, рассмотрим обстановку последней из таких эпох — валдайской, или вюрмской. Эта эпоха заняла последние 100 тыс. лет истории Земли, причем ее максимальная стадия, во время которой масса ледников была наибольшей, а похолодание самым сильным, пришлось на интервал от 17 до 21 тыс. лет назад.

Ко времени этого максимума в северном и южном полушариях образовались гигантские ледниковые покровы, скрывшие под собой значительные части суши и континентальных шельфов; сильно выросли площади морских льдов в океанах и снежного покрова на материках; на свободной от ледников суши произошло глубокое промерзание поверхностных слоев земной коры — расширилась и углубилась вечная мерзлота.

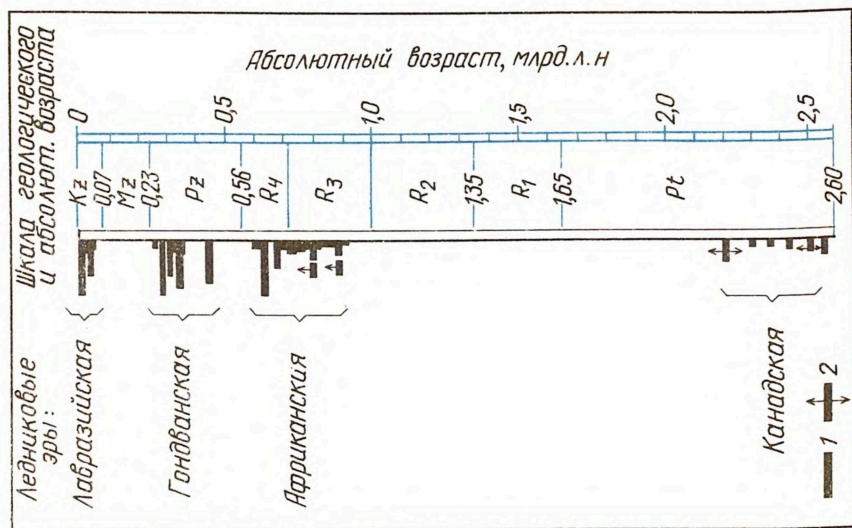
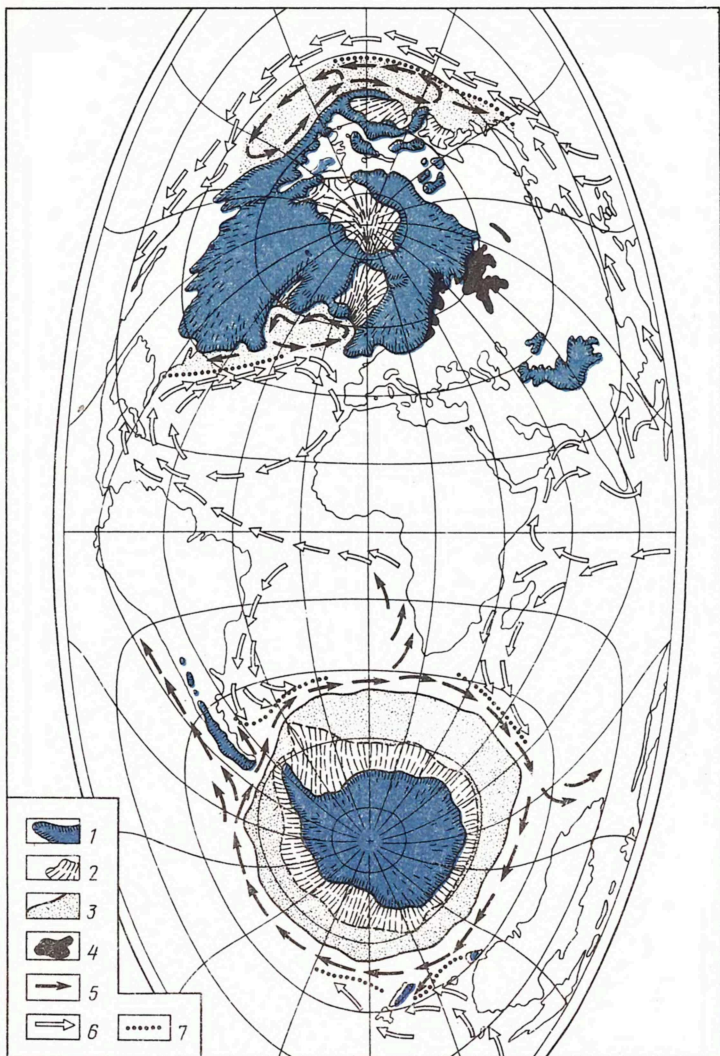


Рис. 4. Ледниковые эры и крупнейшие ледниковые периоды в истории Земли (по Н. М. Чумакову): 1 — оледенения; 2 — возможные возрастные пределы оледенений; длина линий пропорциональна числу материков, на которых известны ледниковые отложения. Латинские буквы в колонке означают геологические эры: Kz — кайнозойская, Mz — мезозойская, Pz — палеозойская, R — рифейская, Pt — протерозойская

В северном полушарии самые большие ледниковые покровы располагались по северным перифериям Атлантического и Тихого океанов (рис. 5). Согласно нашей реконструкции, в первой области существовал Панарктический ледниковый покров, включавший в себя Лаврентьевский, Гренландский, Скандинавский, Баренцево-Карский и некоторые другие ледниковые щиты, а также объединявшие их плавучие шельфовые ледники Арктического бассейна, Норвежского, Гренландского и Лабрадорского морей. Во второй — Северотихоокеанской — области существовал ледниковый покров, включавший огромные ледники гор запада и северо-запада Северной Америки, Берингийского шельфа, Корякии и Камчатки, а также

шельфовые ледники Охотского и Берингова морей. В южном полушарии самый большой ледниковый покров располагался, как и сейчас, в Антарктиде; оледенение этого материка усиливалось, его лед становился еще толще, края ледникового щита выдвигались в океан до границ континентального шельфа. Общая площадь ледников Земли 17—21 тыс. лет назад превышала 60 млн. км², т. е. в 4 раза превосходила современную, а объем льда возрастал до 100—110 млн. км³.

Откуда же бралась эта огромная масса льда? Ответ на этот вопрос очевиден: ледники могли расти только за счет воды Мирового океана. Испарение с поверхности океана поставляло влагу в атмосферу, воздушные массы перено-



Р и с. 5. Оледенение и морские течения в максимум последнего глобального похолодания (17—21 тыс. лет назад): 1 — ледники суши и континентальных шельфов; 2 — плавающие шельфовые ледники; 3 — многолетние морские льды; 4 — крупнейшие приледниковые озера; 5 — океанские течения (круговороты), теплые; 6 — то же, холодные; 7 — зоны столкновения холодных и теплых водных масс океана

сили ее в холодные области, где она выпадала в виде снега и надолго задерживалась в ледниках. Соответственно похолодания и рост ледников сопровождались снижением уровня океана, а потепления и убывание ледников — его повышением. К настоящему времени эта зависимость получила надежное подтверждение как в геологических данных о положении и возрасте древних береговых линий, так и в результате изотопно-кислородных исследований глубоководных осадков Мирового океана. Поэтому гляциоэвстатический график, показывающий изменения уровня океана по времени, одновременно служит и палеогляциологической кривой, описывающей суммарные изменения оледенения Земли.

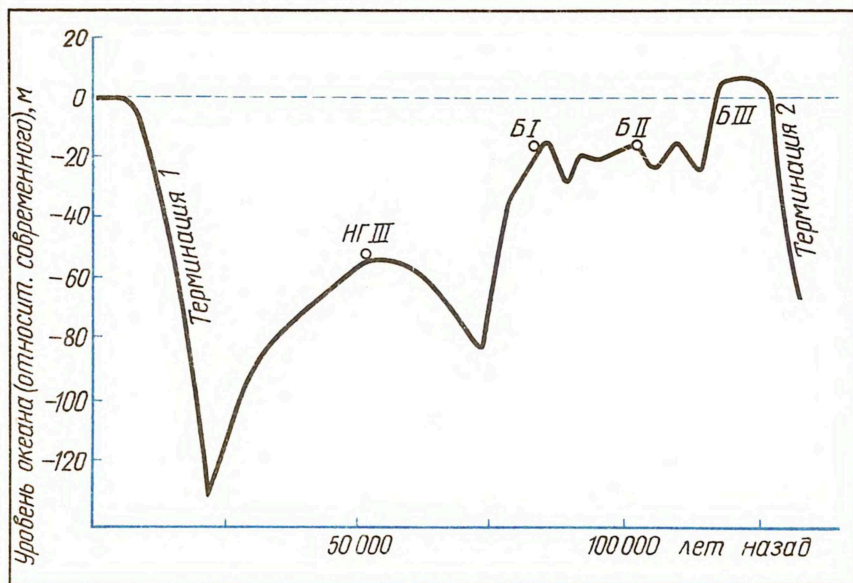
Рассмотрим такой график, построенный по изотопно-кислородным данным для последних 130 тыс. лет³ (рис. 6). В нем «записан» полный цикл изменений массы льда, началом которого можно считать последнее межледниковье (около 125 тыс. лет назад), когда ледники были меньше современных, а концом — окончание последней ледниковой эпохи (около 10 тыс. лет назад). Судя по графику, этот цикл отчетливо распадается на две неравные половины: длительный период роста оледенения, растянувшийся почти на 100 тыс. лет — от 115 до 17—18 тыс.

