

УДК 523.2+551.34+551.324

PACS 92.70.Qr

НОВАЯ ТЕОРИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ИНСОЛЯЦИИ ЗЕМЛИ ЗА МИЛЛИОНЫ ЛЕТ И МОРСКИЕ ИЗОТОПНЫЕ СТАДИИ

© 2020 г. И.И. Смульский

Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Федеральный исследовательский центр, г. Тюмень, Россия

e-mail: JSmulsky@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты новой астрономической теории палеоклимата за последние 1, 5 и 20 млн лет. Рассмотрены эволюции угла наклона ε , инсоляции на 65° с.ш. Q_s^{65N} за летнее полугодие и инсоляции I в эквивалентных широтах за последний 1 млн лет, результаты сопоставлены с эволюцией этих параметров по прежней теории. Диапазон колебаний угла наклона ε по новой теории – от 14.7 до 32.1° , по прежней – от 22.08 до 24.45° , т.е. амплитуда колебаний увеличилась в 7–8 раз. В таком же отношении увеличились колебания инсоляции. На основании летней инсоляции Q_s^{65N} введены шесть градаций климата: от очень холодного до очень теплого. На интервале последние 5 млн лет рассмотрены колебания параметров орбитального и вращательного движений Земли и разных составляющих инсоляции, их периоды и амплитуды. Эксцентриситет орбиты e изменяется с периодами 94.6 тыс. лет, 413 тыс. лет и 2.31 млн лет, а периоды вращения перигелия относительно экватора неравномерны и варьируют от 13.8 до 41.8 тыс. лет. Эти периоды присутствуют также в изменениях угла наклона и инсоляции. Рассмотрено распределение по широте Земли инсоляций за летнее и зимнее калорические полугодия и за год в три разные эпохи: современную, самую холодную и самую теплую. Наибольшие изменения летней и годовой инсоляций происходят в высоких широтах. Статистика очень холодных и очень теплых периодов рассмотрена за последние 20 млн лет. В среднем за 1 млн лет может быть шесть таких периодов; в беспокойные интервалы времени их число может достигать 10, а в спокойные – снижаться до 2. Проанализированы результаты измерений содержания изотопа кислорода ^{18}O в морских отложениях. Показано, что содержание ^{18}O не согласуется с изменением инсоляции Земли как по прежней теории, так и по новой; кроме того, вариации изотопа ^{18}O противоречат известным изменениям палеоклимата. Из анализа короткопериодических вариаций радиоактивных изотопов, а также ^{18}O в сталагмитах и ледниковых кернах следует, что вариации ^{18}O в морских отложениях могут быть обусловлены не колебаниями климата, а изменением содержания ^{18}O в атмосфере Земли.

Ключевые слова: инсоляция, палеоклимат, причины изменения климата, вариации ^{18}O .

DOI: <https://doi.org/10.21455/GPB2020.1-7>

Цитирование: Смульский И.И. Новая теория изменения инсоляции Земли за миллионы лет и морские изотопные стадии // Геофизические процессы и биосфера. 2020. Т. 19, № 1. С. 96–121. <https://doi.org/10.21455/GPB2020.1-7>

ВВЕДЕНИЕ

Согласно астрономической теории ледниковых периодов, созданной М. Миланковичем [1939] в первой трети XX в., распределение количества солнечного тепла по широте Земли зависит от трех параметров: эксцентриситета орбиты Земли e , углового положения перигелия $\varphi_{\text{пр}}$ и угла наклона ε плоскости орбиты к плоскости экватора Земли. М. Миланкович рассмотрел эту проблему на интервале последних 600 тыс. лет. Все последующее развитие этой теории в XX в. заключалось в совершенствовании математических методов, которые позволили получить ее решение на больших интервалах времени, например 30 млн лет [Шараф, Будникова, 1969]. В эту теорию, которую еще называют теорией Миланковича, составными частями входят задачи об эволюции орбитального движения Земли, эволюции вращательного движения Земли и инсоляции Земли в

зависимости от параметров ее орбитального и вращательного движения. Последнюю проблему назовем теорией инсоляции.

