

УДК 551.46, 551.5

100 000-ЛЕТНЯЯ РИТМИЧНОСТЬ В ЛЕДНИКОВЫХ ЦИКЛАХ И КОЛЕБАНИЯХ УРОВНЯ МИРОВОГО ОКЕАНА

© 2019 г. В. А. Безверхний

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, Москва, Ж-17, Пыжевский пер., 3
E-mail: vabezv@mail.ru

Поступила в редакцию 03.10.2018 г.
Принята к печати 03.04.2019 г.

100-тысячелетняя ритмичность в изменениях климата в позднем плейстоцене (в последние 800 тыс. лет) может быть связана с соответствующими колебаниями не только в инсоляции, но и в подводной вулканической активности под воздействием сил гравитации в солнечной системе. Это заключение основано на вейвлетном анализе долговременных данных о колебаниях эксцентриситета орбиты Земли, вариациях различных палеоклиматических характеристик, их известных спектральных оценках и данных о подводной вулканической активности.

Ключевые слова: плейстоцен, климат, эксцентриситет орбиты, наклон земной оси, вулканическая активность, бентос, спектральная плотность, вейвлетный анализ.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-351555437-44>

ВВЕДЕНИЕ

Феномен появления мощной квази-100-т.л. (т. л. — тысяч лет) ритмичности в климатических колебаниях примерно 800 т.л.н. (тысяч лет назад) и так называемый «среднеплейстоценовый переход» — МРТ (Mid-Pleistocene Transition, иногда называемый Mid-Pleistocene Revolution) [1] или «проблема 100 000 лет» является предметом дискуссий в течение более 40 лет [1, 2]. Воздействия регулярных вариаций инсоляции, связанных с 100-т.л. колебаниями эксцентриситета e явно недостаточно для объяснения наблюдаемых климатических эффектов [1–4]. Инсоляционная кривая, рассчитанная по методу М. Миланковича [5] по регулярным изменениям орбитальных параметров — эксцентриситета (e) орбиты Земли, наклона ее оси вращения (ϵ) и прецессии (ϕ), лишь фрагментарно согласуется с известными индикаторами изменений климата, как отмечено в упомянутых обзорах [1, 2]. Главное отличие спектрального состава инсоляционной кривой Миланковича от палеоклиматических данных за последние 800 т.л. состоит в наличии в спектрах последних мощного пика на частоте $1/100$ (т.л.)⁻¹ и практически отсутствии такого пика на спектре инсоляции (см. Figure 1 [1]). Поэтому возникла необходимость учета дополнительных процессов и механизмов, не рассмотренных в теории Миланковича.

Есть точка зрения, что 100-т.л. ритмичность в ледниковых циклах связана вообще не с колебаниями e , а с внутренними обратными связями (альbedo и CO_2) и воздействием на частотах наклона ϵ и прецессии ϕ (“*The dominant 100,000-year response of ice sheets is not externally forced (by e)...* The origin of this signal lies mainly in internal feedbacks (CO_2 and ice albedo) that drive the gradual build-up of large ice sheets and then their rapid destruction”) [6]. Но это представление не исключает возможной связи этой ритмичности с колебаниями эксцентриситета с учетом внутренних отмеченных обратных связей в климатической системе.

Другие исследователи исходят из представления о климате как о нелинейной динамической системе, на которую воздействуют орбитальные факторы e , ϵ , ϕ и разрабатывают различные численные модели для объяснения изменений климата в плейстоцене. Их обзор представлен в [2]. Можно выделить представления, в которых квази-100-т.л. колебания климата прямо связаны со 100-т.л. модой эксцентриситета e [7–9] и такие, в которых действуют другие орбитальные факторы, влияющие на возникновение устойчивых квази-100-т.л. циклов [2, 10–12].

Моделирование отклика климатической системы на астрономическое воздействие [9] по-

казало, что при учете только орбитального воздействия на частоте $1/100$ (т.л.)⁻¹ цикличность ледниковых циклов в модельных расчетах проявляется значительно слабее, чем в реальных палеоклиматических данных и сопровождается дополнительным, ~400-т.л. периодом (колебаний e), отсутствующим в этих данных (“*Modeling the climate response to the astronomical forcing generates, on the contrary, a 400-kyr period as well as a 100-kyr one*” [9]). В [10] приводятся основания, позволяющие рассматривать климатическую систему как модулируемую орбитальным воздействием стохастическую систему, в которой (в согласии с предположением [6]) выделяется роль атмосферного CO₂ в ~100-т.л. ледниковой цикличности.

