



О БИФУРКАЦИЯХ УМНОЖЕНИЯ ПЕРИОДА ЛЕДНИКОВЫХ ЦИКЛОВ В ПЛИОЦЕНЕ – ПЛЕЙСТОЦЕНЕ

Н. В. Вакуленко, Н. Н. Иващенко, В. М. Котляков, Д. М. Сонечкин

В плиоцене (примерно 5–2 млн. лет до настоящего времени) глобальный климат колебался с периодом, хорошо соответствующим 41-тысячелетнему циклу изменений наклона оси вращения Земли к плоскости эклиптики. Затем этот период исчез, несмотря на то, что 41-тысячелетний цикл наклона даже немного увеличил свой размах и, следовательно, отклик на него должен был бы только усилиться. Анализируя палеоклиматический ряд, покрывающий плиоцен и последующий плейстоцен, мы показываем, что этот отклик климатической системы просто стал неустойчивым и, следовательно, ненаблюдаемым. Одновременно, посредством бифуркации удвоения периода, хорошо известной в теории нелинейных динамических систем, возникли новые устойчивые и наблюдаемые климатические колебания. В дальнейшем они испытали несколько вторичных бифуркаций, при которых их периоды поочередно утраивались, удваивались и снова утраивались.

Ключевые слова: Палеоклиматология, ледниковые циклы плиоцена/плейстоцена, вейвлетный анализ, бифуркации умножения периода.

Введение

Со времен пионерских исследований Л. Агассиза, Дж. Адемара, Дж. Кролля и М. Миланковича палеоклиматологами принято объяснение, обычно называемое теорией ледниковых циклов Миланковича. Теория относит весьма регулярное чередование холодных (ледниковых) и теплых (межледниковых) климатических условий в течение последних 5 млн. лет (в плиоцене и плейстоцене) на счет изменений и перераспределений между разными широтными поясами Земли приходящей солнечной радиации (инсоляции). Эти изменения и перераспределения, в свою очередь, обязаны квазипериодическим вариациям прецессии и наклона оси вращения Земли к плоскости эклиптики [1]. Примерно за один млн. лет до настоящего времени климатические колебания, явно следовавшие наиболее мощному циклу наклона с периодом в 41 тыс. лет, внезапно исчезли, несмотря на то, что размах этого цикла тогда не только не уменьшился, но даже немного увеличился. Взамен них появились климатические колебания с периодами около 100 тыс. лет, что неплохо совпадает с преобладающей цикличностью эксцентриситета земной орбиты. Циклы эксцентриситета не приводят к перераспределению инсоляции по широтам и лишь несколько

(на сотую долю процента) меняют годовую сумму инсоляции, получаемую Землей в целом. Поэтому большинство палеоклиматологов считает невероятным, что столь малые изменения инсоляционного воздействия могли вызывать столь существенную трансформацию климатических колебаний. Выяснение причин этой трансформации является сейчас основной нерешенной проблемой в теории Миланковича.

Настоящее исследование было стимулировано попытками западных палеоклиматологов решить эту проблему [2–9]. Хотя в целом эти попытки остались безуспешными, западные ученые существенно детализовали теорию Миланковича, особенно в том, что касается оценки сравнительной роли циклов прецессии и наклона. Напомним в связи с этим, что Дж. Кролль отводил главную роль циклам наклона, а М. Миланкович считал наиболее важными циклы прецессии, происходящие с периодами в 19 и 23 тыс. лет, поскольку известные ему стадии наиболее недавних европейских оледенений (Вюрм, Рисс) хорошо укладывались именно в эти последние.

Однако при этом возник новый вопрос. Изменения инсоляции за счет прецессии происходят противофазно в северном и южном полушариях. Между тем, хотя и с некоторыми сомнениями (см. перечень пяти возможных альтернатив в [10]), сейчас принято интерпретировать палеоклиматические данные как свидетельствующие о том, что относительно теплые и относительно холодные условия наступали в обоих полушариях синхронно. Именно это заставило палеоклиматологов вернуться к вопросу о важности наклона, изначально предполагавшейся Кроллем. Решающую роль тут сыграла недавняя работа П. Хайберса [11]. Он предположил, что для таяния снега и льда в высоких широтах важна сумма инсоляции за теплый период года, превышающая некоторое пороговое значение. Эта инсоляция колеблется в зависимости и от прецессии и от наклона, но главным для нее является 41-тысячелетний цикл наклона.

Таким образом, в современном прочтении, теория Миланковича склоняется к тому, что 41-тысячелетний цикл наклона является главной причиной чередования относительно теплых и относительно холодных климатических условий, и объясняет, почему климатические циклы были синхронными в северном и южном полушариях. Однако эта теория все еще не отвечает на вопрос, почему примерно за один млн. лет до нашего времени произошло существенное увеличение длительности климатических циклов, то есть разрешить основную вышеуказанную проблему теории Миланковича.

Здесь для решения этой проблемы мы используем понятия и методы современной математической теории нелинейных динамических систем, находящихся под воздействием квазипериодических внешних сил, то есть сил, чьи периоды несоизмеримы друг с другом. Наше внимание именно к таким динамическим системам объясняется тем, что энергетические спектры подобных систем содержат очень большое (в принципе, бесконечно большое) число пиков на комбинационных гармониках внешних сил.

Сейчас имеются весьма надежные расчеты [12–17] вариаций инсоляции на разных широтах Земли для последних 20 млн. лет, и даны экстраполяции этих колебаний в далекое будущее. Впервые такие расчеты (долгое время остававшиеся наиболее точными) были проведены советскими учеными Ш.Г. Шараф и Н.А. Будниковой (см. подробные ссылки на их публикации в книге А.С. Моница [18]). Однако упоминания об этих пионерских работах в западных публикациях или отсутствуют, или, как в наиболее известной из этих публикаций – работе известного бельгий-

ского геофизика А. Берже [12], работы Шараф и Будниковой упоминаются мельком как нечто незначительное. В этой работе был дан перечень энергетически наиболее мощных периодичностей в вариациях орбитальных элементов Земли (прецессии, наклонения и эксцентриситета), которые определяют вариации инсоляции, но никак не было прокомментировано их происхождение. Однако уместно упомянуть, что колебания орбитальных элементов Земли являются модулированными по амплитуде и частоте (читатель, не знакомый с теорией модуляции временных колебаний, может ознакомиться с ее азами в [19, гл. 9]), поскольку Земля в своем движении вокруг Солнца подвергается гравитационным воздействиям других планет.

Именно в результате этих модуляций получается огромное количество периодов в фурье-представлении временных вариаций прецессии, наклонения и эксцентриситета. Например, вторая по мощности фурье-гармоника в вариациях эксцентриситета, имеющая период 94945 лет, модулируется гармониками с много большими периодами 2035441 (6-я по мощности), 1306618 (8-я), 1282495 (13-я) и 3466974 (15-я) лет, соответственно. Причем последняя из этих модулирующих гармоник (15-я) сама является комбинационной гармоникой 6-й и 13-й гармоник. Заметим, что в [12] период 6-й гармоники в 2035441 лет был ошибочно указан как 2305441, вероятно, из-за типографской ошибки. Эту ошибку не замечали авторы многих публикаций, цитировавшие работу [12]. Например, эта ошибка перепечатана в весьма содержательной в других отношениях работе М. Гила [20] (см. его табл. IV на стр. 383).

В результате этих модуляций появляются довольно мощные комбинационные гармоники на весьма близких частотах $1/94945 - 1/2035441 = 1/99590$ (4-я), $1/94945 - 1/1306618 = 1/102384$ (12-я), $1/94945 - 1/1282495 = 1/102536$ (7-я), $1/94945 + 1/3466974 = 1/92414$ (16-я) обратных лет. В скобках указаны номера этих гармоник, как они упорядочены в [12] по убыванию их мощности. Комбинационная гармоника $1/94945 - 1/3466974 = 1/97618$ находится уже за пределами указанного там списка 42-х гармоник эксцентриситета, как и много других еще менее мощных гармоник с периодами менее 90 тыс. лет. Из их числа, как пример, приведем гармонику $1/94945 + 1/1306618 = 1/88513$. При частотной модуляции появляются также комбинационные гармоники следующих порядков с периодами до примерно 160-ти тыс. лет. Из их числа приведем только гармоники $1/99590 - 1/1306618 = 1/107807$ и $1/99590 - 1/1282495 = 1/107975$, которые являются 14-й и 26-й в списке Берже. Они встретятся нам ниже в разделе 2 при рассмотрении конкретных климатических циклов плейстоцена. Заметим, что подобные же модуляции присущи основному 41-тысячелетнему колебанию наклонения.

Диапазон более долгих периодов до примерно 300 тыс. лет остается свободным от комбинационных гармоник вышеуказанного типа. Однако затем фурье-гармоника с периодом 412885 тыс. лет (самая первая в списке Берже) начинает новую серию комбинационных гармоник эксцентриситета с существенно более длинными периодами (несколько сотен тыс. лет). Чередование диапазонов временных масштабов, внутри которых имеется много гармоник с близкими периодами, и диапазонов, почти свободных от гармоник, составляет своеобразную «полифонию» (многоголосие) инсоляционных воздействий на климатическую систему.

В палеоклиматических рядах также обнаруживается очень много периодичностей, которым соответствуют дельта-пики в энергетических спектрах этих рядов.

Правда, известный американский геофизик К. Вунш [21], начиная заниматься проблемой удлинения климатических циклов, высказывал сомнение в их статистической значимости против гипотезы «красного шума». Но затем он перестал настаивать на этом, убедившись, что палеоклиматические периодичности все же реальны. С другой стороны, уже упомянутый М. Гил с самого начала своих занятий палеоклиматом хорошо понимал важность существования многих гармоник в вариациях инсоляции. Он, вероятно, первым со своими учениками аккуратно с математической точки зрения показал (см., например, [22]), что именно эти гармоники возбуждают множество пиков в энергетических спектрах палеоклиматических колебаний.

«Полифония» инсоляционных воздействий на климатическую систему делает палеоклиматические колебания чрезвычайно сложными. Это сильно затрудняет понимание механизмов их формирования. Так, пионеры развития теории Миланковича в XX веке Дж. Имбри и др. [23,24] посчитали, что отклики климатической системы на инсоляционные воздействия, включая их примерно 100-тысячелетнее колебание за счет эксцентриситета, были в плиоцене и плейстоцене почти линейными. Действительно, эти исследователи показали, что амплитуды откликов были пропорциональными амплитудам воздействия, а фазы откликов несколько запаздывали по сравнению с фазами воздействующих колебаний инсоляции. Но эти исследователи не нашли [23] никаких следов отклика на самое мощное из колебаний эксцентриситета с периодом 412885 лет. Такой отклик должен был бы наблюдаться, если климатическая система откликалась на инсоляционные воздействия действительно линейно.