Все эти задачи были решены нами по-новому [Мельников, Смульский, 2009; Смульский, 2016б]. При этом использовались методы, отличные от тех, которыми решали эти задачи наши предшественники. Полученные результаты по первой и третьей проблемам (теории инсоляции) принципиально не отличаются от результатов прежних исследователей. А вот результаты решения второй проблемы – эволюции оси вращения Земли – оказались совершенно другими. Так, амплитуда колебания угла наклона ε , согласно нашим расчетам, в 7–8 раз больше, чем по прежней теории. Это приводит к во столько же раз большему колебаниям инсоляции Земли, другой периодичности этих колебаний и другим моментам наступления экстремумов.

Отличие результатов нашего решения задачи о вращении Земли от прежних результатов обусловлено тем, что в прежней астрономической теории задача о вращении Земли фактически не решалась. Исследовалась прецессия оси вращения Земли на основании упрощенных уравнений вращательного движения: в них отбрасывались вторые производные, а также другие составляющие. При этом прецессия оси вращения Земли рассматривалась относительно того же направления, относительно которого прецессирует и орбита Земли.

Согласно нашему решению неупрощенных уравнений, во-первых, кроме прецессии происходят собственные колебания оси вращения Земли, а во-вторых, ось вращения прецессирует относительно другого направления в пространстве, нежели орбита Земли. Это приводит к значительно большим колебаниям угла наклона ε между плоскостями экватора и орбиты Земли. Этот вопрос и основные положения новой астрономической теории изменения палеоклимата рассмотрены в настоящей статье.

Статью можно разделить на две части. В первой рассмотрены новые изменения инсоляции Земли и особенности климата, к которым они приводят. Здесь же для сравнения приводятся результаты прежней теории. Основные результаты новой астрономической теории ранее были рассмотрены за последние 200 тыс. лет [Смульский, 2016б]. В работе [Смульский, 2016а] показано, что новые расчеты изменения количества солнечного тепла объясняют имевшиеся в прошлом колебания палеоклимата. В настоящей статье представлены изменения инсоляции за последние 1, 5 и 20 млн лет, а также основные характеристики палеоклимата на этих интервалах времени.

В последние десятилетия временные характеристики палеоклимата рассматривают также на основе вариаций изотопа кислорода ^{18}O в морских отложениях [Калмычков и др., 2007; Большаков, Катица, 2011]. Во второй части статьи изотопно-кислородные вариации проанализированы и сопоставлены с прежними и новыми расчетами изменений инсоляции Земли, а также с известными сведениями о палеоклимате.

Целью настоящей работы является представление результатов исследования двух систем оценки палеоклимата: инсоляционной и изотопно-кислородной, чтобы дать специалистам в науках о Земле определенные ориентиры для более достоверного познания происходивших на Земле изменений.

Как уже отмечалось, рассматриваемую теорию называют по-разному: астрономическая теория ледниковых периодов, теория Миланковича, орбитальная теория палеоклимата и т.д. При этом последнее название отражает главный недостаток прежней теории: в ней не учитывается эволюция вращательного движения Земли. В дискуссии [Смульский, 2013а] показано, что целесообразно называть ее «астрономическая теория изменения климата». В соответствии с этим в статье она упоминается как астрономическая теория колебания климата или палеоклимата. Чтобы отличить уточненную нами версию этой теории, мы добавляем к названию прилагательное «новая».

ОСНОВАНИЯ НОВОЙ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ПАЛЕОКЛИМАТА И ЕЕ ДОСТОВЕРНОСТЬ

Постановка проблем.

Отличие новой теории от прежней

Эволюция орбитального движения Земли рассматривается в неподвижной системе координат xyz , начало которой находится в центре O небесной сферы I (рис. 1). В результате взаимодействия тел Солнечной системы плоскости экватора Земли 2 и ее орбиты 3 изменяют свое положение: 2 и 3 – в эпоху T_0 , 4 и 5 – соответственно в эпоху T . В качестве эпохи T_0 рассматривается 2000 г. Так как годовое движение Солнца на небесной сфере I относительно Земли происходит по кругам 5 или 3 , то плоскости орбит Земли 5 или 3 еще называют плоскостями подвижной и неподвижной эклиптики соответственно. Система координат xyz связана с плоскостью неподвижного экватора 2 . Подвижная плоскость орбиты Земли 5 характеризуется углом $\varphi_\Omega = \gamma_0\gamma_2$ положения восходящего узла γ_2 и углом наклона i .