В других исследованиях рассматривают палеоклимат как динамическую систему, подверженную внешнему воздействию с другими орбитальными частотами и обладающую нелинейным механизмом перехода к режиму колебаний с частотой, «близкой» к $1/100$ (т.л.)⁻¹. В качестве внешней возбуждающей силы рассматриваются соответственно колебания с орбитальными частотами наклона ϵ или прецессии ϕ [2, 11, 12]. Так, авторы [12] полагают, что ~100-т.л. составляющая температуры глубинных вод (T_{dw}) Тихого океана представляет собой скорее длительность кратного числа циклов наклона ϵ , чем проявление непосредственно 100-т.л. сигнала e (“*.. this variability (~100 kyr variability in temperature) is likely the product of multiple obliquity cycles rather than a simple 100-kyr signal*”). Вместе с тем в [10], как и в [6], отмечается, что внутренние обратные связи в климатической системе усиливают амплитуду ледниковых циклов.

Можно отметить и попытку обоснования 100-т.л. цикличности палеоклимата влиянием ~400-т.л. компоненты колебаний эксцентриситета e [13].

Целью работы является получение свидетельства усиления влияния 100-т.л. моды эксцентриситета на палеоклимат позднего плейстоцена, точнее, в последние 750–800 т.л. Основная задача — получение корреляционных оценок связи между колебаниями эксцентриситета e , температуры глубинных вод Мирового океана T_{dw} , его уровня (h_{sl}) и площади ледяного покрова (S_{ice}) Антарктики на частоте колебаний эксцентриситета $1/100$ (т.л.)⁻¹ при помощи вейвлетного анализа.

ДАННЫЕ И МЕТОД АНАЛИЗА

Достижения в реконструкции характеристик палеоклимата и изучение слоев океанских органических отложений позволили значительно продвинуться в понимании природы крупномасштабных изменений климата в далеком прошлом. Изменения температуры глубинных вод Мирового океана T_{dw} записаны в известковых отложениях бентосных (придонных) планктонных организмов (фораминифер). Индикатором этих изменений служат колебания в слоях отложений относительного содержания стабильных изотопов кислорода $\delta^{18}O_b$, взятые со знаком минус, точнее, $dT_{dw} \approx -C_t \cdot d\delta^{18}O_b$, где C_t — некая положительная константа, dt , $d\delta^{18}O_b$ — приращения параметров. Известный осредненный ряд этих данных, полученный в результате изотопного анализа кернов, добытых на 57 станциях глубоководного бурения в Мировом океане, представлен в [14]. Реконструкции изменений уровня океана h_{sl} и площади ледового покрова S_{ice} Антарктики представлены в [15]. Колебания эксцентриситета орбиты Земли были рассчитаны в [5]. Данные по h_{sl} и S_{ice} охватывают последние 1800 т.л., данные по e и T_{dw} значительно протяженнее. На рис. 1 представлены графики e , $\delta^{18}O_b$, h_{sl} и S_{ice} .

Известная проблема неопределенности в проявлении возможной связи 100-т.л. моды e с изменениями климата из-за слабости вариаций инсоляции [1, 2] может быть связана как с разрешающей способностью спектрального анализа, так и с естественными вариациями амплитуды и фазы отклика климатических параметров на периодическое орбитальное воздействие. Вейвлетный анализ (ВП) представляет собой адекватное средство для детального исследования указанных вариаций.

Отметим особенности материнской вейвлет-функции, выбранной для ВП. Для вычисления ВП применялась действительная вейвлет-функция типа Морле [16, 17], в которой вместо гауссиана $e^{-t^2/2}$ в качестве весовой функции используется сфероидальная волновая функция нулевого порядка $u_0(t)$ [18]:

$$w_0(t) = \cos(\beta t) \cdot u_0(t).$$

Как и гауссиан эта функция имеет форму колокола и обеспечивает локализацию сигнала во временной и частотной областях, но при этом $u_0(t)$ обладает оптимальным фокусирующим свойством: из всего множества гладких весовых

