

УДК 551.324

## ОБ ОПРЕДЕЛЯЮЩЕЙ РОЛИ АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИИ ПРЕЦЕССИОННЫХ ЦИКЛОВ В ЧЕРЕДОВАНИИ ЛЕДНИКОВЫХ ЭПОХ ПОЗДНЕГО ПЛЕЙСТОЦЕНА

© 2003 г. Н. В. Вакуленко, академик А. С. Мониин, Д. М. Сонечкин

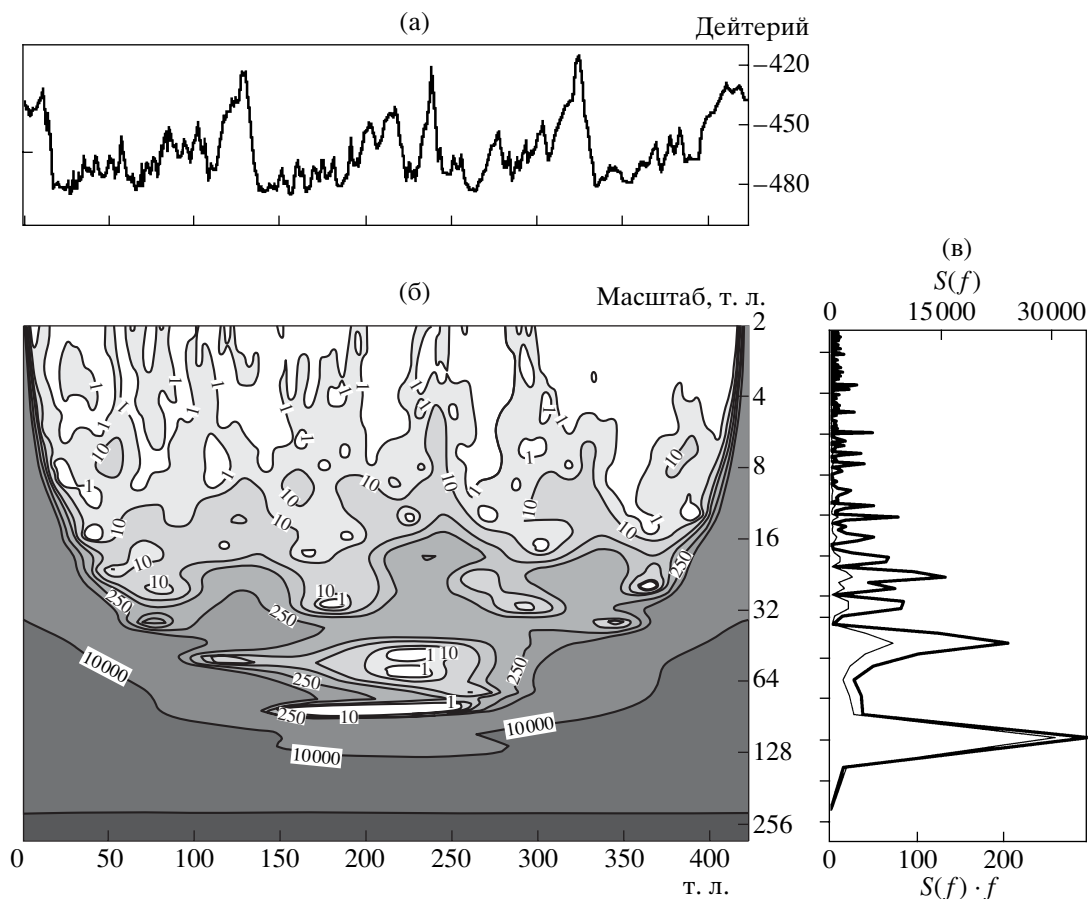
Поступило 04.04.2003 г.

Работы отечественных гляциологов и климатологов под руководством В.М. Котлякова по бурению ледяного щита Антарктиды на станции “Восток” составили фундаментальный вклад в исследования палеоклиматов. В том числе они дали более надежную основу для критического рассмотрения теории влияния изменений приходящей солнечной радиации на чередование ледниковых и межледниковых эпох в климате Земли, которую более 80 лет назад опубликовал югославский климатолог М. Миланкович [1]. В теории Миланковича неявно предполагается, что климатическая система линейно реагирует на квазипериодические изменения инсоляции, а потому максимумы и минимумы в палеоклиматических колебаниях должны лишь несколько запаздывать по сравнению с экстремумами в ходе самой инсоляции. Известная сейчас по результатам бурения на станции “Восток” и другим данным история оледенений не вполне укладывается в теорию Миланковича. Обнаружено, что наиболее силен в энергетическом спектре палеоклиматических колебаний пик на частоте весьма слабого с энергетической точки зрения (вклад около 1/1000 в среднюю изменчивость инсоляции) примерно 100 тыс. лет (т.л.)-цикла эксцентриситета орбиты Земли. При этом 100 т.л.-чередование ледниковых и межледниковых эпох установилось в плейстоцене менее миллиона лет назад, когда амплитуда 100 т.л.-цикла эксцентриситета была особо мала. Ранее же чередование ледниковых эпох происходило с периодом, близким к 41 т.л.-циклу наклона оси вращения Земли, который лишь перераспределяет приходящую радиацию по сезонам. Отклик на 400 т.л.-цикл эксцентриситета, амплитуда которого заметно больше, чем 100 т.л., вообще не найден в реконструкциях климатов плейстоцена. Эти и другие противоречия теории Миланковича указаны, как ждущие своего объяснения, в недавнем обзоре [2].