Земля движется вокруг Солнца по незамкнутой траектории, близкой по форме к эллипсу, в одной точке которой – в перигелии – она подходит к Солнцу на самое близкое расстояние R_p , а в противоположной

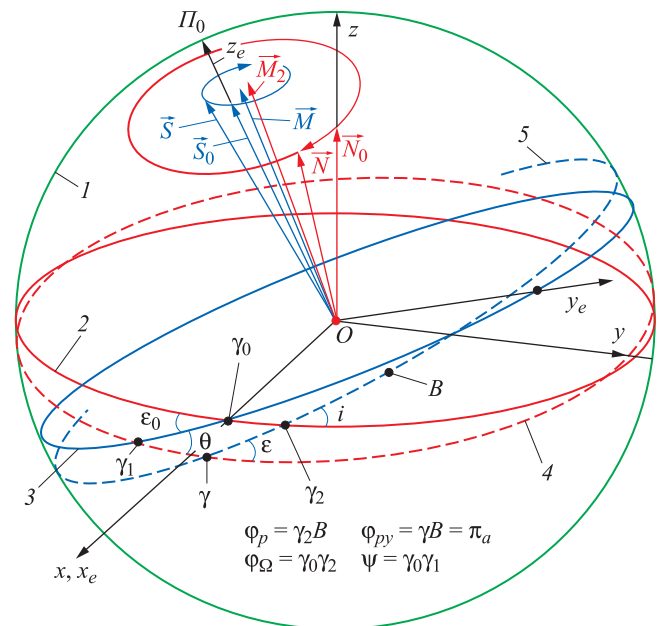


Рис. 1. Параметры орбиты и оси Земли в неподвижных экваториальной xyz и эклиптической $x_e y_e z_e$ системах координат

I – небесная сфера; $2, 3$ – плоскости в эпоху T_0 : 2 – экватора Земли, 3 – орбиты Земли; $4, 5$ – плоскости в эпоху T : 4 – экватора Земли, 5 – орбиты Земли; единичные вектора: \vec{N} – оси Земли, \vec{S} – оси орбиты Земли (перпендикуляр к плоскости орбиты), \vec{M} – момента количества движения Солнечной системы; γ_0 – точка весеннего равноденствия в эпоху T_0 ; B – положение перигелия на небесной сфере; $\varphi_\Omega = \gamma_0 \gamma_2$ – угол наклона орбиты; $\varphi_p = \gamma_2 B$ – угол перигелия; i – угол наклона орбиты

точке – афелии – удаляется на самое дальнее расстояние R_a . На рис. 1 проекция перигелия на небесную сферу l отмечена буквой B , его положение координируется углом $\varphi_p = \gamma_2 B$. Форма орбиты определяется ее эксцентриситетом $e = (R_a - R_p)/(R_a + R_p)$.

В прежней астрономической теории изменения палеоклимата изменения элементов орбиты Земли рассматривались на основании теории вековых возмущений. Это приближенный аналитический метод решения задачи взаимодействия тел Солнечной системы. В этой теории изменения плоскости экватора 4 (см. рис. 1) рассматривались приближенно. По отношению к плоскости экватора определены угол наклона ϵ плоскости орбиты 5 и положение перигелия (угол φ_{pr} в наших обозначениях на рис. 1).

Задачу взаимодействия тел Солнечной системы (для простоты назовем ее орбитальной) мы решаем без упрощения высокоточным численным методом с помощью созданной для этого системы Galactica [Smulsky, 2012a, b]. В этой задаче рассматривается изменение плоскости орбиты 5 (см. рис. 1) относительно неподвижного пространства, связанного с плоскостью экватора 2. Угол наклона i плоскости орбиты 5 и угол восходящего узла φ_Ω в этом случае отличаются от углов в теории вековых возмущений, в которой, как уже отмечалось, используется угол наклона ϵ между подвижными плоскостями экватора 4 и орбиты 5.

