

УДК 551.583:521.31

НОВЫЙ СПОСОБ ХРОНОМЕТРИРОВАНИЯ ИЗОТОПНО-КИСЛОРОДНЫХ ЗАПИСЕЙ КОЛОНОК ГЛУБОКОВОДНЫХ ОСАДКОВ

© 2003 г. В. А. Большаков

Представлено академиком В.Н. Страховым 05.04.2002 г.

Поступило 14.05.2002 г.

На основе использования построенной автором [1, 2] орбитально-климатической диаграммы (ОКД) проведено хронометрирование изотопно-кислородной (ИК) кривой колонки MD 900963, исследованной Bassinot et al., в 1994 г. [3]. Показаны преимущества такого хронометрирования при проведении спектрального анализа ИК-данных по сравнению с обычно используемыми для этой цели трудоемкими процедурами выделения орбитальных периодов. Выявлен не отмеченный ранее в ИК-записях значимый период климатических колебаний, около 29.4 тыс. лет, спектральная амплитуда которого превышает амплитуду прецессионных пиков.

ИК-шкала глубоководных осадков является признанным эталоном климатохроностратиграфических записей плейстоцена. Хронологические рубежи ИК-стадий на этой шкале рассчитываются путем выделения в палеоклиматической записи климатических периодов, соответствующих циклам вариаций угла наклона земной оси (около 41 тыс. лет) и прецессии (около 23 и 19 тыс. лет) [4, 5]. Идеологической основой такой процедуры является теория М. Миланковича, согласно которой глобальные климатические изменения прошедшего миллиона лет определяются непосредственно вариациями инсоляции, связанными только с этими двумя орбитальными элементами. Стотысячелетние эксцентриситетные вариации, по Миланковичу, не должны самостоятельно проявляться в климатических изменениях. Однако, как известно, именно эти вариации доминируют в климатических записях хрона Брюнес. Это и другие противоречия теории Миланковича с эмпирическими данными привели к разработке новой концепции астрономической, а точнее, орбитальной теории палеоклимата (ОТП) [6, 2]. (Напомню, что основная, первоначальная концепция ОТП довольно обща – она заключается в

предположении о связи глобальных изменений климата с орбитально обусловленными вариациями инсоляции.) На основе новой концепции была теоретически построена ОКД (рис. 1а), указывающая на относительную вероятность осуществления оледенений и межледниковий за последний миллион лет [1, 2, 6]. ОКД хорошо сопоставляется с ИК-записью глубоководных осадков. Поскольку ИК-кривые различных глубоководных колонок, в целом обычно согласующиеся между собой, имеют тем не менее индивидуальные особенности, было предложено использовать ОКД в качестве объективного независимого эталона для сравнения различных палеоклиматических записей как глубоководных, так и континентальных. Такая процедура была проведена и показала неплохое соответствие различных палеоклиматических записей и ОКД, а также в основном одинаковые главные их несоответствия [7].

В данном сообщении приводятся результаты использования ОКД для спектрального анализа ИК-данных колонки MD 900963 из Индийского океана [3]. Использование спектрального анализа ИК-данных направлено обычно на выявление роли (амплитуды) и периодов основных климатических циклов плейстоцена. Первые результаты спектрального анализа показали наличие периодов глобальных климатических колебаний, близких к периодам вариаций орбитальных элементов, подтвердив общую гипотезу о связи вариаций орбитальных элементов с глобальными климатическими изменениями плейстоцена [4]. К достижениям использования общей концепции ОТП и спектрального анализа ИК-данных глубоководных колонок следует отнести и новое определение возраста инверсии Матуяма-Брюнес – около 780 тыс. лет [8, 9, 3].