лет назад, и короткий период ликвидации оледенения, или «терминации», занявший всего лишь 10 тыс. лет. На длинную ветвь графика, описывающую рост ледников, «наложено» несколько сравнительно коротких эпизодов быстрого падения и повышения уровня океана, отражающих частные усиления и ослабления оледенения. Эти эпизоды, однако, не нарушают общей картины: как этот график, так и все другие, показывающие изменения оледенения и уровня океана за последний миллион лет, имеют форму косых зубьев пилы. Причем длительность каждого ледниково-межледникового цикла, отраженного на графиках, близка к 100 тыс. лет, а размах изменений уровня океана и объема льда — соответственно 120—130 м и 70—80 млн. км³.

Рассмотрение нашего графика позволяет сделать неожиданный вывод: межледниковый климат, в обстановке которого мы живем, не типичен для текущего геологического периода. Для этого периода гораздо более обычна ледниковая обстановка, т. е. условия со значительно более низкими температурами и более широким распространением ледников, чем в современную эпоху.

Что же мы сейчас знаем о климате ледниковых эпох — как об их среднем климате, когда ледники находились в относительно равновесном состоянии, так и о климате коротких этапов резкого усиления оледенения, на существование которых ясно указывает наш график (см. рис. 6)? Имеющаяся на этот счет информация довольно богата. Сведения о температурах воздуха ледниковых эпох, как уже указывалось выше, черпаются из многих источников: из состава ископаемых

³ Сейчас известно, что испарение воды сопровождается ее изотопным фракционированием: водяной пар обедняется, а оставшаяся вода обогащается тяжелым изотопом кислорода ¹⁸O. Поэтому и для снега, и для питаемых им древних ледниковых покровов характерен недостаток, а для «ледникового» океана — избыток этого изотопа (по сравнению с его средним содержанием в современной морской воде). Так что изотопный состав древнего океана, определенный по составу раковин морских организмов из глубоководных грунтов океана, поддается пересчету и на увеличение льда, и на потери морской воды.



Р и с. 6. Гляциостатическая кривая (график изменений уровня Мирового океана) за последние 130 тыс. лет. Построена по вариациям $\delta^{18}\text{O}$ в глубоководных осадках Тихого океана. Контрольные уровни Б I, Б II, Б III и НГ III получены по датированным террасам о-вов Барбадос и Новая Гвинея

растений, млекопитающих, насекомых; из данных о распространении следов мерзлоты и колебаниях снеговой линии; из результатов математического моделирования изменений климата; наконец, из данных палеотемпературных исследований льда из глубоких скважин, пробуренных на современных ледниковых щитах.

Последний метод чрезвычайно интересен и перспективен. Он основан на экспериментах, которые показали, что между изотопным составом снега, образующегося над ледниками, и температурами воздуха существует строгая зависимость. Установлено, что чем ниже эти температуры, тем ниже относительное содержание уже упоминавшегося нами тяжелого

изотопа кислорода ^{18}O ; отклонение содержания этого изотопа во льду от его же содержания в средней морской воде обозначают $\delta^{18}\text{O}$ и выражают в промилле (тысячных долях), причем отклонение, равное одному промилле, оказывается эквивалентным изменению температуры приблизительно на $1,5^\circ$. Поэтому графики изменений $\delta^{18}\text{O}$ часто называют палеотемпературными кривыми.

Ценные графики изменений изотопного состава льда по глубине (а значит — и по времени!) построены по данным бурения на Гренландском ледниковом щите (две скважины), на ледниковых шапках островов Девон в Канадской Арктике и Шпицберген, а также в Антарктиде (три скважины).

Самый новый и длинный из этих графиков только что получен советскими и французскими исследователями, которые обработали керн с советской антарктической станции Восток. Скважина на этой станции углубилась в лед более чем на 2000 м и достигла слоев с возрастом около 160 тыс. лет, что сделано впервые в мировой практике палеоклиматических исследований.

Этот график представлен на рис. 7. Здесь же даны три других, с которыми он достаточно надежно синхронизируется. Это прежде всего график Б, изображающий уже рассмотренную нами гляцио-эвстатическую кривую. Он дает наглядное представление об изменениях общей массы льда, заключенного в ледниковых покровах Земли, о скоростях и направленности этих изменений на разных этапах ледниковой эпохи. Следующий график В — палеоботанический; он заимствован из работ Ж. Вуаляра и показывает изменения в соотношении площадей леса и тундры в северо-западной Франции, которая неоднократно становилась приледниковой областью. А график Г показывает значения летней инсоляции, т. е. количества солнечного тепла, поступающего на единицу площади земной поверхности за единицу времени, рассчитанные для 50° и 75° с. ш. Эти значения изменяются, причем периодичность их изменений на разных широтах различна, хотя в ней достаточно ясно доминируют циклы продолжительностью около 40 тыс. лет. Известно, что указанные колебания инсоляции целиком зависят от периодических изменений в геометрии земной орбиты — главным образом от цикла предварения равноденствий с 23-тыся-

челетней длиной и цикла изменений наклона земной оси, имеющего длину около 40 тыс. лет.

Палеотемпературная кривая по станции Восток несет с собой исключительно интересную информацию. Она прежде всего показывает, что температуры южной полярной области в последние 150 тыс. лет почти непрерывно изменялись, испытывая колебания с разными амплитудами. Максимальные амплитуды изменений $\delta^{18}\text{O}$ достигали 7—8⁰/₀₀, что соответствует 10—12°С. По-видимому, именно такими были температурные различия между «ледниковым» и «межледниковым» климатами Антарктиды. При изменениях второго порядка, «наложенных» на ледниково-межледниковые колебания, размах понижений и повышений $\delta^{18}\text{O}$ не превышал 3—4⁰/₀₀, что соответствует 4,5—6°С. Очевидно, эти колебания отражали так называемые стадиялы и межстадиялы позднечетвертичного времени, хорошо известные геологам и палеоботаникам Европы и Америки.

Ход кривых на графиках А и Г идеально увязывается по времени и направленности изменений: все крупные пики похолоданий графика А синхронны минимумам летней инсоляции графика Г, а все пики потеплений синхронны инсоляционным максимумам. Вместе с тем фактические амплитуды температурных изменений, «записанные» на графике А, размахом колебаний инсоляции никак не объясняются; остается неясным, почему эти колебания (имеющие, кстати, весьма незначительные абсолютные значения) вызывали столь сильные изменения температуры и почему одним инсоляционным минимумам соответствовали межледниковья, а другим — ничуть не

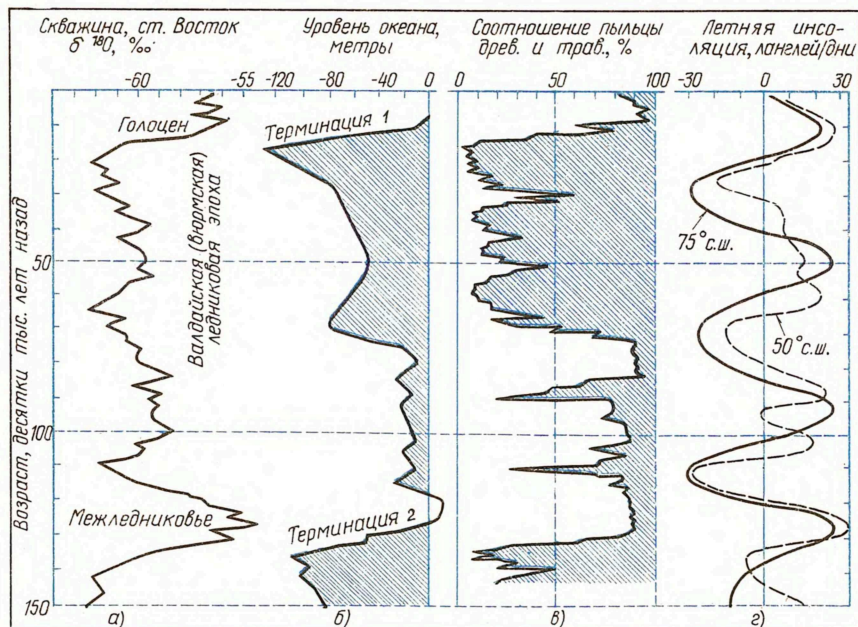


Рис. 7. Сопоставление палеотемпературной кривой, построенной по данным изотопно-кислородного анализа ледяного ядра из скважины со станции Восток (график А), с гляциоэвстатической кривой (график Б), изменениями растительности в приледниковой области Европы по исследованиям торфяника Гран-Пиль во Франции (график В) и с колебаниями летней инсоляции в высоких и умеренных широтах северного полушария (график Г) за последние 130—150 тыс. лет. Заштрихованные площади пропорциональны: на графике Б — массе льда в ледниках Земли, на графике В — площадям холодной безлесной суши (тундры)

меньшим — только межстадиалы. Эти вопросы, как и некоторые другие, возникающие при сравнении рассмотренных кривых с графиками Б и В, пока оставим без ответа. Однако мы вернемся к ним позже.

