

УДК 551.46, 551.5

О 100-ТЫСЯЧЕЛЕТНЕЙ РИТМИЧНОСТИ В ГЕОДИНАМИКЕ И ПАЛЕОКЛИМАТЕ

© 2019 г. В. А. Безверхний

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва, Россия

E-mail: vabezv@mail.ru

Поступила в редакцию 28.11.2017 г.

Принята в печать 03.12.2018 г.

100-тысячелетняя ритмичность в изменениях климата в четвертичном периоде может быть связана с соответствующими колебаниями не только в инсоляции, но и в подводной вулканической активности под воздействием солнечно-лунной гравитации (SMG). Это заключение основано на вейвлетном анализе долговременных данных о колебаниях эксцентриситета орбиты Земли, вариациях различных палеоклиматических характеристик и известных спектральных оценках вариаций в SMG и 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/S0002-333720193117-125>

ВВЕДЕНИЕ

Достижения в реконструкции характеристик палеоклимата [Petit et al., 1997; EPICA community members, 2004; Lisiecki, Raymo, 2005], расчеты орбитальных характеристик Земли [Berger, Loutre, 1991] и многие другие исследования, представленные в обзоре [Berger, 2012], революция в геологии в середине XX в., достижения в исследовании геодинамики [Хаин, Халилов, 2009] и новые данные о проявлениях вулканической активности в последние 800 тыс. – 1.2 млн лет (в частности, глубоководные буровые работы по проектам Deep Sea Drilling Project (DSDP) и Ocean Drilling Program (ODP)) позволили значительно продвинуться в понимании природы изменений крупномасштабных изменений климата в далеком прошлом. Стимулом для новейших исследований послужило выявление в колонках отложений вулканического пепла в регионе тихоокеанского вулканического кольца и в структуре абиссальных холмов (например, в районе Восточно-Тихоокеанского поднятия, Чилийского и Австрало-Антарктического хребтов) мощных спектральных составляющих с частотами орбитального масштаба, которые соответствуют колебаниям наклона оси вращения Земли (ϵ), прецессии и эксцентриситета (e) ее орбиты [Tolstoy, 2015; Crowley et al., 2015; Olive et al., 2015; Kutterolf et al., 2015]. В структуре

абиссальных холмов в окрестности Восточно-Тихоокеанского поднятия (113° ю. ш., 17° з. д.) (Southern East Pacific Rise -SEPR) обнаружены регулярные пространственные периоды, соответствующие 100-т. л. (1000 лет – 1 т. л.) колебаниям [Tolstoy, 2015].

В спектрах рельефа абиссальных холмов в окрестности умеренно-спрединговых хребтов (MOR – mid-ocean ridge), в частности, Австрало-Антарктического [Crowley et al., 2015] и Чилийского [Olive et al., 2015] были выделены колебания с частотами, близкими $1/23$, $1/40$ и $1/100$ (т. л.) $^{-1}$, соответствующие колебаниям прецессии, наклона ϵ и эксцентриситета e . Эти же характерные частоты орбитальных периодов выделяются в спектрах отложений тefры (пепла) во множестве участков океанского дна в Тихом океане [Kutterolf et al., 2015]. Наша цель – прояснить связи геодинамических процессов в окрестности MOR и колебаний температуры глубинных вод океана с изменениями климата на масштабе 100-т. л. колебаний эксцентриситета e . Первая задача состоит в том, чтобы показать, каким образом 100-т. л. климатические циклы могут быть связаны не только с изменениями инсоляции в зависимости расстояния Земли от Солнца и внутренней динамики климата, но и с подводной вулканической активностью. Вторая задача – определить роль 100-т. л. колебаний эксцентриситета в образовании наблюдаемого рельефа абиссальных холмов в окрестностях

MOR. Анализ основан на технике вейвлетного преобразования временного ряда, выделяющей в нем квазипериодические колебания заданной частоты (периода). С этой целью используется свертка сигнала с вейвлет-функцией типа Морле [Morlet et al., 1982; Torrence, Compo, 1998; Безверхний, 2001; Постников, 2009]. Впервые метод вейвлетного преобразования был применен Ж. Морле с соавторами при исследовании сейсмических сигналов.

В статье будут представлены установленные автором корреляционные связи 100-т. л. вейвлетных компонент колебаний эксцентриситета, известных индикаторов изменений палеоклимата и такого показателя геодинамики, как рельеф цепи абиссальных холмов. Почти синхронные колебания эксцентриситета и индикатора изменений температуры глубинных вод океана на частоте $\sim 1/100$ (т. л.)⁻¹ указывают на наличие общего источника энергии колебаний эксцентриситета и притока тепла к океанскому дну. Этим источником могут быть гравитационные взаимодействия в Солнечной системе.

