

Эволюция климатов Земли

Капризы погоды последнего времени оживили разговоры о грядущем значительном потеплении земного климата, вызываемого экономической деятельностью человека, главным образом вследствие выбросов в атмосферу так называемых *парниковых газов* (углекислого газа, метана и др.). Идея о разогреве земной атмосферы парниковыми газами была высказана впервые в конце XIX в. известным шведским учёным С.Аррениусом [1] и с тех пор как очевидная принимается на веру, практически без проверки [2, 3]. Эта точка зрения и сейчас полностью доминирует в заключениях Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), организаций Гринпис, программы ООН по окружающей среде (ЮНЕП), Всемирной метеорологической организации (ВМО), а также в выводах Российских экологических и научных организаций. Она же была полностью поддержана решениями Международных экологических конгрессов в Рио-де-Жанейро (Бразилия, 1992), в Киото (Япония, 1997), Межправительственной комиссии по проблеме климатических изменений (Париж, 2007). Согласно прогнозам её сторонников, потепление климата может достигнуть к 2100 г. 2,5–5 °С, а вызванное этим потеплением повышение уровня океана на 0,6–1 м, что создаст определённые проблемы для густонаселённых районов континентальных побережий, а также для газовых и нефтедобывающих производств в низменных зонах большей части побережий севера России. Прогнозируются и другие губительные для природы последствия: расширение пустынь, исчезновение мерзлоты, эрозия почв и т.д.

Опасение аналогичных катастрофических явлений и давление экологических организаций, а часто и просто спекуляции на эту тему, заставляют правительства развитых стран выделять огромные средства на борьбу с последствиями потепления климата, якобы связанного с антропогенными выбросами в атмосферу «парниковых газов». А насколько оправданы эти расходы? Не ведём ли мы борьбу с «ветряными мельницами»?

Из теории парникового эффекта* (см., например [8, 10, 11]), в частности, следует, что небольшие концентрации парниковых газов практически никак не влияют на температуру воздуха в тропосфере. Связано это с тем, что после поглощения парниковыми газами инфракрасного (теплового) излучения само излучение пропадает, а его энергия переходит в энергию колебательных движений молекул воздуха. В результате облучённый объем воздуха разогревается, расширяется и быстро поднимается в верхние слои тропосферы, где и охлаждается, а ему на смену опускается уже охлаждённый воздух, и температура воздуха в тропосфере вновь снижается до уровня адиабатического распределения, т.е. практически не меняется. Аналогичная ситуация должна наблюдаться и с разогревом воздуха при

конденсации в нём влаги. При значительных же концентрациях парниковых газов развивается – происходит похолодание, а не потепление климата. Так, при мысленной замене азотно-кислородной атмосферы Земли на углекислотную, но с тем же приземным давлением 1 атм, средняя температура земной тропосферы снижается на 6–7 °С, а не повышается, как это принято думать. Связано это с тем, что из-за большей плотности углекислого газа углекислотная атмосфера оказывается более тонкой, чем азотно-кислородная. К тому же теплоёмкость углекислого газа заметно ниже теплоёмкости азота и кислорода. Поэтому углекислотная атмосфера, подобно тонкому одеялу с меньшей теплоёмкостью, хуже сохраняет тепло Земли, чем более протяжённая азотно-кислородная атмосфера, обладающая к тому же и большей теплоёмкостью.

Объясняется же этот кажущийся парадокс тем, что вынос тепла из тропосферы в основном происходит благодаря конвекции, которая обеспечивает зачительно более эффективный перенос тепла, чем радиация. Отсюда становится понятным, что с увеличением концентрации углекислого газа и поглощения им теплового излучения ещё больше возрастает конвективный массообмен воздуха, выносящий это тепло за пределы тропосферы.

Приведённый теоретический вывод наглядно иллюстрируется и экспериментальными данными по бурению ледникового покрова Антарктиды (рис. 1) [7, 8]. При их внимательном изучении оказывается, что кривая температурных колебаний** (так называемая *изотопная температура*) опережает соответствующие им изменения концентраций углекислого газа в среднем приблизительно на 500–600 лет, т.е. как раз на время полного перемешивания верхнего (активного) слоя воды в Мировом океане. Напомним, что в океане растворено углекислого газа приблизительно в 60–90 раз больше, чем его содержится в атмосфере, а согласно закону Генри, парциальное давление углекислого газа в атмосфере повышается при нагревании океанических вод и, наоборот, снижается при её охлаждении (это хорошо известный всем «эффект шампанского», но только в более спокойном варианте).

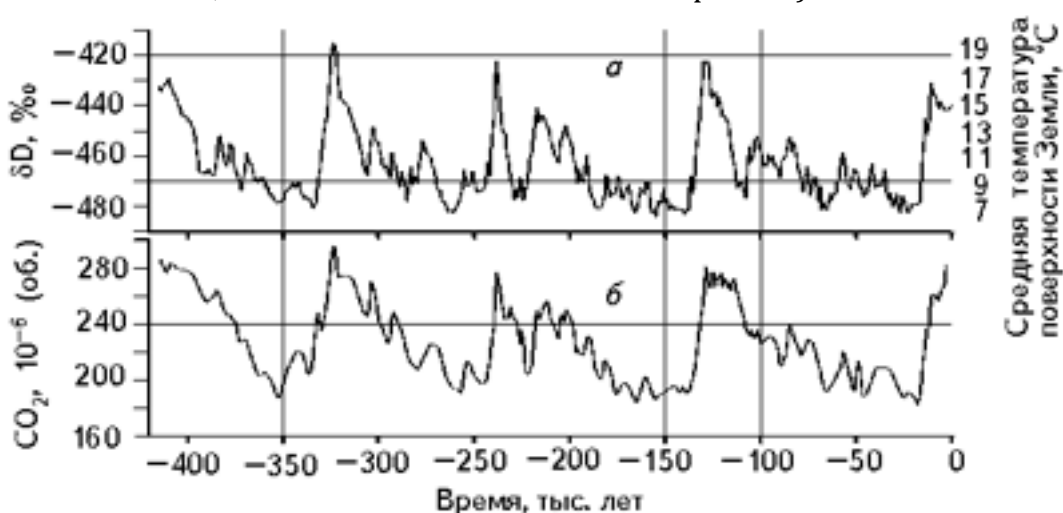


Рис. 1. Корреляция колебаний изотопной температуры воздуха (а) с изменениями концентрации углекислого газа (б) за последние 420 тыс. лет на антарктической станции «Восток». Данные по концентрациям CO_2 и температуре, полученные по керну скважины во льду, пробуренной на этой станции до глубины 3623 м [9], были

любезно предоставлены В.М.Котляковым (шкала средних температур поверхности Земли – наша интерпретация)

Таким образом, результаты бурения ледникового покрова Антарктиды однозначно показывают, что изменения температуры на протяжении последних 420 тыс. лет всегда опережали соответствующие им изменения концентраций CO_2 в толще ледникового покрова. Это бесспорное и однозначное свидетельство того, что изменения концентрации CO_2 в атмосфере являются **следствием** глобальных изменений температуры, а не их **причиной**.

Так в чём же тогда истинная причина наблюдавшегося в XX в. потепления климата? На этот вопрос сегодня можно ответить вполне определённо: колебания солнечной активности (рис. 2) – между её интенсивностью и приземными температурами чётко наблюдается сильная корреляция (необходимо учесть большую ошибку определения солнечной активности в Средние века).

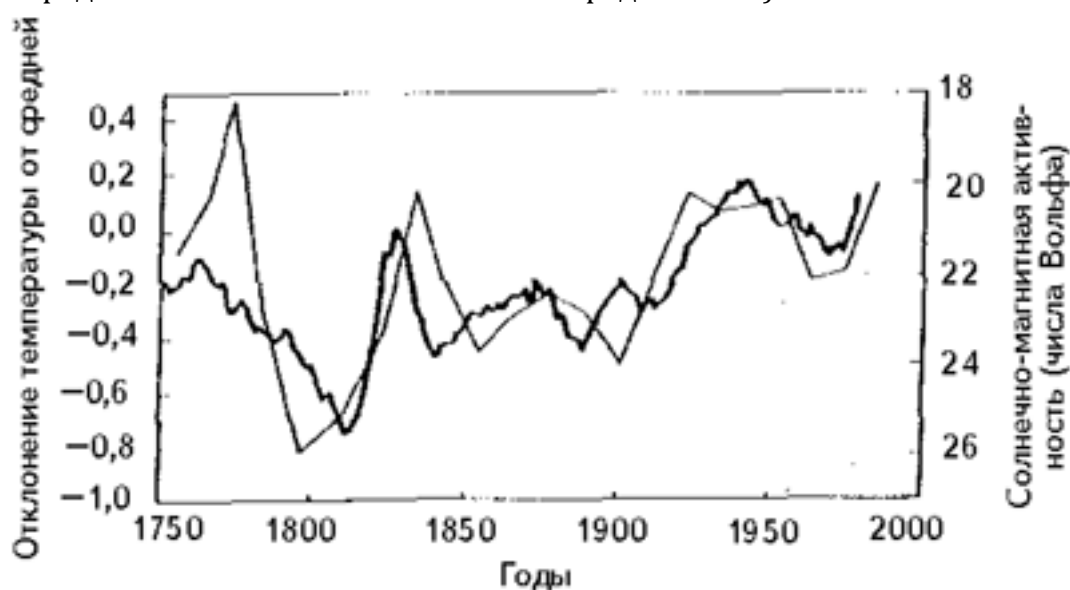


Рис. 2. Корреляция температурных колебаний в Северном полушарии с магнитной активностью Солнца (числами Вольфа). Левая шкала и жирная линия – отклонения среднего значения поверхностной температуры, °С, Северного полушария при текущем 11-летнем сглаживании. Правая шкала и тонкая линия – осреднённая солнечно-магнитная активность (числа Вольфа). Резким всплескам магнитных циклов соответствует более активное, и, следовательно, более яркое солнце [10]