Качество получаемых с помощью спектрального анализа результатов определяется прежде всего точностью временной шкалы изменений изучаемого явления и детальностью представленных в каждом временном интервале данных. В работе [3] на основе ИК-данных по колонке

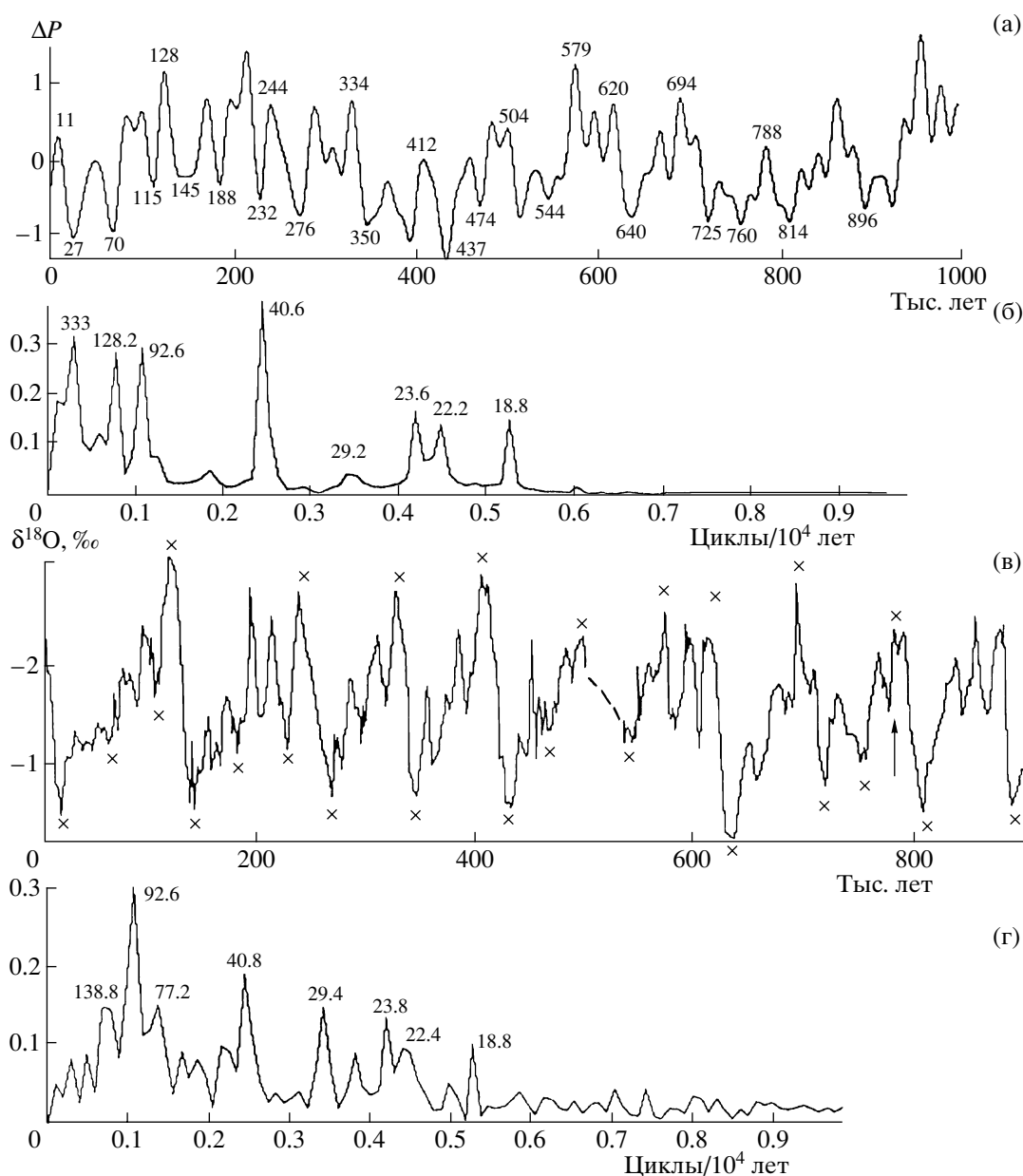


Рис. 1. Результаты хронометрирования ИК-записи колонки MD 900963 с помощью ОКД. а – ОКД, построенная для отношения коэффициентов климатической значимости вариаций эксцентриситета, наклона земной оси и прецессии, равного $1 : 0.7 : 0.55$ [6]; ΔP – условная относительная вероятность оледенений (отрицательные значения) и межледниковий (положительные значения); числа у кривых – даты соответствующих экстремумов в тыс. лет; для определения возраста соответствующих экстремумов на ИК-кривой (рис. 1в) представленные величины нужно уменьшить на 5 тыс. лет. б – спектр ОКД; по оси ординат – относительная амплитуда различных гармоник спектра; числа у кривой – значения соответствующих периодов в тыс. лет. в – ИК-кривая колонки MD 900963, полученная после обработки первичных данных работы [7] с целью равномерного (с шагом 2 тыс. лет) их представления на шкале времени; крестики у кривой – места определения временных реперов с помощью дат соответствующих экстремумов на рис. 1а; штриховая линия – исключенный из рассмотрения участок ИК-записи; стрелка указывает на положение инверсии Матюяма-Брюнес в колонке. г – спектр ИК-кривой, представленной на рис. 1в; условные обозначения те же, что и на рис. 1б.

MD 900963 была разработана климатохроностратиграфическая шкала для интервала времени 0–880 тыс. лет. Используемая авторами исходная временная шкала состояла из 25 временных реперов, полученных путем визуального сопоставле-

ния ИК-записи с теоретической кривой изменения глобального объема льда [10], построенной на основе теории Миланковича. Это послужило отправной точкой для дальнейшей математической обработки полученных ИК-данных, в том