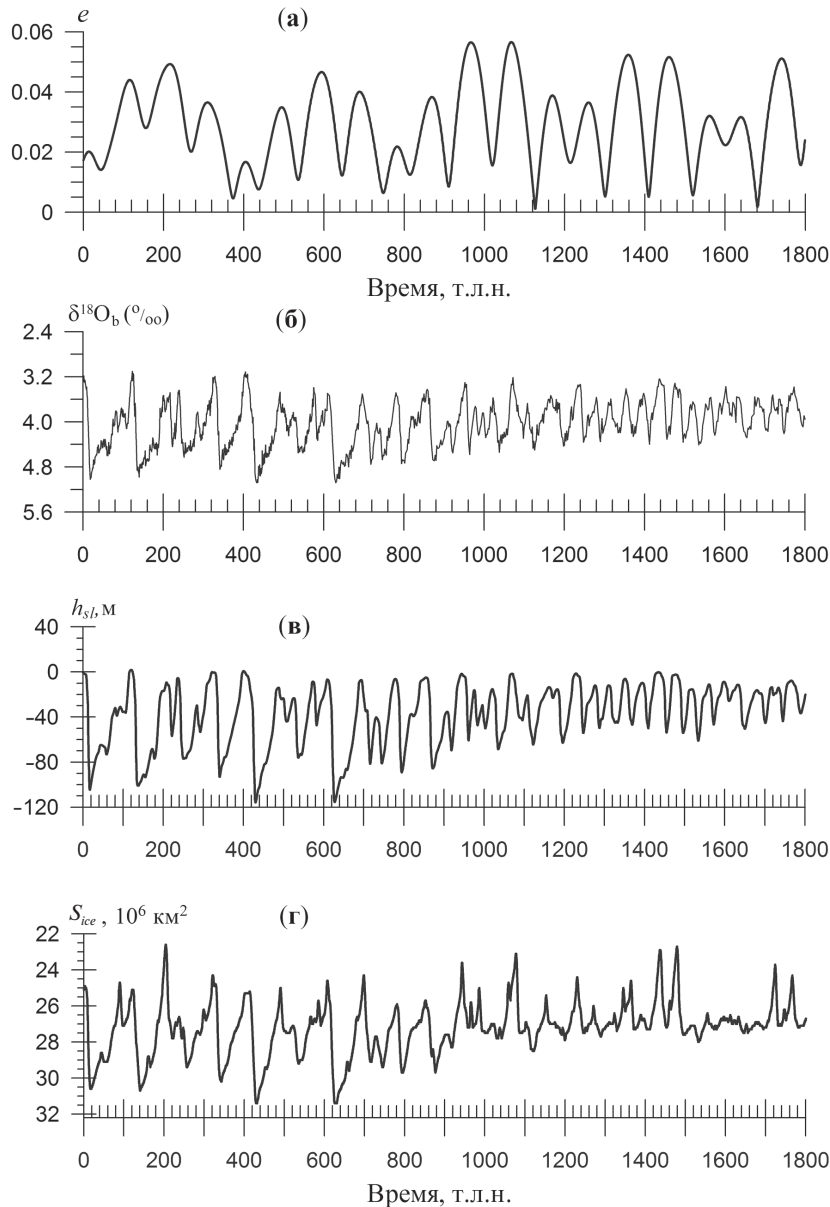


Рис. 1. Изменения: (а) эксцентриситета орбиты Земли e , (б) соотношения стабильных изотопов кислорода в отложениях бентосных фораминифер $\delta^{18}O_b$ (ось ординат направлена вниз), (в) уровня Мирового океана, (г) площади ледников в Антарктике.

функций для этой функции и для ее преобразования Фурье $U_0(\omega)$ достигается максимум произведения:

$$\left[\int_{-\tau}^{\tau} u_0^2(t) dt / \int_{-\infty}^{\infty} u_0^2(t) dt \right] \times \left[\int_{-\Omega}^{\Omega} |U_0(\omega)|^2 d\omega / \int_{-\infty}^{\infty} |U_0(\omega)|^2 d\omega \right]$$

для фиксированных τ и Ω [18].

Это весовое окно применяется в задачах фильтрации, спектральном анализе, а также в вейвлетном анализе временных рядов [9, 19].

Формула ВП функции $x(t)$ имеет вид:

$$W_x(t, a) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} x(\theta) \cdot w_0\left(\frac{\theta-t}{a}\right) d\theta = \frac{1}{a} \int_{-M_p}^{M_p} x(t+\tau) \cdot w_0\left(\frac{\tau}{a}\right) d\tau,$$

где $M_p = a \cdot \beta/2$, M_p — ширина носителя вейвлет-функции $w_0\left(\frac{t}{a}\right)$. Множитель $1/a$ задает амплитудную нормировку для ВП: $\int_{-\infty}^{\infty} \left| w_0\left(\frac{t}{a}\right) \right| \frac{dt}{a} = \int_{-M_p}^{M_p} \left| w_0\left(\frac{t}{a}\right) \right| \frac{dt}{a} = 1$.

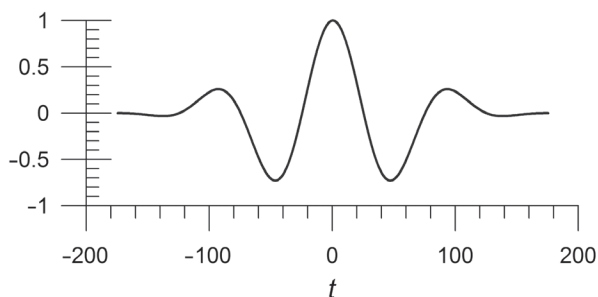


Рис. 2. График вейвлет-функции w_0 , рассчитанной для ВП с периодом 100 (т.л.) и $\beta = 3.5$. $dt = 1$ (т.л.).