Только к концу XX века было понято [25–28], что 412885-летнее колебание эксцентриситета может проявлять себя как модулятор вышеуказанных примерно 100-тысячелетних гармоник эксцентриситета. При этом должны рождаться новые комбинационные гармоники – новые «октавы» инсоляционных и, следовательно, палеоклиматических колебаний. Например, получаются гармоники $1/92414 + 1/412885 = 1/75512$ (33-я), $1/94945 + 1/412885 = 1/77194$ (27-я), которые встретятся нам ниже при рассмотрении конкретных климатических циклов. Также ниже встретятся гармоники $1/102385 + 1/412885 = 1/82041$, $1/92414 - 1/412885 = 1/119063$ (20-я) и $1/94945 - 1/412885 = 1/123298$ (3-я), периоды которых практически равны удвоенному и утроенному периоду главного цикла наклонения.

Ясно, что отклики климатической системы на квазипериодические инсоляционные воздействия могут продуцировать пики в энергетических климатических спектрах на периодах комбинационных гармоник только, если климатическая система является нелинейной. Однако, если период внешней силы много больше любого периода, присущего самой климатической системе (собственного периода), то климатическая система будет «пассивно воспроизводить» изменение этой силы с некоторым запаздыванием по фазе. Это – как раз тот случай, когда система ведет себя как линейная, что и обнаружили авторы работ [23,24]. Если же период силы и какой-либо из собственных периодов климатической системы одного порядка величины, то амплитуда климатического отклика существенно зависит от их близости (резонанса). При сильном резонансе амплитуда отклика очень велика, даже если размах колебаний внешней силы очень мал. Такой высокоамплитудный отклик может оказаться неустойчивым, и будут наблюдаться климатические колебания, возникающие как результат разрешения этой неустойчивости. Рассмотрение того, как и когда

в плиоцене/плейстоцене возникала неустойчивость отклика климатической системы на инсоляционное внешнее воздействие, составляет суть нашего исследования.

Уже довольно давно было наблюденно [29–32], и снова подчеркнуто в недавней статье [6], что длительности плейстоценовых циклов лишь в среднем были близки к 100 тыс. лет. Каждый же конкретный цикл имел длительность, близкую к длительности удвоенного или утроенного главного цикла наклонения. Из сказанного выше следует, что фактические длительности плейстоценовых циклов, взятые по отдельности, близки к длительностям некоторых из комбинационных гармоник эксцентриситета. Так что вполне возможно, что удлиненные климатические циклы плейстоцена имеют резонансную природу.

Помимо инсоляционной «полифонии» вторым определяющим для климатической системы внешним фактором был общий тренд похолодания. Палеоклиматические ряды ясно демонстрируют этот тренд для последних нескольких десятков млн. лет истории Земли [33]. Параллельно с этим трендом увеличивалась высокочастотная изменчивость климата, что косвенно свидетельствует об уменьшении устойчивости климата со временем.

Сам тренд похолодания климата мог быть обусловлен изменениями способности Земли аккумулировать приходящую коротковолновую солнечную радиацию, излучать длинноволновую радиацию в космос и обмениваться теплом с глубокими слоями океана. Вероятно, что альbedo Земли было небольшим и почти постоянным в течение очень теплого раннего плиоцена. Вероятно также, что собственное излучение Земли было мало изменчиво из-за более или менее постоянного уровня концентрации парниковых газов в атмосфере того времени [34]. Зато, в согласии с [35–39] и многими другими публикациями, можно полагать, что реорганизация общей циркуляции океана, связанная с появлением Панамского перешейка и разрастанием ледниковых щитов в северном полушарии, существенно повлияла на теплообмен между атмосферой и океаном и, тем самым, как-то способствовала общему похолоданию климата. Уместно упомянуть в связи с этим наши работы [40,41], в которых было показано, что в масштабах порядка 100 тыс. лет океаническая подсистема глобальной климатической системы лидировала по сравнению с континентальной подсистемой. В данной работе мы, однако, не будем детально обсуждать вопрос о роли океана, а ограничимся только констатацией важности общего похолодания глобального климата для трансформации ледниковых циклов на границе плиоцена и плейстоцена.

1. Метод исследования

Чтобы проследить, какие из комбинационных гармоник были наиболее выражены в климатических колебаниях в тот или иной конкретный отрезок времени, используем технику вейвлетного преобразования (ВП) палеоклиматических временных рядов, полностью покрывающих эпохи плиоцена и плейстоцена. Насколько известно, впервые ВП почти столь же длинных рядов было рассмотрено в статье [42]. Ее авторы показали, что ВП более четко, чем скользящее преобразование Фурье, выявляет смену длительности ледниковых циклов. Они нашли, что эта смена уже завершилась примерно за 900–800 тыс. лет до настоящего времени, но детали ее совсем не рассматривали. Сейчас техника ВП весьма популярна в палеоклиматоло-

гии, но часто она используется просто как «красивая иллюстрация» без какого-либо анализа получающихся картин ВП (см.такие примеры в [14,43]).

В данной работе, как и в [42], использовано комплексное ВП вещественного временного ряда $T(t)$, $t \in \theta$

$$\begin{aligned} WT(b, a) &= WT_{re}(b, a) + iWT_{im}(b, a) = \\ &= a^{-1/2} \int_{\theta} T(t) MOR^* ((t - b)/a) dt, \quad a > 0 \end{aligned} \quad (1)$$

с хорошо известной «материнской» вейвлетной функцией, предложенной французским математиком Ж. Морле,

$$MOR(\tau) = \pi^{-1/4} \exp \{iC\tau\} \exp \{-\tau^2/2\}, \quad (2)$$

вычисленной для всевозможных временных сдвигов $(t - b)$ и вейвлетных масштабов a . Значок «*» в (1) означает комплексное сопряжение.

Выбор частотной характеристики этой функции $C = 6.2035$ обеспечивает строгое равенство вейвлетного масштаба обычному фурье-масштабу, то есть амплитуда ВП гармонического временного ряда $T(t) = A \cos(2\pi\omega t + \phi)$ получается максимальной в вейвлетном масштабе $a = 2\pi/\omega$, а передаточная функция ВП как полосового фильтра, получаемая путем преобразования Фурье функции Морле, имеет вид гауссиана для положительных a

$$\overline{MOR}(a) \cong \exp \{-(a - C)^2/2\}, \quad a^{-1} > 0. \quad (3)$$

Значения передаточной функции, соответствующие отрицательным a , которые формально появляются в преобразовании Фурье, обнуляются. Амплитуда ВП в масштабе a оказывается равна взвешенному среднему амплитуд фурье-гармоник преобразуемого ряда в некотором диапазоне вокруг этого масштаба (см. [19, гл. 8]). Заметим, что в [42] также была использована функция Морле, но с несколько иным значением C , а также иной нормировкой интеграла свертки. Впрочем, эти различия совершенно несущественны для суждения о качественных изменениях в картине ВП, о которых будет говориться ниже.

Заметим, что любой доступный для анализа палеоклиматический ряд не только конечен, но и задан своими значениями на сетке неравно отстоящих точек. Поэтому обычно производят интерполяцию этих значений на точки, равномерно отстоящие друг от друга, а уже затем делают ВП по формуле (1), в которой интегрирование заменяется суммированием

$$WT(b, a) = WT_{re}(b, a) + iWT_{im}(b, a) = a^{-1/2} \sum_{n=1}^N T(t_n) MOR^* (\delta t(n - b)/a), \quad (4)$$

где δt – шаг по времени между последовательными точками ряда.

Однако в палеоклиматических рядах расстояние между соседними точками обычно экспоненциально возрастает со временем, поэтому такая интерполяция может исказить спектральный состав анализируемых колебаний. Например, если интересуются временными вариациями в палеоклиматическом ряду, периоды которых

близки к среднему временному сдвигу между последовательными точками, то для тех отрезков рассматриваемого ряда, где сдвиг больше среднего, использование (4) приводит к ложной перекачке энергии колебаний из области высоких частот, не разрешаемых фактически имеющимися данными, в более низкие частоты. Такая перекачка хорошо известна в задаче оценки энергетических спектров дискретных временных рядов [44]. Чтобы ее избежать, сравнительно недавно зарубежными палеоклиматологами была разработана техника прямого оценивания палеоклиматических энергетических спектров по рядам неэквидистантных точек (см., например, [45]). Практически такая же техника еще раньше была разработана одним из авторов статьи (см. [46] и последующие публикации в Трудах Гидрометцентра СССР) для целей спектрального объективного анализа метеорологических полей по данным стационарных и спутниковых наблюдений, неравномерно распределенных в пространстве и времени. Разумеется, авторы [45] об этих работах не знали. Мы также не знали о статье [45], когда на основе идеи, высказанной в [46], писали свою специальную Фортран-программу ВП, использующую следующее нормированное суммирование:

$$\begin{aligned} WT(b, a) &= WT_{re}(b, a) + iWT_{im}(b, a) = \\ &= a^{-1/2} \sum_{n=1}^N T(t_n) MOR^*(t_n - b)/a / \sum_{n=1}^N [MOR^*(t_n - b)/a]^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Проверка на тестах показала, что в случае равномерно отстоящих точек эта программа дает тот же результат, что и стандартная программа, использующая (4). Если же точки ряда неэквидистантны, результат получается менее чувствительным к спектральному перетеканию энергии в сторону низких частот.

Для нашей работы было также существенно использовать обратное вейвлетное преобразование (ОВП), чтобы реконструировать колебания разных временных масштабов, содержащиеся в рассматриваемых палеоклиматических рядах. Подобно обратному преобразованию Фурье, ОВП определяется как взвешенная сумма базисных функций. У преобразования Фурье ими являются синусы и косинусы, периоды которых кратны длине преобразуемого ряда, а у ОВП базис строится на основе «материнской» вейвлетной функции, не обязательно той, что была использована в (1). В частности, Морле предложил использовать для этого дельта-функцию. Тогда формула для вычисления ОВП принимает особенно простой вид

$$\hat{T}(t) = \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} WT_{re}(t, a) da. \quad (6)$$

В нем пределы интегрирования a_{\min} и a_{\max} определяют диапазон масштабов, внутри которого по вещественной компоненте ($\hat{T}(t) \equiv \hat{T}_{re}(t)$) реконструируются колебания исходного ряда. Для нас оказалось важным реконструировать не только такие колебания, что обычно делается в приложениях ВП, но и так называемое преобразование Гильберта $H[T(t)] = \pi^{-1} P \int_{-\infty}^{\infty} T(s)/(t-s) ds$ исходного (фильтрованного) ряда (здесь P – главное значение рассматриваемого несобственного интеграла). Оно вычисляется по формуле, аналогичной (6), но с заменой $WT_{re}(t, a)$ на $WT_{im}(t, a)$ ($\hat{T}(t) \equiv \hat{T}_{im}(t) = \hat{H}[T(t)]$). Насколько известно ВП для подсчета

преобразования Гильберта временных рядов не применялось. Такая комплексная реконструкция позволила увидеть «фазовый портрет» рассматриваемых палеоклиматических колебаний: как они выглядят в некотором двумерном подпространстве. Конечно, палеоклиматические колебания многомасштабны и, следовательно, требуется фазовое пространство большей размерности, чтобы изобразить их со всеми деталями. Однако для наших целей было важно наглядное представление только тех особенностей палеоклиматических колебаний, которые относятся к основным масштабам ледниковых циклов (10-100 тыс. лет), поэтому предположим, что двумерное фазовое подпространство будет достаточным.