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДА ВЕЙВЛЕТНОГО АНАЛИЗА

Для вычисления вейвлет-преобразования (ВП) применялась действительная вейвлет-функция типа Морле [Morlet et al., 1982; Постников, 2009]: $w_0(t) = \cos(\beta t) \cdot u_0(t)$, в которой вместо гауссиана $e^{-t^2/2}$ в качестве весовой функции используется сфероидальная волновая функция нулевого порядка $u_0(t)$ [Cappellini et al., 1983]. Как и гауссиан эта функция имеет форму колокола, но отличается тем, что она обеспечивает оптимальную локализацию сигнала во временной и частотной областях, а именно, обладает оптимальным фокусирующим свойством: из всего множества гауссовых функций для этой функции и для ее преобразования Фурье $U_0(t)$ достигается максимум произведения

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

для фиксированных τ и Ω [Cappellini et al., 1983]. Дискретная аппроксимация $u_0(t)$ — известное окно Кайзера, которое при единичном шаге дискретизации имеет вид:

$$u_0(n) = \frac{I_0(c_1[(N-1)/2\sqrt{1-[2n/(N-1)]^2})]}{I_0(c_1[(N-1)/2])},$$

$$n = 0, 1, 2, \dots, N-1,$$

где: I_0 — модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка; а c_1 — положительный параметр [Cappellini et al., 1983]. Это весовое окно применяется в задачах фильтрации и спектральном анализе временных рядов для подавления «боковых лепестков» в спектрах, а также в вейвлетном анализе [Безверхний, 2001]. Естественно, его параметры выбраны так, чтобы для материнской вейвлет-функции выполнялось условие допустимости:

$$\int_{-\infty}^{\infty} w_0(t) dt = \int_{-1}^1 w_0(t) dt = 0.$$

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:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \left| w_0\left(\frac{t}{a}\right) \right| \frac{dt}{a} = \int_{-M_p}^{M_p} \left| w_0\left(\frac{t}{a}\right) \right| \frac{dt}{a} = 1.$$

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. 1 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.

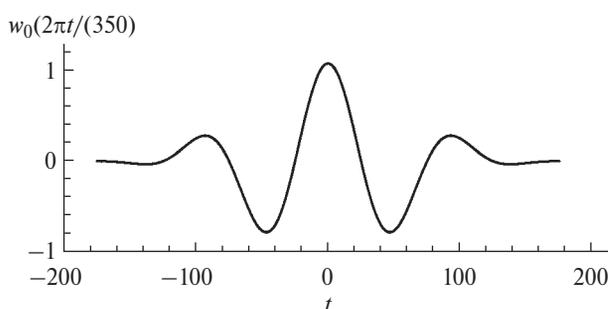


Рис. 1. График вейвлет-функции w_0 , рассчитанной для ВП с периодом 100 т. л. и $\beta = 3.5$. $dt = 1$ т. л.

ПРОЯВЛЕНИЕ ОРБИТАЛЬНЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ В ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ

Многочисленные геофизические данные об изменениях климата, полученные посредством бурения отложений остатков организмов в осадочных породах морского дна в различных районах Мирового океана, реконструкции климатических индикаторов, сохраненных в толще ледниковых щитов в Арктике и Антарктике, позволили определить довольно сложный характер изменений палеоклимата в течение четвертичного периода. На рис. 2 показаны графики колебаний эксцентриситета e [Berger, Loutre, 1991], соотношения стабильных изотопов кислорода в отложениях бентосных организмов $\delta^{18}\text{O}_b$, полученных на основе данных 57 глобально распределенных станций

[Lisiecki, Raymo, 2005] (известный стек LR04) и h_z — изменений высоты абиссальных холмов (в зависимости от расчетного времени из образования) в окрестности SEPR [Tolstoy, 2015]. Отметим, что в палеореконструкциях инвертированные величины $-\delta^{18}\text{O}_b$ (со знаком минус) представляют колебания T_{dw} глубинных вод океана [Hansen et al., 2013], т. е. $T_{dw} \approx -C_t \cdot \delta^{18}\text{O}_b$, где C_t — некая положительная константа.

Абиссальные холмы образуются в результате выхода магмы из оси разлома MOR. Как установлено в работах [Tolstoy, 2015; Crowley et al., 2015; Olive et al., 2015] профили высоты h_z абиссальных холмов в окрестности разломов (с относительно быстрым спредингом (расширением) океанического дна по сторонам разлома) характеризуются спектральными максимумами, соответствующими частотам $1/100$ и $1/40$ (т. л.)⁻¹. Как показано