Параметр $\beta = 3.5$. Такой выбор параметра β позволяет расширить диапазон частот (периодов) при вейвлетном преобразовании и уменьшить величину интервала искажений ВП на краях интервала данных в 1.7 раз по сравнению с выбором вейвлетной функции Морле, для которой выполнение условия допустимости выполняется при $\beta > 6$. На рис. 2 представлен график этой функции, настроенной на выделение периода $P = 100$ т.л. при величине параметра $\beta = 3.5$ и шаге дискретизации $dt = 1$ т.л.

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ СВЯЗИ 100-Т.Л. ВП-КОМПОНЕНТ e , T_{dw} , h_{sl} и S_{ice}

Геофизические данные, полученные посредством анализа известковых остатков бен-тосных фораминифер в осадочных породах в различных районах Мирового океана и ледниковых щитов в Арктике и Антарктике позволили получить информацию об изменениях палеоклимата. На основе этих материалов построены реконструкции различных индикаторов изменений климата. Как можно видеть на рис. 1, до 800–850 т.л.н. в вариациях $\delta^{18}O_b$, h_{sl} и S_{ice} доминировали ~40-т.л. колебания, а примерно 800 т.л.н. резко увеличился размах колебаний квази-100-т.л. масштаба. Этот переход от квази-40-т.л. к квази-100-т.л. колебаниям — МРТ — совпал с последней переменной полярности магнитного поля Земли.

Вейвлетные преобразования с периодом 100 т.л. для e , $\delta^{18}O_b$ (эти колебания с измененным знаком служат индикатором изменений T_{dw}), h_{sl} и S_{ice} представлены на рис. 3, на

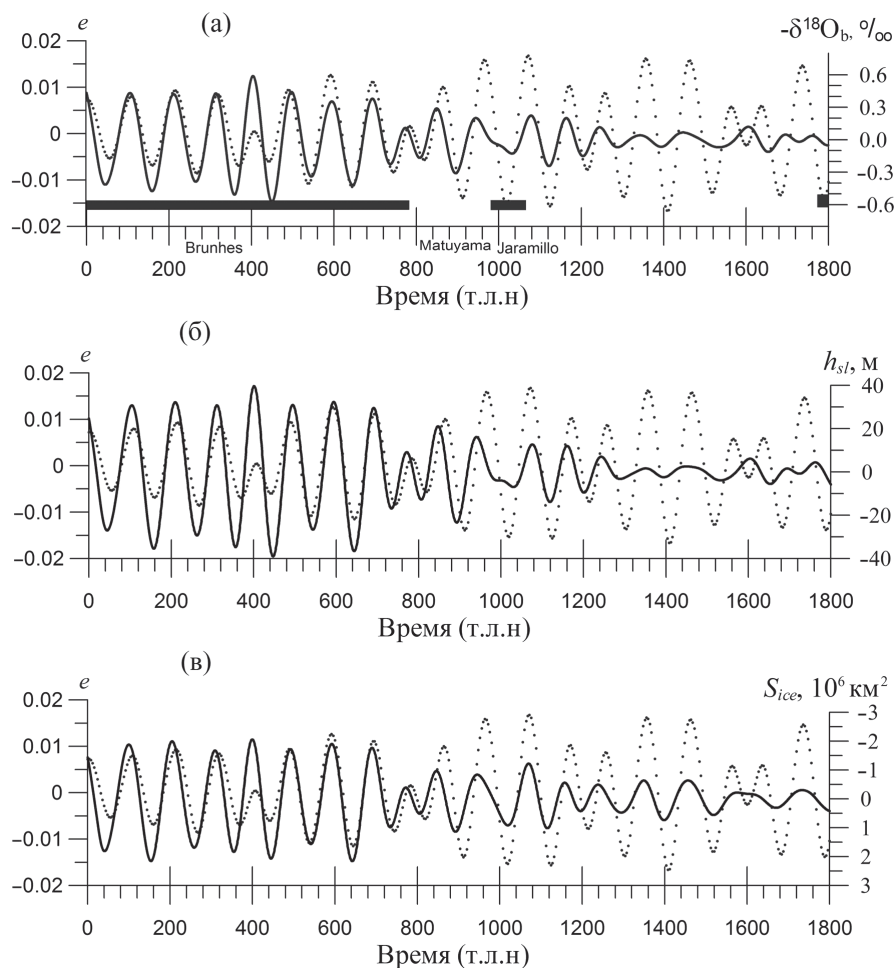


Рис. 3. 100-т.л. мода эксцентриситета e (черные кружки, для наглядности про-режены) и соответствующие 100-т.л. ВП-компоненты: $\delta^{18}O_b$ — (а), уровня океана — (б), площади ледников в Антарктике — (в) (линии, оси ординат справа).