По историческим данным известно, что в Средние века климат Земли был заметно теплее современного. Примером тому может служить и название острова Гренландия, поскольку в момент его открытия Эриком Рыжим в X в. побережье действительно было покрыто сочной зелёной травой. О колебаниях приземных температур в прошлые времена говорят и геологические данные, приведённые, например, в работе [5]. Вероятнее всего, сейчас мы живём вблизи максимума одного из временных потеплений, начавшегося еще в XVII в., когда об антропогенном влиянии на климат выбросов «парниковых газов» в атмосферу и говорить-то не приходилось. Отсюда видно, что современное потепление носит ярко выраженное природное происхождение и в скором времени может смениться новой фазой похолодания [11]. Так, судя по расчётам ведущего астронома Пулковской обсерватории Х.И.Абдусаматова [12], начало медленного понижения температуры

можно ожидать уже в 2012–2015 гг., а глобального минимума она достигнет примерно к 2055–2060 гг. Такое положение сохранится приблизительно в течение 50–70 лет, и только в начале XXII в. начнётся очередной цикл глобального потепления климата. Такие вариации климата явно определяются периодическими (пульсирующими) изменениями светимости Солнца (см. рис. 2), которые, в свою очередь, вероятно, связаны с колебаниями размеров и площади Солнца, зависящими от интенсивности протекающих в его недрах ядерных реакций [12].

В этой связи необходимо обратить внимание на то, что Киотский протокол, помимо того, что он не имеет научного обоснования, по своей сути ещё и противоречит физике природных процессов и совершенно неверно объясняет влияние на климат антропогенных воздействий. Так, пропорционально увеличению парциального давления углекислого газа в атмосфере повышается эффективность сельского хозяйства и скорость восстановления лесов, а также засухоустойчивость злаковых культур, в том числе пшеницы.

Основы адиабатической теории парникового эффекта

Атмосфера представляет собой яркий пример открытой диссипативной (рассеивающей энергию) системы, описываемой нелинейными уравнениями математической физики. Эти два обстоятельства позволяют надеяться, что в атмосфере возможна самоорганизация физических полей и формирование в ней устойчивых термодинамических структур в масштабах пространства и времени, определяемых параметрами процесса. При таком подходе можно пользоваться только наиболее значимыми и достоверно установленными параметрами среды, такими как масса атмосферы, её теплоёмкость, осреднённое значение энергии падающего на Землю солнечного излучения, а также учитывать сильную отрицательной обратной связь между сферическим альбедо планеты и её осреднённой приземной температурой.

Из всех планет Солнечной системы только Земля обладает уникальными атмосферой и гидросферой, благоприятствующими развитию на земной поверхности высших форм жизни. Определяется это удачным стечением многих обстоятельств: и тем, что Солнце «спокойная» звезда, и тем, что Земля расположена на оптимальном расстоянии от светила, и тем, что у неё имеется массивный спутник – Луна, – и химическим составом первичной Земли, и многими другими причинами, рассмотренными более подробно в нашей монографии [6].

Согласно разработанной нами теории парникового эффекта, главными факторами, ответственными за возникновение комфортных климатических условий на Земле, являются величина солнечной радиации, а также давление и теплоёмкость земной атмосферы [4, 5]. Согласно этой теории, в классическом варианте приземная температура T_e , и вообще абсолютная температура на любом уровне тропосферы (нижнего слоя атмосферы) пропорциональна эффективной температуре вращающейся Земли на её расстоянии от Солнца. Как известно, эффективная температура планеты зависит от интенсивности солнечного излучения (солнечной постоянной) S , альбедо планеты (её отражательной способности) A , давления

атмосферы p и показателя адиабаты $\alpha = (\gamma - 1) / \gamma$ ($\gamma = C_p / C_v$, где C_p и C_v – теплоёмкости воздушной смеси соответственно при постоянном давлении и

постоянном объёме), зависящего от состава и теплоёмкости атмосферы:

$$T = b^{\alpha} \cdot T_e \cdot \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\alpha} = b^{\alpha} \cdot \sqrt[4]{\frac{S \cdot (1-A)}{4\sigma}} \cdot \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\alpha}, \quad (1)$$

где b – безразмерный коэффициент пропорциональности; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-5}$ эрг/(см² • с • град⁴) – постоянная Стефана–Больцмана; p_0 – единица давления (например, 1 атм). В приведённом выражении солнечная постоянная делится на 4, поскольку освещаемый Солнцем земной диск в 4 раза меньше общей поверхности Земли. Однако, строго говоря, это справедливо только в случае, когда ось вращения планеты расположена строго перпендикулярно плоскости эклиптики, т.е. когда угол её прецессии равен нулю. Напомним, что углом прецессии Ψ называется угол между осью вращения планеты и перпендикуляром к плоскости эклиптики, по которой Земля и другие планеты обращаются вокруг Солнца. В общем же случае $\Psi \neq 0$ выражение (1) несколько усложняется, но зато становится более универсальным и точным:

$$T = b^{\alpha} \cdot \sqrt[4]{\frac{S(1-A)}{\sigma \cdot \left(\frac{\pi/2 - \Psi}{\pi/2} \cdot 4 + \frac{\Psi}{\pi/2} \cdot 2 \cdot 2 \cdot \frac{1 - \cos \Psi}{(\sin \Psi)^2} \right)}}. \quad (2)$$

Для проверки адиабатической теории парникового эффекта по выражению (2) были рассчитаны (впервые в мире) распределения температуры в тропосфере Земли с азотно-кислородным составом умеренного давления и тропосфере Венеры с углекислотной атмосферой высокого давления (до 90,9 атм) [4]. Результаты дали весьма неплохое (с точностью до долей процента) совпадение с эмпирическими данными (температуры в тропосфере Венеры измерялись советскими и американскими космическими аппаратами). Такое совпадение нельзя считать случайным, скорее всего, оно убедительно свидетельствует о справедливости рассматриваемой здесь теории и о возможности её использования для восстановления климатов Земли в прошлые геологические эпохи и прогнозирования их изменений в будущем. Но для этого предварительно необходимо рассмотреть эволюцию состава и давления атмосферы как в прошлом, так и в будущем.

Эволюция состава и давления земной атмосферы

Пользуясь оригинальной методикой расчёта [5, 6], мы получили эволюцию состава и давления атмосферы для всего времени жизни Земли (рис. 3). Учитывалось, что при образовании планеты её атмосфера состояла только из инертного азота и следов благородных газов, а давление было около 1 атм. Никаких добавок химически активных газов (CO₂, CO, O₂, H₂O или OH) в доархейской (катархейской) атмосфере не наблюдалось, поскольку все они быстро поглощались реголитом (пористым грунтом) растущей Земли.