Здесь мы представляем свидетельство того, что 100 т.л.-чередование ледниковых и межледниковых эпох в позднем плейстоцене определялось в основном амплитудной модуляцией прецессионного цикла за счет 100 т.л.-цикла эксцентриситета, дополненной вкладом от модуляции цикла наклона.

Сначала рассмотрим энергетический спектр ряда дейтерия со станции “Восток”, хорошо описывающего, как принято считать [3], четырехкратную смену (со средним периодом около 100 т.л.) ледниковых и межледниковых эпох в позднем плейстоцене. Этот спектр (показан на рис. 1в) имеет почти белозумовое основание и большое число возвышающихся над ним статистически значимых пиков. Среди них есть пики на периодах 103 и 41 т.л., хорошо соответствующие орбитальным циклам эксцентриситета и наклона. Пик на периоде 103 т.л. вносит наибольший вклад в общую изменчивость рассматриваемого ряда (более 10%), что и определяет на первый взгляд 100 т.л.-чередование ледниковых и межледниковых эпох. Вклад пика на периоде 41 т.л. также существен (7%), но явным образом не виден в чередовании эпох. Еще один пик (на периоде около 29 т.л., с вкладом в общую изменчивость ряда около 3%) соответствует боковой гармонике цикла наклона. Как было недавно выяснено [4], она возникает из-за амплитудной и частотной модуляции цикла наклона. В [5], правда, указано, что вклады амплитудной и частотной модуляций цикла наклона в изменчивость инсоляции крайне незначительны. Тем не менее наличие значимого пика в энергетическом спектре ряда дейтерия подтверждает предположение, высказанное в [6, 7], что модуляция цикла наклона все-таки сказывается на климате. В более высокочастотной части спектра можно усмотреть пики на периодах гармоник прецессионного цикла (от 18 и 24 т.л.). Вклад самого высокого из этих пиков (на периоде 21.7 т.л.), взятого в отдельности, — около 5%, т.е. в два с лишним раза меньше, чем у пика 100 т.л.-периода. В наиболее высокочастотной части спектра видны также пики супергармоник и комбинационных гармоник пре-

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова  
Российской Академии наук, Москва*



**Рис. 1.** Временной ряд содержания дейтерия в керне льда со станции “Восток” за период позднего плейстоцена – (а); картина амплитуды его вейвлетного преобразования (области увеличенных значений амплитуды зачернены) – (б); спектр Фурье  $S(f)$  – тонкая линия) и вклад спектральных гармоник Фурье в общую изменчивость ряда  $(S(f) \cdot f)$  – толстая линия) – (в).

цессионного цикла. Формально эти пики статистически незначимы. Но, как показано в [7], по крайней мере в зоне экватора, влияние прецессионного цикла на приходящую радиацию таково, что период этого цикла как бы уменьшается в два раза. Можно допустить, что телесвязи между климатами экваториальной и полярной зон Земли столь существенны, что супергармоники прецессионного цикла проявляются и в ряду дейтерия.

Перечень 10 главных пиков энергетического спектра ряда дейтерия, упорядоченных по убыванию соответствующих им периодов, дан в табл. 1. Из табл. 1 видно, что высоты пиков (показанные в их отношении к высоте первого, главного, пика на периоде 103 т.л.) убывают с убыванием периода примерно по закону “–2” степени. Свойством этого закона, указываемым в любом учебнике по гармоническому анализу, является то, что пилообразную временную функцию, т.е. функцию, текущее значение которой периодически мгновенно возрастает, а затем медленно убывает, можно разложить в ряд Фурье

$$D(t) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \sin(m\omega t), \quad (1)$$