числе спектрального анализа, и создания в конечном итоге одного из наиболее используемых вариантов климатохроностратиграфической шкалы. Следует отметить, что палеомагнитные исследования колонки MD 900963 позволили получить важный хронологический репер – инверсию Матуяма-Брюнес, который существенно облегчает и делает более достоверным визуальное сопоставление ИК-кривых с другими графическими построениями, отражающими палеоклиматические колебания. Основные периоды климатических изменений, выделенные авторами [3] с помощью спектрального анализа 100, 41, 23 и 19 тыс. лет.

В данной работе для проведения спектрального анализа ИК-записи колонки MD 900963 использовалось сопоставление ИК-кривой с ОКД, основанное также на их визуальном сходстве. (Отдельно отмечу, что принятый здесь способ хронометрирования имеет общую основу с примененными ранее методами [4, 5, 3, 9], которая предполагает определяющую роль вариаций орбитальных элементов в проявлении глобальных климатических изменений последнего миллиона лет.) Однако наш подход имеет определенные преимущества по сравнению с обычным подходом, принятым в публикациях [4, 3]. Во-первых, построение ОКД основано на новой концепции ОТП, не имеющей противоречий с эмпирическими данными, в отличие от теории Миланковича, на основе которой построена теоретическая кривая изменений объема льда [10], используемая для сравнения с ИК-записью в [3]. Во-вторых, временное сопоставление проводится нами с использованием наиболее однозначно выраженных минимумов и максимумов сравниваемых кривых (рис. 1а и 1в), что точнее и намного проще, чем сопоставление по границам ИК-стадий, которое использовалось в [3]. Более того, временные даты минимумов и максимумов ОКД непосредственно могут быть основой хронологической шкалы [4–6] без проведения процедуры выделения различных орбитальных периодов в ИК-записях [3–5, 9].

Использованные нами для построения ОКД данные расчета вариаций орбитальных элементов представлены в работе [11] с шагом 1 тыс. лет. Полученный спектр ОКД показан на рис. 1б. Отмечу еще раз, что важное значение при проведении визуального сопоставления графиков ОКД и ИК-данных имеет обнаружение инверсии Матуяма-Брюнес в 19-й ИК-стадии исследуемой колонки MD 900963 (рис. 1в), соотносимой на ОКД с максимумом ΔP в области 788 тыс. лет (рис. 1а).