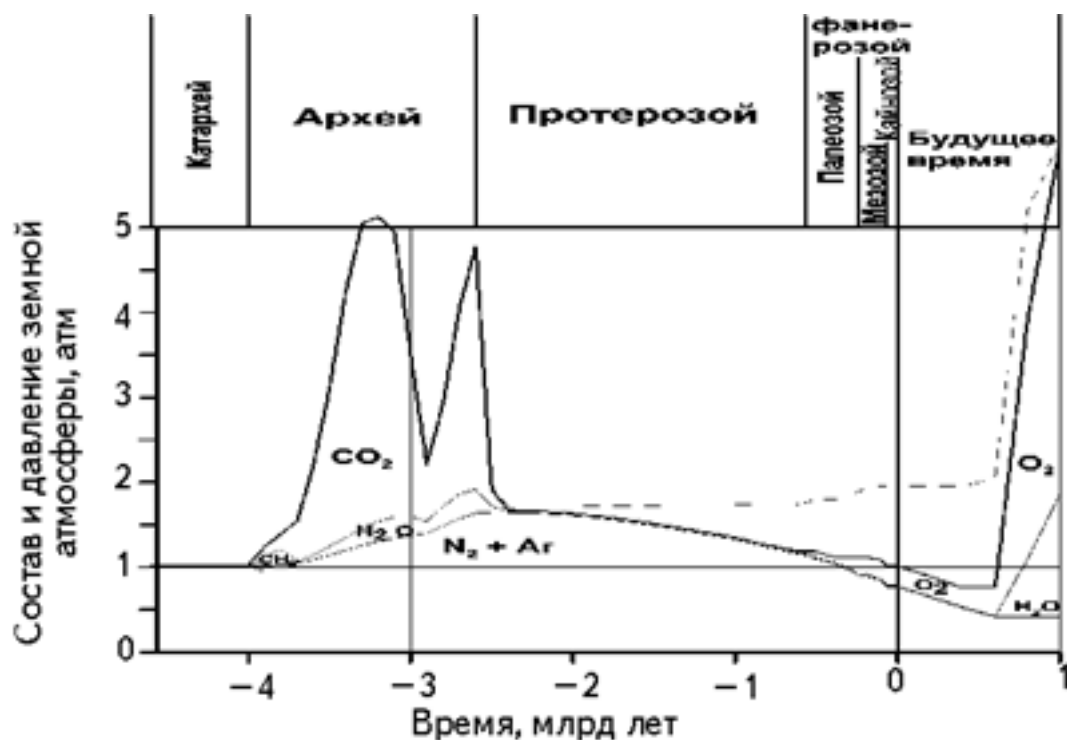


Рис. 3. Эволюция состава и давления земной атмосферы (штриховой линией отмечено атмосферное давление в предположении, что бактериального поглощения азота не существовало)

После начала дегазации Земли в раннем архее стало быстро нарастать парциальное давление углекислого газа CO_2 , а затем и метана CH_4 , который образовывался в результате восстановления CO_2 в присутствии H_2O на металлическом железе, имевшемся в первичном веществе молодой Земли. Атмосфера стала азотно-углекислотно-метановой и существенно восстановительной, что, безусловно, способствовало возникновению жизни. После диссоциации метана под влиянием жёсткого излучения Солнца, примерно через 200 млн лет после начала тектонической активности Земли (около 4 млрд лет назад), земная атмосфера превратилась в нейтральную углекислотно-азотную. Благодаря дегазации азота из мантии в позднем архее парциальное давление азота заметно повысилось. Вместе с тем парциальное давление CO_2 в конце архея стало снижаться, поскольку этот газ стал интенсивно связываться в карбонатных осадках. Наконец, начиная примерно с 3,5 млрд лет назад, после существенного подъёма средней температуры атмосферы, к её углекислотно-азотному составу прибавилось заметное количество паров воды. После выделения земного ядра и образования слоя океанической коры современного типа (около 2,5 млрд лет назад) в результате резкого снижения тектонической активности Земли почти весь атмосферный углекислый газ оказался связанным в карбонатных породах Земли, а состав протерозойской атмосферы стал почти чисто азотным, лишь с небольшими примесями аргона и метана. Начиная со среднего протерозоя парциальное давление азота стало заметно снижаться в связи с жизнедеятельностью азотфиксирующих бактерий. Одновременно с этим в позднем рифее в атмосфере начал накапливаться кислород.

В фанерозое парциальное давление азота продолжало падать, хотя в палеозое и мезозое оно во многом компенсировалось ускоренной генерацией биогенного кислорода. После же широкого развития цветковых растений в конце мезозоя,

главных «производителей» кислорода, его парциальное давление достигло своего стационарного значения около 230 мбар (≈ 173 мм. рт.ст.). После этого благодаря продолжающемуся биогенному снижению парциального давления азота, в кайнозойское атмосферное давление вновь стало уменьшаться, что и привело, согласно выражениям (1), (2), к новому похолоданию.

Следует подчеркнуть положительную роль азотпотребляющих бактерий в создании благоприятных условий для развития высокоорганизованной жизни на Земле. Если бы таких бактерий не было, то сейчас атмосферное давление достигало бы приблизительно 2 атм, средняя температура Земли равнялась бы 54°C (вместо 15°C), а на экваторе превышала бы 70°C , что намного выше температуры коагуляции большинства белков. Подходящие для высокоорганизованной жизни условия могли бы сохраняться только на вершинах гор, да и то в высоких широтах. Но в таких экстремальных условиях не мог бы накапливаться в достаточных количествах необходимый для жизни кислород. Фактически, если бы не происходило удаления азота из земной атмосферы, сейчас, как и в архее, Землю населяли бы только термофильные бактерии и, быть может, примитивные многоклеточные.

В далёком будущем нас ждёт резкое увеличение парциального давления кислорода в связи с его выделением в процессе формирования земного ядра. Сейчас образование вещества внешней оболочки земного ядра идёт по реакции: $2\text{FeO} \rightarrow \text{Fe} \bullet \text{FeO} + \text{O}$. Выделяющийся кислород под влиянием высокого давления вновь связывается с оксидами железа, формируя магнетитовую компоненту мантии: $\text{FeO} + \text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 76,48 \text{ ккал/моль}$, этому способствует и высвобождающаяся энергия сжатия (объём молекулы магнетита меньше, чем молекулярного объёма FeO).

После полного окисления силикатного железа мантии до стехиометрии магнетита образование вещества земного ядра уже будет сопровождаться выделением свободного и ни с чем не связывающегося кислорода: $2\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow 3\text{Fe} \bullet \text{FeO} + 5\text{O}$. В результате, спустя 600 млн лет, давление земной атмосферы должно быстро подняться выше 10 атм, вызвав тем самым на Земле сильнейший парниковый эффект: средние температуры значительно превысят 180°C ! После вскипания океанов давление поднимется ещё – до 270 атм, а температура – выше 600°C (на Венере сейчас около 460°C). Естественно, в таких условиях нечего и говорить о возможности сохранения не только высокоорганизованной, но и самой примитивной жизни.

Прецессионные циклы и ледниковые эпохи Земли

Помимо рассмотренных причин плавного похолодания климатов Земли в протерозой и фанерозой за счёт уменьшения атмосферного давления её приземные температуры, судя по выражению (2), существенно зависят и от величины угла прецессии Земли Ψ . Рассмотрим теперь более подробно и этот аспект проблемы изменений климатов Земли.

Возникновение прецессии вращающегося тела связано с отклонениями распределения его масс от полной осевой симметрии. На Земле такие отклонения симметрии прежде всего обусловлены расположением континентов и океанов на её поверхности, ледниковыми покровами континентов в высоких широтах [5]. Форма Земли весьма близко соответствует форме эллипсоида вращения жидкого тела,

обладающего инерционным экваториальным вздутием. При этом экваториальный радиус Земли $R_e = 6378,2$ км превышает полярный радиус $R_p = 6356,8$ км на 21,4 км, что соответствует её сжатию $\varepsilon = (R_e - R_p)/R_e = 1/298,3$. Отсюда следует, что на экваторе Земли оказываются сосредоточены большие избыточные массы, способные гравитационно взаимодействовать с Луной и Солнцем. Причём такие взаимодействия стремятся повернуть Землю в сторону приближения экваториальной плоскости к плоскости эклиптики (рис. 4). Луна и Солнце одновременно притягивают обе стороны экваториального вздутия Земли, стремясь повернуть их в противоположные стороны. Но сила воздействия на ту часть вздутия, которая обращена к Луне (или к Солнцу), оказывается несколько большей, чем на противоположную.

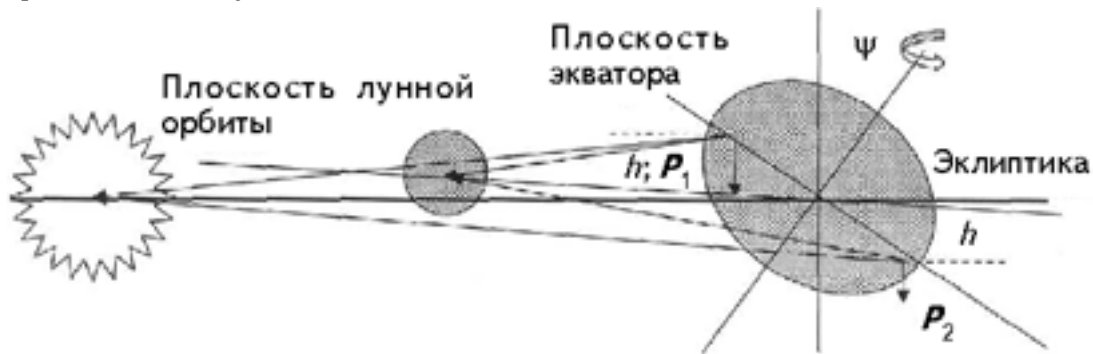


Рис. 4. Схема влияния лунно-солнечного притяжения на экваториальное инерционное вздутие Земли, приводящее к приближению экваториальной плоскости Земли к плоскости обращения Луны вокруг Земли и к плоскости эклиптики, т.е. к снижению угла прецессии Земли (масштабы для наглядности искажены)