Таблица 1. Оценки запаздывания (т.л., выделены жирным шрифтом), корреляции и стандартные ошибки (в скобках) между 100-т.л. ВП-компонентами колебаний, рассчитанные для эксцентриситета e (по данным [5]), $-\delta^{18}\text{O}_b$ (по данным [14]) — индикатора изменений температуры глубинных вод океана; уровня океана h_{sl} и площади льдов в Антарктике S_{ice}^{Ant} (по данным [15]) соответственно в последние 750 т.л.

	e	$-\delta^{18}\text{O}_b$	h_{sl}
$-\delta^{18}\text{O}_b$	0 , 0.81 (0.09)		
h_{sl}	2 , 0.84 (0.09)	2 , 0.99 (0.05)	
S_{ice}^{Ant}	4 , -0.85 (0.10)	4 , -0.98 (0.07)	2 , -0.99 (0.05)

Таблица 2. Соответствующие оценки, как и в табл. 1 для интервала 1051–1800 т.л.н.

	e	$-\delta^{18}\text{O}_b$	h_{sl}
$-\delta^{18}\text{O}_b$	6 , 0.60 (0.17)		
h_{sl}	6 , 0.56 (0.18)	2 , 0.98 (0.03)	
S_{ice}^{Ant}	7 , -0.87 (0.10)	5 , -0.82 (0.09)	4 , -0.82 (0.09)

котором ВП климатических индикаторов для наглядности совмещены с ВП e , изображенном черными кружочками.

На этом рисунке заметно, что в интервале последних 750 т.л. колебания 100 т.л. ВП-компонент e и $\delta^{18}\text{O}_b$ (т.е. T_{dw}) происходят почти синхронно (рис. 3а), а колебания 100-т.л. ВП-компонент h_{sl} и S_{ice} запаздывают относительно e на несколько тысяч лет. Для уточнения величин запаздывания и оценки соответствующих значений корреляции, проведены расчеты при помощи стандартной кросс-корреляционной функции для всех комбинаций пар ВП-компонент e , T_{dw} , h_{sl} и S_{ice} в двух интервалах равной длины до и после МРТ: 0–750 т.л.н. и 1151–1800 т.л.н. Величина запаздывания определялась по экстремуму кросс-корреляционной функции. Результаты расчетов запаздывания и соответствующих значений корреляции приведены в табл. 1, 2. Там же, в скобках, приведены оценки стандартных ошибок.

Сопоставление расчетов показывает, что после МРТ, точнее, 750–800 т.л.н. у 100-т.л. ВП-компонент e и T_{dw} произошла синхронизация, а соответствующие компоненты h_{sl} и S_{ice} имеют сравнительно небольшое запаздывание относительно e (см. табл. 1), в то время как ранее МРТ, картина фазовых соотношений другая. Так, 1051–1800 т.л.н. климатические компоненты запаздывают относительно e на 6–7 т.л., при сохранении тесной связи между собой (см. табл. 2). Но соотношение фаз становится рассогласованным. В частности, для компонент T_{dw} (т.е. $-\delta^{18}\text{O}_b$) и для S_{ice}^{Ant} запаздывание

относительно e составляет 6 т.л. (при корреляции около 0.6), тогда как между ними оно достигает 5 т.л. (при корреляции -0.82). При этом по-прежнему имеется высокая корреляция между ВП-компонентами T_{dw} и h_{sl} (0.98) и меньшая корреляция между парами S_{ice}^{Ant} и T_{dw} и S_{ice}^{Ant} и h_{sl} . То есть можно полагать, что инсоляция тесно связана с S_{ice}^{Ant} , а T_{dw} — с h_{sl} .

ОБСУЖДЕНИЕ

Во всех упомянутых выше публикациях отмечается, что спектральный анализ выделяет в палеоклиматических данных за последний 1 млн л. мощный максимум спектральной плотности на частоте $1/100$ (т.л.)⁻¹.

Высказываются различные предположения о причинах 100-т.л. цикличности изменений климата в плейстоцене [7, 12]. Например, в [7], предполагается, что климатический эффект эксцентриситета проявляется через воздействие на концентрацию атмосферного CO_2 (“*The effect of orbital eccentricity probably enters the paleoclimatic record through an influence on the concentration of atmospheric CO_2* ”). При этом установлено, что на 100-т.л. периоде $\delta^{18}\text{O}_b$ (т.е. T_{dw}) и данные ст. Восток (температура воздуха и CO_2) изменяются в фазе с эксцентриситетом e , а S_{ice} запаздывает относительно этих трех переменных (“*At the 100,000-year period, atmospheric carbon dioxide, Vostok air temperature, and deep-water temperature are in phase with orbital eccentricity, whereas ice volume lags these three variables*”). Заметим, что и другие индикаторы климата по данным

ст. Восток изменяются примерно в фазе [3, 4] на частоте $1/100$ (т.л.)⁻¹.