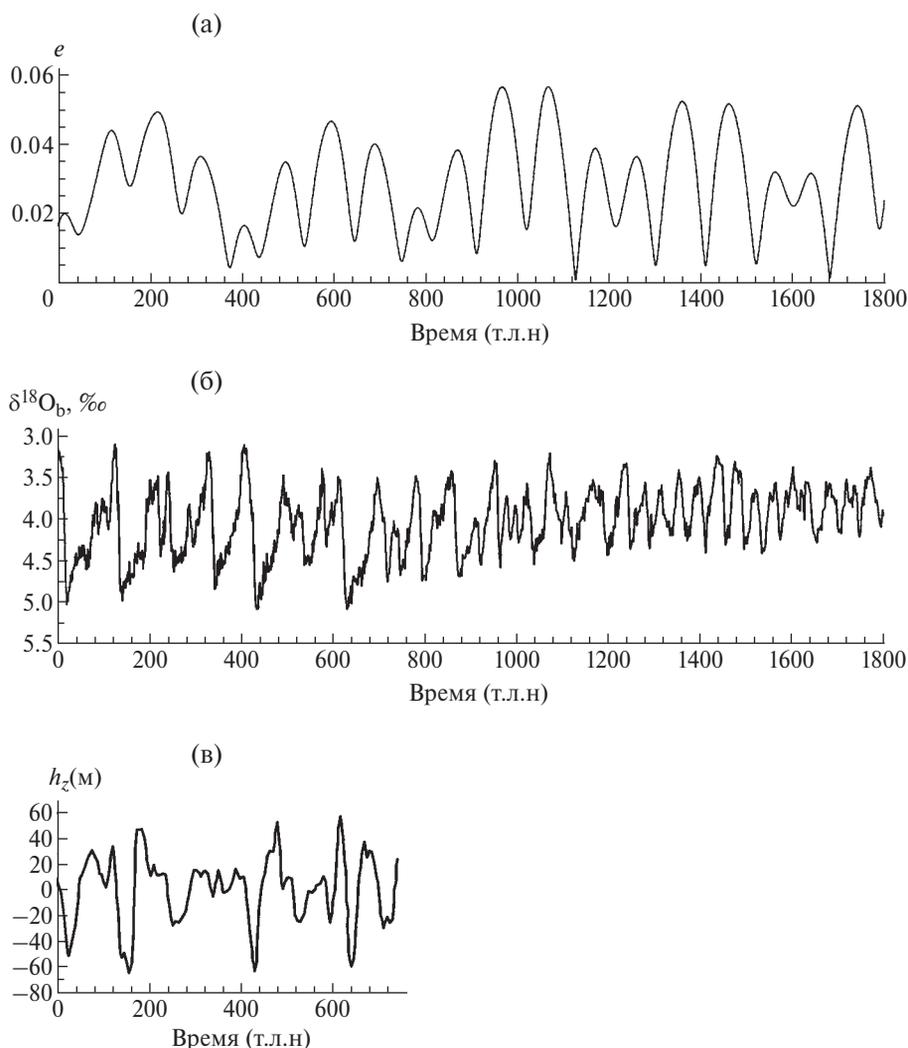


Рис. 2. (а) — Эксцентриситет орбиты Земли e ; (б) — соотношение стабильных изотопов кислорода в отложениях бентосных фораминифер $\delta^{18}\text{O}_b$ (ось ординат направлена вниз); (в) — профиль дна океана в районе Восточно-Тихоокеанского поднятия (h_z).

в работе [Kutterolf et al., 2015] в спектрах отложенных тефры (вулканического пепла), полученных в ходе бурения на 42 станциях в регионе тихоокеанского вулканического пояса также выделяются максимумы на упомянутых орбитальных частотах. В последние 800 т. л. спектры антарктических данных и ряда LR04 также имеют мощные составляющие на орбитальных частотах [Berger, 2012; Безверхний, 2013].

На рис. 3а и 3б представлены вейвлетные компоненты с периодом 100-т. л. следующих пар: e и $\delta^{18}\text{O}_b$ и e и h_z . Можно отметить для соответствующих 100-т. л. компонент почти синхронность e и $-\delta^{18}\text{O}_b$ и заметное запаздывание h_z относительно e . Величину запаздывания φ можно оценить при помощи стандартной кросс-корреляционной функции по значению положения максимума этой функции. Заметим, что характеристики φ и соответствующие квадраты корреляции r^2 аналогичны параметрам фазы и квадрата когерентности, принятым в спектральном анализе. Полученные расчеты показывают, что в последние 750 т. л. для пары 100-т. л. компонент e и $-\delta^{18}\text{O}_b$ (т. е. инвертированной $\delta^{18}\text{O}_b$) запаздывание φ не превышает 1 т. л. ($|\varphi| < 1$ т. л. с учетом темпа выборки 1 т. л. в орбитальных данных — этот результат был отмечен в статье

[Безверхний, 2013]). При этом величина корреляции достигает $r=0.81$. Увеличение амплитуды этой моды колебаний $-\delta^{18}\text{O}_b$ и практически ее синхронность со 100-т. л. модой колебаний e свидетельствует о значимом отклике климата на воздействия, как-то связанные с колебаниями e в последние 750 т. л.

На основе сопоставления соответствующих графиков e и h_z в работе [Tolstoy, 2015 (дополнительные рисунки Fig. S2 и Fig. S3)] предполагается, что колебания эксцентриситета e , антарктических вариаций CO_2 и хронологии образования рельефа морского дна в цепи абиссальных холмов вблизи MOR близки по фазе в последние ~750 т. л. («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.» [Tolstoy, 2015]). Как показывают оценки кросс-корреляционной функции вейвлетных компонент для пары e и h_z на частоте $1/100$ (т. л.)⁻¹ (представленных на рис. 3б) максимальная корреляция $r=0.77$ достигается при запаздывании h_z на 13 т. л. Таким образом на частоте $1/100$ (т. л.)⁻¹ колебания h_z отстают от e на 13 т. л.