Пока же будем помнить, что при максимальном похолодании последней ледниковой эпохи температуры в районе антарктической станции Восток были на 10—12° ниже современных. Такое же похолодание выявлено изотопно-кислородным анализом ядра из сква-

жин, пробуренных во льду у антарктических станций Бэрд и Купол С, а также на севере и в центре Гренландии. По данным некоторых других методов, обобщенным Р. Фейрбриджем, изменения температуры северной полярной области в последние 150 тыс. лет достигали и даже превосходили 15° С. Во то же время в экваториальных, тропических и субтропических широтах температуры за это время практически не менялись. Так что ледниковые эпохи

знаменовались не только сильными похолоданиями полярных и умеренных широт, но также резким возрастанием межширотных температурных контрастов. Вдобавок к этому усиливались такие же контрасты между материками, особенно их частями, лежащими в высоких и умеренных широтах, и океанами.

В среднем по земному шару последнее похолодание, вероятно, составляло $6-7^{\circ}$, причем океаны охлаждались несколько меньше (в среднем на $4-5^{\circ}$), а материки — больше (в среднем на $7-10^{\circ}$). Судя по данным изотопно-кислородного исследования микрофауны из самых длинных колонок глубоководных грунтов Мирового океана, примерно такие же похолодания были характерны и для других ледниковых эпох плейстоцена, т. е. последнего миллиона лет.

Такова в общих чертах известная сейчас картина изменений приземных температур воздуха в ледниковые эпохи. Сложнее обстоит дело с изменениями в количествах атмосферных осадков в те же эпохи. Реконструкции осадков эпохи последнего оледенения, основанные на характере и составе ископаемых растительных остатков и других признаках, дают крайне пеструю картину, которая свидетельствует о сильных изменениях увлажненности от места к месту — гораздо более сильных, чем изменения температур. Эта картина оказывается и очень неполной: на картах осадков прошлого мы видим большие пробелы, совпадающие главным образом с наиболее интересными для нас областями древних оледенений. Этот недостаток восполняется, правда лишь частично, теоретическими расчета-

ми, принимающими во внимание известные связи между испарением и влагоемкостью воздуха, с одной стороны, и температурами — с другой. И поскольку средние температуры в ледниковые эпохи были ниже современных, то более низкие значения должны были иметь и испарение, и влагоемкость воздуха, и, казалось бы, атмосферные осадки. Опираясь на эту логику, климатологи рассчитали, что в интересующее нас время количество осадков было на 20—30% меньше, чем сейчас. Эти результаты получили широкую известность и используются во многих палеогеографических моделях. И тем не менее они далеко не бесспорны.

Дело в том, что количество осадков зависит не столько от содержания влаги в атмосфере, сколько от интенсивности ее циркуляции, в частности от скорости влагонесущих ветров. Содержание водяного пара в воздухе и сегодня невелико; в случае полной конденсации атмосферного пара на материки выпал бы слой воды или льда, имеющий толщину всего лишь 2,5 см. Естественно, что «строительство» материковых ледниковых покровов из атмосферной влаги независимо от того, становилось ли ее количество на треть меньше или оставалось неизменным, было возможным лишь при условии высокой скорости «оборота» этой влаги. В самом деле, если атмосфера — это конвейер, транспортирующий водяной пар из теплых областей океана в районы оледенения, то производительность этого конвейера должна зависеть не только от его нагрузки, но и от скорости, с которой движется лента.

А эта скорость сильно возрастала, что было неизбежным след-

ствием отмеченного выше усиления температурных контрастов между сушей и океаном, между высокими и низкими широтами. Рост этих контрастов повышал энергию всех океанских и атмосферных процессов, что подтверждено новыми исследованиями советских и зарубежных океанологов и палеоклиматологов. В частности, М. С. Бараш, У. Раддимэн, А. Макинтайр и другие установили, что в периоды глобальных похолоданий повышались скорости и менялись направления ряда крупнейших течений, в том числе Гольфстрима и Куро시오, возрастали температурные градиенты на гидрологических фронтах, усиливалась циркуляция в субарктических круговоротах, сильно активизировались процессы в зонах апвеллинга, т. е. подъема глубинных вод океанов, существующих у западных берегов материков. Столь же сильно активизировалась и циркуляция атмосферы: в ледниковые эпохи усиливались ветры, включая пассаты; возрастала энергия круглогодичных барических депрессий, расположенных на стыках океана с ледниковыми покровами, в частности исландской и субантарктической; мощной и круглогодичной становилась и алеутская депрессия, которая в современных условиях проявляется только зимой; повышалась циклоническая активность, связанная с такими барическими центрами.

В последнее время удалось получить и более прямые доказательства возрастания интенсивности атмосферной циркуляции при усилении оледенений. В качестве мерила этой интенсивности было предложено использовать количество и крупность частиц пыли, вынесенных ветрами с материков в

океаны. Эта идея была воплощена в программу специальных исследований, при осуществлении которой морские геологи провели работы в разных частях Мирового океана и собрали данные о составе и толщине слоев золотых отложений, участвующих в строении глубоководных осадков разного возраста. Таким путем было доказано, что развитие текущей ледниковой эры, продолжающееся уже около 35—40 млн. лет, сопровождается существенным ростом грубости и скорости накопления эоловой пыли на океанском дне, а также что своих максимумов этот рост достигал в интервалы времени, которые совпадали с эпохами плейстоценовых оледенений.

Итак, в ледниковые периоды и эпохи на Земле устанавливался своеобразный — ледниковый — климат, отличавшийся от современного не только низкими температурами, но и сравнительно высоким уровнем атмосферных осадков, обилие которых обеспечивалось усилением влагонесущих ветров. Однако следует иметь в виду, что такой климат был характерен не для всей планеты, а лишь для ее ледниковых областей, причем и в них было немало исключений. В других же областях климат ледниковых эпох был и вовсе иным. Так, например, мы уже указывали, что, когда высокие и умеренные широты испытывали похолодания, низкие широты оставались практически столь же теплыми, как и сейчас. Количество осадков в экваториальных и тропических зонах тогда сокращалось, что приводило к деградации влажных экваториальных лесов, например сельвы бассейнов Амазонки и Конго, к усыханию речных и озерных бассейнов, регрессии и сокращению зам-

кнутых водоемов, подобных африканскому озеру Чад и южноазиатским озерам Мундафан и Раджастан.

Зато в субтропиках и внеледниковых районах умеренных широт климат становился более влажным. Причиной этого было смещение в сторону экватора зон западных атмосферных течений («западного переноса») и уменьшение потерь влаги на испарение. Так что оледенениям там соответствовали так называемые плювиалы, что буквально означает «периоды дождей». Об их реальности говорят следы высоких береговых линий древних озер в ныне сухих или полусухих котловинах названных областей, которые, по геологическим данным, надежно синхронизируются с разрастаниями ледников в соседних горах. Такие береговые линии известны в ныне аридных впадинах Большого Бассейна и Долины Смерти в Северной Америке, в Котловине Больших озер Монголии, в депрессии Мертвого моря и в ряде других районов.

Таким образом, климат ледниковых эпох далеко не везде был понастоящему ледниковым. И все же его конкретные особенности всюду на Земле определялись — если не прямо, то косвенно — развитием ледников, снежного покрова и морских льдов в полярных и умеренных широтах. Ведь это их разрастание влекло за собой рост межширотных температурных контрастов, которые и были первопричиной изменений в глобальной картине океанской и атмосферной циркуляции.