Авторы [12] исходят из предположения, что вариации T_{dw} , в которых доминируют 100-т.л. ритмы, скорее связаны с воздействием ритмов, кратных 41-т.л. орбитальному циклу, чем со 100-т.л. сигналом („*this (~100-kyr) variability is likely the product of multiple obliquity cycles rather than a simple 100-kyr rather than a simple 100-kyr signal*”).

В статье [20] разработана численная модель динамики климата, учитывающая не только климатические параметры, но и вклад выхода углекислого газа CO_2 из разломов срединно-океанических хребтов. В ней, подобно [11, 12] реализуется механизм «запираания фазы» колебаний климатических параметров с колебаниями инсоляции орбитального масштаба, причем происходит переход от ~40-т.л. к ~100-т.л. колебаниям („*Oscillations readily become phase-locked with insolation forcing associated with changes in Earth's orbit. Under certain parameterizations, a transition from ~40ky to larger ~100ky oscillations occurs during the middle Pleistocene in response to modulations in orbital forcing*”). В обзоре [2] приведены ссылки и на другие работы, представляющие подобный нелинейный механизм 2–3-х (для ~40-т.л. периода наклона ϵ) или даже 4–5-кратного (для ~20-т.л. периода прецессии ϕ) увеличения соответствующего орбитального периода до квази-100-т.л.

В [12] делается следующий вывод о роли T_{dw} в «управлении» ледниковыми циклами: «нелинейное поведение T_{dw} , в котором доминируют 100-т.л. ритмы, могут играть ключевую роль в образовании ледниковых циклов» („*The non-linear behaviour of deep ocean temperature, dominated by pulses at 100 kyr time scales, may identify it as a key player in governing the glacial cycles*”). В согласии с [7] в [12] полагается, что сильная нелинейность в вариациях T_{dw} может быть связана с эффектами парниковых газов (см. с. 180 [12]).

В численной комплексной модели промежуточной сложности для системы Земли CLIMBER-2 [8] проведена серия экспериментов, учитывающих различные внешние воздействия на климатическую систему в последние 800 т.л. Расчеты показали, что «сильная 100-т.л. периодичность в ледниковых циклах и моменты терминаций оледенений успешно моделируются как прямой сильно нелинейный отклик климата и криосферы на одно лишь орбитальное воздействие». При этом установлено, что «острый 100-т.л. пик в спектре мощности объема льда в ходе ледниковых циклов синхро-

низируется с эксцентриситетом орбиты» Земли. Там же отмечается, что временная изменчивость CO_2 играет важную роль в усилении (т. е. увеличении амплитуды) 100-т.л. циклов („*...temporal variability in the CO_2 concentration plays an important role in the amplification of the 100 kyr cycles*”). Таким образом, большое значение вариаций CO_2 орбитальных масштабов в усилении ледниковой цикличности за счет положительной обратной связи отмечается во многих публикациях в частности, в [6–8, 10, 20, 21].

Полученные выше результаты вейвлетного анализа указывают на тесную корреляционную связь 100-т.л. колебаний эксцентриситета e через соответствующие ВП-компоненты с индикаторами изменений климата. Амплитуды 100-т.л. ВП-компонент климатических параметров до МРТ (тогда в палеоклимате доминировали колебания периода 41 т.л., связанные с наклоном ϵ) были значительно меньше, чем позднее МРТ. Но стоит отметить увеличение амплитуды ВП-компоненты T_{dw} при сближении ее локальной фазы с e (см. рис. 3). После наступления МРТ, как показывает табл. 1, резко возрастает корреляция всех индикаторов климата с эксцентриситетом e . Эти результаты вполне согласуются с выводами, сделанными в упомянутой статье [7] (см. также [8]).

Сравнительно недавно [22] был выполнен анализ и моделирование движения магмы под воздействием солнечно-лунной гравитации (SMG — Sun-Moon Gravitation). Их расчеты показали, что SMG может вызывать в движении магмы «палеоклиматические вариации» с орбитальными периодами. Полученная модельная кривая движения магмы за 800 т.л. имеет большее сходство с палеоклиматическими данными, чем инсоляционная кривая [5] (см. рис. 1 в [22]). Для учета колебаний эксцентриситета e в модели движения магмы следует учитывать воздействие гравитации планет Солнечной системы [5]. Заметим, что в ходе подводной вулканической активности в разломах срединно-океанических хребтов (MOR — Mid-Ocean Ridge) и других «горячих точках» происходит выход расплавленной магмы, сопровождающийся эмиссией парниковых газов. Орбитальная модуляция таких процессов может производить геодинимический и климатический эффекты. Например, на частоте $1/41$ (т.л.)⁻¹-колебаний наклона оси вращения Земли взрывная вулканическая активность в тихоокеанском регионе может привести к соответствующим ритмам в палеоклиматических индикаторах, в частности, в океанской