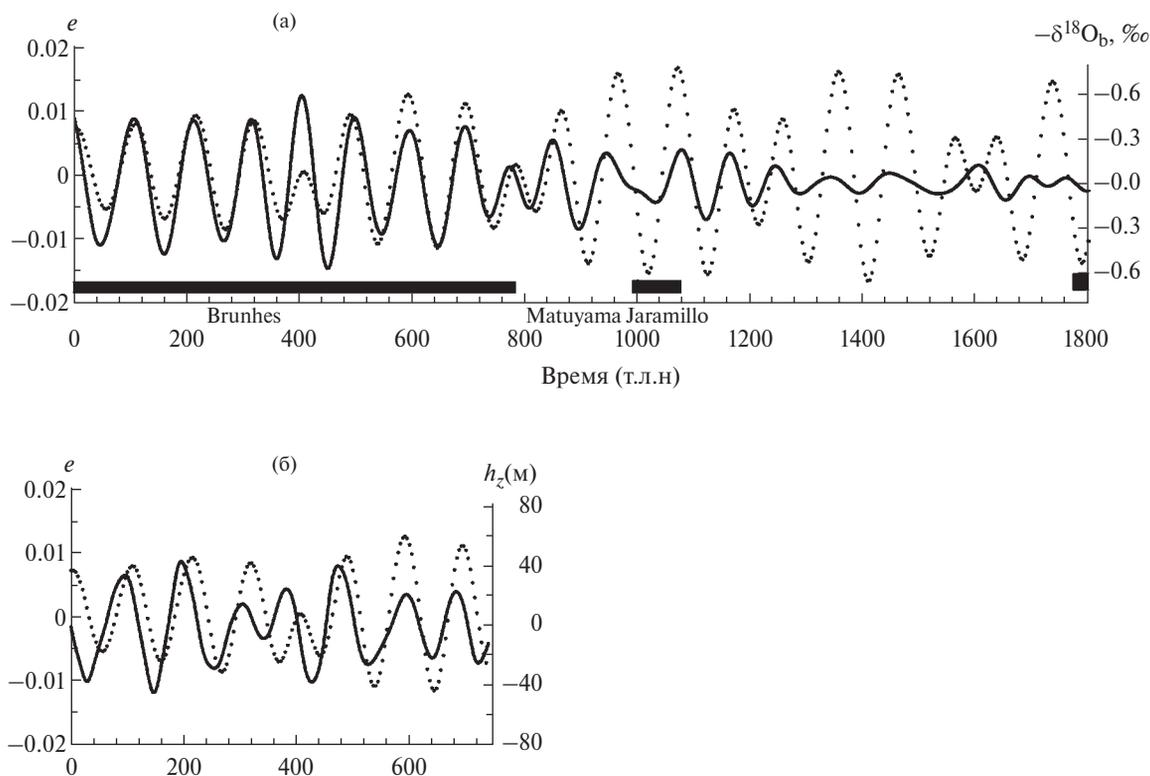


Рис. 3. 100-т. л. моды: (а) — эксцентриситета e (кружки, для наглядности прорезаны) и $-\delta^{18}\text{O}_b$ (линия, оси ординат справа); (б) — эксцентриситета e и рельефа дна в районе Восточно-Тихоокеанского поднятия h_z .

Соотношение величин запаздывания (жирный шрифт) и корреляции временных рядов относительно $-\delta^{18}\text{O}_b$ на периоде **100** т. л. по данным антарктических (Восток [Petit et al., 1997] и Dome C [EPICA, 2004]). T – реконструкция температуры, CO_2 , CH_4 , $-\delta^{18}\text{O}_{\text{sea}}$, $-\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$, Deu, Na – углекислый газ, метан, океанское и атмосферное соотношение $-\delta^{18}\text{O}$, дейтерий, натрий, соответственно. L – длина записи. Прочерк – отсутствие данных.

	T	CO_2	CH_4	Dust	$-\delta^{18}\text{O}_{\text{sea}}$	$-\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$	Deu	Na
Dome C $L=800$ т. л.	-5.0 +0.97	-3.5 +0.98	-2.5 +0.94	1.0 -0.96	–	–	–	–
Dome C $L=415$ т. л.	-6.0 +0.99	-3.0 +1.00	-1.0 +0.98	0.0 -0.97	–	–	–	–
Vostok $L=415$ т. л.	-2.5 +0.98	-0.5 +0.98	-0.5 +0.96	5.5 -0.96	-1.0 +0.98	14.5 +0.94	-4.0 0.98	0.5 -0.98