Определим массу экваториального вздутия Земли. Объём вздутия равен разности объёмов эллипсоида вращения Земли и вписанной в него сферы:

$$V_{\text{взд}} = \frac{4}{3} \pi R_e^2 \cdot R_p - \frac{4}{3} \pi R_p^3 = 7,1 \cdot 10^{24} \text{ см}^3, \quad (3)$$

следовательно, масса вздутия $m_{\text{взд}} = V_{\text{взд}} \cdot \rho_{\text{взд}} \approx 2 \cdot 10^{25}$ г, где $\rho_{\text{взд}} \approx 2,8$ г/см³ – средняя плотность вздутия с учётом слоя океанической воды глубиной около 3–4 км и подстилающего слоя океанической коры. Эффективная же масса каждой из половин экваториального вздутия оказывается примерно в два раза меньше – порядка $1 \cdot 10^{24}$ г. Разность действующих на них сил лунного притяжения $\Delta P_L = P_1 - P_2$ достигает (с точностью до $2/\pi$)

$$\gamma \cdot m_L \cdot m_{\text{взд}} \cdot \left[\frac{1}{(L_L - R \cos(\psi - \lambda))^2} - \frac{1}{(L_L + R \cos(\psi - \lambda))^2} \right], \quad (4)$$

где $\gamma = 6,67 \cdot 10^{-8}$ см³/(г • с²) – гравитационная постоянная; $m_L = 7,35 \cdot 10^{25}$ г – масса Луны; $L_L = 3,844 \cdot 10^{10}$ см – расстояние между центрами тяжести Земли и Луны; $R = 6,371 \cdot 10^8$ см – средний радиус Земли; $\lambda \approx 5^\circ$ – угол между плоскостью обращения

Луны вокруг Земли и плоскостью эклиптики, откуда $\Delta P_L \approx 2,2 \cdot 10^{21} \text{ см} \cdot \text{г/с}^2$. Аналогично: разность сил солнечного притяжения достигает $\Delta P_S \approx 1,02 \cdot 10^{21} \text{ см} \cdot \text{г/с}^2$ ($m_S = 1,99 \cdot 10^{33} \text{ г}$ – масса Солнца; $L_S = 1,5 \cdot 10^{13} \text{ см}$ – расстояние между центрами масс Земли и Солнца).

Очевидно, что действия лунного и солнечного притяжений должны быть приложены к центру масс каждой из половин экваториального вздутия. Но каждая из них по форме напоминает свод с центром тяжести, отстоящим от геометрического центра Земли приблизительно на $2/3$ радиуса Земли. В этом случае

$$h \approx \frac{2}{3} \cdot R \cdot \sin \psi$$

плечо момента сил равно , а разность моментов сил, приложенных со стороны Луны и Солнца к экваториальному вздутию Земли соответственно $\Delta M_L = \Delta P_L \cdot h = 3,71 \cdot 10^{29} \text{ см}^2 \cdot \text{г/с}^2$ и $\Delta M_S = \Delta P_S \cdot h = 1,72 \cdot 10^{29} \text{ см}^2 \cdot \text{г/с}^2$.

Помимо влияния Луны и Солнца на прецессию Земли воздействует и асимметрия расположения континентов на земной поверхности, поскольку их центр масс находится несколько выше центра масс вытесненного континентами вещества мантии. Однако необходимо ещё учитывать неоднородность строения мантии Земли, особенно расположения относительно лёгких восходящих мантийных потоков и более тяжёлых опускающихся литосферных плит, а также неровности рельефа земного ядра. Суммарное влияние всех этих факторов становится весьма неопределённым. По нашим косвенным оценкам, основанным на сопоставлении теоретических определений температурных колебаний климата в плейстоцене (1,64 млн–10 тыс. лет назад) с изотопными температурами ледникового покрова Антарктиды, $\Delta M_{cont+m} \approx 0,6 \cdot 10^{29} \text{ см}^2 \cdot \text{г/с}^2$.

Теперь, пользуясь теорией свободных гироскопов, можно определить среднюю скорость поворота оси вращения Земли ω вокруг линии пересечения экваториальной плоскости с плоскостью обращения Луны вокруг Земли и Земли вокруг Солнца, определяемой простым уравнением

$$\omega = \frac{\Delta M_L + \Delta M_S - \Delta M_{cont+m}}{I \cdot \Omega}, \text{ где } I = 8,04 \cdot 10^{44} \text{ г} \cdot \text{см}^2 \text{ – момент инерции}$$

Земли; $\Omega = 7,27 \cdot 10^{-5} \text{ рад/с}$ – угловая скорость вращения Земли. Но $\omega = d\psi/dt$, откуда находим зависимость угла прецессии от времени (рис. 5, кривая ψ). Теперь по выражению (2) легко найти и зависимость изменения приземной температуры от времени (рис. 5, кривая T).

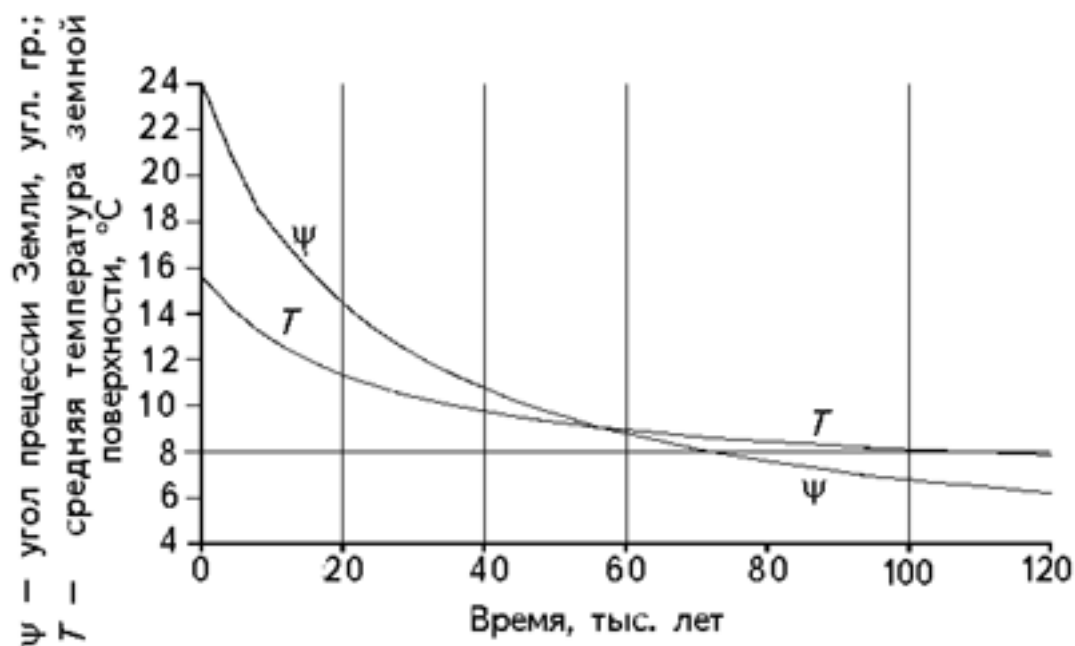


Рис. 5. Изменение угла прецессии Земли (Ψ) и обусловленной этим средней температуры поверхности Земли (T) со временем

По мере приближения плоскости земного экватора к эклиптике угол прецессии Ψ уменьшается от 24° до $2,5^\circ$, что сопровождается, судя по выражению (2), существенным похолоданием климата: температура уменьшается от 15°C , асимптотически приближаясь к своему предельно минимальному значению $6,5^\circ\text{C}$. Как только средняя приземная температура достигает некоторого критического значения (для северных регионов Земли близкая, по-видимому, к 9°C), возникают оледенения. Возникновение же ледниковых покровов в приполярных районах неизбежно приводит к нарушению равновесного вращения Земли и к новому, достаточно быстрому, возрастанию угла прецессии.

Судя по данным о распространении ледников в позднем плейстоцене [13], главные массы льда Северного полушария накапливались над Канадским щитом. Поэтому на тело Земли должны были действовать два момента сил, направленные друг против друга (рис. 6): одно вызывалось северным оледенением, а другое – оледенением Западной Антарктиды. Однако момент сил оледенения Северного полушария явно превалировал. Расчёты показывают, что момент дополнительных сил равен $5,1 \cdot 10^{30} \text{ г} \cdot \text{см}^2/\text{с}^2$, а характерное время потепления – около 2500 лет [5].