2. Полученные результаты

2.1. Циклы плиоцена и раннего плейстоцена. Напомним, что в [47] уже выполнен качественный анализ фазового портрета климатической системы в двумерном подпространстве, построенном по (6). Был использован изотопный палеоклиматический ряд «Композит», составленный почти двадцать лет назад из данных всего трех бурений дна Тихого океана [48,49]. К настоящему времени выполнено несравненно больше бурений дна океанов и существенно усовершенствована техника первичной обработки, получаемых данных. В результате, американские палеоклиматологи Л.Е. Лисецки и М.Е. Раймо [50] опубликовали ряд «LR04», составленный из данных о содержании изотопа $\delta^{18}O$ в донных отложениях останков *Bentic foraminifera*, полученных при 57 бурениях дна Тихого, Атлантического и Индийского океанов. Этот уникальный ряд содержит информацию о вариациях глобального климата (глобальной средней температуре и, одновременно, о суммарном объеме ледников) за 5.3 млн. лет до настоящего времени. Временное разрешение ряда LR04 меняется от 1 тыс. лет в позднем плейстоцене (0–0.6 млн. лет назад) до двух тыс. лет в позднем плиоцене (1.5 млн. лет назад) и падает до пяти тыс. лет в начале плиоцена (3.0–5.3 млн. лет назад), что достаточно для анализа климатических колебаний с периодами в десятки и сотни тыс. лет.

На рис. 1, *a* показана картина амплитуд ВП ряда LR04 в диапазоне вейвлетных масштабов от 10 до 1312 тыс. лет. Видно, что в раннем и среднем плиоцене (период последних пяти - трех млн. лет до настоящего времени) размах климатических колебаний был сравнительно невелик, в том числе и вблизи вейвлетного масштаба в 41 тыс. лет, соответствующего главному периоду колебаний наклона, хотя колебания все же имели относительный максимум вблизи масштаба в 41 тыс. лет. В позднем плиоцене размах примерно сорока тысячелетних климатических колебаний начал заметно расти, а колебания в диапазонах масштабов прецессии и эксцентриситета продолжали оставаться сравнительно небольшими. Не сомневаясь, что эти последние колебания были реальны (хотя они, наверняка, сильно искажены наблюдательными «шумами»), мы исключили их из дальнейшего рассмотрения с помощью комплексной реконструкции ряда LR04 по формуле (6) с $a_{\max} = 58$ и $a_{\min} = 29$ тыс. лет. Обе (вещественная и мнимая) части этой реконструкции показаны на рис. 1, *a*, а над ними – график колебаний самого наклона. Видно, что в реконструированных колебаниях преобладает главный (41-тысячелетний) цикл наклона. Это констатировалось многими нашими западными предшественника-

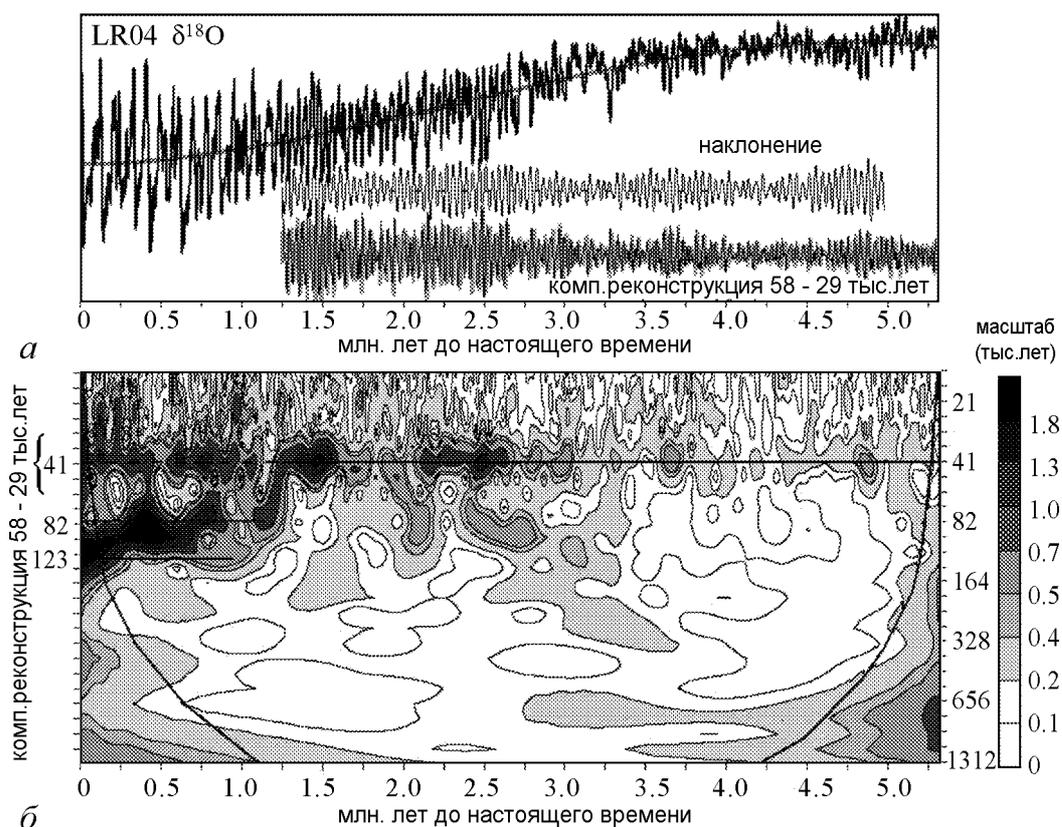


Рис. 1. Картина амплитуд вейвлетного преобразования ряда LR04 содержания изотопа кислорода $\delta^{18}O$ в донных отложениях останков бентосных фораминифер [50]: *a* – исходный ряд и его полиномиальный тренд (ось ординат перевернута, чтобы минимумы соответствовали наиболее холодному климату); *б* – ряды наклонения и комплексная реконструкция ряда LR04 в диапазоне вейвлетных масштабов от 58 до 29 тыс. лет

ми, начиная с пионеров количественного исследования климатической цикличности в плейстоцене и плейстоцене Дж.Д. Хейса, Дж. Имбри, Н.Дж. Шеклтона и других [1,23]. Причина этого в том, что в условиях очень теплого глобального климата раннего плейстоцена покровные ледниковые щиты в северном полушарии не возникали даже при наиболее существенных временных похолоданиях и, следовательно, эффекты обратных климатических связей за счет изменений альбедо были слабы. Из-за практической неизменности альбедо характерные частоты собственных колебаний климатической системы должны были быть тогда существенно выше, чем частоты воздействующих на систему колебаний инсоляции, так что отклик климатической системы на очень долгопериодное (по сравнению с периодами возможных собственных колебаний) инсоляционное воздействие был почти линейным. Согласно недавней работе Хайберса [11], основной вклад в колебания самого инсоляционного воздействия делал 41-тысячелетний цикл наклонения, а вклады прецессии и эксцентриситета были много менее существенными. Именно поэтому в плейстоцене установились примерно 40-тысячелетние климатические колебания.

Предлагаем теоретико-динамическую формализацию описания этого почти линейного отклика. Положим, что практически единственным двигателем климата в раннем и среднем плейстоцене действительно был 41-тысячелетний цикл наклонения,

и будем описывать отклик на него только наиболее мощными климатическими колебаниями, полученными при вышеупомянутой комплексной реконструкции ряда LR04. Обратим внимание на биение, хорошо видимое в графиках обеих частей этой реконструкции. Заметим, что образующие это биение периоды колебаний наклонения (порядка одного-двух млн. лет) были указаны во Введении. Видно, что размах биения климатических колебаний заметно возрос около трех-двух с половиной млн. лет до настоящего времени, в то время как размах биения наклонения остался неизменным. Поэтому мы полагаем, что здесь вступил в игру другой влияющий на климатические колебания фактор – общий тренд похолодания климата, сделавший актуальными обратные связи в климатической системе за счет изменений альбедо земной поверхности.

Аппроксимируем этот тренд, как он представлен в исходном ряду LR04, полиномом третьего порядка (серая линия, наложенная на график ряда LR04, см. рис. 1, а). Построим двухпараметрическую диаграмму зависимости амплитуды биения реконструированной компоненты от размаха биения колебаний наклонения и от тренда похолодания одновременно (рис. 2). Диаграмма использует 15 оценок (помечены черными кружками) одновременных значений всех трех сравниваемых величин в интервале от 4.5 до 1.5 млн. лет до настоящего времени. Она ясно показывает, что амплитуда биений рассматриваемых климатических колебаний зависела от обоих факторов.

Примерно 2.5 млн. лет назад амплитуда биения реконструированных климатических колебаний (соответствующая точка данных отмечена светло серой звездочкой на диаграмме) стала в 2-3 раза больше, чем в начале плиоцена (четыре точки данных у верхнего края диаграммы). Возвращаясь к картине амплитуд ВП (см. рис. 1, а), можно видеть, что этому эпизоду существенного увеличения амплитуды климатического биения соответствует небольшая область весьма больших амплитуд ВП точно на веивлетном масштабе в 41 тыс. лет. Интерпретируем этот эпизод как первую, но неудавшуюся, попытку дестабилизации климатического отклика на инсоляционное воздействие главного цикла наклонения. После этого, в соответствии с затуханием размаха биения наклонения, амплитуда реконструированных климатических колебаний снова уменьшилась и оставалась таковой в течение примерно 1 млн. лет. Затем она снова и еще более резко возросла в начале плейстоцена (примерно за 1.5 млн. лет до настоящего времени – соответствующая точка данных помечена второй светло серой звездочкой на рис. 2). Интерпретируем этот эпизод как вторую, и снова неудачную, попытку дестабилизации климатического отклика, поскольку сразу после рез-

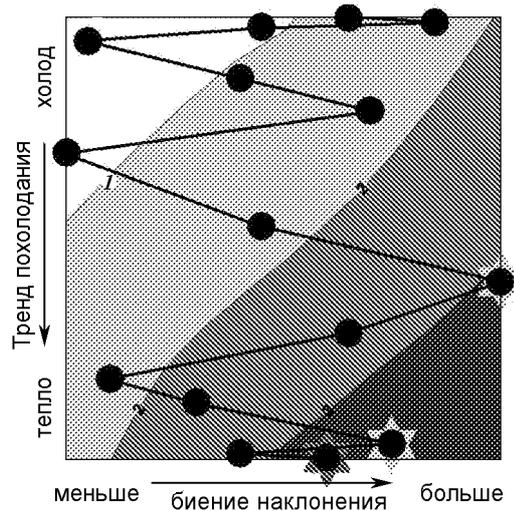


Рис. 2. Двухпараметрическая диаграмма зависимости амплитуды биения у комплексной реконструкции ряда LR04 в диапазоне веивлетных масштабов 58–29 тыс. лет от размаха биения у колебаний наклонения и от тренда похолодания одновременно. Диаграмма построена по 15 точкам (точки помечены черными кружками) одновременных значений всех трех сравниваемых величин в интервале от 4.5 до 1.5 млн. лет до настоящего времени. Два момента времени, когда рассматриваемые климатические колебания могли потерять свою устойчивость, помечены светло-серыми звездочками, а момент фактической потери устойчивости помечен темно-серой звездочкой