Ряды других геофизических характеристик по данным ледниковых кернов антарктических станций Dome C и Восток [Petit et al., 1997, EPICA, 2004], полученных в результате палеореконокструкций, также демонстрируют «когерентное» поведение относительно $-\delta^{18}\text{O}_b$ на частоте $1/100$ (т. л.)⁻¹, как представлено в таблице. Величина запаздывания для них не превышает 6 т. л. (за исключением соотношения изотопов $-\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ в пузырьках воздуха, сохранившихся во льду). Колебания уровня мирового океана также изменяются вполне согласованно с вариациями альbedo поверхности и концентрации CO_2 в ледниковых ядрах антарктической станции Dome C (см. Fig. 5 в работе [Hansen et al., 2013]). Следовательно орбитальные, различные геофизические, климатические и, как здесь предполагается, указанные выше характеристики подводной вулканической активности проявляют высокую корреляцию на этой частоте. При этом в последние 750 т. л. климатический отклик мог усиливаться колебаниями объема ледниковых щитов и альbedo земной поверхности, потока уходящей солнечной радиации, эмиссии парниковых газов, поступающих из океана в атмосферу Земли, и другими обратными связями.

Таким образом, складывается диаграмма связей 100-т. л. компонент колебаний, представленная на рис 3. Представленные на этом рисунке и в таблице физические связи, дополненные естественно возникающими обратными связями в климатической системе, предполагают действие определенного механизма согласования радиационных, геодинамических и климатических характеристик на частоте $1/100$ (т. л.)⁻¹ в последние 750 т. л. Так как значительное увеличение амплитуды 100-т. л. компоненты в различных климатических характеристиках произошло в период «синхронизации» колебаний e и T_{dw} , то можно предположить, что на изменения T_{dw} ,

не имеющие прямой зависимости от инсоляции, оказывал воздействие и другой фактор – колебания гравитации, проявляющиеся в изменениях орбитальных параметров – эксцентриситета e (и, как отмечалось ранее, наклона оси вращения Земли [Bezverkhii, 2017]).

В интервалах 750–1500 т. л. н. и 1500–2250 т. л. н. в 100-т. л. вейвлетной компоненте $-\delta^{18}\text{O}_b$ (т. е. T_{dw}) наблюдаются малые локальные амплитуды, причем вычисления кросс-корреляционной функции показывают, что величина запаздывания T_{dw} относительно e , т. е. от воздействия SMG, увеличивалась и составила, соответственно, 9 и 20 т. л. По-видимому, на фоне более высокой подводной вулканической активности ранее 750–800 т. л. н. (об этом свидетельствует более высокий уровень T_{dw}) воздействие 100-т. л. ритмов в SMG на геодинамику и их климатические эффекты были значительно слабее¹.

ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ 41-И 100-Т. Л. КОЛЕБАНИЙ В ДВИЖЕНИИ МАГМЫ – ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ?

Воздействие солнечно-лунной гравитации (SMG – Sun-Moon gravitation) на Землю, по расчетам [Wang, Lin, 2015] «может производить палеоклиматические вариации с рядом периодов (~23, 40, 80 и 100 т. л.) в движении магмы», сопровождающиеся значительным выделением тепла. Их динамическая модель воспроизводит колебания указанных орбитальных масштабов в магме с основными периодами

¹ Рис. 3а представлен автором ранее [Безверхний, 2013], рис. 3б, рис. 4, таблица и большинство оценок запаздывания и соответствующих корреляций – новые результаты автора.

41 и 100 т. л. в спектре мощности. Полученная модельная кривая притока магмы к коре имеет заметное сходство с палеоклиматическими данными, в отличие от инсоляционной кривой (рис. 1 в работе [Wang, Lin, 2015]). Согласно их оценке приток тепла, выделяемый в результате движения магмы, согласно их модельным расчетам, может иметь среднее значение и дисперсию в пределах $1.57\text{--}22.7 \text{ W/m}^2$ и, соответственно, $0.98\text{--}13.7 \text{ W/m}^2$. Современные средние величины потока внутреннего тепла через континенты и океанское дно составляют, как известно из работы [Davies, 2013], соответственно, всего лишь 0.0647 W/m^2 и 0.0959 W/m^2 . В окрестности оси Срединно-Атлантического хребта и других тектонических разломов с выходом магмы величина теплового потока достигает $0.132\text{--}1.237 \text{ W/m}^2$.

Результаты моделирования [Wang, Lin, 2015] позволяют предположить, что SMG через геодинамику воздействует на климатическую систему посредством тепломассопереноса из мантии. Взаимодействие сил гравитации в солнечной системе вызывает, в частности, колебания эксцентриситета e , ритмическую деформацию земной коры и астеносферы с периодом 100 т. л. (в числе др. периодов колебаний, связанных с движением Земли относительно Солнца) и, как следствие, соответствующие 100-т. л. ритмы в вариациях выхода расплава магмы в разломах MOR, на стыках литосферных плит, в вулканической активности и, по-видимому, в других последствиях геодинамической активности. Следует иметь в виду, что не учет пульсаций в скорости поступления расплава магмы, вызванных орбитальными воздействиями, приводит к определенной неравномерности интервалов отсчетов в хронологии абиссальных рядов.