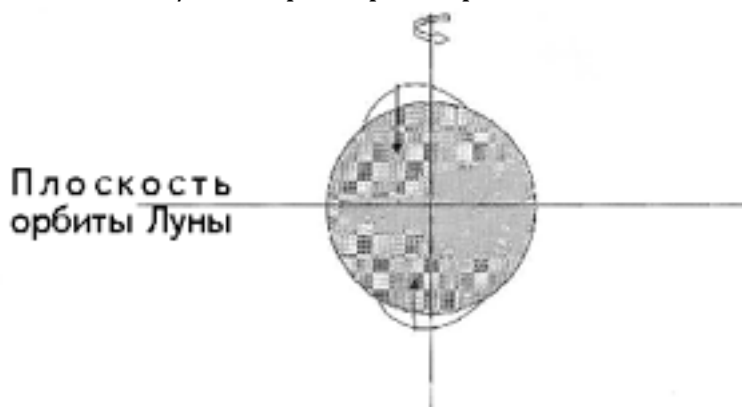


Рис. 6. Воздействие притяжения избыточной массы ледниковых покровов Северного полушария на поворот оси вращения Земли. Это воздействие направлено на

увеличение угла прецессии, в результате чего происходит быстрое (приблизительно за несколько тысяч лет) возвращение угла прецессии к своему исходному значению (около 24°), к потеплению климата, таянию и деградации ледниковых покровов и наступлению межледникового стадиала

Полученная оценка, безусловно, весьма приближённая, но позволяет оценить характерное время потепления климата и деградации оледенений. Оно оказалось порядка нескольких тысяч лет, что, по-видимому, и соответствует действительности. Так, по оценкам В.М.Котлякова [13], «распад гигантского плейстоценового оледенения в Северном полушарии произошёл геологически очень быстро – всего за несколько тысяч лет».

Учёт влияния прецессии орбиты Земли при её обращении вокруг Солнца (циклов Миланковича – с периодами главных гармоник около 40 тыс. [14] и 22 тыс. лет) приводит к температурным колебаниям около $\pm(2...3)^\circ\text{C}$. На рис. 7 приведён результат расчёта средней температуры Земли позднего плейстоцена в сопоставлении с экспериментальными значениями изотопной температуры толщи антарктического льда на станции «Восток» [9]. Видна хорошая корреляция, хотя теоретические кривые более гладкие. Подобрал по сдвигу фаз слагающих климатических колебаний наилучшее совпадение теории с экспериментом (по керну ледникового покрова Антарктиды), можно провести прогноз изменений климата в будущем (рис. 8): нас ждёт только похолодание, быть может, даже наиболее значительное из всех предыдущих.

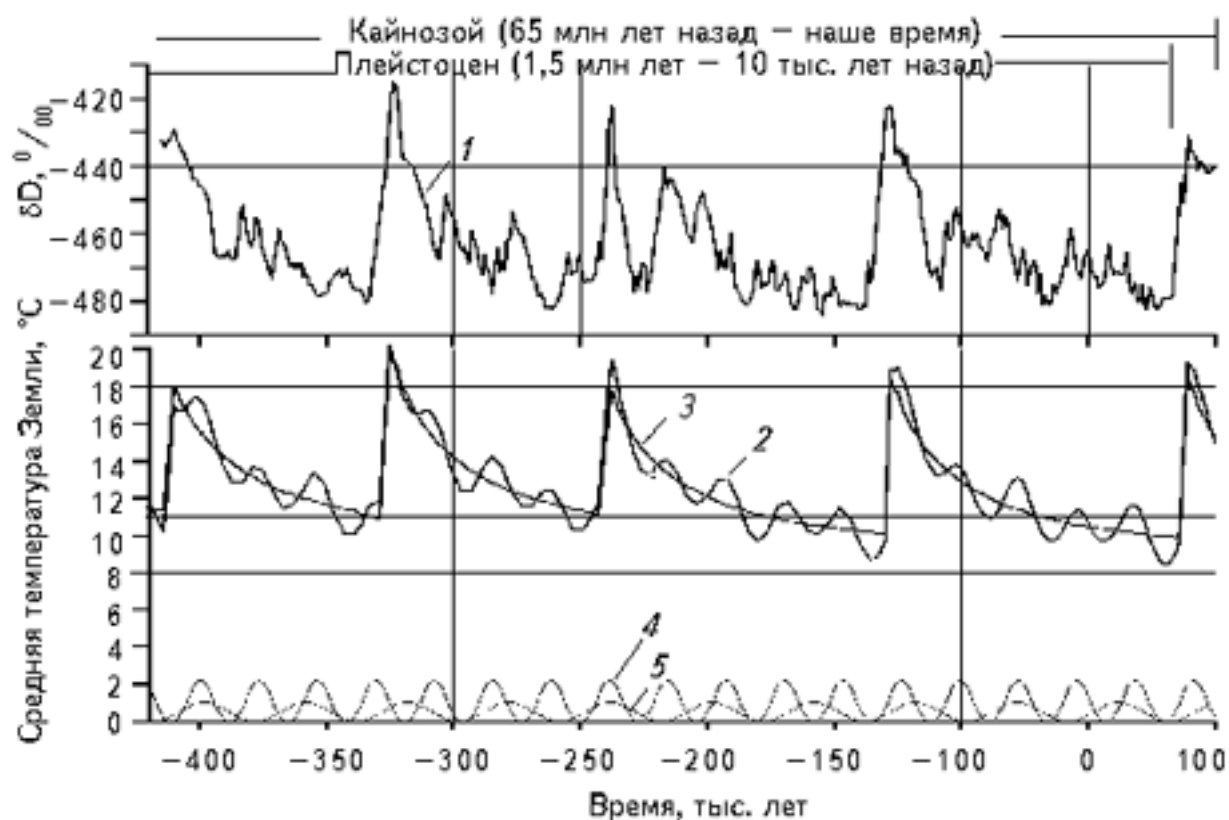


Рис. 7. Корреляция экспериментальных (кривая 1) и теоретических (кривая 2) температур в позднем плейстоцене. Теоретическая кривая 2 построена по выражениям (2), (4) и учитывает влияние Луны и Солнца, а также расположения континентов на прецессионные циклы Земли. Колебания температур вызваны

прецессией Земли – кривая 3 (максимумы совмещены с экстремумами экспериментальных данных) и прецессией орбиты обращения Земли вокруг Солнца (циклы Миланковича – около 22 и 40 тыс. лет) – кривые 2 и 3. Последний всплеск изотопной температуры (около 20–10 тыс. лет назад) соответствовал 8 °С, а предыдущий (130–140 тыс. лет) – 10 °С

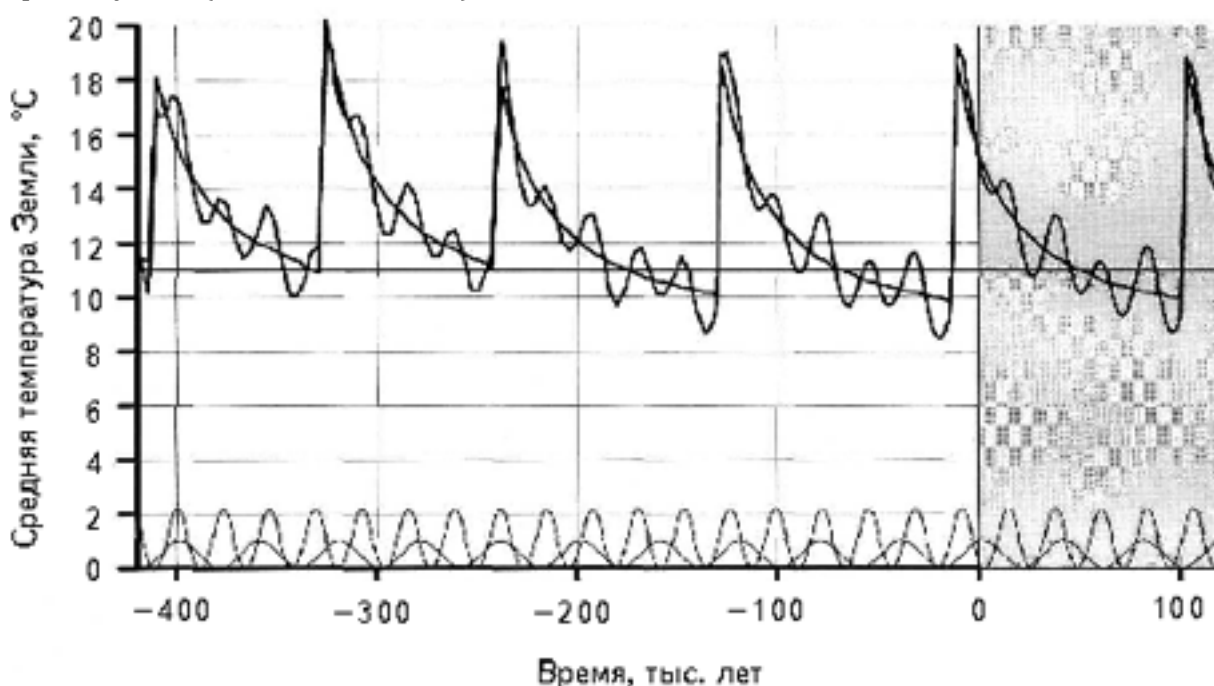


Рис. 8. Теоретический температурный прогноз климата на следующие 120 тыс. лет. Таким образом, в результате лунно-земных связей в плейстоцене периодически происходили медленные, но закономерные похолодания климата на 8–10 °С, продолжавшиеся в течение приблизительно 100–120 тыс. лет. После же образования мощных ледниковых покровов наступало быстрое, в течение нескольких тысяч лет, потепление всё на те же 8–10 °С и столь же быстрая деградация оледенений. Следовательно, лунно-земные связи в сочетании с оледенениями Земли, возбуждают существенно нелинейные автоколебательные климатические процессы, столь характерные для всего позднего плейстоцена. Отметим, что общее похолодание происходит благодаря жизнедеятельности азотпоглощающих бактерий, постоянно снижающих парциальное давление азота, а следовательно, и общее давление земной атмосферы в нарастающем режиме, начиная с рифея [5].

