

УДК 551.583

К ВОПРОСУ О ПАЛЕОКЛИМАТИЧЕСКИХ ЦИКЛАХ МИЛАНКОВИЧА

© 2003 г. А. А. Косов

Институт динамики систем и теории управления СО РАН, Иркутск

Поступила в редакцию 15.05.2000 г., получена после доработки 12.12.2001 г.

Предлагается гипотеза, поддерживающая выдвинутую В.А. и П.В. Большаковыми новую концепцию астрономической теории палеоклимата, в которой изменениям эксцентриситета придается существенно большее значение, чем в теории М. Миланковича. В периоды максимальных значений эксцентриситета существенно (на 17%) увеличиваются действующие на Землю солнечные приливные силы, что может приводить к усилению вулканической активности и вызывать увеличение концентрации парниковых газов в атмосфере. В эти же периоды в соответствии с теорией Миланковича увеличивается на 0.1% интегральная инсоляция всей поверхности Земли. Оба фактора способствуют потеплению климата синхронно в обоих полушариях планеты.

Ключевые слова. Палеоклимат, оледенения, теория Миланковича, эксцентриситет, наклон эклиптики, климатическая прецессия, приливные силы, палеовулканизм, парниковый эффект.

ВВЕДЕНИЕ

Сразу после того, как в XIX веке были выявлены факты неоднократных оледенений Земли, покрывавших в прошлом значительно большие, чем в современный период территории, начали появляться гипотезы и научные теории, призванные объяснить причины колебаний климата, возникновения оледенений и межледниковий. Изменения климата связывали с вариациями солнечной постоянной, с прохождением солнечной системы при движении вокруг центра галактики через разреженные облака космической пыли, уменьшающей количество поступающей на поверхность Земли солнечной энергии, с изменением концентрации в земной атмосфере углекислого или других газов, вызывающих парниковый эффект и т.д. (Берг, 1938; Монин, 1972; Величко, 1973; Будыко и др., 1985; Котляков, 1994). Наибольшее признание заслуженно получила астрономическая теория климата М. Миланковича (Миланкович, 1939), который полагал, что оледенения Северного полушария совпадают по времени с наиболее глубокими минимумами инсоляции высоких широт этого полушария за периоды летних калорических полугодий. Отметим, что, несмотря на совершенно разные конечные причины изменений климата в трех вышеназванных теориях, они принципиально отличаются от теории Миланковича синхронностью изменений климата обоих полушарий Земли, тогда как согласно последней вместо синхронности должна скорее наблюдаться даже противоположность.

Спектральный анализ палеоклиматических записей из океанских донных отложений (Shackleton et al., 1990), ледовых кернов из Гренландии

(GRIP, GISP-2) и Антарктиды (Котляков, 1994), глубоководных донных отложений Байкала (Качуков и др., 1998), четко показывает наличие периодов в 100, 41, 23 и 19 тыс. лет, совпадающих соответственно с периодичностью изменения “орбитальных параметров” – эксцентриситета орбиты Земли e , наклона плоскости экватора к плоскости эклиптики ϵ и углового расстояния от точки весеннего равноденствия до перигелия орбиты (прецессии) ω . Такое соответствие частот не может быть объяснено простым случайным совпадением, поэтому модуляция колебаний климата вариациями орбитальных параметров сейчас не вызывает сомнений. Поскольку в теории Миланковича инсоляция за калорические полугодия для каждой широты представлена в виде явной функции от трех названных орбитальных параметров, то, казалось бы, совпадение частот является доказательством адекватности теории Миланковича. Однако детальное сопоставление показало (Большаков, Большаков, 1999), что кривые инсоляции по Миланковичу и реальный палеоклиматический сигнал имеют существенные расхождения:

1). Несоответствие количества и возраста оледенений, выявленных и датированных по изотопно-кислородным океаническим данным, минимумам инсоляции высоких широт Северного полушария за летние калорические полугодия, отсутствие критериев выделения оледенений по таким инсоляционным диаграммам.

2). Проявление оледенений в периоды пониженных значений эксцентриситета, необъяснимое в рамках теории Миланковича.

3). Наиболее четкое проявление в экспериментальном палеоклиматическом сигнале последнего миллиона лет периодичности в 100 тыс. лет, свойственной частоте изменения эксцентриситета по теоретическим данным, получаемым приближенным интегрированием уравнений вековых возмущений небесной механики. В инсоляционной теории Миланковича эта периодичность должна проявляться значительно слабее по сравнению с частотами изменения наклона эклиптики и прецессии, поскольку вклад эксцентриситета Миланкович полагал только косвенным, через так называемую “климатическую прецессию” $e \sin \omega$.

В дополнение отметим, что сделанные В.А. Большаковым на основе анализа океанических изотопно-кислородных данных выводы 1–3 полностью подтверждаются и данными по байкальским отложениям за последние 5 миллионов лет, полученными в проекте “Байкал-бурение” (Качуков и др., 1998). Далее, сопоставление данных ледовых кернов Гренландии и Антарктиды приводит к следующему выводу (Котляков, 1994):

4). Температура в полярных районах обоих полушарий Земли изменялась синхронно (по крайней мере, на одном полном климатическом цикле 100 тыс. лет) и так же синхронно с температурой изменялась концентрация парниковых газов (углекислый газ, метан) в атмосфере.