Для спектрального анализа ИК-данных было выделено 25 наиболее уверенно сопоставляемых на ОКД и ИК-кривой реперных точек (рис. 1а, 1в). На рис. 1а приведены даты максимумов и ми-

нимумов теоретически полученной ОКД. Учитывая запаздывание климатического отклика на управляющий орбитальный инсоляционный сигнал, обусловленное огромной инерционностью климатической системы планеты, связанной с взаимодействиями в системе гидросфера–атмосфера–криосфера–литосфера, можно предположить, что возраст соответствующих максимумов и минимумов ИК-кривой будет на 5–6 тыс. лет моложе даты, указанной на ОКД [2]. В данной работе использовано время задержки 5 тыс. лет. Оно получено на основании того, что даты максимума последнего оледенения и оптимума голоцена приняты равными соответственно 22 и 6 тыс. лет, а отвечающие им минимум и максимум ОКД – 27 и 11 тыс. лет [2]. Внутри каждого из 24 полученных таким способом временных интервалов ИК-запись была представлена величинами $\delta^{18}O$ с одинаковыми временными промежутками 2 тыс. лет, что необходимо для проведения спектрального анализа. При этом предполагалось, что скорость седиментации внутри каждого интервала была постоянной. Поскольку первичные измерения представляются для разных глубин отбора образцов, то δ_k – величина $\delta^{18}O$ для временных точек, не совпадающих с местами отбора образцов, вычислялась по формуле

$$\delta_k = \delta_i + \frac{\delta_{i+1} - \delta_i}{l_i} \Delta l_i.$$

Здесь δ_i и δ_{i+1} – измеренные экспериментально величины $\delta^{18}O$ в ближайших, расположенных выше и ниже по колонке от места определяемой нами величины δ_k уровнях отбора образцов; l_i – расстояние между этими уровнями отбора образцов; Δl_i – расстояние между уровнем отбора верхнего образца и местом определяемой с помощью процедуры осреднения временной величины δ_k . При построении временной ИК-кривой были исключены из рассмотрения ИК-данные для интервала от 24 до 26.5 м по глубине колонки, так как на этом участке, характеризуемом резкими изменениями величин $\delta^{18}O$, была отмечена и палеомагнитная аномалия [3], что дало нам основание рассматривать эти ИК-данные как артефакт (рис. 1в). Полученные таким образом величины $\delta^{18}O$ подвергались спектральному анализу по методике спектрально-временного анализа, изложенной в [12]; результаты представлены на рис. 1г. Естественно ожидать, что при использованном способе хронометрирования ИК-кривой результаты спектрального анализа ОКД (рис. 1б) и ИК-данных (рис. 1г), особенно для более длительных периодов, будут близки. Как видно из рис. 1б и 1г, это все же не совсем так, но это не главное, поскольку цель проведения данного исследования заключается не в обнаружении орбитальных периодов в ИК-записи и доказательстве правильности основной концепции ОТП. Это уже показано в ряде ра-

бот [4, 3, 6, 2]. Цель данного исследования – определить, что нового может дать использование ОКД в качестве хронологического эталона при определении особенностей соотношения орбитальных вариаций с глобальными климатическими изменениями.