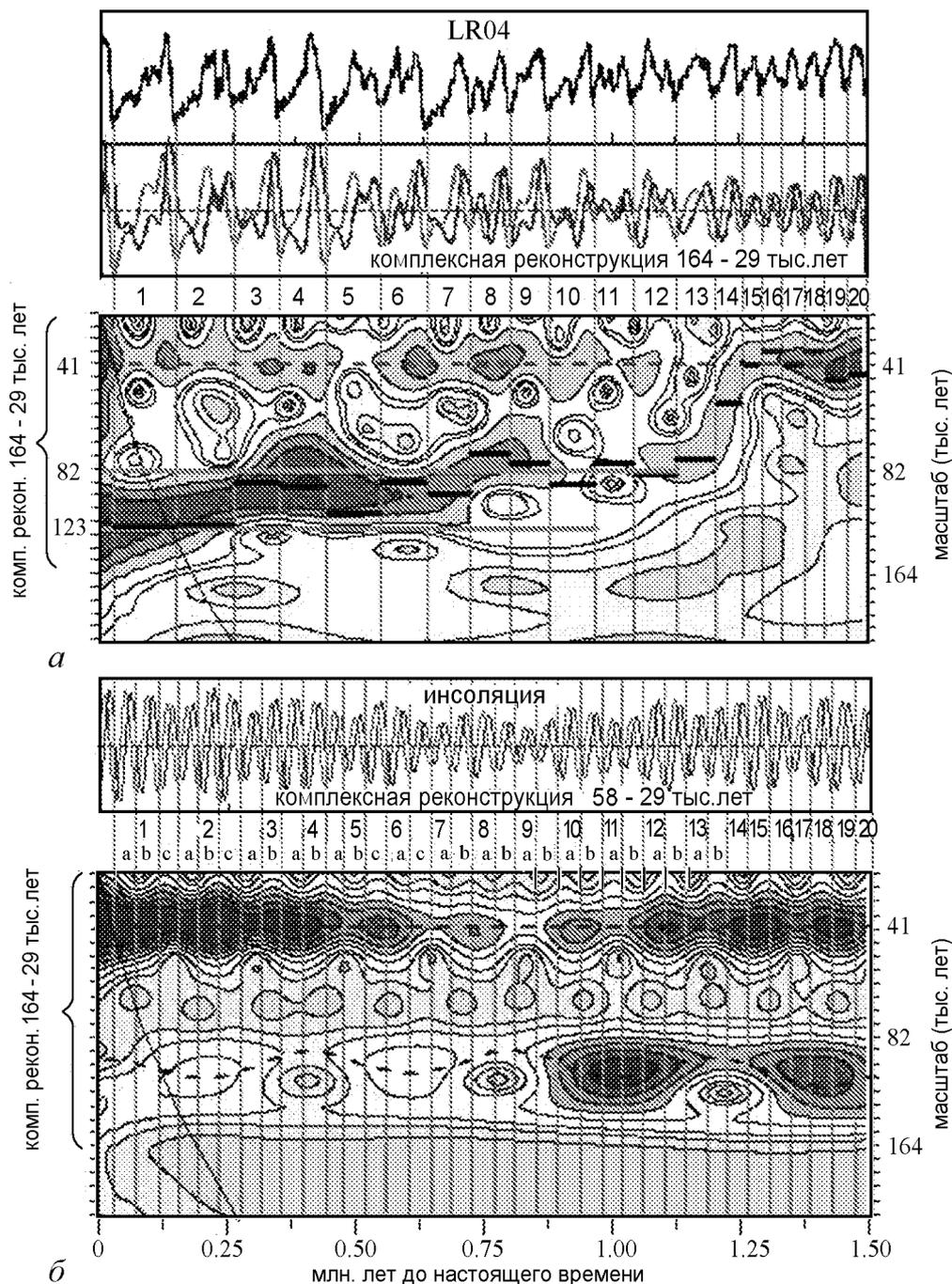


Рис. 3. *a* – увеличенная картина амплитуд ВП для части ряда LR04 и его комплексная реконструкция в диапазоне вейвлетных масштабов от 164 до 29 тыс. лет. Тонкие вертикальные линии проведены через главные минимумы вещественной части реконструкции и разделяют ряд на 20 климатических циклов. Толстые горизонтальные полосы между последовательными вертикальными линиями отмечают положение каждого климатического цикла на плоскости «время–масштаб вейвлетной картины». *б* – соответствующая картина амплитуд вейвлетного преобразования и комплексная реконструкция ряда годичной инсоляции на экваторе [11]. Тонкие вертикальные линии проведены через минимумы вещественной части реконструкции, а все интервалы между последовательными линиями помечены буквами а, б, с, указывающими на удвоение и утроение периода климатического цикла. Пунктирные линии на вейвлетной картине проведены через масштаб главного 41-тысячелетнего колебания наклона и через диапазон 100-тысячелетних масштабов главных колебаний эксцентриситета

кого возрастания амплитуда ВП уменьшилась до почти первоначального значения. Только при третьем возрастании размаха, отмеченном темно серой звездочкой внизу диаграммы, дестабилизация действительно произошла, о чем будет говориться в следующем подразделе. Сейчас только отметим, что размах биения наклона в этом эпизоде был не больше, а даже меньше, чем в предшествующих эпизодах. Тем не менее, дестабилизация произошла из-за прогрессирующего общего похолодания климата.

2.2. Основная бифуркация удвоения периода в начале плейстоцена.

Чтобы более тщательно рассмотреть эпизод возникшей дестабилизации плейстоценового климата (и последующую эволюцию климата в плейстоцене) на рис. 3, *a* показана более подробная картина амплитуд ВП последней части ряда LR04, а также комплексная реконструкция этой части ряда в расширенном диапазоне вейвлетных масштабов от 164 до 29 тыс. лет. Расширение диапазона реконструируемых масштабов осуществлено путем добавления к выше рассмотренному диапазону масштабов, типичных для вариаций эксцентриситета земной орбиты. Ниже покажем, что плейстоценовые климатические циклы зависели не только от наклона, но и от эксцентриситета. Через главные минимумы вещественной части комплексной реконструкции на этом рисунке, которые отлично совпадают с главными минимумами (максимумами оледенений) самого исходного ряда LR04, проведены тонкие вертикальные линии, которые делят всю рассматриваемую часть ряда LR04 на 20 периодов, соответствующих 20 климатическим циклам плейстоцена. Толстые горизонтальные линии между последовательными вертикалями отмечают положение каждого климатического цикла на плоскости «время–масштаб» вейвлетной картины.

На рис. 4 изображены фазовые портреты всех двадцати климатических циклов плейстоцена в двумерном подпространстве, осями которого служат вещественная и мнимая части комплексной реконструкции ряда LR04 в диапазоне вейвлетных мас-

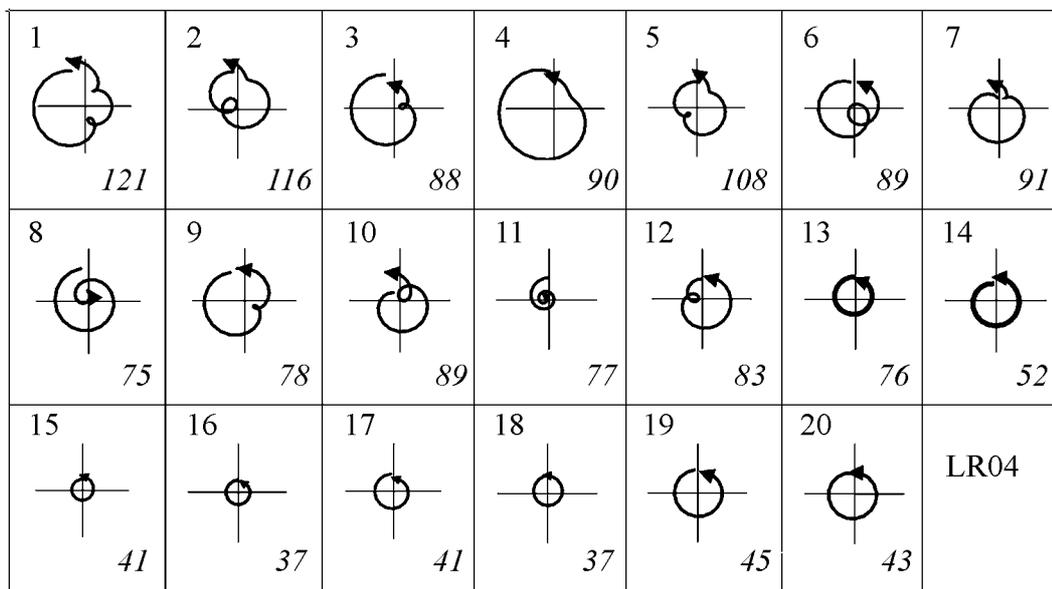


Рис. 4. Формы всех плейстоценовых климатических циклов, как они видны в двумерном подпространстве, осями которого являются вещественная и мнимая части комплексной реконструкции части ряда LR04 в диапазоне вейвлетных масштабов от 164 до 29 тыс. лет. Длины циклов указаны в тысячах лет

штабов от 164 до 29 тыс. лет. Все фазовые траектории в этом подпространстве движутся против часовой стрелки и у циклов 20–15 образуют почти идеальные окружности, практически замыкаясь по окончании каждого цикла. Отсюда следует, что эти траектории описывают гармонический (значит, практически линейный) отклик климатической системы на периодическое внешнее воздействие. Указанные на рисунке длительности этих циклов (43, 45, 37, 41, 37 и 41 тыс. лет, соответственно) отклоняются не более чем на 4 тыс. лет от главного периода наклонения (41 тыс. лет). Это вполне можно отнести за счет наблюдательных шумов в первичных изотопных рядах, использованных для конструирования ряда LR04, и считать периоды климатических циклов 20–15 точно равными главному периоду воздействующей внешней силы.

Чтобы окончательно убедиться, что именно 41-тысячелетний цикл наклонения являлся главным двигателем 20-15 циклов, надо еще сравнить начальные фазы этих циклов с соответствующими фазами колебаний инсоляции. Для этого на рис. 3, б показана картина амплитуд ряда годичной инсоляции на экваторе (исходные данные заимствованы из [11]). Заметим, что в теории Миланковича принято ориентироваться на суточную инсоляцию 21 июня на 65° с.ш. В частности, подгонка временной шкалы ряда LR04 делалась в [50] именно по этой инсоляции. Несмотря на это, мы использовали годичную инсоляцию на экваторе. Обоснование в данном случае служило предположение Хайберса [11]: сумма суточной инсоляции за теплое полугодие на любой приполярной широте является физически более вероятным двигателем климатических колебаний, чем суточная инсоляция за любой отдельный летний день как таковая. Эта суммарная инсоляция определяется, в первую очередь, наклонением. Также учтено, что имеется взаимно однозначное соответствие между одновременными вариациями инсоляции на любой широте за счет изменений наклонения. Поэтому с равным успехом можно ориентироваться на суммарную инсоляцию на любой широте, в частности, на экваторе. В недавних же работах [3,14,35–38] были приведены разнообразные аргументы в пользу того, что именно процессы вблизи экватора важны для инициации климатической цикличности. В этом контексте сошлемся также на работу авторов [51].