Объяснение этого факта в рамках теории Миланковича затруднительно, поскольку составляющая “климатической прецессии” в формулах для инсоляции за летние калорические полугодия присутствует с противоположным знаком для разных полушарий, а по абсолютной величине она для высоких широт при большом эксцентриситете сопоставима с влиянием наклона эклиптики. Отметим, что еще в 30-е годы XX столетия, когда не было никаких изотопных данных по океаническим отложениям и ледовым кернам, Л.С. Берг, исходя из биогеографических данных о биполярном распределении морских животных, считал потепления и похолодания в обоих полушариях синхронными и на этой основе полагал “маловероятными астрономические причины оледенений, которые требуют попеременности ледниковых эпох в обоих полушариях” (Берг, 1938, с. 420). На основании сопоставления континентальных геолого-палеогеографических данных и инсоляционных кривых в работах (Величко, 1973, 1991) было установлено, что теория Миланковича “не согласуется с конкретными палеогеографическими данными” (Величко, 1991, с. 11).

В работе (Большаков, Большаков, 1999) была предложена новая концепция, модифицирующая инсоляционную теорию Миланковича. В ней существенно большее значение придается вариациям эксцентриситета, увеличение которого соглас-

но формулам Миланковича вызывает возрастание интегральной годовой инсоляции всей Земли пропорционально $(1 - e^2)^{-1/2}$. Значение же вариаций наклона и прецессии считается существенно меньшим за счет сглаживания температурных градиентов течениями в атмосфере и гидросфере, хотя и имеющим ту же направленность, как и по Миланковичу.

Таким образом, предложенная В.А. Большаковым новая концепция фактически объясняет колебания климата так же, как теория Миланковича, изменениями инсоляции, вызываемыми вариациями орбитальных параметров (с возможными изменениями солнечной постоянной), при этом радиационно-климатическая кривая (РК) строится как линейная комбинация вариаций трех параметров во времени с постоянными весовыми коэффициентами, выбираемыми исходя из качественных “индикаторных” соображений. На наш взгляд, лучшее соответствие РК Большакова реальному палеоклиматическому сигналу достаточно очевидно, а качественные выводы о направленности и значимости вариаций орбитальных параметров в работе (Большаков, Большаков, 1999) вполне обоснованны.

С выводом работы Большаковых (1999) о том, что задача построения количественных оценок палеоклиматических параметров по вариациям орбитальных параметров может быть успешно решена только после создания полномасштабной модели, включающей наряду с инсоляцией и все другие факторы (конфигурация материков и океанов, рельеф суши и морского дна, состав атмосферы и гидросферы в динамике с учетом источников и стоков ключевых элементов, циркуляция воздуха и океанские течения, отражение и переизлучение энергии, альbedo и т.д.), безусловно, необходимо согласиться. В то же время, на наш взгляд, представляет несомненный интерес и качественное развитие новой концепции Большакова, в том числе и вскрытие новых, альтернативных инсоляционному, механизмов воздействия вариаций орбитальных параметров на климат. Это, в частности, позволит более точно и обоснованно определить структуру и состав полномасштабной количественной модели палеоклимата.

Основная цель данной статьи – обратить внимание специалистов на возможность существования такого альтернативного инсоляционному канала воздействия изменений эксцентриситета на климат за счет модуляции действующих на Землю солнечных приливных сил, что может приводить (в вероятностном плане) к усилению вулканической активности при возрастании эксцентриситета и вызывать глобальные потепления из-за соответствующего повышения концентрации углекислого газа в атмосфере и усиления парникового эффекта. Это вызывает увеличение удель-

ного весового значения вариаций эксцентриситета и, тем самым, полностью согласуется с концепцией Большаковых и поддерживает ее. Построена модификация ПК-палеоклиматической кривой (поскольку учитывается не только инсоляция, то кривую не обязательно называть “радиационной”), подобная предложенной в работе (Большаков, Большаков, 1999) РК, но с другими весовыми коэффициентами, показано, что эта кривая хорошо согласуется с изотопно-кислородной кривой с учетом запаздывания на 8 тыс. лет.

ВЛИЯНИЕ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ НА КЛИМАТ

Вулканы при извержениях выбрасывают в атмосферу огромные массы пепла, пыли, газов и аэрозолей, что приводит к изменению состава атмосферы и влияет на климат, причем изменения могут носить как кратковременный (не более 10 лет), так и более длительный характер. Выбросы пепла и аэрозолей при катастрофических извержениях приводят к снижению прозрачности атмосферы и вызывают кратковременные похолодания (Будыко и др., 1986). В то же время вулканическая деятельность реализует, по-видимому, один из основных каналов дегазации мантии и обеспечивает существенную часть прихода углекислого газа в атмосферу, поддерживая его баланс. Как надежно установлено по геохимическим данным (Будыко и др., 1985, рис. 24, 25), изменения концентрации углекислого газа в атмосфере за последние 500 млн. лет четко коррелируют с изменениями скорости формирования вулканических пород. При этом проявляется тенденция к постепенному снижению вулканической активности, объясняемая израсходованием радиоактивных элементов, распад которых обеспечивает разогрев глубоких слоев Земли, и цикличность этого процесса с периодом порядка 100 млн. лет, объясняемая периодичностью процессов термической конвекции в мантии (Будыко и др., 1985, с. 128). Как указывают авторы (Будыко и др., 1985, с. 129), вполне могут существовать и более кратковременные ритмы. Возможно, что вызывать их могут разные причины, в том числе внешние по отношению к происходящим в мантии и земной коре процессам.