температуре T_{dw} [23, 24]. Кроме того, анализ рельефа цепей абиссальных холмов Восточно-тихоокеанского поднятия [25] показал, что они сформировались в окрестности MOR в течение последних 670 т.л., а их рельеф под чехлом осадков на шкале времени формирования имеет вариации ~100-т.л. масштаба. Как показано в [25] временной ход образования указанных абиссальных холмов происходил примерно в фазе как с e , так и с CO_2 (по антарктическим данным) (“Normalized overlays of the bathymetry and CO_2 (Supporting Figure S2) and bathymetry and eccentricity (Supporting Figure S3) further illustrate that the 100 kyr cycles appear to be broadly in phase”).

Выше установлено, что в течение последних 750–800 т.л.н., т.е. после МРТ, колебания ВП-компонент e и T_{dw} происходили синхронно (см. табл. 1), причем на T_{dw} воздействовали скорее геодинамические факторы, связанные с подводной вулканической активностью, чем инсоляция. Поэтому можно предположить, что усиление квази-100-т.л. ледниковых циклов наступило в результате согласованного воздействия на климат 100-т.л. периодических колебаний инсоляции (через амплитудную модуляцию ее годового хода) и подводной вулканической активности. Дополнительное усиление этих колебаний обусловлено обратными связями ледниковых циклов с вариациями CO_2 и альbedo земной поверхности [6–8] и, по-видимому, уровня океана.

Так как ритмы орбитального масштаба в движении магмы проявляются в подводной вулканической активности, продуцирующей тепломассоперенос, эмиссию парниковых газов в разломах MOR (с вовлечением их в глобальный углеродный цикл), то можно полагать, что включение в модель CLIMBER-2 [8, 24] «геодинамического блока», моделирующего климатические эффекты, связанные с подводной вулканической активностью, позволит улучшить результаты моделирования изменений климата плейстоцена.

ВЫВОДЫ

1. Установлена почти синхронность воздействия 100-т.л. колебаний эксцентриситета орбиты Земли с соответствующими колебаниями индикатора температуры глубинных вод океана $\delta^{18}O_b$, а также их высокая корреляция с колебаниями уровня океана и площади ледников в Антарктике (с запаздыванием на 2 и 4 т.л. соответственно) в последние 750–800 т.л.

2. Содержание МРТ-перехода 800 т.л.н. от квази-41-т.л. к квази-100-т.л. колебаниям климата может заключаться в прошедшей примерно 800 т.л.н. относительно быстрой синхронизации 100-т.л. ритмов в климате с периодическим орбитальным воздействием на частоте 100-т.л. периодических колебаний эксцентриситета орбиты Земли.

3. Можно предположить, что согласованность воздействия 100-т.л. колебаний инсоляции на атмосферу и поверхность Земли и гравитационного взаимодействия в Солнечной системе на подводную вулканическую активность (с модуляцией процессов тепломассопереноса, эмиссии парниковых газов в глубинных водах и их выделения в атмосферу) при постепенном остывании океана привели в последние 750–800 т.л. к усилению квази-100-т.л. ледниковых циклов.

Автор выражает признательность Г.С. Голицыну и О.Г. Чхетиани за внимание к этой работе. Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 17-05-01097.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Berger W.H. Milankovitch theory — hits and misses. Scripps Institution of Oceanography Technical Report // Scripps Inst. Oceanogr. UC. San Diego. Ca. 2012.
2. Maslin M. Forty years of linking orbits to ice ages // Nature. 2016. V.540. P. 208–210.
3. Мохов И.И., Безверхний В.А., Карпенко А.А. Диагностика взаимных изменений содержания парниковых газов в атмосфере и температурного режима по палеорекострукциям для антарктической станции Восток // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 5. С. 579–592.
4. Мохов И.И., Безверхний В.А., Карпенко А.А. Взаимные изменения температурного режима и содержания парниковых газов в атмосфере по палеорекострукциям для последних 800 тысяч лет // Экстремальные природные явления и катастрофы. Т. 1. Оценка и пути снижения негативных последствий экстремальных природных явлений. Отв. ред. А.О. Глико. М.: ИФЗ РАН. 2010. С. 312–319.
5. Berger A., Loutre M.F. Insolation values for the climate of the last 10 million years // Quat. Sci. Rev. 1991. V. 10. P. 297–317.
6. Ruddiman W.F. Orbital changes and climate // Quat. Sci. Rev. 2006. V. 25. P. 3092–3112.
7. Shackleton N.J. The 100,000-Year Ice-Age Cycle Identified and Found to Lag Temperature, Carbon Dioxide, and Orbital Eccentricity // Sci-