Помимо 100-т. л. ритмов в вариациях теплового потока в окрестностях MOR климатический отклик (в виде колебаний температуры глубинных вод океана и др. климатических характеристик) могут вызывать и другие последствия геодинамической и геохимической активности, в частности, 100-т. л. ритмы в вариациях эмиссии парниковых газов с океанского дна из разломов MOR.

Поскольку SMG действует глобально, то наряду со 100-т. л. ритмами в колебаниях температуры глубинных вод мирового океана T_{dw} , уровня океана, соответствующими ритмами таяний—оледенений в ледниковом покрове Земли [Crowley et al., 2015], подобные ритмы в структуре абиссальных холмов в окрестности и других MOR, например, умеренно-спрединговых

Чилийского и Австрало-Антарктического хребтов и в отложениях тефры (пепла) в регионе тихоокеанского кольца вулканов [Kutterolf et al., 2015] также *могут быть* согласованы с колебаниями эксцентриситета e и инсоляции.

В работах [Barkin, 2004; Barkin, Shatina, 2005] приводятся аргументы и расчеты в пользу того, что в последние 600 т. л. оледенения наступали при положении твердого ядра строго в центре Земли, а периоды межледниковий совпадали с максимальным смещением ядра и мантии. Подобные относительные движения ядра явно связаны с взаимодействием сил SMG, причем максимальная деформация тела Земли происходит при максимальном значении e . В работе [Barkin, Shatina, 2005] приведены расчеты, согласно которым скорость смещения ядра относительно центра масс мантии составляет 8 см/год. Близкую скорость спрединга имеют умеренно-спрединговые MOR (для них скорость спрединга лежит в диапазоне 4–8 см/год). Эти расчеты также показывают, что силы гравитационного взаимодействия в солнечной системе являются источником энергии, достаточно мощным для образования абиссальных холмов, обнаруженных в различных регионах мирового океана (MOR и абиссальные холмы занимают около 1/3 площади океанского дна).

ОБСУЖДЕНИЕ

Заметим, что влияние подводной вулканической активности на изменения климата в работах [Tolstoy, 2015; Crowley et al., 2015; Kutterolf et al., 2015] явно недооценивается. Лишь в статье [Huybers, Langmuir, 2017], хотя и в рамках представлений [Crowley et al., 2015] об образовании абиссальных холмов под воздействием колебаний уровня океана в ходе ледниковых циклов, сделана попытка обосновать важность роли MOR в ~ 100 -т. л. ритмичности ледниковых циклов в позднем плейстоцене («Building on recent evidence that ocean ridge volcanism responds to changes in sea level, here it is suggested that ocean ridges may play an important role in generating late-Pleistocene 100-ky glacial cycles.»). В этой же работе предполагается значительное (на многие десятки т. л.) запаздывание падения эмиссии углекислого газа из окрестностей MOR от подъема уровня моря представляется как необходимое условие возникновения ~ 100 -т. л. ледниковых циклов в позднем плейстоцене. Заметим, в соответствии с их же оценками, рост эмиссии CO_2 происходит с небольшим запаздыванием относительно роста T_{dw} и подъема уровня моря,

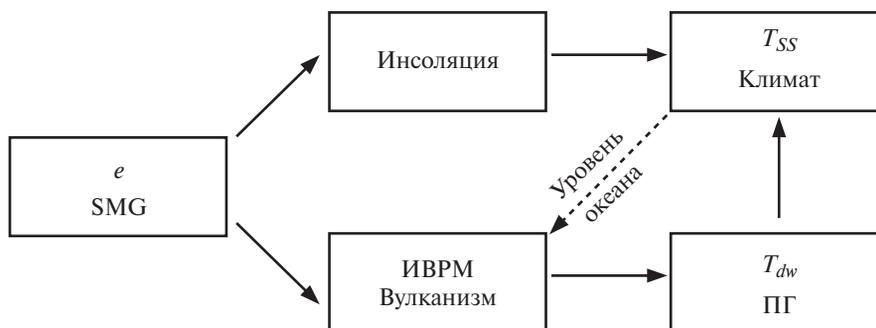


Рис. 4. Схема согласованного воздействия солнечной инсоляции и SMG на изменения палеоклимата на частоте $1/100$ (т.л.)⁻¹ в последние 750 т.л. Здесь e – эксцентриситет орбиты Земли; SMG – солнечно-лунная гравитация; ИВРМ- индуцированный SMG выход расплава магмы; T_{dw} и T_{ss} – температуры глубинных вод мирового океана и его поверхности, соответственно, ПГ – парниковые газы, выделяющиеся при выходе расплава магмы и вулканических извержениях. На диаграмме штриховой линией отмечена относительно слабая обратная связь, показывающая воздействие изменений уровня океана на выход магмы и вулканизм.

что вполне согласуется с воздействием на него колебаний притока тепла и парниковых газов из MOR.