Для решения поставленного вопроса логично сравнить результаты спектрального анализа, приведенные нами и представленные в работе [3], прежде всего потому, что анализировалась одна и та же ИК-запись, с одинаковым шагом представленных данных – через 2 тыс. лет. Можно отметить, что полученный нами спектр (рис. 1г) имеет большее разрешение, так как спектральные пики более узкие, а фоновые значения имеют меньшую относительную амплитуду, чем в [3]. Это выражается и в том, что широкий максимум, соответствующий периоду около 100 тыс. лет, приведенный в [3], у нас разделяется на 3 пика, причем главный пик, соответствующий периоду 92.6 тыс. лет, совпадает с соответствующим пиком спектра теоретической ОКД (рис. 1б, 1г). Особенно показательным преимуществом нашего метода, в том числе и используемой методики спектрального анализа, является то, что широкий 23-тысячелетний максимум спектра ИК-кривой в [3] на нашем графике (рис. 1г) является бимодальным, опять же практически совпадающим с соответствующим бимодальным максимумом спектра ОКД. Также необходимо отметить результат, о котором не сообщалось ранее другими исследователями. Наряду с обычно выделяемыми по ИК-записям наиболее значимыми спектральными максимумами для периодов 100, 41, 23 и 19 тыс. лет нами выделен максимум, соответствующий периоду 29.4 тыс. лет, амплитуда которого даже выше амплитуды 23-тысячелетнего пика (рис. 1г). Максимум, соответствующий периоду около 29 тыс. лет, существует и в спектре ИК-кривой работы [3], однако его амплитуда заметно меньше амплитуды 19-тысячелетнего пика. Вероятно, поэтому 29-тысячелетний пик не выделен авторами [3] как значимый результат. Преобладание периодов около 29 тыс. лет в изменениях гранулометрического состава отложений и средней поверхностной температуры в приэкваториальной части Тихого и Индийского океанов было отмечено в работах [13, 14]. Этот факт довольно неопределенно трактовался как результат нелинейного взаимодействия вариаций эксцентриситета и угла наклона земной оси с резонансными явлениями в климатической системе планеты, в частности, связанными с изменением интенсивно-

сти пассатов и муссонов. Однако заметим, что в спектре ОКД есть пик, соответствующий периоду 29.2 тыс. лет (являющемуся одной из гармоник цикла вариаций наклона земной оси), хотя его амплитуда очень мала (рис. 1б). Близость полученного из эмпирических ИК-данных и хорошо выраженного периода 29.4 тыс. лет с теоретически полученным, но слабо выраженным периодом 29.2 тыс. лет позволяет предположить существование неизвестного пока механизма нелинейного усиления (или отклика) климатической системы Земли на орбитальный инсоляционный сигнал, связанный именно с этой гармоникой изменения угла наклона земной оси.

Автор благодарен А.Г. Гамбурцеву за помощь при проведении спектрального анализа, а Е.Е. Талденковой и Е.Н. Былинскому за помощь при подборе литературы.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 01–05–64073.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Большаков В.А.* // ДАН. 2000. Т. 374. № 5. С. 692–695.
2. *Большаков В.А.* // Физика Земли. 2001. № 11. С. 50–61.
3. *Bassinot F.C., Labeyrie L., Vinsent E. et al.* // Earth and Planet. Sci. Lett. 1994. V. 126. P. 91–108.
4. *Hays J.D., Imbrie J., Shackleton N.* // Science. 1976. V. 194. P. 1121–1132.
5. *Imbrie J., Hays J., Martinson D. et al.* In: *Milankovitch and Climate.* Dordrecht: Reidel, 1984. P. 269–305.
6. *Большаков В.А., Большаков П.В.* // Стратиграфия. Геол. корреляция. 1999. Т.7. № 6. С. 3–13.
7. *Большаков В.А.* // ДАН. 2001. Т. 378. № 5. С. 675–678.
8. *Johnson R.J.* // Quatern. Res. 1982. V. 17. P. 135–147.
9. *Shackleton N.J., Berger A., Peltier W.* // Trans. Roy. Soc. Edinburg. 1990. V. 81. P. 251–261.
10. *Imbrie J., Imbrie J.Z.* // Science. 1980. V. 207. P. 943–953.
11. *Berger A., Loutre M.F.* // Quat. Sci. Rev. 1991. V. 10. P. 297–317.
12. *Гамбурцев А.Г., Александров С.И., Беляков А.С.* Атлас временных вариаций природных процессов: Порядок и хаос в литосфере и других сферах. М.: ОИФЗ РАН, 1994. С. 176.
13. *Pisias N., Rea D.* // Paleooceanography. 1988. V. 3. № 1. P. 21–37.
14. *Clemens S., Prell W.* // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. № D12. P. 22683–22700.