Однако вернемся к вопросу о собственно ледниковом климате. Мы уже подчеркивали, что в типичном случае он был холодным и сравнительно влажным, точнее

многоснежным, и что из этого правила были исключения. Ведь влагонесущие ветры могли снабжать снегом только те районы ледниковых областей, которые были открыты для вторжений океанических воздушных масс. В таком положении оказывались, например, южные края Евразийского и Лаврентьевского ледниковых покровов и примыкавшие к ним участки суши. Что же касается недоступных для таких вторжений районов, то в них формировалась особая разновидность ледникового климата, которую можно назвать берингийской. Для этого климата была характерна исключительная континентальность: крайняя степень сухости, чрезвычайно низкие температуры зим и довольно значительное прогревание в летние сезоны. Именно таким был климат Берингии — безледной суши, которая периодически возникала на стыке Евразии с Северной Америкой и включала, наряду с приморскими низменностями Якутии и Аляски, осушавшиеся шельфы морей Бофорта, Берингова и Чукотского. По некоторым оценкам средние температуры января здесь были ниже -40° , средние температуры июля поднимались до $+10^{\circ}$, годовое количество осадков едва достигало 150 мм, из которых в зимние сезоны выпадало не более 20—25 мм. Чтобы понять причины столь специфических условий Берингии, достаточно найти ее на нашей карте (рис. 5): эта область была оазисом, окруженным большими ледниковыми щитами и оледенелыми горными хребтами и, следовательно, наглухо изолированным от влияний океана.

Берингия уже давно привлекала внимание исследователей — палеогеографов, археологов, биогео-

ографов. Однако для большинства из них эта суша — лишь межконтинентальный мост, с помощью которого удастся объяснить несколько этапов обмена фауной и флорой между Азией и Америкой в плейстоцене, указать возможные пути миграций древнего человека. Наш же интерес к Берингии связан с ее уникальным климатом. Кстати, его специфичность понята уж давно, гораздо раньше, чем ее причины. Этому способствовали многочисленные находки остатков растительности и животных, образующих неповторимый берингийский комплекс. В нем явно доминировали травоядные животные, существовавшие в условиях безлесных ландшафтов «тундро-степного» облика, в условиях холодного, резко континентального климата. На Аляске, например, в позднем плейстоцене обитали млекопитающие 31 вида, среди которых были и типичные представители «ледниковой» фауны — мамонт, северный олень, лемминг, овцебык, бизон и другие, и животные-ксерофилы — верблюд, як, антилопа-сайга.

Энергоактивные зоны океана

В последние годы выяснено, что одним из важнейших свойств современных океана и атмосферы является синоптическая изменчивость их физических полей, связанная с тем, что средняя картина океанских и воздушных течений все время искажается возмущениями, энергия которых часто во много раз превосходит энергию средних течений. Установлено также, что на Земле существуют «фиксированные» зоны высокой вихревой активности, которые практически всегда приурочиваются к районам, где мощ-

ные океанические течения, несущие тепло из низких широт в высокие, подходят к холодным побережьям. В этих зонах сталкиваются теплые и холодные водные массы, возникают резкие температурные градиенты и создаются условия для развития интенсивных динамических и тепловых взаимодействий океана с атмосферой.

Над такими — высокоградиентными — зонами приходят в контакт теплые и холодные воздушные массы, активизируются атмосферные фронтальные процессы и резко возрастает повторяемость циклонов. В северном полушарии все это наиболее ярко проявляется на стыке теплых атлантических воздушных масс с холодной блокирующей системой Гренландии, в южном полушарии — на стыке таких же масс воздуха Южного океана с блокирующей системой Антарктиды. Температурные перепады вместе с большими скоростями ветра и бурностью океана способствуют здесь многократному усилению испарения, делают рассматриваемые зоны центрами ускоренного поступления влаги из океана в атмосферу.

Выше уже говорилось, что в советской научной литературе эти зоны получили название энергоактивных зон океана, или ЭАЗО. В последние годы они стали объектом пристального внимания исследователей. На ряде полигонов, находящихся на участках взаимодействия Гольфстрима с материковыми окраинами Америки и Европы и Куро시오 — с берегами Японии, советские экспедиции на кораблях погоды ведут регулярные наблюдения за идущими там процессами. Анализ полученных данных позволил сделать

вывод о ведущей роли взаимодействий атмосферы с ЭАЗО в формировании современного климата и его изменений. Эта концепция легла в основу теории климата и долгосрочного прогноза погоды, разработанной академиком Г. И. Марчуком.

В гипотезах, объясняющих источники энергии синоптических возмущений океана, основное место отводится механизмам динамической и тепловой неустойчивости, возникающей в связи с накоплением избыточных масс воды и избыточного тепла в одних районах океана и их резким дефицитом в других. Явления этой — так называемой баротропной и бароклинной — неустойчивости широко развиты в современном океане, а в ледниковые эпохи их роль еще более возрастала. Причина этого — все то же усиление межширотных перепадов температур, которое повышало энергию океанских процессов. Вместе с этой энергией как раз и росла неустойчивость указанных процессов, росли сила и повторяемость возмущений.

По-видимому, в периоды особенно сильных и частых возмущений перенос влаги из ЭАЗО на материке был настолько велик, что в районах зарождения и роста оледенения интенсивность снегопадов значительно превосходила современную. Во всяком случае, детальное изучение видового и изотопного-кислородного состава микрофауны из колонок глубоководных осадков Северной Атлантики, выполненное американскими геологами У. Раддимэнгом и А. Макинтайром, показало, что на этапах быстрого роста оледенения 115—110 и 80—75 тыс. лет назад, которые отразились на гляциоэста-

тической кривой (рис. 6 и 7) в виде круто падающих отрезков, за считанные тысячелетия нарастали десятки миллионов кубикометров льда. Причем, по данным этих ученых, именно на этапах такого роста поверхность океана, омывавшего уже оледенелые побережья Лабрадора и Гренландии, была теплой, т. е. имела «межледниковые» температуры. Это значит, что в зоне Гольфстрима тогда должны были возникать палео-ЭАЗО с еще более высокими, чем в современных ЭАЗО, температурными градиентами.

Североатлантическая палео-ЭАЗО показана на рис. 5. На нем можно видеть и несколько других зон Мирового океана, в которых происходило столкновение теплых водных масс, поступавших из низких широт, с холодной и ледовитой водой субполярных круговоротов. Можно предполагать, что во всех районах такого столкновения формировались особые палео-ЭАЗО. В зоне Курисио это была Северотихоокеанская палео-ЭАЗО, а в зонах столкновения теплой воды Бразильского, Восточно-Австралийского и Игольного течений с холодными массами циркумполярного Антарктического течения — несколько Субантарктических палео-ЭАЗО. По нашей гипотезе эти древние ЭАЗО как раз и были теми мощными центрами, в которых атмосфера заряжалась влагой, необходимой для питания разрастающихся ледниковых покровов.

Механизмы роста и распада оледенений

Представление о палео-ЭАЗО как мощных поставщиках осадков

в ледниковые области помогает преодолеть противоречие между снижением влагоемкости воздуха при похолоданиях и формированием огромных ледников за сравнительно короткие интервалы времени. Отрицательные эффекты похолоданий с лихвой компенсировались усилением взаимодействий атмосферы с океаном в ЭАЗО, ускорением ветров, переносивших влагу с океанов на материки. Нет оснований сомневаться в том, что было достаточно немногих тысячелетий, чтобы ледниковые покровы приобрели форму массивных выпуклых щитов с установившимся, или «равновесным», режимом. Последнее означает, что расход их льда, связанный с откалыванием айсбергов и таянием на краях, примерно компенсировался притоком льда из холодных внутренних районов, где шло непрерывное накопление и преобразование снега. Иными словами, ледниковые покровы достигали предельных размеров, которые уже почти не менялись от года к году.

Теперь рассмотрим причины и механику уже упоминавшихся терминаций. Как кончались оледенения и каким был климат этих этапов? В последнее время этот вопрос стал вызывать много споров, хотя еще недавно казалось, что с ним все просто: на смену холодному климату приходили потепления, и ледники таяли. А о причинах самих потеплений либо не думали, либо связывали их с изменениями в поступлении солнечного тепла. В частности, конец последнего оледенения многие объясняли влиянием инсоляционного максимума, который начался около 20 тыс. лет и кульминировал 11 тыс. лет назад.

Однако наблюдения и расчеты показывают, что эти представления неверны или верны лишь частично. Во-первых, выяснилось, что ликвидация ледниковых покровов произошла чрезвычайно быстро, не более чем за 10 тыс. лет, о чем мы уже говорили, рассматривая гляциоэвстатический график. И стало ясно, что если бы таяние этих покровов шло лишь за счет тепла атмосферы и солнечной радиации, то оно заняло бы не 10, а целых 100 тыс. лет. Подсчитано, например, что убывание массы льда со скоростями, которые установлены геологами для некоторых секторов Лаврентьевского ледникового щита Северной Америки, требовало ежегодных затрат энергии в 1500 кДж/см^2 , тогда как даже сейчас соответствующие районы получают через атмосферу в среднем не более 130 кДж/см^2 . Таким образом, может возникнуть вопрос: где же был главный источник энергии, которая расходовалась на таяние плейстоценовых ледниковых покровов?