Влияние дрейфа континентов на климаты Земли

Как уже отмечалось, положение континентов на поверхности Земли может нарушать сферическую симметрию планеты и сильно влиять на её температурные режимы. Однако такое влияние трудно поддаётся расчёту, поскольку нам неизвестны аномалии плотности в мантии и рельеф земного ядра. Сегодня этот вклад относительно невелик, разность моментов сил тяжести всего $\Delta M_{cont+m} \approx 0,6 \cdot 10^{29} \text{ см}^2 \cdot \text{г/с}^2$. Однако при формировании суперконтинентов с компактным расположением отдельных материков, обычно располагавшихся на низких широтах, эти моменты резко возрастают. Поскольку непосредственный вклад дрейфа континентов в прецессию Земли определить трудно, мы воспользовались косвенным методом – определением углов прецессии по палеотемпературам

океанов, существовавшим в прошлые геологические эпохи.

Судя по данным [15], около 100 млн лет назад, во время образования последнего суперконтинента, вегенеровской Пангеи, температуры на экваторе могли достигать 32 °C при положительных температурах на полюсах Земли. Таким условиям соответствовал угол прецессии 34° [5]. Кроме того, определению углов прецессии в прошлые геологические эпохи помогают данные по реконструкциям предыдущих суперконтинентов и характеру их расколов в прошлые геологические эпохи Земли (рис. 9).

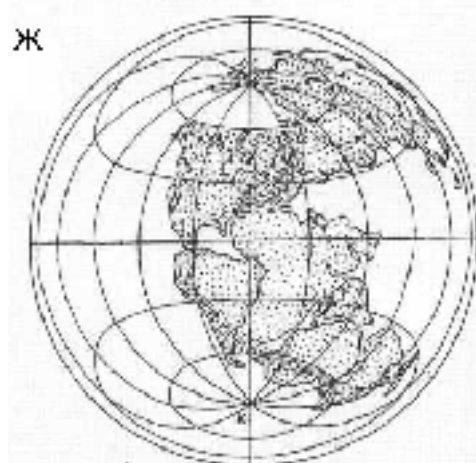
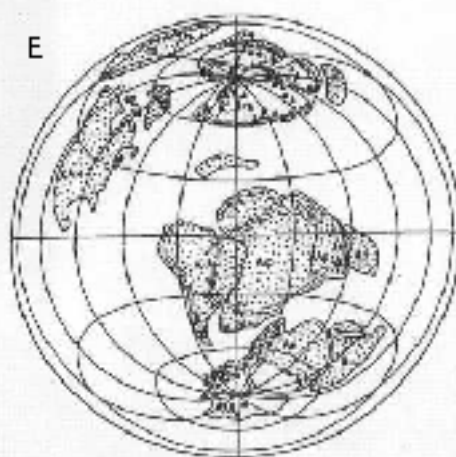
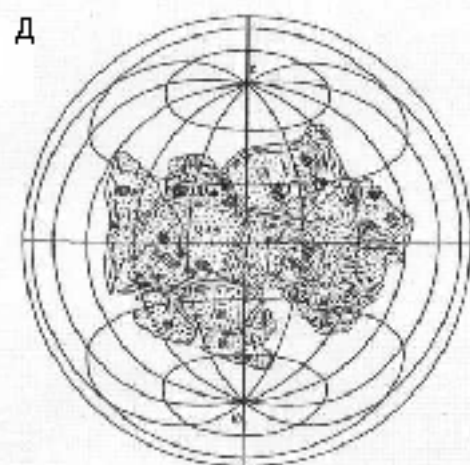
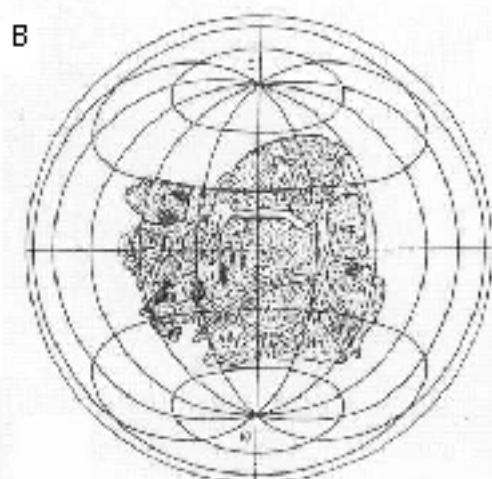
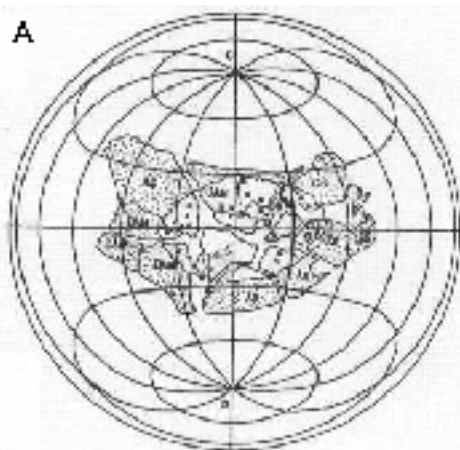


Рис. 9. Палеорекострукции положения континентов и океанов в проекции Ламберта: А – Моногея, 2,6 млрд лет назад (белым на континентах обозначен ледниковый покров); Б – распад Моногеи, 2,1 млрд лет назад; В – Мегагея Штилле, 1,8 млрд лет назад; Г – распад Мегагеи, 1,6 млрд лет назад; Д – Мезогея, 1,0 млрд лет назад; Е – раскол Мезогеи на Лавразию и Гондвану, 750 млн лет назад (белым на континентах обозначен ледниковый покров); Ж – Пангея Вегенера, 200 млн лет назад; З – современное расположение континентов и океанов [10]

Если стационарный угол прецессии при образовании Пангеи достигал приблизительно 34° , то для других суперконтинентов, судя по их реконструкциям и меньшей массе, получаются несколько меньшие значения углов прецессии (рис. 10). В интервалах времени между моментами образования суперконтинентов мы полагали углы прецессии близкими к стационарным $6-8^\circ$. Используя полученную модель изменений угла прецессии Земли, мы определили и колебания средней температуры океанов и континентов на экваторе и полюсах Земли (рис. 11, 12).

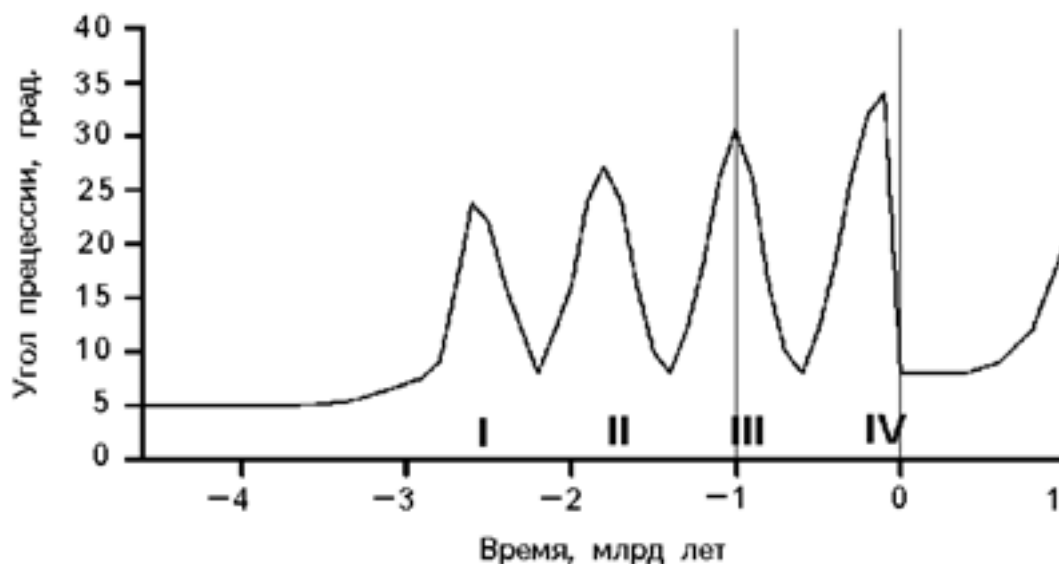


Рис. 10. Вероятные изменения угла прецессии в моменты формирования суперконтинентов: I – Моногея; II – Мегагея; III – Мезогея; IV – Пангея (будущий суперконтинент Гипергея в рассматриваемом интервале времён сформироваться ещё не успеет). Избыточные массы Моногеи, Мегагеи и Мезогеи составляли соответственно 0,7; 0,8 и 0,9 от массы Пангеи