На рис. 3, б начальные фазы инсоляционных циклов указаны тонкими вертикалями, проведенными через минимумы вещественной компоненты комплексной реконструкции этой инсоляции в том же диапазоне веивлетных масштабов от 58 до 29 тыс. лет, который использован для комплексной реконструкции климатических циклов. Видно, что начальные фазы инсоляционных циклов предшествуют по времени начальным фазам 20–15 климатических циклов примерно на четверть – треть периода. Считая отклик климатической системы строго линейным, можно было бы ожидать запаздывания в четверть периода. Полученные запаздывания хорошо этому соответствуют, что подтверждает роль 41-тысячелетнего цикла наклонения как главного двигателя климатических циклов в раннем плейстоцене.

Однако заметим, что Лисецки и Раймо использовали при конструировании ряда LR04 подгонку временных шкал исходных изотопных рядов к вариациям инсоляции 21 июня на 65° с.ш. (исходные инсоляционные данные были взяты ими из [16]), как это всегда делалось после вышеупомянутых пионерских работ западных палеоклиматологов. По этой причине можно усомниться в правомерности построения нашей двухпараметрической диаграммы: ведь зависимость от биения наклонения может быть заложена упомянутой подгонкой изначально. Чтобы исключить основания для подобного сомнения, мы проанализировали совсем недавно опубликован-

ные Хайберсом [11] ряды данных о содержании изотопа $\delta^{18}O$ в донных отложениях останков бентосных и планктонных фораминифер, при конструировании которых никакой подгонки к инсоляционным данным не делалось. Поскольку картина амплитуд ВП и фазовые соотношения колебаний в ряду планктонных фораминифер оказались практически такими же, что у ряда бентосных фораминифер, на рис. 5, *a* показана картина только для первого ряда. Она выглядит вполне аналогично картине, приведенной на рис. 3, *a*. Также аналогичны ее фазовые соотношения с рядом инсоляции, картина амплитуд ВП которого повторена на рис. 5, *б*. Небольшие отличия оказались только в длительностях отдельных климатических циклов. Но эти отличия являются непринципиальными, так как они не повлекли изменений в фазовых портретах циклов 20–15. Эти портреты для обеих фораминифер показаны на рис. 6 и могут быть сравнены с соответствующими портретами, показанными на рис. 4 для ряда LR04. Также не произошло каких-либо качественных изменений в фазовых соотношениях климатических циклов 20–15 с циклами инсоляции: во всех шести случаях инсоляционные циклы были первыми. Поэтому можно заключить, что подгонка временной шкалы ряда LR04 не повлияла на сделанный выше вывод о роли 41-тысячелетнего цикла наклонения как главного движителя климатических циклов в раннем плейстоцене.

Рассматривая увеличенную часть картины амплитуд ВП ряда LR04 (см. рис. 1, *a*), как она представлена на рис. 3, *a*, и рассматривая соответствующую часть картины ВП на рис. 5, *a*, обратим внимание на поведение полосы относительно больших амплитуд вблизи вейвлетного масштаба в 41 тыс. лет после второй неудачной попытки дестабилизации климатического отклика на инсоляционное возбуждение. Видно, что около 1.25 млн. лет до настоящего времени эта полоса начала смещаться в сторону больших масштабов и примерно через 130 тыс. лет достигла вейвлетного масштаба в 82 тыс. лет. Судя по показанным на рис. 3, *a* и рис. 5, *a* горизонтальным полоскам, за это время имели место всего два климатических цикла. Они отмечены на рисунках номерами 14 и 13. Длительность 14 цикла составила 52 тыс. лет, что существенно больше, чем период главного цикла наклонения. Длительность же 13-го цикла составила целых 76 тыс. лет. На рис. 3, *б* можно также видеть, что этим двум климатическим циклам соответствуют три инсоляционных цикла, так что невозможно установить линейную связь этих циклов с инсоляционным воздействием. Хотя фазовые портреты климатических циклов 14–13 на рис. 4 выглядят неотличимыми от портретов 20–15 циклов, то есть представляют собой замкнутые окружности, периоды этих циклов существенно больше, чем предшествующих циклов 20–15. Это свидетельствует о качественном отличии природы циклов 14 и 13 от природы предшествующих циклов. Изменение природы климатических циклов мы истолковываем в терминах математической теории динамических систем как бифуркацию. Бифуркация – это приобретение нового качества в движениях динамической системы при малом изменении ее параметров. Бифуркации в автономных (с неизменными параметрами) и возбуждаемых периодически меняющейся внешней силой нелинейных динамических системах в настоящее время хорошо изучены. Их исчерпывающий обзор содержится, например, в [52]. Однако читателю-климатологу, может быть, будет более понятно вполне строгое, но ориентированное именно на него, описание этих бифуркаций в [53].

В рассматриваемом случае длительности всех климатических циклов, следовавших за 13 циклом, примерно в два (циклы 12–6, 4 и 3) или даже в три (циклы 5, 2 и 1) раза превышали длительности климатических циклов плиоцена и раннего

плейстоцена, а их фазовые портреты претерпели качественное изменение. Как видно на рис. 4 и рис. 6, траектории новых циклов, в двумерном фазовом подпространстве отличны от простой окружности. До своего приближенного замыкания они делали одну петлю, если период цикла был примерно равен 80 тыс. лет (циклы 12, 10, 9, 7, 6, 4 и 3 у ряда LR04 и дополнительно цикл 8 у рядов Хайберса). Траектории делали

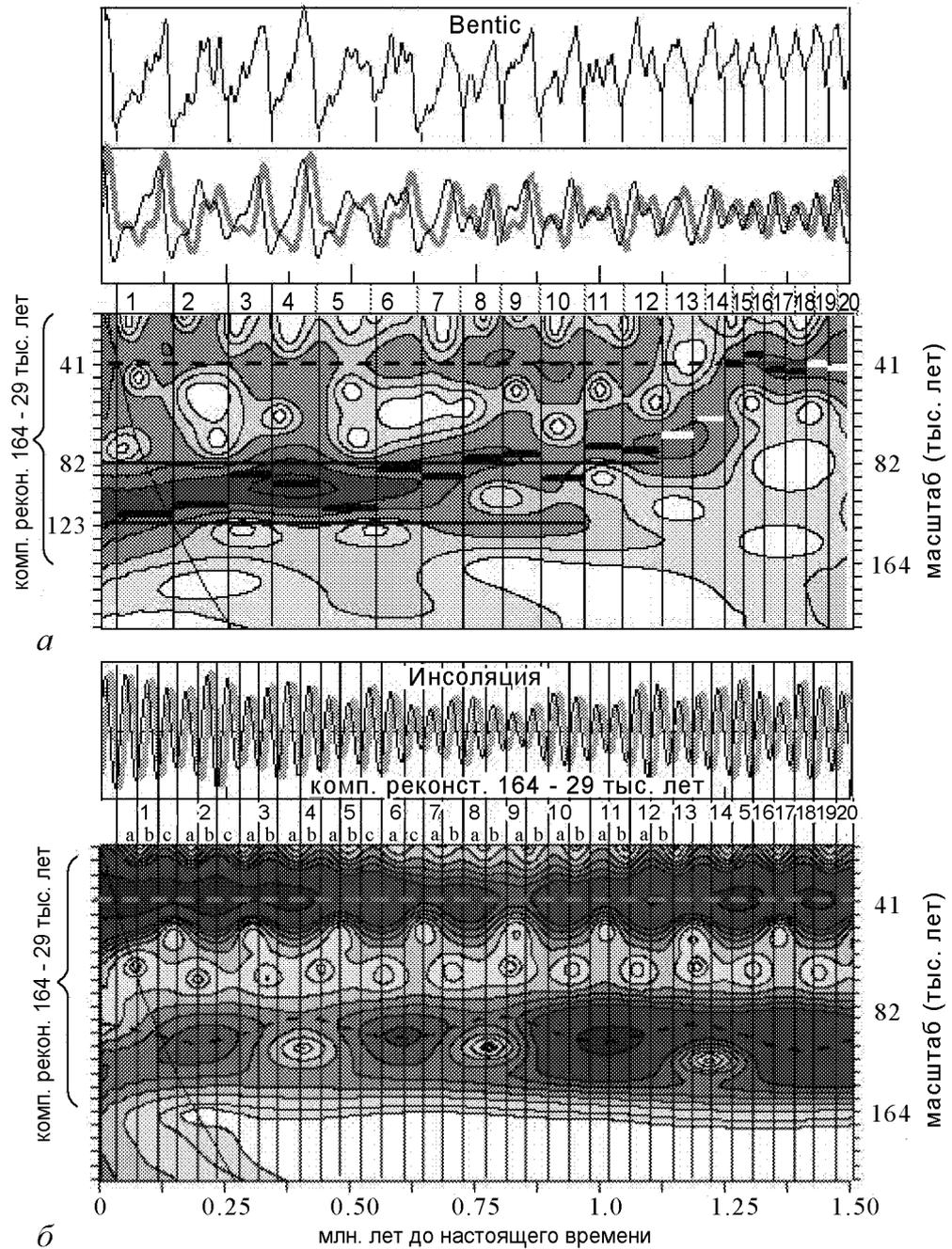


Рис. 5. То же самое, что на рис. 3, но для ряда содержания изотопа кислорода $\delta^{18}O$ в донных отложениях останков бентосных фораминифер *Bentic foraminiferas*, построенного без привязки его временной шкалы к ряду колебаний инсоляции [11]

даже две петли, если период цикла превышал 100 тыс. лет (циклы 5, 2 и 1 у всех рядов). В соответствующем фазовом подпространстве можно было бы увидеть, что траектории этих циклов замыкаются после одного или двух оборотов, причем каждый оборот длится примерно 40 тыс. лет. На основании этого можно заключить, что примерно за 1.250 миллион лет до настоящего времени произошла бифуркация удвоения (в последующем и утроения) периода ранее существовавшего климатического цикла. О механизмах этих бифуркаций будет сказано далее. Заметим, что в двух случаях у ряда LR04 (циклы 11 и 8) и в одном случае у рядов Хайберса (цикл 11) траектории оказались похожи на скручивающиеся спирали, что, возможно, является следствием неточностей в исходных данных. Но может быть, что это отражает реальность, то есть тут происходила более сложная бифуркация.