Для вулканизма Юго-Восточной Азии такого рода периодичности, в том числе порядка 400 и 100 тыс. лет, были выявлены С.В. Рассказовым (1998) на основе аргон-аргоновых датировок. Им же высказано предположение, что “с проявлением орбитальных циклов Земли может быть связана и ее эпизодическая эндогенная активность, проявляющаяся в периодически возобновляющемся вулканизме”. Какими именно причинами объясняется наличие периодичностей такого рода для Юго-Восточной Азии, несут ли они глобальный характер, т.е. справедливы ли для всей

Земли – в настоящее время неизвестно. Однако проявление в колебаниях вулканической активности “частот Миланковича” 400 и 100 тыс. лет изменений эксцентриситета орбиты Земли указывает на возможную взаимосвязь этих двух процессов. Такая связь может, на наш взгляд, проявляться как своеобразная “модуляция” вулканической активности возмущающими силами, в качестве которых выступают приливные силы, солнечная составляющая которых зависит от расстояния от Земли до Солнца.

Действующий вулкан перед началом извержения можно рассматривать с точки зрения теории устойчивости (Абдуллин и др., 1987) как находящуюся в равновесном состоянии систему, где равновесие обеспечивается за счет компенсации сил давления жидкой магмы и вулканических газов силами гравитации и прочностью твердой верхней части вулкана (а для подводных вулканов – еще и давлением вышележащего столба воды). Это равновесие имеет малый “запас устойчивости”, тем меньший, чем более назревшим и подготовленным по законам собственной эволюции вулкана является очередное извержение. В таком критическом состоянии даже относительно небольшие по сравнению с каждой из взаимно уравновешенных сил внешние возмущающие силы могут нарушить равновесие, система потеряет устойчивость и произойдет переход к другому состоянию устойчивого равновесия (процесс извержения). Чем больше величина таких внешних возмущающих сил в тот или иной геохронологический период, тем выше вероятность нарушения устойчивости равновесия такой критической системы как действующий вулкан и, соответственно, выше вероятность извержения. Поэтому при прочих равных условиях в такие периоды вулканическая активность на планете в целом может заметно повышаться, причем доля катастрофических извержений при этом, возможно, может даже уменьшиться (увеличенные возмущения приводят к более раннему и менее катастрофическому “стравливанию пара”).

В качестве такого рода возмущающих сил могут выступать приливные силы, солнечная составляющая которых будет изменяться вместе с изменением эксцентриситета орбиты Земли.

ЗАВИСИМОСТЬ СОЛНЕЧНЫХ ПРИЛИВНЫХ СИЛ ОТ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА ОРБИТЫ ЗЕМЛИ

Величина приливных сил, как известно (Монин, 1972; Белецкий, 1977), прямо пропорциональна массе притягивающего тела и обратно пропорциональна кубу расстояния до него:

$$F = k \frac{M}{r^3}. \quad (1)$$

Для Земли реальное значение имеют приливные силы, вызываемые притяжением Луны и Солнца. Из формулы (1), подставляя соответствующие значения масс и расстояний, получаем, что в настоящую эпоху солнечные приливные силы составляют 0.46 от лунных, т.е. влияние Солнца примерно вдвое слабее, чем Луны (Монин, 1972, с. 15).

За последние несколько миллионов лет параметры орбиты Луны, по-видимому, существенно не менялись (Монин, 1972; Авсюк, 1996), поэтому характер лунных приливных сил в этот период можно считать неизменным. Что касается солнечной составляющей приливных сил, то при увеличении эксцентриситета орбиты от $e = 0$ (круговая орбита) до величины $e = 0.05$ (достигавшейся на протяжении последнего миллиона лет согласно (Berger et al, 1991)) и сохранении по теореме Лапласа величины большой полуоси a , расстояние от Земли до Солнца в перигелии r_{π} , равное в соответствии с (Белецкий, 1977, с. 17) $r_{\pi} = a(1 - e)$, будет составлять лишь 0.95 от расстояния при круговой орбите. Поэтому из (1) вытекает увеличение в такие моменты времени солнечных приливных сил в $1/0.95^3 = 1.166$ раз, т.е. приблизительно на 17%, а значит величина приливных сил в целом может возрастет примерно на 5.4%, что существенно больше относительного прироста интегральной инсоляции Земли, вытекающего из формул Миланковича (0.1%).¹

Далее, в эпохи повышенных значений эксцентриситета возрастают не только значения солнечной составляющей приливных сил в моменты прохождения Землей перигелия орбиты, но возрастает и интегральная работа этой составляющей за весь годовой цикл. Действительно, пусть $t \in [0, 1]$ – время внутри одного годового цикла, $r(t)$ и $v(t)$ – соответственно расстояние от Земли до Солнца и истинная аномалия в момент времени t , тогда в силу первого и второго законов Кеплера они связаны соотношениями (Белецкий, 1977, с. 17)

$$r = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos v}, \quad r^2 \frac{dv}{dt} = \sqrt{\mu a(1 - e^2)}, \quad (2)$$

где μ – некоторый коэффициент, пропорциональный постоянной всемирного тяготения.

Интегральная за год работа солнечных приливных сил, как вытекает из (1) и (2), пропорцио-

нальна величине интеграла

$$\begin{aligned} \int_0^1 \frac{dt}{r^3(t)} &= \int_0^{2\pi} \frac{dv}{r(v)\sqrt{\mu a(1 - e^2)}} = \\ &= \frac{1}{a^{3/2} \sqrt{\mu(1 - e^2)^{3/2}}} \int_0^{2\pi} (1 + e \cos v) dv = \\ &= \frac{2\pi}{a^{3/2} \sqrt{\mu(1 - e^2)^{3/2}}}, \end{aligned}$$

поэтому при увеличении эксцентриситета от нуля до 0.05 она возрастет на 0.37%, т.е. также на относительно большую величину по сравнению с возрастанием интегральной инсоляции.