В отличие от теории вековых возмущений, мы дополнительно решаем численно также и вторую задачу – о вращении Земли – со своими дифференциальными уравнениями. В результате получаем законы изменения угла наклона θ и угол прецессии ψ подвижной плоскости экватора 4 относительно неподвижной плоскости орбиты 3 (см. рис. 1).

Затем решается аналитически третья сложная геометрическая задача – определение угла наклона ϵ между подвижными плоскостями экватора 4 и орбиты 5, а также угла перигелия $\varphi_{pr} = \gamma B$. На малых интервалах времени (порядка тысячи лет) ее решение имеется в небесной механике, но на миллионных интервалах времени, когда две эти плоскости и перигелий орбиты совершают многочисленные вращения, причем нерегулярные и в разные стороны, решения до настоящего времени не было.

Четвертая задача, которая дает изменение солнечного тепла в зависимости от изменения параметров орбиты Земли (e, φ_{pr}) и положения ее оси (ϵ), т.е. теория инсоляции, в завершённом виде была представлена М. Миланковичем в первой четверти XX в. Ее мы также аналитически решили по-новому [Smulsky, Krotov, 2014]. Применен новый математический алгоритм эллиптического движения, который более понятен неспециалистам и удобен для компьютерных вычислений.

Все уравнения, включая дифференциальные уравнения орбитального и вращательного движений, вывелись по-новому. Поскольку результатами решений являлись другие величины и в другом представлении, применились также новые методы их анализа. Вся работа сопровождалась разработкой различных компьютерных программ на разных языках программирования.

Достоверность решения орбитальной задачи

В связи с новым решением всех четырех задач все они на каждом своем этапе проходили проверку. Для проверки решения орбитальной задачи разработаны 9 критериев достоверности. Некоторые из них включены в программу Galactica, поэтому контроль осуществляется в процессе решения. Для всех тел, имеющих базу наблюдений (это планеты от Меркурия до Нептуна и спутник Земли Луна), решения на интервале тысячелетий сопоставлены с вековыми изменениями параметров орбит. Они совпадают [Гребеников, Смутьский, 2007; Мельников, Смутьский, 2009].

На интервалах в сотни тысяч и миллионы лет вычисленные нами параметры орбит сопоставлены с результатами предшественников [Шараф, Будникова, 1969; Berger, Loutre, 1991; Laskar et al., 2004]. Они также совпадают. Каждые последующие авторы учитывали опыт предыдущих авторов и уточняли теорию вековых возмущений, что подтвердилось при сопоставлении. Чем позднее опубликованы работы, тем на большем интервале времени их результаты совпадают с нашими [Мельников, Смутьский, 2009].

Теория возмущений, как уже отмечалось, представляет собой приближенный метод решения орбитальной задачи. В этом методе после 20 млн лет решения начинают расходиться: орбиты отдельных планет увеличиваются, и при дальнейшем решении эти планеты могут покинуть Солнечную систему [Laskar, 1996]. Мы решили орбитальную задачу за 100 млн лет, при этом все параметры орбит планет и Луны испытывают установившиеся колебания и не существует тенденции к изменению этих колебаний [Гребеников, Смутьский, 2007; Мельников, Смутьский, 2009].

В результате наших решений установлено следующее: оси орбит планет \vec{S} (см. рис. 1) прецессируют вокруг вектора \vec{M} момента количества движения Солнечной системы. Эволюция орбиты Земли происходит в результате четырех движений: прецессии и колебания оси орбиты \vec{S} , вращения перигелия (угол φ_p) и колебания эксцентриситета e .