Математическая конструкция бифуркации удвоения периода состоит в следующем (см. [52] и [53, §3.2.]). Пусть до бифуркации в фазовом пространстве нелинейной динамической системы существует периодически повторяющаяся последовательность состояний, называемая предельным циклом, к которой со временем сходятся все соседние последовательности состояний (траектории рассматриваемой динамической системы), то есть этот цикл – аттрактор динамической системы. Предельный цикл может возникнуть даже в динамической системе, внешнее воздействие на которую постоянно и достаточно велико, чтобы дестабилизировать простейший возможный в таких системах аттрактор – стационарное состояние. Такой предельный цикл был впервые обнаружен горьковским математиком А.А. Андроным и назван им автоколебанием [54]. Но предельный цикл может существовать даже в динамической системе, находящейся под воздействием периодической внешней силы. Тогда он – вынужденный (с тем же периодом и некоторым запаздыванием по фазе) отклик на изменение этой силы. Это, по-видимому, тот случай динамики климата, который

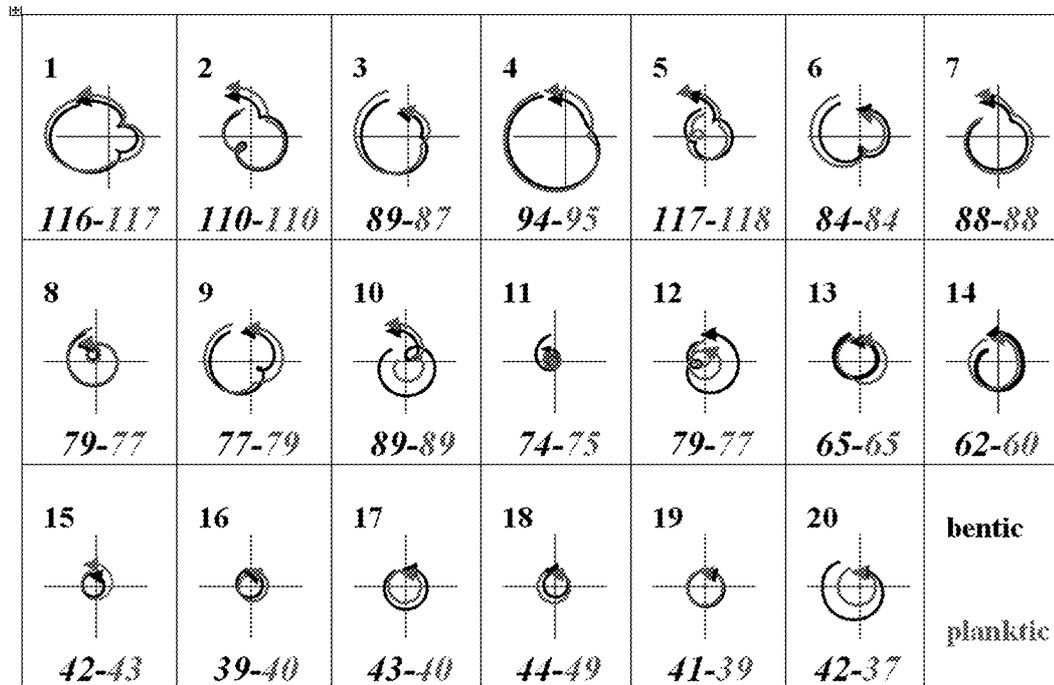


Рис. 6. То же самое, что на рис. 4, но по данным комплексных реконструкций рядов содержания изотопа кислорода $\delta^{18}O$ в донных отложениях останков бентосных и планктонных фораминифер, построенных без привязки их временных шкал к ряду колебаний инсоляции [11]

реализовался в плиоцене и раннем плейстоцене как примерно 40-тысячелетняя цикличность смен относительно теплого и относительно холодного климата.

Мультипликаторы (собственные числа) линеаризации динамической системы в малой окрестности предельного цикла меньше 1 по модулю, что и обеспечивает устойчивость этого аттрактора. Но они меняются при изменении воздействующей на систему силы. Бифуркации (качественные изменения этого аттрактора) происходят, когда один из вещественных мультипликаторов становится равен ± 1 или модуль пары комплексно сопряженных мультипликаторов оказывается равен 1. Если один вещественный мультипликатор становится равным $+1$, предельный цикл исчезает. Однако в двух других случаях он продолжает существовать, но теряет свою устойчивость, а потому становится ненаблюдаемым, ибо всякая реально осуществившаяся последовательность состояний динамической системы уходит от него в фазовом пространстве, даже если она начиналась в его близкой окрестности. Взамен будет наблюдаться новый аттрактор. Им будет квазипериодическая последовательность состояний (двухчастотное биение), если бифуркация происходила по достижении модулем комплексно сопряженной пары мультипликаторов единичного значения. Возможно, что спиральная форма траектории цикла 11 (и цикла 8 в ряду LR04) отражает эту бифуркацию. Если же один вещественный мультипликатор оказался равен -1 , то будет наблюдаться чисто периодическая последовательность, которая вначале (при очень малом отклонении воздействующей силы от критического значения) копирует старый цикл, но замыкается только после двух оборотов, то есть период нового аттрактора – предельного цикла будет удвоенным по сравнению с периодом старого аттрактора. Это, по-видимому, именно та бифуркация, которая реализовалась примерно 1.250 тыс. лет назад.

Что касается утроения периода, присущего 5, 2 и 1 климатическим циклам, то математическая конструкция подобной бифуркации описана в работе В.С. Афраймовича и Л.П. Шильникова [55]. Она предполагает существование в фазовом пространстве системы аттрактора – инвариантного двумерного тора. В рассматриваемом нами случае такой тор мог возникать из-за квазипериодичности (не только цикл наклонения, но также циклы эксцентриситета и прецессии) инсоляционного внешнего воздействия на климатическую систему. На этом торе при каких-то значениях параметров могла возникать резонансная обмотка, то есть тот же предельный цикл. Во время бифуркации разрушения инвариантного тора период этого цикла мог, согласно [55], не только удваиваться, но утраиваться и даже учетверяться.

Довольно долго после бифуркации петли нового (с удвоенным или утроенным периодом) предельного цикла располагаются в фазовом пространстве достаточно близко к старому потерявшему устойчивость, но все же продолжающему существовать предельному циклу. Поэтому в энергетических спектрах установившихся после бифуркации колебаний (на рисунках не показаны) видны пики не только на удвоенном (утроенном) периоде, но и на периоде цикла, бывшего устойчивым до бифуркации. Это объясняет, почему в картинах амплитуд ВП на рис. 1, рис. 3, *a* и рис. 5, *a* полоса относительно больших амплитуд ВП сохраняется вблизи масштаба главного цикла наклонения в 41 тыс. лет в среднем и позднем плейстоцене, несмотря на то, что главный максимум амплитуды ВП смещается после бифуркации в диапазон удвоенного и утроенного масштабов. Заметим, что математически всякая бифуркация происходит мгновенно при монотонном изменении внешней силы. В реальной же климатической системе переход от 40-тысячелетних к 80-тысячелетним колебаниям занял примерно 130 тыс. лет (циклы 14 и 13).

2.3. Вторичные бифуркации климатических циклов в среднем и позднем плейстоцене. Как уже было упомянуто в предыдущем подразделе, длительности и фазовые портреты плейстоценовых климатических циклов сильно отличались друг от друга. Сразу после основной бифуркации и до примерно 600 тыс. лет до нашего времени, то есть для циклов 12–6 периоды были примерно удвоенными по сравнению с главным циклом инсоляции, возникающим за счет изменений наклона оси вращения Земли к плоскости эклиптики. В пределах точности рассматриваемых палеоклиматических рядов, период каждого из этих циклов совпадал с периодом одной из комбинационных гармоник эксцентриситета, указанных во Введении. Поэтому можно предположить, что после основной бифуркации динамика климата оказалась очень чувствительна к тем небольшим вариациям суммарной инсоляции Земли в целом, которые были обусловлены циклическими эксцентриситетами земной орбиты.

Чтобы более тщательно рассмотреть эту возможность, на рис. 7 представлены вещественные реконструкции рядов Хайберса для бентосных и планктонных фораминифер в диапазоне веивлетных масштабов от 29 до 164 тыс. лет. В параллель показаны вещественные части реконструкций годичной инсоляции на экваторе в диапазонах масштабов от 29 до 58 тыс. лет (диапазон колебаний за счет наклона) и от 58 до 164 тыс. лет (диапазон колебаний за счет эксцентриситета). Фазовые запаздывания климатических циклов по сравнению с инсоляционными циклами наклона показаны положительными (если климатический цикл запаздывал) или отрицательными (в противном случае запаздывания инсоляционного цикла) числами. Видно, что главные минимумы климатических циклов всегда следовали за минимумами инсоляционных циклов, обусловленных вариациями наклона.

К вышеизложенному добавим следующее. Запаздывание климатического цикла 1 оказалось равно 11 тыс. лет, а запаздывание перехода к голоцену было равно

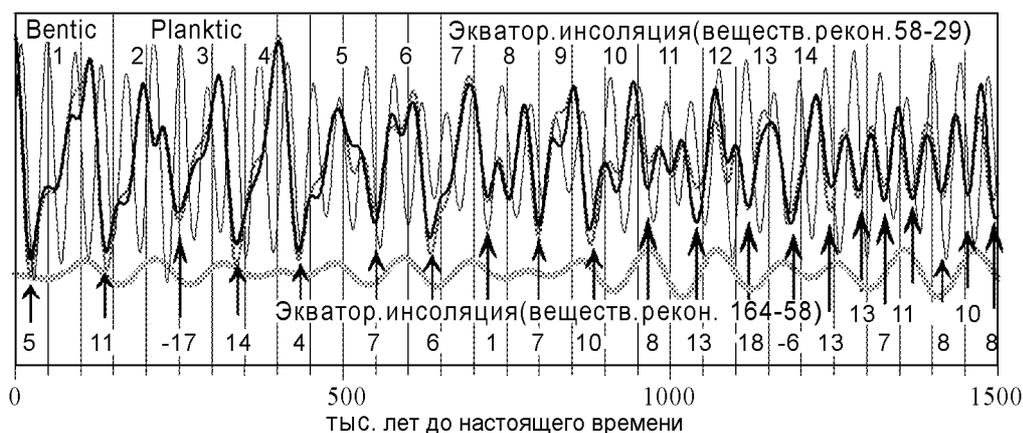


Рис. 7. Вещественные части реконструкций рядов содержания изотопа кислорода $\delta^{18}O$ в донных отложениях останков бентосных и планктонных фораминифер, построенных [11] без привязки их временных шкал к ряду колебаний инсоляции в диапазоне веивлетных масштабов от 164 до 29 тыс. лет (толстые черная и серая линии). Вещественные части реконструкций ряда годичной инсоляции на экваторе в диапазоне веивлетных масштабов от 58 до 29 тыс. лет (тонкая серая линия) и в диапазоне веивлетных масштабов от 164 до 58 тыс. лет (толстая серая линия, смещенная вниз для лучшей читаемости рисунка). Положительные (отрицательные) числа внизу рисунка указывают опережение (запаздывание) инсоляционного цикла по сравнению с соответствующим климатическим циклом (номера климатических циклов указаны сверху рисунка)

5 тыс. лет в хорошем соответствии с недавними, тщательными оценками этих запаздываний в работе [5]. Климатическому циклу 2 оказалось свойственно отрицательное запаздывание в 17 тыс. лет, то есть в почти половину периода наклонения. Зато начальный минимум этого цикла хорошо следовал инсоляционному минимуму, обусловленному вариациями эксцентриситета. Более того, у всех четырех последних климатических циклов, а также более ранних циклов 12–6 начальные минимумы хорошо последовали инсоляционным минимумам за счет эксцентриситета. Более того, сами длительности этих климатических и инсоляционных циклов хорошо совпадали друг с другом.