Во-вторых, гораздо менее понятной оказывается и природа тех «толчков», которые служили непосредственной причиной терминаций. Из рис. 7 следует, что последняя из них (как, впрочем, и предпоследняя и ряд более древних) совпала с последним максимумом летней инсоляции, что вроде бы хорошо согласуется с известной гипотезой югославского астронома М. Миланковича. Однако тот же рисунок делает очевидным и другое: этот максимум не был за последние 100 тыс. лет ни единственным, ни самым большим. Ему предшествовали два других инсоляционных пика, имевших возраст около 50 и 90—100

тыс. лет, которые терминаций не вызвали. Поэтому возникает и второй вопрос, который созвучен вопросу о причинах различий в глубине межледниковых и межстадиальных потеплений: если причина ритмических чередований оледенений и межледниковий действительно состоит в изменениях летней инсоляции, то почему за одними ее максимумами следовала ликвидация оледенения, а за другими, ничуть не менее значительными, лишь некоторое сокращение массы льда? И почему длительность ледниково-межледниковых циклонов плейстоцена была близка к 100 тыс. лет, тогда как в вариациях инсоляции, ощутимых в высоких и умеренных широтах, выявляется лишь 20- и 40-тысячелетняя периодичность?

Как ни интригующе звучат все эти вопросы, ответы на них уже получены, и они довольно просты. Причем главный из этих ответов, служащий основой для всех остальных, состоит в следующем. Климат со всеми его характеристиками, включая температуры воздуха и воды океана, атмосферные осадки и морские течения, распределение и размеры ледников и др., формируется и изменяется работой «климатической машины» Земли, т. е. взаимодействиями в системе «океан — атмосфера — материка — оледенение», внутри которой существуют прямые и обратные связи, в том числе механизмы усиления (или ослабления) внешних по отношению к системе сигналов.

Одним из примеров этих механизмов может служить уже описанный нами процесс образования атмосферных осадков в эпохи роста ледниковых покровов. Взаимодействие холодных материков,

ледников и ледовитых субполярных морей с субтропическими водными массами создавало энергоактивные зоны океана, усиливало циркуляцию атмосферы, а взаимодействие последней с этими зонами способствовало быстрому насыщению воздуха влагой, которая затем и питала ледники.

Усилением в этой системе объясняется и фактический размах похолоданий Земли. Напомним, что среднее снижение глобальных температур в ледниковые эпохи составляло 6—7°, тогда как прямым следствием периодических уменьшений инсоляции могли быть лишь похолодания, не превышавшие 2°. Что же усиливало тот импульс, который давало падение инсоляции? Сейчас можно назвать несколько механизмов такого усиления. Главный из них — возрастание отражательной способности (альбедо) суши и океана, связанное с ростом площадей ледников, снежного покрова и морских льдов, с усилением опустынивания материков. Выполненные нами расчеты, учитывающие разработки советского климатолога М. И. Будыко, показали, что только благодаря росту альбедо температуры воздуха ледниковых эпох должны были дополнительно снижаться не менее чем на 3°.

Еще один механизм усиления похолодания состоит в выхолаживающем влиянии ледниковых покровов на воздушные массы. Приходя в контакт со снежно-ледниковыми поверхностями, эти массы передают им свои запасы тепла, которое затем излучается в космическое пространство. Интенсивность указанного процесса обеспечивается тем, что по своей способности излучать энергию, как уже было сказано, снег и лед

близки к абсолютно черному телу, а само это излучение может идти без помех, поскольку небо над ледниковыми покровами почти всегда безоблачно. Такое выхолаживание также дает эффекты, ощущаемые в масштабах всей Земли. Возможно, что в ледниковые эпохи этот процесс служил дополнительным усилителем того сигнала к похолоданию, который поступал в виде минимумов летней инсоляции.

Так объясняется размах плейстоценовых колебаний температур. Те же механизмы позволяют понять и природу различий в глубине межстадиальных и межледниковых потеплений. Очевидно — и это подтверждается графиками А и Б на рис. 7, — что первые происходили в условиях, когда на Земле существовали сравнительно крупные ледниковые покровы, а связанные с ними потери энергии были велики. А вторые имели место в условиях, когда оледенение резко сокращалось и потери тепла за счет альбедо и ледникового выхолаживания становились близкими к современным. Именно в этом проявляли себя прямые и обратные связи между температурами и оледенением: не только похолодания способствовали нарастанию снежно-ледяных масс, но и масштабы оледенения оказывали определяющее влияние на температурное состояние Земли. Причем причины и следствия здесь часто менялись местами. Сравнение графиков А и Б, т. е. палеотемпературной и гляциозвстатической кривых, приводит к заключению, что изменения оледенения и температур далеко не строго следовали друг за другом. Правда, температурные минимумы последней ледниковой

эпохи довольно строго совпадали с интервалами ускоренного роста ледниковых покровов, а температурные максимумы — с этапами их сокращения. Однако если снижения температур во время трех климатических минимумов этой эпохи были практически одинаковыми, то количество льда в каждый из них было различным, последовательно нарастая от начала эпохи к ее концу. Судя по всему, межстадиальные потепления, имевшие место внутри ледниковой эпохи, были и слишком слабыми, и слишком короткими, чтобы уничтожить весь лед, накопившийся к их началу. А новые похолодания с лихвой компенсировали межстадиальные потери. Важно также, что ледники, успевшие вырасти до этих потеплений, были целиком наземными или полярными, а потому весьма устойчивыми по отношению к внешним воздействиям.

Зато дальнейший рост оледенения, приближавший его к максимуму, был связан с распространением льда в более низкие широты, и с его экспансией на приморские низменности и континентальные шельфы. Судя по данным теоретических и экспериментальных исследований гляциологов, ледниковые покровы таких низменностей и шельфов в определенных условиях теряли устойчивость, чему способствовали рост массы льда и прогибание земной коры под его нагрузкой. А достигнув критического уровня неустойчивости, они могли катастрофически быстро разрушаться, причем не путем наземного таяния, а за счет резкого ускорения движения и сброса льда в океан («айсбергового стока»).

Катастрофическое разрушение

неустойчивых ледников могло начинаться в ответ на сравнительно слабые внешние воздействия, в том числе на некоторое усиление таяния, вызванное очередным инсоляционным максимумом. А после этого включалась своеобразная цепная реакция взаимодействий: интенсивный айсберговый сток вел к повышению уровня океана, а это повышение вызывало новые сбросы льда.

Таким образом, основная масса плейстоценовых льдов таяла не на суше. Впрочем, не наземное таяние, а айсберговый сток составляет главную статью расхода льда и у современных ледниковых покровов. Антарктида, например, и сейчас ежегодно теряет с этим стоком свыше 2000 км³ льда, тогда как ее потери, связанные с наземным таянием, как поверхностным, так и подледным, не достигают и 100 км³. В эпохи же древних оледенений, когда температура воздуха снижалась, а контакты ледников с океаном усиливались, роль айсбергового стока еще более возрастала, особенно на этапах терминаций, когда за считанные тысячелетия в океан сбрасывались десятки миллионов кубокилометров льда. Реальность этих сбросов доказана позднеледниковыми изменениями изотопного состава океана, которые говорят о быстром «облегчении» его воды за время терминаций. Очевидно, что это облегчение может быть только следствием возвращения в океан изотопно легкой воды (т. е. воды, обогащенной легким изотопом кислорода ¹⁶O), которая до того удерживалась в ледниках.

Теперь мы можем ответить и на все оставшиеся вопросы. Раз основная масса плейстоценового

льда не таяла на суше, а сбрасывалась в океан, то и энергия, потребная для ее таяния, черпалась не из атмосферы, а в океане, где ее запасы в 1000 раз больше. И поскольку катастрофические сбросы льда были следствием неустойчивости ледниковых покровов, они могли происходить лишь тогда, когда эта неустойчивость возникала, а именно, когда ледники распространялись на шельфы и достигали «критической массы». Мы уже указывали, что толчком для начала терминаций служили повышения летней инсоляции, однако сейчас ясно, что такую роль могли играть не все ее повышения, а только те из них, которые приходились на время ледниковых максимумов. Наверное, мы не ошибемся, если скажем, что оледенения завершались быстрыми и полными распадами только тогда, когда инсоляционные потепления воздействовали на ледниковые покровы, успевшие созреть для распада. И срок такого созревания в конкретных условиях четвертичного периода Земли, видимо, был близок к 100 тыс. лет.

В завершающие фазы оледенений сток льда в океан становился глобальным климатообразующим фактором, поскольку он обуславливал резкий рост тепловых потерь океана. Эти потери были связаны прежде всего с поглощением тепла при таянии айсбергов. Ведь известно, что энергия, необходимая на таяние 1 млн. км³ льда, составляет более $3 \cdot 10^{14}$ МДж, что в 100 раз больше, чем теплосодержание воды, ежегодно поступающей в Арктический бассейн с ветвями Североатлантического течения. А при деградации последнего оледенения в океан поступил не один, а не менее 60 млн. км³ льда.