Таким образом, относительный прирост солнечной составляющей и приливных сил в целом, как в моменты прохождения перигелия орбиты, так и интегрально за годовой цикл, при увеличении эксцентриситета орбиты Земли является существенно большим, чем прирост интегральной инсоляции в соответствии с теорией Миланковича. Конечно, реакция – увеличение вулканической активности на модулирующий сигнал – увеличение приливных сил вовсе не обязательно является линейной и проявляется, по-видимому, только в вероятностном плане, однако направленность и относительная величина самого модулирующего сигнала для канала “эксцентриситет–приливные силы–вулканическая активность–парниковые газы–температура” могут приводить к эффекту несколько не меньшему, чем для канала “эксцентриситет–интегральная инсоляция–температура”. Важно отметить также, что оба эти канала действуют сонаправленно, что должно привести к повышению удельного весового значения вариаций эксцентриситета в полном соответствии с концепцией, предложенной в работе Большаковых (1999). Кроме того, оба эти канала действуют синхронно для обоих полушарий, в отличие от теории Миланковича, где формулы инсоляции за летние калорические полугодия для разных полушарий содержат противофазные компоненты “климатической прецессии”.

Относительно более важная по сравнению с другими орбитальными параметрами роль эксцентриситета в климатических изменениях может быть связана с воздействием через изменения приливных сил и по другим каналам, не обязательно связанным с вулканической активностью. Заметим, что как указано в статье (Шило и др., 1989), приливные силы можно рассматривать как насос направленного действия, поставляющий из глубинных слоев Земли через зоны активной тектоно-магматической деятельности пары и газы к поверхности планеты. В периоды повышенных значений эксцентриситета возрастание в соответ-

¹ Примечание редакции. Автором в расчетах использована только кеплерова часть солнечного воздействия.

ствии с приведенной выше формулой среднегодовой работы солнечных приливных сил пропорционально $(1 - e^2)^{-3/2}$ повлечет увеличение мощности этого насоса и, соответственно, скорости поступления парниковых газов в атмосферу.

Влияние вариаций приливных сил на тектонические процессы на Земле, происходящие в реальном времени, выявлено экспериментально. Как установлено в результате измерений (Володичев и др., 1997), в моменты полнолуний и новолуний, когда приливные силы максимальны, в тектонически активных районах (Памир) возрастает интенсивность нейтронного излучения, что вероятнее всего объясняется увеличением поступления радиоактивного радона из глубоких трещин и разломов. Установлено также, что крупные серии землетрясений коррелируют с фазами новолуний и полнолуний, т.е. периодами максимумов приливных воздействий (Володичев и др., 2001), которые выступают в роли “спускового крючка” или триггерного механизма, запускающего “вызревший” по законам своего развития тектонический процесс. Аналогичная корреляция приливных и тектонических процессов для Луны, которая в силу соотношения масс Земли и Луны проявляется более отчетливо, была выявлена давно и описана Ю.Н. Авсюком (1996).

Поэтому и долгопериодические вариации приливных сил, связанные с изменениями эксцентриситета орбиты Земли, могли менять эффективность действия приливного триггерного механизма в отношении вулканической активности и приливного насоса, поставляющего парниковые газы из глубин мантии и земной коры. Результаты работы (Шило и др., 1989) дают основания рассматривать и еще один возможный канал влияния эксцентриситета через приливные силы на климат, уже не триггерный, не требующий сравнимых с вариациями инсоляции количеств энергии, а прямо обуславливаемый вариациями мощности приливных сил в различные геохронологические периоды. Согласно приведенным в статье Н.А. Шило и др. (1989) оценкам в современную эпоху суммарная мощность солнечных и лунных приливных сил, выделяемая в земной коре (и превращающаяся согласно законам физики в конце концов в тепло), на порядок больше мощности потока всей поступающей к Земле солнечной энергии. Поэтому при увеличении эксцентриситета орбиты возрастание составляющей примерно 32% солнечной доли этого “приливного тепла” пропорционально $(1 - e^2)^{-3/2}$ вызовет даже большее увеличение в годовом балансе земной энергетики, чем вытекающее из формулы Миланковича возрастание интегральной годовой инсоляции пропорционально $(1 - e^2)^{-1/2}$.

Подчеркнем, что все рассмотренные потенциальные каналы влияния вариаций эксцентрисите-

та синхронны и синфазны для обоих полушарий планеты и приводят к возрастанию его относительной роли по сравнению с двумя другими орбитальными параметрами в полном соответствии с концепцией, предложенной в работе (Большаков, Большаков, 1999). Вопрос о том, какова реальная доля вклада каждого из названных каналов в колебания климата, и насколько полно они исчерпывают связь колебаний эксцентриситета и климата, на наш взгляд можно решить только после создания полномасштабной модели на основе комплексного междисциплинарного анализа экспериментальных данных.