Достоверность решения задачи о вращении Земли

Вопросы достоверности решения задачи о вращении Земли детально рассмотрены в работах [Смутьский, 2016б; Smulsky, 2016]. Все необходимые проверки были выполнены: например, задача решалась последовательно при воздействии на Землю одного из 10 тел: Солнца, восьми планет и Луны [Smulsky, 2011]. Полученные периоды колебаний оси Земли подтвердились общетеоретическими выводами на основании теоремы моментов, а также результатами других авторов [Bretagnon et al., 1997]. При воздействии всех тел задача решалась за разные интервалы времени, и полученные результаты совпали с наблюдениями. Интегрирование уравнений за 200 тыс. лет проводилось с разными начальными условиями и разными шагами интегрирования. Это не привело к изменению периодов колебаний, их амплитуд и моментов наступления экстремумов.

Как уже отмечалось, в прежней астрономической теории задача о вращении Земли в полном объеме не решалась. Основным периодом колебаний угла ϵ равен 41 тыс. лет, а периодов колебаний ϵ меньше 10 тыс. лет получено

не было. Наши решения дают суточные, полумесячные, полугодовые колебания и колебания с периодом 18.6 лет. Амплитуда колебаний увеличивается с увеличением периода, и для периода 18.6 лет она доступна для наблюдений. Полученные нами колебания с амплитудой 9.2" и периодом 18.6 лет в точности совпадают с наблюдаемыми колебаниями [Смульский, 2014; Smulsky, 2016].

По всем астрономическим наблюдениям за последние 2.5 тыс. лет установлен линейный тренд изменения осредненного угла наклона ε . Рассчитанный нами тренд угла ε в точности совпадает с этим трендом [Смульский, 2014; Smulsky, 2016].

После 2.5 тыс. лет в прошлое от линейного тренда начинают отличаться как наши решения, так и решения наших предшественников. За большой интервал времени, а именно за последние 200 тыс. лет, задача о вращении Земли была решена сначала в будущее [Смульский, 2013а]. Основной период колебаний угла наклона ε по расчетам новой теории равен 25.74 тыс. лет в отличие от 41 тыс. лет по прежней теории. Решения для угла ε имели другую структуру колебаний, другие моменты наступления экстремумов и, самое главное, амплитуда новых колебаний превышала амплитуду прежних в 7–8 раз. После этих расчетов началась проверка решения задачи о вращении Земли, которая продолжалась три года.

Задача о вращении Земли – одна из самых сложных задач механики. Вид ее решений может зависеть от фундаментальных допущений при выводе уравнений, выбора начальных условий, метода решения, а также от преобразований решений к подвижной орбите Земли. Поэтому кардинальной проверкой полученных результатов являлось бы их получение без решения дифференциальных уравнений вращательного движения.

При исследовании орбит выяснилось, что эволюция оси орбиты Луны подобна эволюции оси вращения Земли. Этот результат привел нас к составной модели Земли, в которой часть массы Земли равномерно распределена между периферийными телами, обращающимися вокруг центрального тела по круговой орбите. Под воздействием Луны, Солнца и планет орбиты периферийных тел начинают изменяться. Эволюция оси орбиты одного из этих тел моделирует эволюцию оси вращения Земли. Чтобы достичь в модели таких же характеристик вращения, как и у Земли, было разработано и исследовано 13 моделей [Мельников и др., 2008; Smulsky, 2016]. Решение задачи для 13-й составной модели Земли на интервале последних 300 лет [Смульский, 2014; Smulsky, 2016] дало все характеристики динамики земной оси, в том числе полумесячные, полугодовые и 18.6-летние колебания углов ε и ψ . Их амплитуды также совпали с результатами задачи о вращении Земли. Такое совпадение результатов модельной задачи с результатами прямой происходит на интервалах до 3 тыс. лет. Из-за малого шага интегрирования дальнейшее решение задачи затруднено невыполнимым временем ее счета.

Итак, составная модель Земли на интервале последних 3000 лет подтвердила полученные результаты интегрирования дифференциальных уравнений вращения Земли. Это свидетельствует о том, что принятые допущения и упрощения при выводе уравнений, их вывод, метод решения и преобразование результатов интегрирования в конечный вид также подтвердились.