Это делает весьма правдоподобным предположение, что каждый из этих климатических циклов захватывался в фазу текущей комбинационной гармонике колебаний инсоляции за счет эксцентриситета. Зададимся вопросом: были ли увеличены амплитуды колебаний плейстоценовых климатических циклов за счет резонансов с рассматриваемыми инсоляционными гармониками эксцентриситета, коль скоро захват фазы имел место для каждого климатического цикла и, следовательно, длительности климатических циклов совпадали с периодами соответствующих гармоник эксцентриситета? Из рис. 6 не следует ясного ответа на этот вопрос. Так самые мощные и длительные климатические циклы 2 и 1 последовали мощным и длительным инсоляционным гармоникам, но не менее мощный (в нашей реконструкции) климатический цикл 4 последовал весьма маломощной гармонике.

Заключение

За последнее десятилетие достигнут консенсус по причинам изменения климата в плиоцене, а именно: вариации инсоляции, вызванные 41-тысячелетним циклом наклонения оси вращения Земли к плоскости эклиптики, были главным движителем изменений климата в плиоцене и даже плейстоцене. В данном исследовании показано, что вторым важным фактором изменений климата был общий тренд похолодания. Для доказательства:

- впервые сформулирована проблема динамики климатических колебаний в плиоцене и плейстоцене как проблема качественного изменения свойств текущего климатического состояния (аттрактора);
- использованы идеи современной математической теории нелинейных динамических систем для определения моментов возникновения этих изменений;
- разработана специальная, основанная на вейвлетах, методика анализа палеоклиматических временных рядов.

Основными предпосылками исследования является следующее.

- В пионерских работах последователей М. Миланковича в конце XX века установлено, что собственные частоты колебаний, возможно присущие очень теплomu климату плиоцена, существенно превышали частоту главного широтного перераспределения инсоляции, обязанного, в свою очередь, 41-тысячелетнему циклу наклонения. Климатический отклик на это инсоляционное воздействие должен был быть почти линейным. Этот отклик происходил на частоте самого воздействия и с запаздыванием по фазе примерно в четверть периода. Грубо говоря, существенно осредненное по времени (в масштабе десятка тыс. лет) состояние климатической системы менялось в плиоцене периодически, подобно

аттрактору – устойчивому предельному циклу в фазовом пространстве какой-либо периодически форсированной нелинейной динамической системы.

- Из-за тренда общего похолодания климата, чьи конкретные физические причины и механизмы еще предстоит выяснить, с середины плиоцена стали разрастаться, сокращаться и снова разрастаться покровные оледенения в дополнение к уже давно существовавшему оледенению Антарктики. Это должно было активизировать обратные связи в климатической системе за счет изменений альбедо. Возникшие обратные связи расширили спектр возможных собственных колебаний климатической системы, в итоге способствовав дестабилизации 40-тысячелетнего предельного цикла, бывшего климатическим аттрактором в плиоцене.

Конкретные результаты данной работы состоят в следующем.

- Анализ палеоклиматических временных рядов с помощью специально разработанной в данной статье методики показал, что дестабилизация аттрактора плиоцена (его бифуркация) произошла, когда размах долгопериодного (порядка одного млн. лет) биения инсоляционного воздействия на климат Земли превысил некоторый порог, а тренд похолодания стал существенным. В результате этой бифуркации климатический примерно 40-тысячелетний предельный цикл не исчез, но стал ненаблюдаемым. Вместо него в плейстоцене возникли и стали наблюдаться совсем новые, грубо говоря, 100-тысячелетние, климатические колебания. Установлено точное время этой бифуркации – примерно за 1.250 млн. лет до настоящего времени. За время перехода от старых к новым климатическим колебаниям имели место два климатических цикла, свойства которых качественно отличались от свойств как предыдущих, так и последующих циклов. По форме это были еще гармонические колебания, как и им предшествовавшие в плиоцене, а по длительности эти циклы уже приближались к длительностям более поздних циклов плейстоцена.
- Реконструкция фазовых портретов осредненных по времени климатических колебаний, наблюдаемых после завершения бифуркации, показала, что их математическим образом можно считать предельный цикл, период которого был вдвое больше, чем период потерявшего устойчивость предельного цикла – аттрактора климата в плиоцене. Переход к этому новому аттрактору можно понимать как бифуркацию удвоения периода, хорошо известную в математической теории нелинейных динамических систем.
- В течение плейстоцена климатический аттрактор непрерывно эволюционировал. Сопоставление изменения этого аттрактора с одновременными изменениями инсоляции, показало, что, по крайней мере, одной из причин эволюции климатического аттрактора в плейстоцене были многомасштабные колебания инсоляции, получаемой Землей в целом за счет вариаций эксцентриситета земной орбиты. Они приводили к захвату фазы каждого текущего климатического цикла с той из комбинационных гармоник эксцентриситета, которая в это время доминировала. Поскольку периоды доминировавших гармоник эксцентриситета были близки или к удвоенному (примерно 70...90 тыс. лет) или к утроенному (примерно 110...130 тыс. лет) периоду главного цикла наклонения, то в результате климатический цикл поочередно удваивал, утраивал и снова удваивал свой период. Энергетически вариации инсоляции за счет эксцентри-

ситета, как хорошо известно, были очень невелики. Вероятно, по этой причине, несмотря на захват фазы, заметного резонансного усиления размаха плейстоценовых климатических циклов не происходило.

Работа выполнена при финансовой поддержке по грантам РФФИ 09-05-00155, 12-05-00136 и по Программе Президиума РАН «Фундаментальные исследования в области океанологии».

Библиографический список

1. *Hays J.D., Imbrie J., Shackelton N.J.* Variations in the Earth's orbit: Pacemaker of the Ice Ages? *Science*. 1976. Vol. 194. P. 1121.
2. *Ashkenazy Y.* The role of phase locking in a simple model for glacial dynamics // *Climate Dynamics*. 2006. Vol. 27. doi:10.1007/s00382-006-0145-5.
3. *Ashkenazy Y., Tziperman E.* Are the 41 kyr glacial oscillations a linear response to Milankovitch forcing? *Quat. Sci. Rev.* 2004. Vol. 23. doi:10.1016/j.quascirev.2004.04.008.
4. *Crowley T.J., Hyde W.T.* Transient nature of late Pleistocene climate variability // *Nature*. 2009. Vol. 456. P. 226.
5. *Drysdale R.N., Hellstrom J.C., Zanchetta G. et al.* Evidence for obliquity forcing of glacial termination II // *Science*. 2009. Vol. 325. P. 1527.
6. *Huybers P., Wunsch C.* Obliquity pacing of the late Pleistocene glacial terminations // *Nature*. 2005. Vol. 434. P. 491.
7. *Raymo M.E., Huybers P.* Unlocking the mysteries of the ice ages // *Nature*. 2008. Vol. 451. P. 284.
8. *Raymo M.E., Nisancioglu K.* The 41 kyr world: Milankovitch's other unsolved mystery // *Paleoceanology*. 2003. Vol. 18. doi: 10.1029/2002PA000791.
9. *Tziperman E., Raymo M.E., Huybers P. et al.* Consequences of pacing the Pleistocene 100 kyr ice ages by nonlinear phase locking to Milankovitch forcing // *Paleoceanology*. 2006. Vol. 21. P. PA4206. doi:10.1029/2005PA001241.
10. *Huybers P.* Antartics's orbital beat // *Science*. 2009. Vol. 325. P. 1085.
11. *Huybers P.* Early Pleistocene glacial cycles and the integrated summer insolation forcing. *Science*. 2006. Vol. 313. P. 508.
12. *Berger A.* Long-term variations of daily insolation and Quaternary climatic changes // *J. Atmos. Sci.* 1978. Vol. 35. P. 2362.
13. *Berger A., Loutre M.F.* Insolation values for the climate of the last 10 million years // *Quat. Sci. Rev.* 1991. Vol. 10. № 4. P. 297.
14. *Berger A., Melice J.L., Loutre M.F.* On the origin of the 100-kyr cycles in the astronomical forcing // *Paleoceanology*. 2005. Vol. 20. PA4019. doi:10.1029/2005PA001173.
15. *Laskar J., Joutel F., Boudin F.* Orbital, precessional, and insolation quantities for the earth from -20 myr to +10 myr // *Astronomy and Astrophysics*. 1993. Vol. 270. P. 522.
16. *Laskar J., Robutel P., Joutel F. et al.* A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth // *Astronomy and Astrophysics*. 2004. Vol. 428. P. 261.

17. *Vernekar A.D.* Long-term global variations of incoming solar radiation // *Meteorol. Monogr.* 1972. Vol. 34. 21 p.
18. *Монин А.С.* Вращение Земли и климат. Л.: Гидрометеиздат, 1972.
19. *Монин А.С., Сонечкин Д.М.* Колебания климата по данным наблюдений. Тройной солнечный и другие циклы. М.: Наука, 2005.
20. *Ghil M.* Theoretical climate dynamics: an introduction. In: *Turbulence and Predictability in Geophysical Fluid Dynamics and Climate Dynamics*. M. Ghil, R. Benzi and G. Parisi (eds.). New York, North Holland, 1985, 347.
21. *Wunsch C.* The spectral description of climate change including the 100 ky energy // *Climate Dynamics*. 2003. Vol. 20. P. 353.
22. *Le Treut H., Ghil M.* Orbital forcing, climatic interactions, and glacial cycles // *J. Geophys. Res.* 1983. Vol. 88 (C9). 5167.
23. *Imbrie J., Boyle E.A., Clemens S.C. et al.* On the structure and origin of major glacial cycles. 1. linear responses to Milankovitch forcing // *Paleoceanography*. 1992. Vol. 7. P. 701.
24. *Imbrie J., Berger A., Boyle E.A. et al.* On the structure and origin of major glacial cycles. 2. The 100 000-year cycle // *Paleoceanography*. 1993. Vol. 8. P. 699.
25. *Yiou P., Genthon C., Ghil M. et al.* High-frequency paleovariability in climate and CO₂ levels from Vostok ice core records // *J. Geophys. Res.* 1991. Vol. B12996. P. 20365.
25. *Ghil M.* Cryothermodynamics: the chaotic dynamics of paleoclimate // *Physica D*. 1994. Vol. 77. P. 130.
26. *Rial J.A.* Pacemaking the Ice ages by frequency modulation of Earth's orbital eccentricity // *Science*. 1999. Vol. 285. P. 564.
27. *Rial J.A., Anaclerio C.A.* Understanding nonlinear responses of the climate system to orbital forcing // *Quaternary Science reviews*. 2000. Vol. 19. P. 1709.
28. *Winograd I.J., Copley C., Landwehr J.M. et al.* Continuous 500000-year climate record from vein calcite in Devils Hole, Nevada // *Science*. 1992. Vol. 258. P. 255.
29. *Raymo M.E.* The timing of major climate terminations // *Paleoceanography*. 1997. Vol. 1294. P. 577.
30. *Petit J.R., Jouzel J. Raynaud D. et al.* Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica // *Nature*. 1999. Vol. 399. P. 429.
31. *Котляков В.М.* Гляциология Антарктиды. М.: Наука, 2000.
32. *Zachos J., Pagani M., Sloan L., Thomas E., Billups K.* Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 ma to present // *Science*. 2001. Vol. 292. P. 686.
33. *Lowenstein T.K., Demicco R.V.* Elevated Eocene atmospheric CO₂ and its subsequent decline // *Science*. 2006. Vol. 313. P. 1928.
34. *Filander S.G., Fedorov A.V.* Role of tropics in changing the response to Milankovitch forcing some three million years ago // *Paleoceanology*. 2003. Vol. 18. doi:10.1029/2002PA000837.
35. *Lawrence K.T., Zhonghui Liu, Herbert T.D.* Evolution of the Eastern Tropical Pacific through Plio-Pleistocene glaciation // *Science*. 2006. Vol. 312. P. 79.
36. *Lunt D.J., Valdes P.J., Haywood A., Rutt I.C.* Closure of the Panama seaway during