ПОСТРОЕНИЕ ПАЛЕОКЛИМАТИЧЕСКОЙ КРИВОЙ

Обозначим через $\tau > 0$ время (возраст) в тыс. лет, $e(\tau)$, $\epsilon(\tau)$, $\omega(\tau)$ – соответственно изменения эксцентриситета орбиты, наклона плоскости экватора к плоскости эклиптики и долготы перигелия в прошедшие периоды. Тогда в соответствии с предложенным в статье (Большаков, Большаков, 1999) подходом проблема Миланковича построения ПК кривой $K(\tau)$, отражающей эволюцию во времени какого-либо индикатора палеоклимата, по полагаемым известными из теоретических положений небесной механики эволюций орбитальных параметров $e(\tau)$, $\epsilon(\tau)$, $\omega(\tau)$ может быть сформулирована следующим образом: определить характер функциональной зависимости $K(\tau) = f(\tau, e(\tau), \epsilon(\tau), \omega(\tau))$, т.е. сконструировать функцию $f(\tau, x, y, z)$. Как справедливо отмечено в статье (Большаков, Большаков, 1999), точное теоретическое решение этой проблемы весьма затруднительно. Поэтому вполне естественно прежде всего попытаться использовать в качестве искомой функции линейную комбинацию, причем в стационарном варианте, т.е. без явной зависимости коэффициентов от времени.

Приведем методику построения такого рода функции. Некоторые отличия от подхода (Большаков, Большаков, 1999) связаны в основном с привлечением при построении кривой информации по обоим полушариям.

Пусть рассматривается отрезок времени $T = [\tau_1, \tau_2]$, положим $e_{\max} = \max_{\tau \in T} e(\tau)$, $e_{\min} = \min_{\tau \in T} e(\tau)$, $e_0 = (e_{\max} + e_{\min})/2$, $\Delta e(\tau) = 2(e(\tau) - e_0)/(e_{\max} - e_{\min})$. Совершенно аналогично строятся кривые относительных вариаций остальных параметров $\Delta \epsilon(\tau)$, $\Delta \omega(\tau)$ соответственно наклона $\epsilon(\tau)$ и “климатической прецессии” $e(\tau)\sin\omega(\tau)$, при этом для любого отрезка времени T все три кривые будут изменяться между (-1) и $(+1)$, достигая крайних значений, причем масштабы для отрицательной и положительной ветвей будут одинаковы. Для Северного полушария ПК кривую $K_N(\tau)$ с учетом влияния каждого орбитального параметра, выбо-

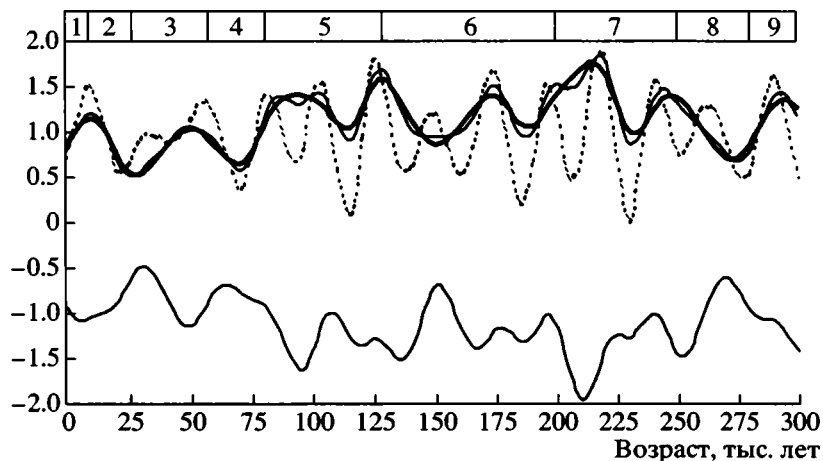


Рис. 1. Палеоклиматическая полоса, июльская инсоляция широты 65° Северного полушария и морские изотопные стадии для последних 300 тыс. лет. Тонкие сплошные линии – ПК $K_N(\tau)$ и $K_S(\tau)$ для Северного и Южного полушарий соответственно. Жирная линия – ПК $K_1(\tau)$, синтезирующая вариации параметров для обоих полушарий. Штриховая линия – нормированная на отрезок $[-1, 1]$ июльская инсоляция широты 65° Северного полушария, сдвинутая на 1 вверх. Сверху цифрами обозначены соответствующие морские изотопные стадии.

ра начала отсчета для прецессии и соображений наглядности будем строить по формуле

$$K_N(\tau) = a_e \Delta e(\tau) + a_\epsilon \Delta \epsilon(\tau) - a_\omega \Delta \omega(\tau) + 1, \quad (3)$$

где неотрицательные весовые коэффициенты $a_e, a_\epsilon, a_\omega$ отражают удельное влияние каждого орбитального параметра и в сумме дают единицу, поэтому значения $K_N(\tau)$ будут располагаться между 0 и 2, причем крайние значения могут и не достигаться.

Аналогичным образом, для Южного полушария климатическая кривая строится по формуле

$$K_S(\tau) = -[a_e \Delta e(\tau) + a_\epsilon \Delta \epsilon(\tau) + a_\omega \Delta \omega(\tau)] - 1, \quad (4)$$

и ее значения будут располагаться между (-2) и 0, причем крайние значения могут и не достигаться. Таким образом, построенные на одном графике кривые (3) и (4) никогда не будут пересекаться, образуя некоторую полосу, ширина которой может варьировать от 0 до 4. Эта “палеоклиматическая полоса” имеет наглядную интерпретацию: ее “узким местам” должны соответствовать периоды похолоданий климата (оледенения), а наиболее широким – потепления (межледниковья).