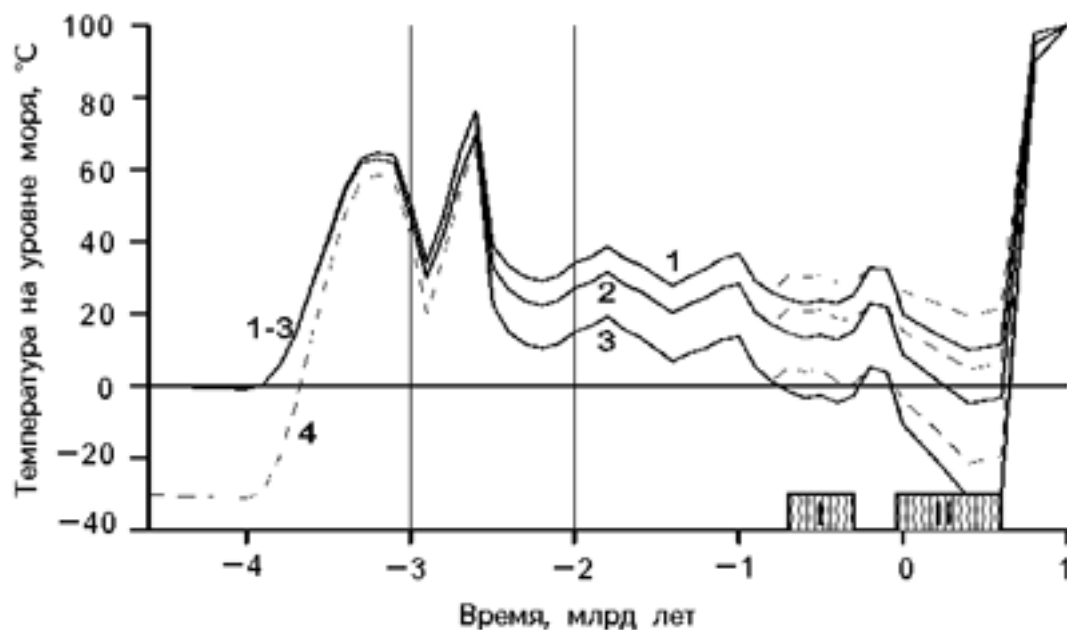


Рис. 11. Эволюция температуры Мирового океана, вызванная совместным действием изменения давления атмосферы и угла прецессии: на экваторе (1); в океанах, средняя (2); на полюсах Земли (4), пунктиром справа над кривыми 1-3 показаны температуры в моменты межледниковых стадиялов. I и II – эры оледенений полярных океанических бассейнов

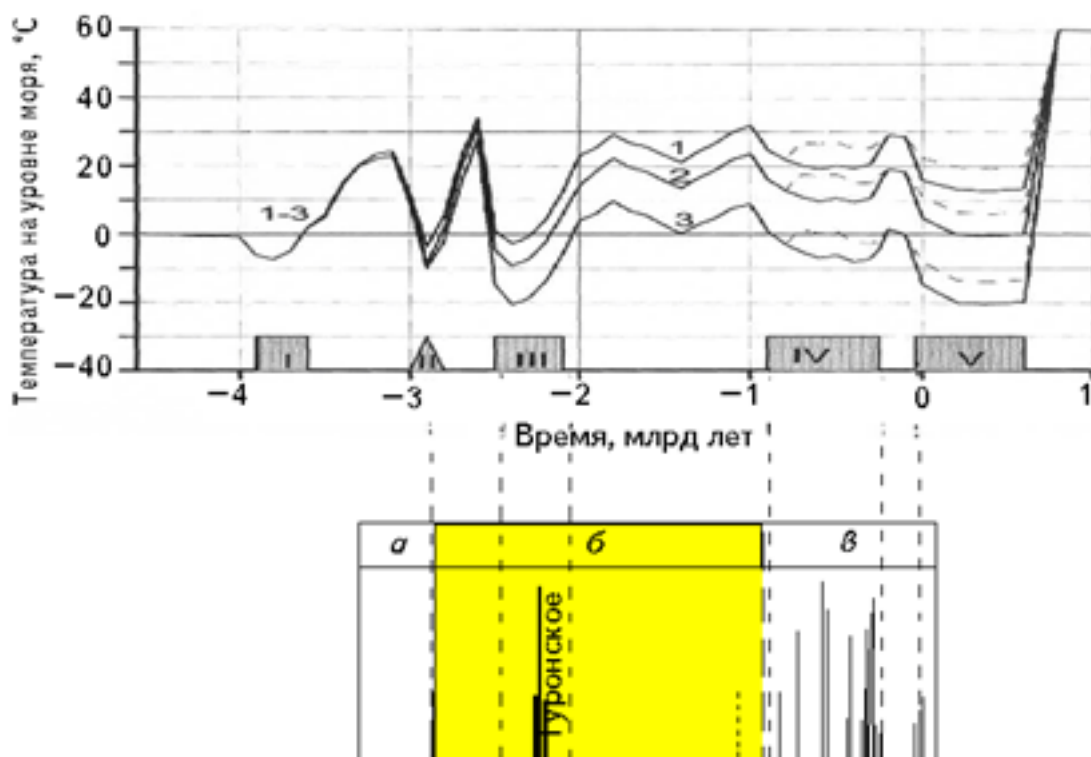


Рис. 12. Расчёт эволюции континентальных эр оледенений на Земле: температура континентов: 1 – на экваторе; 2 – средняя на поверхности континентов; 3 – на полюсах (пунктир – температура в моменты межледниковых стадиялов); I-V – эры оледенений континентов в полярных областях или на высокогорьях. Внизу: эволюция оледенений по геологическим данным [17]: а – безледниковый этап, б – эпизодически ледниковый, в – периодически ледниковый (вертикалями показаны оледенения)

Видно, что каждой эпохе образования суперконтинентов соответствует повышение приземных температур. Так, во время формирования первого в истории Земли суперконтинента Монгеи (около 2,6 млрд лет назад), когда ещё существовала архейская плотная углекислотная атмосфера, средняя температура на уровне океана превышала +70 °С. Поскольку в архее средние уровни континентов были исключительно высокими и достигали 6 км [6], то и температуры на их поверхности были существенно более низкими и не превышали +20...30 °С. При формировании Мегагеи Штилле (около 1,8 млрд лет) эти температуры приближались соответственно к +30 и +20 °С, при образовании Мезогеи (Родинии, около 1 млрд лет) они уже снизились до +30 и +25 °С, а при образовании Пангеи Вегенера (около 200 млн лет) уменьшились до +24 и +20 °С. В промежутках между эпохами формирования суперконтинентов средние температуры на уровне моря и на континентах снижались на 7–10 °С.

На рис. 12 вместе со средними температурами поверхности континентов и материков приведены геологические данные по распространению в истории Земли эр оледенений [17]. Как видно, после архея температура земной поверхности только снижалась, несмотря даже на возрастание светимости Солнца. Вначале, после накопления воды в Мировом океане и возникновения в раннем протерозое океанической коры современного типа, такое снижение температуры происходило благодаря связыванию углекислого газа в карбонатах, а затем (в протерозое и фанерозое) и благодаря жизнедеятельности азотфиксирующих бактерий. Похолодание земного климата даже более резкое, чем прежде, продолжится и в будущем.

Прежде всего обращает на себя внимание хорошая корреляция между теоретическими положениями эр оледенений и геологическими данными. Поэтому интересно рассмотреть причины возникновения выделенных ледниковых эр Земли. Начнём с древнейшей раннеархейской эры I. В это время, около 3,9–3,7 млрд лет назад, молодые морские бассейны и зародыши будущих континентальных щитов располагались только в сравнительно узком экваториальном поясе Земли. Поэтому моря тогда были тёплыми (от +3...20 °С, см. рис. 11). Что же касается вершин молодых континентальных образований, достигавших высот 3–4 км, то они, находясь на экваторе, несмотря на общее потепление климата попадали в зоны господства отрицательных температур (см. рис. 12). Возникавшие же на этих образованиях оледенения носили только локальный и горный характер, причём, возможно, настоящие ледники вообще не возникали, поскольку воды на Земле тогда ещё было очень мало. Поэтому, вероятно, никаких следов раннеархейского оледенения в геологической летописи и не осталось.