где период первой гармоники  $l = 2\pi/\omega$  равен периоду “пилы” (в нашем случае примерно 100 т.л.). Ряд дейтерия имеет эту характерную, хотя далеко не идеальную, пилообразную форму, на что неоднократно обращал внимание В.М. Котляков. Отсюда следует, что ряд дейтерия можно аппроксимировать рядом типа (1). Например, можно выбрать усечение (1), которое включает все гармоники прецессионного цикла, ибо их суммарный вклад в общую изменчивость ряда дейтерия достигает 17%. Многие палеоклиматологи давно предполагали, что именно биения прецессионных гармоник определяют 100 т.л.-чередование ледниковых и межледниковых эпох. Но биения, сами по себе, не влекут пика в спектре на периоде 100 т.л., поэтому первая гармоника (с периодом “пилы”) должна быть явно включена в конечномерную аппроксимацию (1), чтобы описать наблюдаемое чередование ледниковых и межледни-

**Таблица 1.** Пики спектральной плотности ряда дейтерия, упорядоченные по убыванию соответствующего им периода, с указанием отношений их периодов и высот по отношению к периоду и высоте первого пика (с периодом 103 т.л.)

Порядковый № пика	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Период пика, т. л.	103	41	29.4	24.2	21.7	17.8	14.7	12.1	10.8	9.4
$\frac{\text{период } 100 \text{ т. л.}}{\text{период пика}}$	1.0	2.5	3.5	4.2	4.7	5.8	7.0	8.5	9.5	10.9
$\left(\frac{\text{период пика}}{100 \text{ т. л.}}\right)^2$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{6.2}$	$\frac{1}{12.2}$	$\frac{1}{18.1}$	$\frac{1}{22.6}$	$\frac{1}{33.5}$	$\frac{1}{49.0}$	$\frac{1}{72.2}$	$\frac{1}{91.0}$	$\frac{1}{120.1}$
$\frac{\text{высота пика}}{\text{высота пика с периодом } 100 \text{ т. л.}}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{3.6}$	$\frac{1}{12.8}$	$\frac{1}{16.9}$	$\frac{1}{10.7}$	$\frac{1}{25.3}$	$\frac{1}{41.6}$	$\frac{1}{32.3}$	$\frac{1}{56.5}$	$\frac{1}{138.7}$
	$\left(\frac{1}{1}\right)$	$\left(\frac{1}{4}\right)$	$\left(\frac{1}{9}\right)$	$\left(\frac{1}{16}\right)$	$\left(\frac{1}{25}\right)$	$\left(\frac{1}{36}\right)$	$\left(\frac{1}{49}\right)$	$\left(\frac{1}{64}\right)$	$\left(\frac{1}{81}\right)$	$\left(\frac{1}{100}\right)$

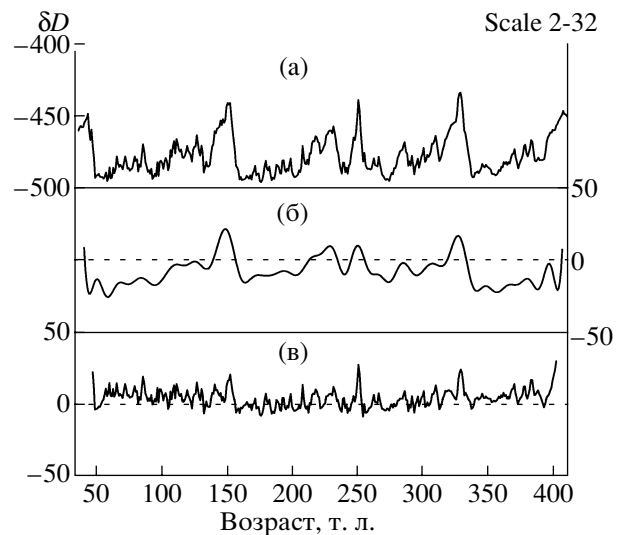
Примечание. В скобках указаны отношения высот пиков к высоте пика с периодом 103 т.л. в случае идеальной “пилы”.

ковых эпох. Связана ли эта 100 т.л.-гармоника с биениями прецессионного цикла, в рамках гармонического анализа (1) выяснить нельзя.

Чтобы решить этот вопрос, мы сделали вейвлетное преобразование (ВП) ряда дейтерия, используя вейвлетную функцию Морле, особо удобную для анализа биений. На рис. 1 показана картина распределения значений амплитуды ВП на полуплоскости (время–масштаб). Из рисунка видно, что в полосе масштабов от 16 до 32 т.л. области повышенных и пониженных значений амплитуд ВП чередуются во времени. Это хорошо известный из теории вейвлетов признак амплитудной модуляции гармоник соответствующих масштабов, т.е. в данном случае гармоник прецессионного цикла. Средний период модуляции составляет около 100 т.л. Эта модуляция примерно совпадает по фазе с таким же чередованием областей увеличения и уменьшения амплитуды ВП, которые можно усмотреть в картине вещественной компоненты ВП самого цикла прецессии, показанной на рис. 2с в статье [6]. Сразу ниже в картине амплитуды ВП есть полоса масштабов (от 32 т.л. и несколько более), внутри которой амплитуда ВП почти постоянна. Отсюда следует, что амплитудная модуляция цикла наклона на его основном периоде в 41 т.л. малосущественна для динамики климата, как это и утверждают авторы работы [5]. Впрочем, боковая гармоника этого цикла (период около 29 т.л.) находится внутри упомянутой выше полосы масштабов, охваченной амплитудной модуляцией. Амплитудная модуляция видна также у второй боковой гармоники цикла наклона (период около 54 т.л.). Наличие амплитудной модуляции на обеих боковых гармониках есть признак частотной модуляции цикла наклона (см. [6]). Добавим, что рассматриваемый ряд слишком короток, чтобы обнаружить при анализе его ВП какие-либо вариации в