Полушария планеты существенно отличаются конфигурацией суши и океанов, поэтому, например, даже при совершенно одинаковых условиях инсоляции, отклики климатических изменений могут быть разными. Поэтому при построении палеоклиматической кривой для Земли в целом целесообразно предусмотреть для полушарий разные весовые коэффициенты:

$$\begin{aligned} K_1(\tau) &= a_N K_N(\tau) - (1 - a_N) K_S(\tau), \\ K_0(\tau) &= K_1(\tau) - 1, \end{aligned} \quad (5)$$

где $a_N \in [0, 1]$ – весовой коэффициент, соответствующий Северному полушарию. Обычно Северному полушарию придают ведущее значение в климатических изменениях, чем и объясняют синхронность колебаний температуры в разных полушариях², не вытекающую прямо из инсоляционной теории Миланковича. При $a_N = 0.5$, т.е. при симметричном подходе к полушариям, обе кривые (5) не будут зависеть от вариаций “климатической прецессии”. При других значениях этого весового коэффициента кривые (5) будут синтезировать вариации всех трех орбитальных параметров с учетом значимости каждого полушария. Кривая $K_1(\tau)$ при этом будет располагаться вблизи кривой $K_N(\tau)$, тем ближе, чем ближе a_N к 1, а кривая $K_0(\tau)$ будет ограничена по модулю 1.

При построении ПК важное значение имеет выбор конкретных числовых значений весовых коэффициентов $a_e, a_\epsilon, a_\omega, a_N$. Приведенные ниже на графиках ПК были построены при следующих значениях: $a_e = 0.44, a_\epsilon = 0.33, a_\omega = 0.23, a_N = 0.65$, которые подбирались так, чтобы добиться по возможности наилучшей корреляции кривых. Если ПК на рис. 2 и 3 интерпретировать как кривую для Северного полушария $K_N(\tau)$, то этим коэффициентам будет отвечать отношение масштабов 1 : 0.75 : 0.16, довольно близкое (кроме прецессии) к использованному в работе Большаковых (1999). Числовые данные для построения кривых изотопии кислорода и вариаций орбитальных параметров были взяты соответственно из работ (Shackleton et al., 1990) и (Berger et al, 1991).

Как можно видеть из рис. 1, холодным четным стадиям соответствуют “узкие места” палеокли-

² Отметим, что при этом приходится пренебрегать инерционностью накопления и таяния полярных ледниковых щитов.

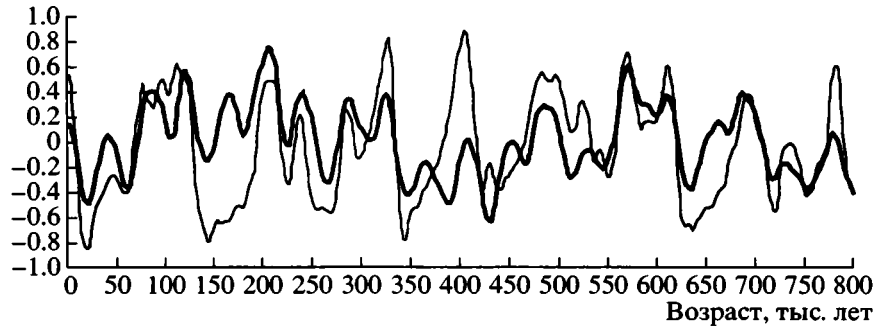


Рис. 2. Сопоставление палеоклиматической и изотопно-кислородной кривых в течение палеомагнитной эпохи Брюнес (последние 800 тыс. лет). Жирная линия – смещенная на 8 тыс. лет в будущее ПК $K_0(t)$, тонкая линия – нормированная на отрезок $[-1, 1]$ ИК-кривая ODP-677, сглаженная осреднением по пяти точкам.

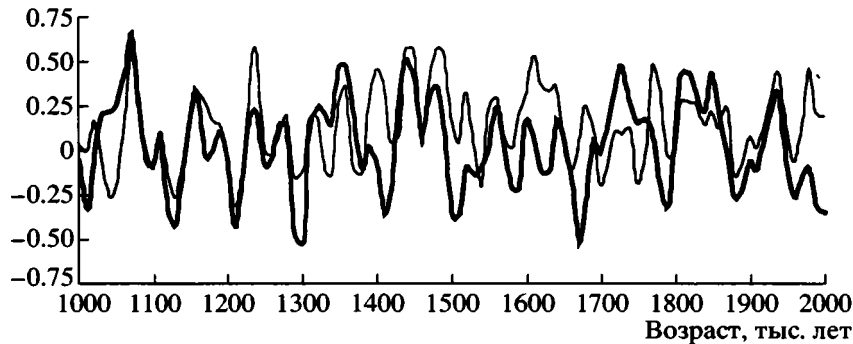


Рис. 3. Сопоставление палеоклиматической и изотопно-кислородной кривых в течение 1000–2000 тыс. лет до настоящего времени. Жирная линия – смещенная на 8 тыс. лет в будущее ПК $K_0(t)$, тонкая линия – нормированная на отрезок $[-1, 1]$ ИК-кривая ODP-677, сглаженная осреднением по пяти точкам.

матической полосы, теплым нечетным – участки ее расширения. ПК $K_1(t)$ сглаживает прецессионные отличия полушарий. Вариации летней инсоляции плохо соответствуют ИК: самые глубокие минимумы инсоляции оказались на теплых нечетных стадиях 5 и 7, а на месте одного из самых холодных периодов с возрастом 150 тыс. лет располагается локальный максимум инсоляции. Все отмеченное сохраняется и для более древних возрастов, возрастная граница 300 тыс. лет для рис. 1 взята только из соображений наглядности.