Среднеархейское оледенение II (2,9 млрд лет назад) было связано с временным снижением в это время общего давления архейской атмосферы, причины которого объясняются в работе [5]. Это оледенение могло развиваться уже не только в низких, но и в умеренных широтах, поскольку к этому времени ширина зоны тектонической активности Земли распространилась до широт $\pm 40^\circ$... 50° . До этих же широт тогда могли дрейфовать и молодые континентальные щиты. Вместе с тем их средняя высота увеличилась приблизительно до 5,5–6 км. В среднем архее уже заметно прибавилось воды в морских бассейнах, а их температура поднялась до

+30...40 °C, что усиливало испарение вод. Поэтому высокогорное оледенение среднего архея уже могло сопровождаться образованием небольших ледниковых покровов, оставивших свой след и в геологической летописи Земли.

В раннем протерозое возникли настоящие океаны, правда, пока ещё не очень глубокие, в среднем до 1 км [6], тогда как уровни стояния поверхностей континентов оставались сравнительно высокими – в среднем 2–4 км. Однако давление атмосферы в это время резко понизилось с 4,5–5 атм в архее до 1,6 атм в раннем протерозое, что и привело к столь же резкому похолоданию высокогорных регионов Мегагеи, вызвав тем самым оледенения на их поверхности. В начале раннепротерозойской эры оледенений (*Гуронское оледенение*, группа III), ледниковые покровы могли развиваться только на высоких и средних широтах. Однако после распада первого в истории Земли суперконтинента Моногеи, когда её «осколки» оказались разбросанными по всей поверхности Земли (см. рис. 10, А, Б) в середине и конце третьей эры оледенений (2,4–2,1 млрд лет назад), ледниковые покровы могли возникать уже на многих материковых массивах, оказавшихся к этому времени в высоких широтах. Действительно, ледниковые отложения этого возраста, свидетельствующие о покровном характере оледенений, сейчас известны практически на всех континентах, причём возраст оледенений приблизительно одинаков.

Как следует из расчётов, во временном интервале 2–1 млрд лет назад отрицательных среднегодовых температур на континентах нигде не существовало, поэтому не должно было быть и континентальных оледенений. Действительно, по свидетельству Н.М.Чумакова [17], следов оледенений в ту эпоху не обнаружено. Это был продолжительный безледниковый период в развитии Земли.

В позднем протерозое и палеозое началась новая, четвёртая эра континентальных оледенений, связанная с заметным похолоданием в это время земного климата (группа IV). В результате на расположенных возле полюсов континентах (см. рис. 9, Е) господствовали устойчивые отрицательные среднегодовые температуры, на них неизбежно должны были возникать ледниковые покровы. Если площадь оказывалась значительной, то сказывалось альбедо снежной поверхности оледенений, и в зависимости от высоты ледникового покрова средние температуры над ними снижались до –65 °C. Интересно отметить, что, несмотря на достаточно суровые условия континентальных оледенений, устойчивых морских оледенений типа современного Северного Ледовитого океана, тогда по-видимому, ещё не происходило, поскольку полярные участки океанов и морей характеризовались небольшими неотрицательными среднегодовыми температурами (см. рис. 11).

В середине кайнозоя (около 40 млн лет) назад началась последняя, пятая эра оледенений с развитием ледниковых эпох наиболее обширных ледяных покровов Земли. Эта эра продолжится и в будущем, но будет последней в истории Земли (группа V). Одновременно возникли и первые в истории Земли обширные морские оледенения Северного Ледовитого океана, а также части Южного океана (шельфовые ледниковые покровы морей Росса и Уэдделла), что в свою очередь привело к значительному понижению температуры придонных вод океанов с +16 °C до +2 °C в настоящее время.

Как же тогда объясняется тёплый климатический промежуток конца мезозоя,

возникший между двумя суровыми ледниковыми эрами палеозойской и позднекайнозойской? Его происхождение связано с действием двух факторов: образованием Пангеи и усиленной генерацией кислорода. Образование Пангеи, как мы уже отмечали, привело к увеличению угла прецессии до 34° и, как следствие, к потеплению климата почти на 10°C . Второй фактор – временная компенсация снижения парциального давления азота за счёт генерации биогенного кислорода. Таким образом, изложенная здесь теория показывает, что в формировании климатов Земли существенную роль играли живые организмы. Особенно сильное влияние на глобальный климат Земли в позднем протерозое и фанерозое оказали азотфиксирующие бактерии, жизнедеятельность которых более чем на половину снизила парциальное давление азота в земной атмосфере, что привело к значительному похолоданию и возникновению в высоких и умеренных широтах континентальных оледенений протерозоя и фанерозоя. Генерация же фитопланктоном и наземными растениями биогенного кислорода в фанерозое не только способствовала расцвету высокоорганизованной жизни на Земле, но также частично компенсировало и снижение парциального давления азота, что способствовало потеплению климата в конце мезозоя. Однако после раскола Пангеи и центробежного раздвижения её фрагментов-материков, а также достижения предельного (равновесного) уровня давления кислорода около 0,231 атм (23,4 кПа), начались новое снижение атмосферного давления и новая эра похолодания с чередой ледниковых эпох. Ледниковые эры Земли должны перестать возникать только приблизительно через 600 млн лет, в будущем, о чём мы уже говорили выше. Таким образом, главными причинами изменения климатов Земли являются вариации солнечной активности, изменения угла прецессии Земли и постепенное снижение атмосферного давления благодаря жизнедеятельности азотфиксирующих бактерий.

Литература

1. Arrhenius S. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. – Phil. Mag., 1896, 41.
2. Глобальное потепление: Доклад Гринпис. – М.: Изд-во МГУ.
3. Парниковый эффект, изменение климата и экосистемы. – Л.: Гидрометеиздат.
4. Сорохтин О.Г. Парниковый эффект: миф и реальность. – Вестник РАЕН, 2001, т. 1, № 1.
5. Сорохтин О.Г. Эволюция и прогноз изменений глобального климата Земли. – М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2006.
6. Сорохтин О.Г., Ушаков С.А. Развитие Земли. – М.: Издательство МГУ, 2002.
7. Мохов И.И., Безверхний В.А., Карпенко А.А. Циклы Миланковича и эволюция характеристик климатического режима и состава атмосферы по данным ледяных кернов с антарктической станции «Восток»: Материалы гляциологических исследований, 2003, т. 95.
8. Fischer H., Wahlen M., Smith J., Mastroianni D. & Deck B. Ice core records of atmospheric CO_2 around the last three glacial terminations. – Science, 1999, 283.
9. Котляков В.М. Гляциология Антарктиды. – М.: Наука, 2000.
10. Robinson A.B., Baliunas S.L., Soon W., Robinson Z.W. Environmental effects of increased atmospheric carbon dioxide. 1998 [info@oism.org; info@marshall.org]

11. *Landscheidt T.* New Little Ice Age Instead of Global Warming? – *Energy and Environment*, 2003, 14, p. 327–350.
12. *Абдусаматов Х.И.* О долговременных скоординированных вариациях активности светимости, радиуса Солнца и климата: Труды международной конференции «Климатические и экологические аспекты солнечной активности». – СПб, 2003.
13. *Котляков В.М.* В мире снега и льда. – М.: Наука, 2002.
14. *Миланкович М.* Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. – М.–Л.: ГОНТИ, 1939.
15. *Чумаков Н.М.* Климатическая зональность и климат мелового периода: В кн. «Климат в эпохи крупных биосферных перестроек». – М.: Наука, 2004.
16. *Сорохтин О.Г.* Глобальная эволюция Земли. – Вестник РАН, 2004, т. 4, № 4.
17. *Чумаков Н.М.* Ледниковый и безледниковый климат в докембрии: В кн. «Климат в эпохи крупных биосферных перестроек». – М.: Наука, 2004.

*См. также статью *О.Г.Сорохтина* «Адиабатическая теория парникового эффекта» в № 11/05. – *Ред.*

**Температурные колебания определялись по отношению содержания обычного водорода в кернах, взятых из ледникового покрова Антарктиды, к его тяжёлому изотопу дейтерию. Экспериментально доказано, что вначале испаряется «лёгкая» вода H₂O, а затем только «тяжёлая» (HDO и D₂O). Поэтому в атмосферных осадках концентрация «тяжёлой» воды обычно более низкая. Чем теплее вода в океанах, тем меньше отношение D/H в атмосферных осадках. Обычно изотопные отношения атомов измеряются в промилле (‰) – тысячных долях. Отрицательные значения δ D в ледниковом покрове говорят о недостатке дейтерия по сравнению с его распространённостью в океанических водах. Лёд антарктического покрова формировался только из атмосферных осадков, что и позволило определить температурные режимы океанов в прошлые геологические эпохи.

Олег Георгиевич Сорохтин (1927—2010) — советский, российский учёный-геолог, геофизик, эколог, заслуженный деятель науки Российской Федерации (1997), академик РАН (1991).

Критиковал теорию глобального потепления в результате человеческой деятельности

О.Г.Сорохтин, С.А.Ушаков, Развитие Земли
<http://www.samomudr.ru/d/Soroxtin%20G.%20Razvitie%20zemli.pdf>

О.Г.Сорохтин, Развитие Земли
<http://gemp.ru/tom/3.html>