Причем этот механизм позднеледникового охлаждения океана не был единственным. Талые ледниковые воды опресняли приповерхностный слой воды океана, что вызвало сильный рост его зимней ледовитости, айсберги и морские льды способствовали резкому повышению альбедо поверхности, сокращая поглощение радиационного тепла.

Айсберговый сток на этапах деградации оледенения не был постепенным равномерным процессом. Наоборот, каждая терминация состояла из нескольких стадий ускоренного распада ледниковых покровов, во время которых в океан поступали огромные массы льда, и интервалов временной стабилизации ледников, когда сток айсбергов замедлялся. Соответственно менялся и климат. По расчетам палеоклиматологов, наиболее крупные сбросы льда могли охлаждать климат целого полушария на $5-10^{\circ}$ на столетия. О том же говорят прямые палеогеографические данные: позднеледниковое потепление действительно неоднократно прерывалось короткими похолоданиями, во время которых наступали горные ледники, расширялись ареалы тундровой растительности, усиливались эоловые процессы. Причем уже давно предполагалось, а недавно удалось и доказать, что очаги этих похолоданий находились в океане.

Это доказательство было получено следующим образом. Был избран сравнительно хорошо датированный интервал резкой температурной осцилляции — переход от теплого аллередского времени к холодному позднему дриасу, имевший место около 11 тыс. лет назад, а затем собраны и пересчитаны на температуры все имею-

щиеся в мировой литературе данные по изменениям в составе планктонных фораминифер дна Северной Атлантики и растительности на сопредельных материках, которые произошли в это время. При этом выяснилось, что самое большое снижение температур происходило в океане, охватывая поверхностные слои воды в районах наиболее интенсивного таяния айсбергов, и достигало $8-9^{\circ}$ (относительно современных температур). А на суше похолодание этого времени сильнее всего проявилось в тех областях Евразии и Северной Африки, которые находятся под влиянием атлантических воздушных масс, да и составило оно лишь $4-5^{\circ}$ и менее.

Причины оледенений

Итак, что же сейчас известно о причинах оледенений? Мы уже немало об этом сказали, однако коснулись далеко не всего. Ведь для решения проблемы резких глобальных похолоданий необходимо дать объяснение ледниковым событиям очень разных масштабов — и ледниковых эр, и ледниковых периодов, и ледниковых эпох. Эти события имели разную длительность, которая в одних случаях измерялась десятками и сотнями миллионов, в других — миллионами, в третьих — лишь десятками тысяч лет, причем более короткие события происходили в недрах более длинных и повторялись явно циклично, а в повторении более длительных подобную цикличность усмотреть трудно. Так что и причины столь разных явлений были почти наверняка разными.

Рассмотрим сначала причины ледниковых эр. Проблема эта край-

не трудная, однако на некоторые вопросы геология уже дала ответ — во всяком случае, в части, касающейся последней эры, которая носит название лавразийской (см. рис. 4). Похолодание этой эры было явно подготовлено изменениями в очертаниях океанов и рельефе их дна, связанными с новейшим этапом дрейфа литосферных плит. Эти изменения — отделение Австралии от Антарктиды, открытие пролива Дрейка, образование Панамского перешейка и др. — повлекли за собой перестройку картины океанских течений и ослабление теплообмена между низкими и полярными широтами. В этой связи полярные области Земли охладились, и температурные контрасты между ними и более низкими широтами возросли. Таким образом был создан общеклиматический фон, на котором могли происходить и изменения иного характера — периодические и более кратковременные.

Что касается ледниковых эпох и разделяющих их межледниковий, то об их причинах можно говорить с большей определенностью. Выше было показано, что импульс для них создавался периодическими снижениями летней инсоляции в умеренных и особенно высоких широтах. Эти снижения связаны с повторяющимися изменениями в геометрии земной орбиты («эффектами М. Миланковича») и по своему непосредственному влиянию на климат Земли никогда не были большими. Однако этот «космический сигнал» претерпевал 3—4-кратное усиление в системе «материки — оледенение — океан — атмосфера». Особо подчеркнем, что указанный «космический сигнал» поступает все-

гда — и в ледниковые и межледниковые эры и периоды, а вот усиливаться и приводить к оледенениям он может лишь тогда, когда на Земле появляется благоприятный для этого фон: те самые охлаждения высоких широт и нарастания межширотных контрастов, которые характерны только для ледниковых периодов.

Глядя на рис. 4, можно сделать еще один очень важный для палеоклиматологии вывод. Раз оледенения возникали не только в современную (кайнозойскую) эру, но также и на более ранних этапах истории Земли, причем неоднократно, можно не сомневаться, что причины глобальных похолоданий и оледенений не имели ничего общего с направленным остыванием планеты, с приближением ее «тепловой смерти», как думали когда-то. Дело явно не в этом, а в изменениях теплового баланса земной поверхности, вызванных внешним сигналом и усиленных в процессе взаимодействия природных льдов и их окружения.

Теперь, когда мы обсудили возможные причины оледенений и межледниковий, пришла очередь для ответа и на два других традиционных вопроса: следует ли ожидать нового оледенения, и если следует, то как скоро?

На первый из них большинство ученых сейчас отвечает положительно. В самом деле, рис. 4 не оставляет места для сомнений, что современная эпоха приходится на самый разгар лавразийской ледниковой эры, которая еще явно далека от своего конца. Так что совершенно ясно, что мы живем в одно из межледниковий плейстоценового ледникового периода, которое, как и полтора десятка предшествующих, должно сме-

ниться новым оледенением.

Когда же «наше», т. е. текущее, межледниковье окончится? На этот счет мнения специалистов расходятся. Одни из них предсказывают, что оно продлится еще не менее 50 тыс. лет. Так, в частности, считает известный нидерландский специалист по моделированию климата И. Эрлеманс, который при этом опирается на прогноз изменений летней инсоляции в высоких широтах в ближайшие тысячелетия, сделанный на основе теории М. Миланковича. Другие же полагают, что новое оледенение должно начаться гораздо скорее, может быть, всего лишь через несколько столетий. Основанием для этой — крайней — точки зрения служат прежде всего имеющиеся данные о средней продолжительности плейстоценовых межледниковий. Дело в том, что, судя по все тем же изотопно-кислородным (палеотемпературным) графикам, построенным по результатам изучения длинных колоннок глубоководных осадков Мирового океана, эта продолжительность составляет лишь 10—12 тыс. лет. И поскольку текущее межледниковье, или голоцен, началось около 10 тыс. лет назад, ему уже вроде бы пора и кончиться. К тому же выводу приводит и опыт экстраполяции в будущее некоторых климатических трендов — длиннопериодных, как тенденция к общему похолоданию, сохраняющаяся с климатического оптимума голоцена на протяжении последних 7 тыс. лет, и короткопериодных, как изменения температур, меняющие свой знак каждые 2—2,5 тыс. лет.

Подчеркнем, что все эти прогнозы опираются только на известные данные о естественных климатических циклах и не учитывают

возможного влияния «неестественного», или антропогенного, фактора, т. е. человека и его производственной деятельности. Многие климатологи считают, что эта деятельность, а именно сведение лесов, распашка целинных земель, ирригация, урбанизация и, самое главное, все более интенсивное сжигание минерального топлива, ведущее к росту количества CO_2 в атмосфере, может стать и уже становится дополнительным мощным климатообразующим фактором, способным существенно изменять естественные тренды.

Антропогенное воздействие на климат

Из изложенного следует, что прогноз естественных изменений климата в рамках его современного стационарного состояния мало перспективен. Выделенные циклы не обладают устойчивостью во времени, тренды слабы. В целом за последние 7000 лет со времени климатического оптимума голоцена преобладает тенденция к похолоданию. Некоторое похолодание характерно и для последних 30 лет. Но характер его и причины (естественные или антропогенные) остаются неясными. Сейчас можно оценить лишь возможную амплитуду и вероятность климатических аномалий, исходя из обработки рядов данных о прошлых состояниях климатической системы, и ее реакцию на возможные природные изменения.

Более определен прогноз последствий антропогенных воздействий на климат, в частности последствий увеличения содержания в атмосфере двуокси углерода. За последние 120 лет содержание CO_2 в атмосфере увеличилось от

290 до 340 частей на миллион, т. е. оно возросло на 17%, в среднем на 0,14% в год. За последние десятилетия этот рост составил уже 0,36% в год. Такой рост количества двуокиси углерода представляет собой следствие нарастания интенсивности сжигания топлива, которое удваивается примерно каждые 20 лет. В настоящее время человечество выбрасывает в атмосферу ежегодно около 10 млрд. т углерода, в том числе две трети его образуется за счет сжигания топлива и одна треть в результате сельскохозяйственного производства. Это составляет около трех частей CO_2 на миллион в год. Однако около 70% углерода уходит в океаны и биосферу и только 30% остается в атмосфере.