Из рис. 2 вытекает явная “индикаторная” связь между ПК и реальным палеоклиматическим сигналом, записанным в ИК кривой: практически все изменения орбитальных параметров отражаются в той или иной степени в изменениях климата через 8 тыс. лет. Степень влияния для разных участков оказывается различной, поэтому формальный коэффициент корреляции двух кривых невысок (он равен 0.55), но визуальное подобие кривых совершенно очевидно. Максимальное отличие кривых на рис. 2 (как и на РК Большаковых) приходится на возраст около 170 тыс. лет, соответствующий холодной 6-й стадии. Здесь на ИК ODP-677 нет заметного отклика на локаль-

ный максимум на ПК. Отметим, что на известной ИК SPECMAP, приведенной в работе (Качуков и др., 1998), локальный максимум для этого участка выражен довольно четко.

“Индикаторная” связь ПК-кривой $K_0(t)$ и ИК-кривой ODP-677 сохраняется и на интервале возрастов 1–2 млн. лет. Как видно из рис. 3, практически все минимумы и максимумы этих кривых совпадают (несовпадения по времени могли быть вызваны реально имевшим место непостоянством запаздывания в 8 тыс. лет и/или погрешностями датировки ИК-кривой). Характер отклика реального ИК-сигнала был нелинейным и менялся во времени, но похожесть кривых на рис. 3 проявляется не менее четко, чем для эпохи Брюнес на рис. 2.

Соответствие ПК (5) и реальных палеоклиматических сигналов имеет место и для еще более древних возрастов и проявляется не только по океаническим ИК-записям, но, например, и по записям континентального климата Азии в осадках озера Байкал (Качуков и др., 1998). Важность сопоставления с континентальными записями отмечалась Большаковыми (1999).

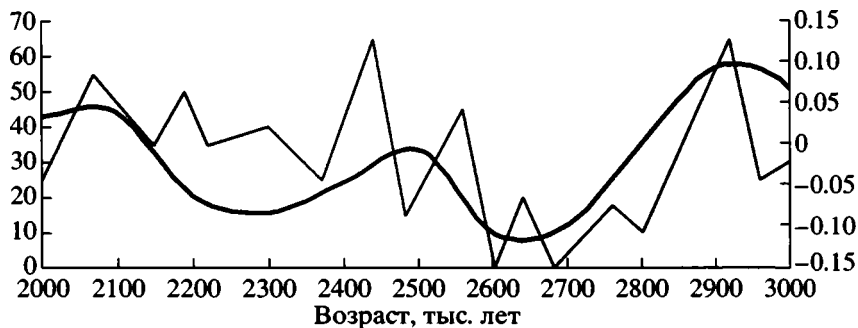


Рис. 4. Сопоставление ПК кривой, осредненной для каждого момента времени за предшествующие 300 тыс. лет, и кривой содержания диатомовых (в % по объему) в байкальских отложениях для первого оледенения Байкала. Жирная линия и правая ось – осредненная за предшествующие 300 тыс. лет ПК $K_0(\tau)$, тонкая линия и левая ось – снятый с рис. 7 из (Качуков и др., 1998) профиль содержания диатомей в осадке.

Полученная в рамках проекта “Байкал-Бурение” непрерывная запись палеоклимата последних 5 млн. лет позволила выявить два длительных (около 300 тыс. лет) холодных интервала (Качуков и др., 1998, рис. 7): первый 2.82–2.48 млн. лет и второй 1.75–1.45 млн. лет назад. Именно в эти периоды на горных хребтах, окружающих Байкал, впервые возникали оледенения, проявившиеся в глубоководных отложениях слоями тонкодисперсных (осажденное “ледниковое молоко”) глин с практически полным отсутствием остатков панцирей диатомовых водорослей, ставшими позднее характерными для всех плейстоценовых холодных интервалов.

Первому оледенению Байкала соответствует один из самых глубоких³ за последние 5 млн. лет относительных минимумов ПК $K_0(\tau)$, равный -0.619 и достигаемый при возрасте 2.819 млн. лет. Отметим, что июльская инсоляция⁴ широты 65 градусов Северного полушария для этого возраста (430 ед.) (да и для отрезка 2.82–2.75 млн. лет, где инсоляция не менее 422 ед.) практически не отличается от современного значения (426 ед.) и существенно превосходит минимальную за последние 5 млн. лет (387 ед.), так что теория Миланковича не предсказывает сильного похолодания для этого момента времени. Кроме того, например, при возрасте 2.937 млн. лет июльская инсоляция 65-й широты Северного полушария падала существенно ниже – до 401 ед., но соответствующее похолодание на рис. 7 статьи Качукова и др. (Качуков и др., 1998) имело намного меньшую глубину и не достигало масштабов оледенения. Первому оледенению второго холодного интервала с возрастом 1.67 млн. лет соответствует тоже весьма глубокий (равный -0.526) относи-

тельный минимум ПК $K_0(\tau)$, достигаемый при возрасте 1.679 млн. лет. Июльская инсоляция широты 65 градусов Северного полушария для этого возраста (433 ед.) также практически не отличается от современного значения, как и на отрезке 1.7–1.65 млн. лет, где она не меньше 422 ед. Таким образом, вывод В.А. Большакова о том, что инсоляционные диаграммы не дают даже критериев выделения оледенений, сделанный по сопоставлению с ИК-кривыми океанических записей, подтверждается и континентальной Байкальской записью.

Длительность отмеченных холодных интервалов (300 тыс. лет), выявленных в результате проекта “Байкал-бурение”, не может быть объяснена вариациями инсоляции: глубоких минимумов июльской инсоляции широты 65 градусов Северного полушария в интервале 2.7–3.0 млн. лет не имеется, а средняя инсоляция за 300 тыс. лет на этом интервале практически не отличается от среднего для любого временного интервала такой же длины. Как можно видеть из рис. 4, первое сильное похолодание климата, приведшее к первому оледенению на Байкале, четко коррелирует с поведением осредненной за предшествующие 300 тыс. лет ПК $K_0(\tau)$: для возраста 2.65 млн. лет осредненная ПК достигает одного из самых глубоких за последние 5 млн. лет относительных минимумов, опускаясь ниже -0.1 .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из изложенного выше вытекают следующие выводы.