Максимумы на орбитальных частотах, обнаруженные в спектрах хронологии рельефа океанского дна вблизи MOR, вызвали дискуссию геофизиков и климатологов о происхождении абиссальных холмов и о причинно-следственной связи климатических и геодинамических процессов. Исходя из сложившихся ошибочных, на наш взгляд, представлений в упомянутых работах рельеф абиссальных холмов в публикациях даже называют «индуцированным уровнем моря («sea level-induced») [Crowley et al., 2015] или «модулированным уровнем моря» («sea level-modulated») [Olive et al., 2015]. Это основывается на предположении, что значительные изменения уровня океана в ходе оледенений–межледниковий являются первопричиной возникновения абиссальных холмов в окрестности быстро- и умеренно-спрединговых MOR. В частности, в работе [Crowley et al., 2015] предполагается и делается попытка при помощи моделирования обосновать утверждение, что именно колебания уровня моря, связанные с ледниковыми циклами, вызывают соответствующий отклик в вулканической активности с орбитальными частотами колебаний в их спектрах, что должно привести к вариациям толщины и подъему океанической коры («ocean ridge volcanism should respond to sea-level changes, potentially leading to changes in the thickness and elevation of ocean crust»).

В то же время в работе [Olive et al., 2015] с помощью трех численных моделей доказывалось, что колебания давления на океанское дно при чередовании ледниковых циклов не способны вызвать образование абиссальных холмов

с хронологией рельефа, соответствующей периодам, по крайней мере меньшим 100 т.л. Известные оценки зависимости характерных значений ширины таких холмов от скорости спрединга [Goff, 2015] также опровергают базовое предположение работы [Crowley et al., 2015] и, соответственно, [Huuybers, Langmuir, 2017] о существенном влиянии колебаний уровня океана на образование абиссальных холмов вблизи MOR по данным за последние 1 млн лет.

Согласно же представленным выше основаниям, рельеф абиссальных холмов вблизи MOR, образовался в результате ритмического воздействия SMG на кору и недра Земли с частотами колебаний эксцентриситета e , наклона ϵ [Bezverkhni, 2017] и, по-видимому, прецессии. Воздействие колебаний уровня океана на формирование рельефа дна вблизи MOR невелико и представляет собой относительно слабую обратную связь (рис. 4). Эти выводы согласуются с положениями классической теории приращенной земной коры в оси разлома MOR в результате выхода расплава магмы и спрединга [Добрецов, 2010]. Учет влияния SMG на геодинамику и на климатическую систему через геодинамику и океан на масштабах колебаний орбитальных параметров может принести существенный вклад в развитие «астрономической» теории климата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты приводят к следующим выводам, из которых важнейшие выделены курсивом.

1. 100 т.л. ритмы в ряде параметров, характеризующих изменения климатической системы

Земли формируются под воздействием связанных с SMG колебаний как в инсоляции, так и колебаний в выходе магмы в разломах MOR, вызывающих сопутствующие геодинамические и геохимические эффекты в океане.

2. В ходе постепенного уменьшения теплового потока через океанскую кору и соответствующего понижающего тренда в температуре глубинных вод мирового океана T_{dw} 850–750 т. л. н. произошел переход к климату, более чувствительному к 100-т. л. ритмам в вариациях инсоляции, подводной вулканической активности, в выходе расплава магмы, и эмиссии парниковых газов в MOR. То есть это резкое изменение климатического режима, известное как Mid-Pleistocene transition (Средне-плейстоценовый переход) может быть связано с повышением влияния подводной вулканической активности в остывающем океане на изменения климата.

3. Увеличение 100-т. л. амплитуды колебаний T_{dw} и согласованность 100-т. л. ритмов других климатических индикаторов и подводной вулканической активности и привели к увеличению амплитуд вариаций уровня мирового океана и ледниковых циклов, величины альbedo земной поверхности, эмиссии парниковых газов в атмосферу, потока уходящей длинноволновой радиации.

Таким образом, в этот период геофизические и климатические эффекты масштабов не только 41-т. л. колебаний наклона земной оси, но также и 100-т. л. ритмов колебаний эксцентриситета земной орбиты могут быть связаны с SMG.

4. Эффекты SMG на 100 т. л. масштабе проявляются не только в колебаниях эксцентриситета орбиты Земли, но и в рельефе абиссальных холмов в окрестности Восточно-Тихоокеанского поднятия и, очевидно, в окрестности других MOR.

Автор выражает признательность Г.С. Голицыну и О.Г. Чхетиани за полезные обсуждения. Работа выполнена при поддержке Программы РАН и проектов РФФИ №№ 16-05-00663, 17-05-01097.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Безверхний В.А. Проявление характерных периодов колебаний орбитальных параметров Земли в палеоклиматических данных // Докл. РАН. 2013. Т. 451. С. 327–331.
Безверхний В.А.. Развитие метода вейвлет-преобразования для анализа геофизических данных // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2001. т. 37. № 5. С. 630–638.

Добрецов Н.Л. Глобальная геодинамическая эволюция Земли и глобальные геодинамические модели // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. С. 761–784.