Предполагая различные модели нарастания потребления угля, нефти, газа и дров, многие ученые, начиная с М. И. Будыко в СССР, сделали прогноз об удвоении количества CO_2 в атмосфере уже к середине следующего, XXI столетия и соответствующем потеплении климата за счет парникового эффекта примерно на $2,5^\circ\text{C}$. Это потепление накладывается на упомянутый выше слабый естественный тренд к похолоданию, чем, по-видимому, объясняется отсутствие потепления до настоящего времени (рис. 8). Как мы уже упоминали, такое потепление, да еще усиленное в полярных странах, повело бы к многим серьезным последствиям — таянию ледников, повышению уровня океана, к изменению условий земледелия, большому увлажнению севера, усилению засух в полосе степей и полупустынь, смещению примерно на 400 км на север природных зон.

Однако, во-первых, фактически

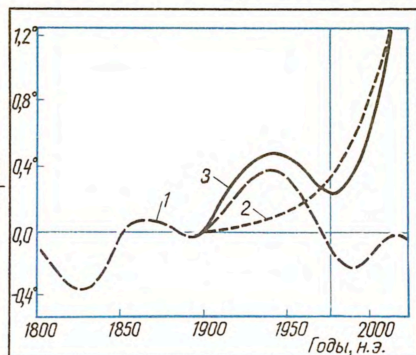


Рис. 8. Кривые: 1 — естественных температурных циклов; 2 — изменений глобальной температуры вследствие парникового эффекта CO_2 ; 3 — суммарного эффекта первого и второго факторов

сейчас отсутствует нарастающее потепление и в последние десятилетия даже улучшаются условия существования ледников. Причина такого хода событий не обязательно заключается в естественном тренде.

Во-вторых, вовсе не обязательно предполагать увеличивающееся нарастание концентрации CO_2 в атмосфере. Ведь потребляемое органическое топливо не беспречно. При линейном же нарастании CO_2 в атмосфере современными темпами его удвоение будет достигнуто лишь через 250 лет, т. е. только в XXIII в., когда ввиду ограниченности обычных видов топлива ведущей станет, по-видимому, атомная энергетика. К этому следует добавить, что экстраполяция современных темпов нарастания двуокиси углерода крайне затруднительна из-за возможных изменений углеродного цикла — обмена CO_2 атмосферы с океаном и биосферой.

Зато очень быстро нарастает

выброс в атмосферу малых газовых примесей, в особенности отходов холодильной промышленности — фреонов. После объявления в 1974 г. сокращения их выброса, такой выброс практически не изменился. По данным Ассоциации химической промышленности США, выброс CF_2Cl_2 за 1974—1980 гг. снизился на четверть — с 400 до 300 тыс. т в год. Однако, по наблюдениям, он, наоборот, возрос на ту же четверть, превысив 500 тыс. т в год. Следовательно, приведенные выше данные занижены более чем на 40%. До настоящего времени глобальный прирост концентрации фреонов в атмосфере сохраняется на уровне 5% в год, что с учетом сложных процентов приводит к их удвоению за 12 лет.

Растет выброс и других газов — метана, азота и др. Объединенный эффект малых примесей этих газов может сводить на нет парниковый эффект двуокиси углерода. Поступающие в атмосферу газы в результате сложных цепочек реакций влияют на содержание озона. Первоначальная тревога о разрушении этого слоя, в частности, за счет реакций с окислами азота от авиации и спутников не подтвердилась измерениями. Некоторое снижение озона в стратосфере компенсируется его ростом в верхней тропосфере.

Большое значение имеет содержание в атмосфере пыли и аэрозолей. Оно неоднородно в пространстве, а густая сеть наблюдений за ним отсутствует. Существует оценка глобального уменьшения прозрачности на 0,2% в год. Это соизмеримо с нарастанием двуокиси углерода на 0,3% в год. Аэрозоли, в особенности сернокислые, чрезвычайно вредны для

окружающей среды. Климатический же их эффект в настоящее время, согласно экспериментам на моделях климата, состоит в снижении средней планетарной температуры воздуха.

Наконец, промышленность в настоящее время выделяет в атмосферу более $3 \cdot 10^{14}$ МДж тепла, в среднем по Северному полушарию 0,1 Вт/м². Это менее 1% кинетической энергии атмосферы и 0,01% энергии, поступающей в атмосферу от Солнца. Ожидаемое нарастание энергетики в 4 раза к 2025 г. все равно не представляется существенным в глобальном масштабе. Однако в некоторых индустриальных районах концентрация тепловой энергии промышленности возрастает в сотни раз, что, наряду со снижением альбеда, уже приводит к появлению теплых ореолов над городами и целыми промышленными районами, где положительные аномалии температуры составляют несколько градусов.

Эффекты воздействия человека на подстилающую поверхность могут быть не менее существенны, чем на саму атмосферу. Изменение типа поверхности может менять величины испарения и прямой теплоотдачи в атмосферу. Замена лесов культурными плантациями приведет к снижению испарения и росту прямой теплоотдачи. Снижится шероховатость поверхности, что повлияет на циркуляцию атмосферы.

Для развития сельского хозяйства развивающихся стран при росте там голодающего населения потребуются сведения в ближайшие 20 лет 12—15 млн. км² тропических лесов, т. е. больше половины их площади. Особенно заметным окажется сведение

тропических лесов бассейна Амазонки — одной из энергоактивных зон суши. Уменьшение теплоотдачи в атмосферу и одновременный рост альбедо приведут к заметному в глобальном масштабе охлаждению. Уже осуществленное за историю человечества сведение лесов охладило поверхность нашей планеты почти на 1°C .

Противоположный эффект будет иметь орошение пустынь. Потенциально, по почвенным условиям оно возможно на площади почти 5 млн. км². Орошение вызовет увеличение теплоотдачи и потепление атмосферы за счет резкого роста испарения и уменьшения альбедо. Усиление восходящих конвективных токов будет способствовать выпадению осадков.

Обратный процесс развивается при опустынивании. Экстенсивное хозяйство, вытеснение скотом в сахельском поясе Африки на севере саванн привели к росту альбедо, выхолаживанию, усилению нисходящих потоков воздуха и к смещению на юг, в глубь саванн от края пустыни сезонных осадков. Таким образом, процесс оказался неустойчивым, что и обусловило уже известную сахельскую катастрофу.

Перечисленные эффекты воздействия человека на климат не могут быть просто суммированы. Они зависят друг от друга. Прогноз может быть сделан только в модельных экспериментах. Однако в современных моделях, ограниченных возможностями ЭВМ, пока нельзя учесть все эффекты одновременно. Гораздо более определены климатические последствия современной войны.

«Ядерная зима»

Помимо описанных «медленных» изменений климата, человечество может вызвать климатическую катастрофу, способную уничтожить его как биологический вид. Такой катастрофой была бы ядерная война. Оценка большинством ученых ее последствий сводится к следующему:

1. Тепловой нагрев атмосферы взрывами и пожарами эквивалентен нагреву всей атмосферы на 1°C и вызовет разрушительные локальные эффекты, в том числе мощные ураганные ветры.

2. Атмосфера будет заражена радиоактивными загрязнениями в виде облака протяженностью на многие сотни и тысячи километров по ветру, включая почти всю территорию Европы и США.

3. Дополнительное выделение при пожарах и из вскрытых газовых скважин CO_2 , CO , метана, этана, пропана и увеличение образования озона в тропосфере за счет ультрафиолета от разрушения окислами азота стратосферного озона приведут без учета «пепельного экрана» к повышению глобальной температуры Земли на $4\text{—}5^{\circ}$, что повлечет за собой опустынивание, иссушение, потерю урожая.

4. Образование при взрывах из азота воздуха окислов азота и их вынос в стратосферу с облаками приведет к разрушению от 40 до 60% озона в Северном полушарии в целом в силу быстрой миграции окислов азота по всему полушарию. Окислы азота вступают в фотохимические реакции с озоном, связывая его в O_2 , что приведет к резкому увеличению ультрафиолетового облучения поверхности Земли.

5. Однако главным последствием взрывов и пожаров является, по-видимому, поступление пыли и пепла в атмосферу.

Наземные взрывы поднимают пыль, часть которой испаряется. Вес поднятой пыли равен 5 Мт на каждую Мт мощности взрывов, т. е. может достигнуть $5 \cdot 10^{11}$ Мт, или 50 млрд. т. Большая ее часть оседает, но испарившаяся часть превратится в аэрозольную фракцию со средним размером в один микрон, которая попадет в стратосферу. Пожары приведут к образованию пепла, который заполнит тропосферу и частично стратосферу. Пепел и пыль быстро (за первые недели) обволокут всю Землю или по крайней мере Северное полушарие. Солнце нагреет облака пыли, что усилит ветры и будет способствовать ускорению распространения пыли и ее новому подъему ветром. В результате, по разным оценкам, прозрачность атмосферы для солнечной радиации уменьшится в 75—200 раз. Это приведет к нагреву верхней и средней тропосферы и нижней тропосферы на 25°C за первый месяц и к похолоданию приземного слоя воздуха, по разным оценкам, на 15—30°C, что перекроет эффект парникового нагрева CO_2 и малыми примесями. Вертикальный градиент температуры в глобальном масштабе сменит знак: вместо 5—10° на километр он будет близок к —20° на километр. Смена неустойчивой стратификации атмосферы на сверхустойчивую приведет к почти полному прекращению осадков, что продлит пребывание пыли и пепла в атмосфере.