1. Предложенная В.А. и П.В. Большаковыми новая концепция астрономической теории палеоклимата, в которой вариациям эксцентриситета орбиты придается существенно более важное значение, чем вариациям наклона плоскости экватора к плоскости эклиптики и вариациям положения перигелия орбиты (прецессии), значитель-

³ Меньшее значение -0.625 достигалось только при возрасте 1.302 млн. лет.

⁴ Здесь и далее речь идет о среднемесячной инсоляции, измеряемой в ваттах на квадратный метр, и используются числовые данные (Berger et al., 1991).

но лучше соответствует реальным палеоклиматическим сигналам как изотопно-кислородных океанических, так и континентальных байкальских диатомовых записей за последние 3 миллиона лет, чем концепция Миланковича, связывавшего оледенения с минимумами инсоляции за летние калорические полугодия.

2. Реальные каналы воздействия вариаций орбитальных параметров на климат не обязательно должны ограничиваться исключительно изменениями инсоляции, но могут проявляться и через альтернативные механизмы, например, модуляцию вулканической активности приливными силами, зависящими от расстояния от Земли до Солнца, и приводящими к изменениям концентрации парниковых газов в атмосфере. Могут существовать и иные каналы воздействия вариаций орбитальных параметров на климат.

3. Доказательные и достоверные расчеты количественных оценок динамики изменения палеоклимата в зависимости от изменения орбитальных параметров и других исходных внешних факторов можно будет получать только на основе полномасштабных моделей, для определения состава которых принципиальное значение имеет как сохраняющая свое непреходящее значение классическая инсоляционная теория М. Миланковича, так и ее развитие в новой концепции Большаковых, лучше соответствующей современному объему фактических данных о палеоклимате.

Автор благодарен члену-корреспонденту РАН Ю.Н. Авсюку и А.А. Величко за ценные критические замечания, способствовавшие более глубокому пониманию автором роли приливных сил и улучшению первоначального варианта статьи.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и администрации Иркутской области (проект № 01-01-97201-р2001Байкал) и Интеграционной программы СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абдуллин Р.З., Анапольский Л.Ю., Козлов Р.И. и др. Метод векторных функций Ляпунова в теории устойчивости / Ред. Воронов А.А. и Матросов В.М. М.: Наука, 1987. 312 с.
- Авсюк Ю.Н. Приливные силы и природные процессы. М.: ОИФЗ РАН, 1996. 188 с.
- Белецкий В.В. Очерки о движении космических тел. М.: Наука, 1977. 432 с.
- Берг Л.С. Основы климатологии. Л.: Учпедгиз, 1938. 455 с.
- Большаков В.А., Большаков П.В. Астрономическая теория палеоклимата – новая концепция // Стратиграфия. Геол. корреляция. 1999. Т. 7. № 6. С. 3–13.
- Будыко М.И., Ронов А.Б., Янишин А.Л. История атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 208 с.
- Будыко М.И., Голицин Г.С., Израэль Ю.А. Глобальные климатические катастрофы. М.: Гидрометеиздат, 1986. 160 с.
- Величко А.А. Природный процесс в плейстоцене. М.: Наука, 1973. 256 с.
- Величко А.А. Глобальные изменения климата и реакция ландшафтной оболочки // Изв. АН СССР. Сер. географическая. 1991. № 5. С. 5–22.
- Володичев Н.Н., Кужевский Б.М., Нечаев О.Ю. и др. Явление возникновения всплесков интенсивности нейтронов во время фаз новолуний и полнолуний // Космические исследования. 1997. Т. 35. № 2. С. 144–154.
- Володичев Н.Н., Подорольский А.Н., Левин Б.В. и др. Корреляция появления крупных серий землетрясений со временем фаз новолуния и полнолуния // Вулканология и сейсмология. 2001. № 1. С. 60–67.
- Качуков В., Лыков Д., Певзнер Л. и др. Непрерывная запись климатических изменений в отложениях озера Байкал за последние 5 миллионов лет // Геология и геофизика. 1998. Т. 39. № 2. С. 139–156.
- Котляков В.М. Мир снега и льда. М.: Наука, 1994. 286 с.
- Миланкович М. Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. М.-Л.: ГОНТИ, 1939. 207 с.
- Монин А.С. Вращение Земли и климат. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 112 с.
- Рассказов С.В. Вулканическая периодичность 5 млн. лет в геодинамической иерархии позднего кайнозоя Юго-Восточной Азии // Metallogeny, fuel resources, and geodynamics of the North Asian craton and framing orogenic belts. Irkutsk.: Institute of Geochemistry, 1998. P. 69–70.
- Шило Н.А., Ващилов Ю.Я. Земные приливы как тектонический насос и вибратор // Докл. АН СССР. 1989. Т. 307. № 4. С. 833–836.
- Berger A., Loutre M.F. Insolation values for the climate of the last 10 million years // Quaternary Sci. Rev. 1991. V. 10. P. 297–317.
- Shackleton N.J., Berger A., Peltier W. An alternative astronomical calibration of the lower Pleistocene time scale based on ODP Site 677 // Trans. Roy. Soc. Edinb. 1990. V. 81. P. 251–261.

Рецензенты Ю.Н. Авсюк, А.А. Величко