- the Pliocene: implications for climate and Northern Hemisphere glaciation // *Climate Dynamics*. 2007. Vol. 30. doi:10.1007/s00382-007-0265-6.
37. *Ravelo A.C., Andreasen D.H., Lyle M., Lyle A.O., Wara M.W.* Regional climate shifts caused by gradual global cooling in the Pliocene epoch // *Nature*. 2004. Vol. 429. P. 263.
 38. *Sosdian S., Rosenthal Y.* Deep-sea temperature and ice volume changes across the Pliocene-Pleistocene climate transitions. *Science*. 2009. Vol. 325. P. 306.
 39. *Вакуленко Н.В., Котляков В.М., Сонечкин Д.М.* Свидетельство упрещающей роли океана в цикличности ледниковых эпох позднего плейстоцена // *Доклады АН*. 2008. Т. 421, № 3. С. 402.
 40. *Вакуленко Н.В., Котляков В.М., Ламберт Ф., Сонечкин Д.М.* О роли океана в изменениях климата плейстоцена // *Доклады АН*. 2010. Т. 432, № 2. С. 260.
 41. *Bolton E.W., Maasch K.A., Lilly J.M.* A wavelet analysis of Plio-Pleistocene climate indicators: A new view of periodicity evolution // *Geoph. Res. Lett.* 1995. Vol. 22: 20. P. 2753.
 42. *Han-Shou Liu, Chao B.F.* Wavelet spectral analysis of the Earth's orbital variations and paleoclimatic cycles // *J. Atmos. Sci.* 1998. Vol. 55 P. 227.
 43. *Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T. et al.* Numerical Recipes in FORTRAN, 2nded. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
 44. *Schulz M., Stattegger K.* Spectrum: Spectral analysis of unevenly spaced paleoclimatic time series *Computers & Geosciences*. 1997. Vol. 23. P. 929.
 45. *Сонечкин Д.М.* Обоснование четырехмерного (непрерывного) усвоения данных метеорологических наблюдений на основе динамико-стохастического подхода // *Метеорология и Гидрология*. 1973. № 4. С. 13.
 46. *Вакуленко Н.В., Иващенко Н.Н., Котляков В.М., Сонечкин Д.М.* О бифуркации умножения периода ледниковых циклов в начале плейстоцена // *Доклады АН*. 2011. Т.436. № 4. С. 541.
 47. *Shackleton N.J., Hall M.A., Pate D.* Pliocene stable isotope stratigraphy of ODP site 846 // *Proc. Ocean Drill. Program Sci. Results*. 1995. Vol. 138. P. 337.
 48. *Shackleton N.J., Crowhurst S., Hagelberg T., Pisias N.G., Schneider D.A.* A new late Neogene time scale: Application to Leg 138 sites // *Proc. Ocean Drill. Program Sci. Results*. 1995. Vol. 138. P. 73.
 49. *Lisiecki L.E., Raymo M.E.* A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}O$ records // *Paleoceanology*. 2005. Vol. 20. PA1003: doi:10.1029/2004PA001071.
 50. *Вакуленко Н.В., Котляков В.М., Монин А.С., Сонечкин Д.М.* Особенности календаря ледниковых циклов позднего плейстоцена // *Известия АН, физика атмосферы и океана*. 2007. Т. 43, № 6. С. 713.
 51. *Арнольд В.И., Афраймович В.С., Ильяшенко Ю.С., Шильников Л.П.* Теория бифуркаций. Динамические системы. 5. Итоги науки и техники. Современные проблемы математики. Фундаментальные направления. М.: ВИНТИ, 1986.
 52. *Сонечкин Д.М.* Стохастичность в моделях общей циркуляции атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1984.
 53. *Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э.* Теория колебаний. М.: Физматгиз, 1959.

54. *Афраймович В.С., Шильников Л.П.* Инвариантные двумерные торы, их разрушение и стохастичность. Сб.: Методы качественной теории дифференциальных уравнений. Горький: Изд. ГГУ, 1983. С. 3.

*Институт океанологии РАН
Гидрометцентр России
Институт географии РАН*

Поступила в редакцию 23.11.2012

ON THE PERIOD-MULTIPLYING BIFURCATION OF GLACIAL CYCLES IN THE PLIOCENE – PLEISTOCENE

N. V. Vakulenko, N. N. Ivashchenko, V. M. Kotlyakov, D. M. Sonechkin

In the Pliocene (about five – two million years before present) global climate fluctuated with a period corresponding well 41-thousand-year cycle of changes in the Earth's axis inclination to the ecliptic plane. Then, this period has disappeared, despite the fact that the 41-thousand-year cycle even slightly increased its scope and, therefore, the response to it would have only strengthened. By analyzing paleoclimatic series covering the Pliocene and subsequent Pleistocene, we show that the response of the climate system simply became unstable and therefore unobservable. At the same time, through period-doubling bifurcation, a well-known in the theory of nonlinear dynamical systems, new stable and observable climatic oscillations have been excited. Further, they experienced several secondary bifurcations, at which their periods alternately tripled and doubled again.

Keywords: Paleoclimatology, Pliocene – Pleistocene glacial cycles, wavelet analysis, period-multiplying bifurcations.



Вакуленко Надежда Викторовна – родилась в Москве (1955), окончила МВТУ им. Баумана (1978), после чего работала программистом в нескольких вычислительных центрах. С 1993 года работает в институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН старшим научным сотрудником. Защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (2004). Научные интересы: исследование динамики климата, палеоклиматология. Имеет более 20 научных публикаций.

117997 Москва, Нахимовский проспект, 36
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
E-mail: vanava139@rambler.ru



Иващенко Надежда Назаровна – родилась в Москве (1938), окончила Московский институт электронного машиностроения, после чего занималась экспериментальной работой по полупроводниковой электронике, а с 1980-х годов – вопросами автоматизации проектирования химических производств. С 1991 года работает как научный сотрудник в лаборатории динамико-стохастических методов долгосрочных прогнозов погоды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра России. Научные интересы: разработка программ для многомасштабного анализа нестационарных хаотических процессов и временных рядов с приложениями к динамике погоды и климата. Имеет около 30 научных публикаций.

123242 Москва, Большой Предтеченский пер., 11-13
Гидрометеорологический научно-исследовательский центр России
E-mail: nnivach@mecom.ru

Котляков Владимир Михайлович – родился в 1931 году в подмосковном посёлке Красная Поляна (ныне город Лобня). Окончил географический факультет МГУ по специальности «физическая география» (1954), после чего поступил на работу в Институт географии АН СССР, где прошел путь от должности младшего научного сотрудника до директора института в настоящее время. Участник и руководитель экспедиций в Антарктиде, на Новой Земле, Эльбрусе, Заилийском Алатау и Памире. Исследовал современный режим и динамику полярных и горных оледенений, дал интерпретацию материалов глубокого бурения антарктических льдов, высказал и реализовал идею бурения и изучения ледяного ядра Антарктического ледникового щита. Доктор географических наук (1967), академик РАН (1991), член и почетный член многих зарубежных академий и научных обществ. Почетный президент Русского географического общества. Председатель Российских национальных комитетов по Международной геосферно-биосферной программе и по исследованиям Антарктиды. Главный редактор журнала «Известия РАН, серия географическая», академического периодического издания «Материалы гляциологических исследований». Член редколлегии журналов «Доклады Академии наук», «Наука в России», «Земля и Вселенная», «Известия Русского географического общества», «Криосфера Земли» «Environment», «Geo Journal», «Ocean and Coastal Management». Опубликовал 25 книг и около тысячи статей. Основные сочинения: «Снежный покров Антарктиды и его роль в современном оледенении материка» (1961), «Мы живем в ледниковый период?» (1966), «Снежный покров Земли и ледники» (1968), «Горы, льды и гипотезы» (1977), «Изотопная и геохимическая гляциология» (с соавтором, 1982), «Гляциологический словарь» (1984), «Проблемы экологии России» (с соавторами, 1993), «Мир снега и льда» (1994), «Экологические проблемы: что происходит, кто виноват и что делать?» (с соавторами, 1997), «Наука, общество, окружающая среда» (1997), «Основы изотопной геохронологии и гляциологии» (с соавтором, 2000), Избранные сочинения в 6 книгах (2000–2004), «География: Понятия и термины. Пятиязычный академический словарь» (с соавтором, 2007).



119017 Москва, Старомонетный пер., 29
Институт географии РАН
E-mail: direct@igras.ru

Сонечкин Дмитрий Михайлович – родился в Москве (1937), окончил географический факультет МГУ по кафедре метеорологии и климатологии, после чего работал как синоптик-прогнозист в Центральном институте прогнозов Гидрометеорологической службы СССР, а с начала 1960-х годов участвовал в работах по созданию метеорологической космической системы «Метеор». В 1970-х годах организовал в Гидрометеорологическом научно-исследовательском центре СССР лабораторию динамико-стохастических методов для применения идей и методов современной теории нелинейных динамических систем к задачам численного долгосрочного прогноза погоды и динамики климата. В начале 2000-х годов перешел на работу в Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, продолжая участвовать в работах лаборатории динамико-стохастических методов в Гидрометцентре России. В настоящее время является также приглашенным профессором в Институте исследований окружающей среды холодных и засушливых регионов Китайской академии наук. Доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН. Научные интересы: теоретические проблемы долгопериодных колебаний в климатической системе; численный долгосрочный прогноз погоды; современное изменение климата; реконструкции и исследования динамики климатов прошлого. Автор монографий: Метеорологическое дешифрирование космических снимков Земли (количественные методы). Л.: Гидрометеоиздат, 1979; Стохастичность в моделях общей циркуляции атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1984; Колебания климата по данным наблюдений. Тройной солнечный и другие циклы. М.: Наука, 2005 (в соавторстве с А.С. Мониным); Хаос и порядок в динамике погоды и климата. Водный и тепловой балансы тропосферы. С.-Пб.: Гидрометеоиздат, 2005 (в соавторстве с Р.Ф. Бурлуцким). Общее количество публикаций – более 200.



117997 Москва, Нахимовский проспект, 36
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
123242 Москва, Большой Предтеченский пер., 11-13
Гидрометеорологический научно-исследовательский центр России
E-mail: dsonech@ocean.ru