Как показывают расчеты на моделях вычислительного центра

АН СССР, локальные эффекты могут быть еще большими, доходя до выхолаживания на 40—50° крупных регионов в умеренном поясе Северного полушария. Через несколько месяцев после осаджения пыли охлаждение сменится нагревом на 20—30° по сравнению с нормой, что приведет к катастрофическому таянию снега и ледников. Высокие горы будут нагреты в первые месяцы, что обусловит тальные паводки оттуда. Неравномерность температурного нагрева в Северном и Южном полушариях обусловит единую ячейку трансэкваториальной циркуляции, разрушив пассатные ячейки, а неоднородные температурные изменения над сушей и океаном приведут к возникновению ураганных ветров и снегопадов в прибрежных зонах.

Серьезные последствия вызовут также изменения альбедо поверхности Земли.

Модель подобного развития событий дала сама природа. Произошедшее в 1815 г. извержение вулкана Тамбора, расположенного на о. Субава (восточнее о. Ява), было самым сильным на Земле за последние 500 лет. Во время извержения в атмосферу было выброшено огромное количество материала, во много раз превысившее выбросы при известном извержении вулкана Кракатау на о. Ява в 1883 г. Газ и пепел создали в верхних слоях атмосферы завесу, ставшую экраном для солнечного излучения. Началось охлаждение атмосферы: почти всюду в Северном полушарии сезонный снег лежал до середины июня, а в августе в Западной Европе уже были отмечены заморозки. В том году Англия совсем осталась без лета.

Ответом на эти события было написанное в 1816 г. стихотворение Дж. Байрона, по мотивам которого в 1845 г. И. С. Тургенев опубликовал эссе под названием «Тьма»:

...И мир был пуст;
Тот многолюдный мир, могучий мир
Был мертвой массой, без травы,
деревьев,
...Завязли ветры в воздухе
немом...
Исчезли тучи... Тьме не нужно
было
Их помощи... она была повсюду...
...Такого рода «зима», судя по
модельным экспериментам, про-
длится около двух лет. Но моде-
ли не обладают всеми свойствен-

ными реальной атмосфере меха-
низмами устойчивости. По-види-
мому, после «ядерной зимы» кли-
мат никогда больше не вернется
к прежнему.

* * *

Изложенное свидетельствует о
чрезвычайной сложности клима-
тической системы. На прогноз ее
развития направлены усилия мно-
гих коллективов ученых, но, по-
видимому, пройдут еще десяти-
летия, пока более совершенные
модели, использующие качествен-
но новые идеи и ЭВМ будущих
поколений, позволят давать на-
дежный прогноз изменений кли-
мата.

Литература

- Борисенков Е. П. Климат и деятельность человека. М., Наука, 1982.
Борисенков Е. П., Пасецкий В. Н. Экстремальные природные явления в русских летописях XI—XVII веков. Л., Гидрометеиздат, 1983.
Будыко М. И. Климат и жизнь. Л., Гидрометеиздат, 1971.
Будыко М. И. Климат в прошлом и будущем. Л., Гидрометеиздат, 1980.
Гляциологический словарь (под редакцией В. М. Котлякова). Л., Гидрометеиздат, 1984.
Голицин Г. С. Последствия ядерной войны для атмосферы. — Природа, 1985, № 6.
Ле Руа Ладюри. История климата с 1000 года. Л., Гидрометеиздат, 1971.
Лосев К. С. Климат: вчера, сегодня... и завтра. Л., Гидрометеиздат, 1985.
Марчук Г. И., Кондратьев К. Я., Дынников В. П. Некоторые проблемы теории климата. Итоги науки и техники. — Метеорология и климатология, т. 7. М., ВИНТИ, 1981.
Монин А. С., Шихов Ю. А. История климата. Л., Гидрометеиздат, 1979.
Подборка статей о взаимодействиях ледников с атмосферой, океаном и земной корой. — Земля и Вселенная, 1984, № 1.
Ясаманов Н. А. Древние климаты Земли. Л., Гидрометеиздат, 1985.

Рецензент: В т ю р и н Б. И., доктор географических наук.

Котляков В. М. и др.

К73 Климат Земли: прошлое, настоящее, будущее.
/ В. М. Котляков, М. Г. Гросвальд, А. Н. Кренке. —
М.: Знание, 1985. — 48 с. — (Новое в жизни, науке,
технике. Сер. «Науки о Земле»; № 12).

12 к.

В брошюре популярно изложены научные представления о современном, древнем и будущем климате Земли. Рассмотрены физические факторы формирования климата. Много места уделено роли древних оледенений, ледников, снежного покрова, морских льдов в «климатической машине» планеты.

Брошюра рассчитана на лекторов, слушателей и преподавателей народных университетов, читателей, интересующихся данными проблемами.

1903000000

**ББК 26.234.7
551.5**

**Владимир Михайлович КОТЛЯКОВ,
Михаил Григорьевич ГРОСВАЛЬД,
Александр Николаевич КРЕНКЕ**

**КЛИМАТ ЗЕМЛИ:
ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ, БУДУЩЕЕ**

Главный отраслевой редактор А. Нелюбов

Редактор Л. Иваненко

Художник М. Дорохов

Худож. редактор М. Гусева

Техн. редактор С. Птицына

Корректор И. Тереховская

ИБ № 7309

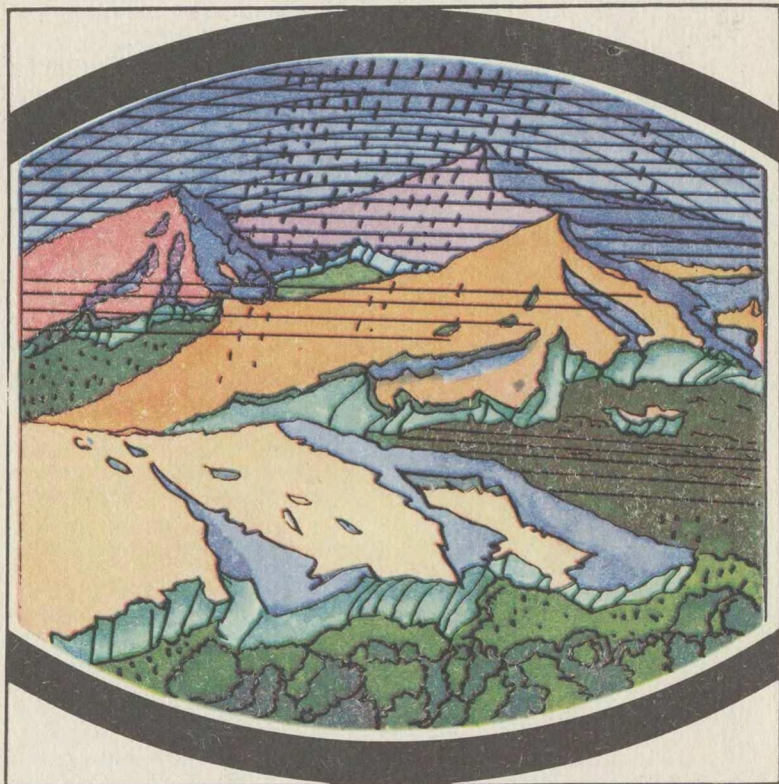
Сдано в набор 19.08.85. Подписано к печати 18.10.85. Т14492. Формат бумаги 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная № 2. Гарнитура журн. рубленая. Печать офсет. Усл. печ. л. 2,80. Усл. кр.-отт. 6,06. Уч.-изд. л. 3,41. Тираж 24 560 экз. Заказ 2299. Цена 12 коп. Издательство «Знание». 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 856612. Ордена Трудового Красного Знамени Калининский полиграфический комбинат Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. г. Калинин, пр. Ленина, 5.

ДОРОГОЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Брошюры этой серии в розничную продажу не поступают, поэтому своевременно оформляйте подписку. Подписка на брошюры издательства „Знание“ ежеквартальная, принимается в любом отделении „Союзпечати“.

Напоминаем Вам, что сведения о подписке Вы можете найти в „Каталоге советских газет и журналов“ в разделе „Центральные журналы“, рубрика „Брошюры издательства „Знание“.

Цена подписки на год 1 р. 44 к.



СЕРИЯ

НАУКИ О ЗЕМЛЕ