Постников Е.Б. Вейвлет-преобразование с вейвлетом Морле: методы расчета, основанные на решении диффузионных дифференциальных уравнений // Комп. иссл. след. модел. 2009. Т. 1 № 1 С. 5–12.

Хаун В.Е., Халилов Э.Н. Цикличность геодинамических процессов. М: Научный мир. 2009. 519 с.

Barkin Yu. V. Dynamics of the Earth shells and variations of paleoclimate. Proc. Milutin Milankovitch Anniv. Symp. «Paleoclimate and the Earth climate system». 2004. Belgrade, Serbia. 30 Aug.– Sep. 2004.

Barkin Yu. V. and Shatina A. V. Deformation of the Earth's mantle due to core displacements // Astron. Astrophys. Trans. 2005. V. 24. P. 195–213.

Berger A. and Loutre M. F. Insolation values for the climate of the last 10 million years // Quat. Sci. Rev. 1991. V. 10. P. 297–317.

Berger W. H. Milankovitch theory – hits and misses. Scripps Institution of Oceanography Technical Report. Scripps Inst. Oceanogr. UC. San Diego. Ca. 2012. 36 p.

Bezverkhniy V. A. Earth's Obliquity Oscillations can Influence Climate Change by Driving Global Volcanic Activity // Geosciences Res. 2017. V. 2. № 1. P. 22–26.

Cappellini, V., Constantinides A. G. D. and Emiliani P. Digital filters and their applications // Acad. Press. London. 1978. 393 p.

Crowley J. W., Katz R. F., Huybers P., Langmuir C. H., Park S. H. Glacial cycles drive variations in the production of oceanic crust // Science. 2015. V. 347. P. 1237–1240.

Davies J. H.. Global map of solid Earth surface heat flow. Geochemistry, Geophysics, Geosystems // 2013. V. 14. P. 4608–4622.

EPICA community members. Eight Glacial Cycles from an Antarctic Ice Core // Nature. 2004. V. 429. P. 623–628.

Goff J. A. Comment on Glacial cycles drive variations in the production of oceanic crust // Science. 2015. V. 349. P. 1065.

Hansen J, Sato M, Russell G, Kharecha P. Climate sensitivity, sea level and atmospheric carbon dioxide // 2013. Phil. Trans. R. Soc A 371: 20120294. 31 p.

Huybers P. and Langmuir Ch. H. Delayed CO₂ emissions from mid-ocean ridge volcanism as a possible cause of late-Pleistocene glacial cycles // Earth Planet. Sci. Let. 2017. V. 457. P. 238–249.

Kutterolf S., Jegen M., Mitrovica J. X., Kwasnitschka T., Freundt A. and P. J. Huybers. A detection of Milankovitch frequencies in global volcanic activity // Geology. 2013. V. 41. № 2. P. 227–230.

Lisiecki L. E. and Raymo M. E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records // Paleoceanogr. 2005. V. 20. PA1003. P. 1–17.

Maslin M. A., Brierley C. M. The role of orbital forcing in the Early Middle Pleistocene Transition // Quat. Intern. 2015. V. 389. P. 1–9.

- Morlet J., Arensz G., Fourgeau E., Giard D.* Wave propagation and sampling theory-Part II: Sampling theory and complex waves // *GEOPHYSICS*. V. 41. № 2. 1982. P. 222–236.
- Olive J.A., Behn M.D., Ito G., Buck W.R., Escartín J., Howell S.* Sensitivity of seafloor bathymetry to climate-driven fluctuations in mid-ocean ridge magma supply // *Science*. 2015. V. 350. P. 310–313.
- Petit J.R., Basile I., Leruyet A., Raynaud D., Lorius C., Jouzel J., Stievenard M., Lipenkov V.Y., Barkov N.I., Kudryashov B.B., Davis M., Saltzman E. and Kotlyakov V.* Four climate cycles in Vostok ice core // *Nature*. 1997. V. 387. P. 359–360.
- Tolstoy M.* Mid-ocean ridge eruptions as a climate valve // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42. №. 5. P. 1346–1351.
- Torrence, C. and Compo, G.P.* A Practical Guide to Wavelet Analysis // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 1998. V. 79. P. 61–78.
- Wang Z.J. and 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. ID 536829. P. 1–10.

On 100 000-Year Rhythmicity in Geodynamics and Paleoclimate

V. A. Bezverkhii^{a,}*

^a*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia*

^{*}*E-mail: vabezv@mail.ru*

Received November 28, 2017

The 100 000-year rhythmicity in paleoclimate variations in the Quaternary can be associated with the respective oscillations in insolation and seafloor volcanism forced by Solar-Moon gravitation (SMG). This conclusion is based on the wavelet analysis of long time series of the variations in the eccentricity of the Earth's orbit, different paleoclimatic characteristics, and the existing spectral estimates of variations in SMG and seafloor volcanism.

Keywords: Pleistocene, climate, orbit eccentricity, Earth's axial tilt, volcanism, benthos, spectral density, wavelet analysis.