амплитуде 100 т.л.-гармоники цикла эксцентриситета. Эта последняя представлена полосой повышенного значения амплитуды ВП в середине самой нижней, еще не искаженной краевыми эффектами ВП, части рис. 1.

Построим теперь аппроксимацию ряда дейтерия по гармоникам прецессионного цикла через посредство обратного ВП в диапазоне масштабов от 2 до 32 т.л., где обнаруживается модуляция. Заметим, что из-за конечности ряда дейтерия при ВП возникают значительные краевые искажения (искаженные части с боков и внизу картины ВП на рис. 1 характеризуются очень большими зна-



**Рис. 2.** Временной ряд содержания дейтерия в керне льда со станции “Восток” за период позднего плейстоцена (а); ряд, реконструированный с помощью обратного вейвлетного преобразования в диапазоне масштабов от 2 до 32 т.л. (б); остаточный ряд, полученный вычитанием реконструированного ряда из оригинального (в).

чениями амплитуды). Поэтому при обратном ВП не удается хорошо восстановить ряд в его начальной и конечной частях. Еще отметим свойство всякого ВП быть нечувствительным к постоянной составляющей преобразуемого ряда, так что обратное ВП определено с точностью до константы, что для наших целей несущественно. Реконструированный по указанному диапазону масштабов временной ряд (рис. 2б) воспроизводит в сглаженном виде все основные черты оригинального ряда дейтерия. Остаточный ряд (рис. 2в), получаемый путем вычитания реконструированного ряда из оригинального, содержит поэтому только наиболее высокочастотные детали оригинального ряда, не ухватываемые вейвлетной функцией Морле даже в самом мелком масштабе в 2 т.л. Самое главное: реконструированный ряд воспроизводит, хотя и с уменьшенной амплитудой (примерно на треть у второго и четвертого пиков потепления и примерно на половину у третьего пика), цикл 100 т.л.-чередования ледниковых и межледниковых эпох. То, что 100 т.л.-цикл воспроизводится с уменьшенной амплитудой, можно отчасти отнести на счет вычислительного несовершенства обратного ВП, которое было использовано. Оптимизация обращения может несколько улучшить реконструкцию. Но, с другой стороны, возможно прямое влияние на климат 100 т.л.-цикла эксцентриситета или каких-то других факторов, не относящихся к биениям прецессионного цикла. Поэтому отношение реконструированной части 100 т.л.-цикла к его амплитуде в остаточном ряду (примерно 2 : 1) можно рассматривать как грубую меру климатической важности пре-

цессионных биений по сравнению с другими факторами.

Таким образом, чередование ледниковых и межледниковых эпох в позднем плейстоцене определяется в основном амплитудной модуляцией прецессионного цикла, его супергармоник и комбинационных гармоник этого цикла с боковой гармоникой цикла наклона. Возбуждение столь богатого комбинационного спектра в отклике на орбитальные циклы Миланковича может быть объяснено только нелинейностью климатической системы. Построение адекватной математической модели нелинейного отклика является поэтому одной из актуальных задач дальнейшего совершенствования теории Миланковича.

Данная работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 02-05-64299).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Milankovitch M.* Theorie mathematique des phenomenes thermiques produits par la radiation solaire. Zagreb; P.: Acad. Yougoslave Sci. Arts, 1920.
2. *Clark P.U., Alley R.B., Polard D.* // *Science*. 1999. V. 286. P. 1104–1111.
3. *Petit J.R., Jouzel I., Raynaud D. et al.* // *Nature*. 1999. V. 399. P. 429–436.
4. *Liu H.S.* // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. № D20. P. 25147–25164.
5. *Melice J.L., Coron A., Berger A.* // *J. Climate*. 2001. V. 14. P. 1043–1054.
6. *Liu H.-S., Chao B.F.* // *J. Atmos. Sci.* 1998. V. 55. P. 227–236.
7. *Berger A., Loutre M.F.* // *Science*. 1997. V. 278. P. 1476–1478.