- ence 2000. V. 289 P. 1897–1902. doi: 10.1126/science.289.5486.1897
8. *Ganopolski A., Calov R.* The role of orbital forcing, carbon dioxide and regolith in 100 kyr glacial cycles // *Clim. Past.* 2011. V. 7. P. 1415–1425.
 9. *Berger A., Melice J.L., Loutre M.F.* On the origin of the 100-kyr cycles in the astronomical forcing // *Paleoceanography.* 2005. V. 20. PA4019. P. 1–17. doi: 10.1029/2005PA001173
 10. *Maslin M.A., Brierley C.M.* The role of orbital forcing in the Early Middle Pleistocene Transition // *Quat. Intern.* 2015. V. 389. P. 47–55.
 11. *Tziperman E., Raymo M.E., Huybers P.J., Wunsch C.* Consequences of pacing the Pleistocene 100 kyr ice ages by nonlinear phase locking to Milankovitch forcing // *Paleoceanography.* 2006. V. 21. PA4206. P. 111.
 12. *Siddall M., Honisch B., Waelbroeck C., Huybers P.* Changes in deep Pacific temperature during the mid-Pleistocene transition and Quaternary // *Quat. Sci. Rev.* 2010. V. 29. P. 170–181.
 13. *Lisiecki L.E.* Links between eccentricity forcing and the 100,000-year glacial cycle // *Nature Geosci.* 2010. V. 3. P. 349–352.
 14. *Lisiecki L.E., Raymo M.E.* A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records // *Paleoceanography.* 2005. V. 20. PA1003. P. 1–17.
 15. *De Boer B., Lourens L.J., van de Wal R.S.W.* Persistent 400,000-year variability of Antarctic ice volume and the carbon-cycle is revealed throughout the Plio-Pleistocene // *Nat. Commun.* 2014. V. 5. P. 2999.
 16. *Morlet J., Arensz G., Fourgeau E., Giard D.* Wave propagation and sampling theory-Part II: Sampling theory and complex waves // *Geophysics.* 1982. V. 41. № 2. P. 222–236.
 17. *Постников Е.Б.* Вейвлет-преобразование с вейвлетом Морле: методы расчета, основанные на решении диффузионных дифференциальных уравнений // *Комп. исслед. модел.* 2009. Т. 1. № 1. С. 5–12.
 18. *Cappellini V., Constantinides A.G.D., Emiliani P.* Digital filters and their applications // London: Academic Press. 1978. P. 393.
 19. *Безверхний В.А.* Проявление характерных периодов колебаний орбитальных параметров Земли в палеоклиматических данных // *Докл. РАН.* 2013. Т. 451. № 3. С. 327–331.
 20. *Huybers P., Langmuir Ch.H.* Delayed CO₂ emissions from mid-ocean ridge volcanism as a possible cause of late-Pleistocene glacial cycles // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2017. V. 457. P. 238–249.
 21. *Ganopolski A., Brovkin V.* Simulation of climate, ice sheets and CO₂ evolution during the last four glacial cycles with an Earth system model of intermediate complexity // *Clim. Past.* 2017. V. 13. P. 1695–1716.
 22. *Wang Z.J., Lin X.* Astronomy and Climate-Earth System: Can Magma Motion under Sun-Moon Gravitation Contribute to Paleoclimatic Variations and Earth's Heat? // *Advan. Astron.* 2015. V. 2015. Art. ID536829. P. 1–10.
 23. *Kutterolf S., Jegen M., Mitrovica J.X., Kwasnitschka T., Freundt A., Huybers P.J.* A detection of Milankovitch frequencies in global volcanic activity // *Geology.* 2013. V. 41. № 2. P. 227–230.
 24. *Безверхний В.А.* Earth's obliquity oscillations can influence climate change by driving global volcanic activity // *Geosci. Res.* 2017. V. 2. № 1. P. 22–26.
 25. *Tolstoy M.* Mid-ocean ridge eruptions as a climate valve // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42. № 5. P. 1346–1351.

100,000-Year Rhythmicity in Glacial Cycles and Global Sea Level Variations

V. A. Bezverkhniy

*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Science
Pyzhevsky per, 3, Moscow, 119017, Russia
e-mail: vabezv@mail.ru*

Received: 03.10.2018

Accepted: 03.04.2019

100,000-year rhythmicity of paleoclimate variations, that aroused in the Late Pleistocene, can be linked with corresponded long-term oscillations of insolation and seafloor volcanism, forced by gravitational forces in Solar system. This conclusion is based on wavelet analysis of variations of the earth's orbit eccentricity, different paleoclimatic characteristics, and their known spectral estimates and seafloor volcanism data.

Keywords: pleistocene, climate, Earth's orbital eccentricity, obliquity, volcanic activity, benthos, spectral density, wavelet analysis.