Вторая проверка заключалась в смене метода интегрирования. В первоначальной программе DfEqA11. for решения задачи о вращении Земли использовался метод интегрирования Рунге–Кутты 4-го порядка [Крутко и др., 1989]. Для проверки была разработана программа решения задачи DfEqADP8.for с методом интегрирования Рунге–Кутты 8-го порядка [Хайпер и др., 1990]. При интегрировании уравнений вращательного движения на интервале последних 200 тыс. лет все полученные ранее результаты подтвердились.

Третья проверка состояла в смене технологии решения задачи. В дифференциальные уравнения вращательного движения входят координаты воздействующих на Землю 10 тел: восьми планет, Солнца и Луны. Они определяются при решении орбитальной задачи с помощью программы Galactica. Однако массив этих данных с шагом интегрирования задачи 10^{-5} – 10^{-4} года за большие промежутки времени занимает нереализуемый объем памяти. Поэтому мы создали математическую модель Солнечной системы [Смульский, 2007], которая в необходимый момент времени позволяет получать координаты тел на основании формул эллиптического движения, в которых параметры эллипса в каждый момент времени определяются по данным, предварительно рассчитанным с помощью программы Galactica.

В процессе решения этой задачи математическая модель Солнечной системы была всесторонне проверена. Тем не менее оставалась вероятность того, что на больших интервалах времени несущественные отличия результатов математической модели Солнечной системы от значений координат, полученных с помощью программы Galactica, могут повлиять на эволюцию параметров вращательного движения ε и ψ . Была разработана новая программа glc3rte2.for совместного решения орбитальной задачи и задачи о вращении Земли. В ней за один шаг по времени происходит решение орбитальной задачи методом программы Galactica, затем методом Рунге–Кутты 8-го порядка за этот шаг решается задача о вращении Земли. С помощью новой программы были выполнены решения этих двух задач за разные интервалы времени, включая интервал 200 тыс. лет. Все ранее полученные результаты подтвердились [Смульский, 2014; Smulsky, 2016]. В ходе этой проверки была также подтверждена математическая модель Солнечной системы на большом интервале времени.

Итак, выполненные разнообразное тестирование и проверки первоначального метода решения задачи о вращении Земли, а также независимые от него решения этой задачи тремя другими методами подтвердили, что ось вращения Земли совершает колебания с амплитудой в 7–8 раз большей, нежели в решениях наших предшественников.

Нашими результатами установлено, что эволюция плоскости экватора Земли или ее оси \vec{N} происходит в виде двух движений: прецессии оси \vec{N} вокруг неизменного в пространстве вектора \vec{M}_2 и колебаний относительно него.

Достоверность решения третьей и четвертой задач

Третья задача определения угла наклона ε между подвижными плоскостями экватора 4 и орбиты 5 и угла перигелия φ_{pp} (см. рис. 1), как уж отмечалось, является

геометрически сложной из-за множества оборотов осей \vec{N} и \vec{S} и перигелия B вокруг разных осей и в разных направлениях. Например, ось Земли \vec{N} совершает 777 оборотов за 20 млн лет. В этой задаче необходимо по полученным решениям орбитальной задачи для i , φ_Ω , φ_p (см. рис. 1) и задачи о вращении Земли для θ и ψ определить параметры относительного движения ε и φ_{pr} .

Эти преобразования мы вывели, однако в них входят обратные тригонометрические функции, которые, как известно, многозначны. Сами выражения сложны, отдельные их части в некоторые моменты времени становятся мнимыми или стремятся к бесконечности. Эти особенности необходимо находить, выяснять причину и разрабатывать алгоритм для ее устранения. Вначале эта задача была решена средствами сферической геометрии, однако из-за сложности всех логических конструкций не было уверенности в достоверности полученного решения, поэтому возникла другая идея. Вектора осей \vec{N} и \vec{S} заменялись их проекциями на оси декартовой системы координат. Затем средствами тригонометрии выводились необходимые преобразования. Эти две системы преобразований позволили выявлять ошибки каждой и устранять их, пока обе не начали давать один и тот же результат на исследованном интервале времени 20 млн лет.

Разработанный новый алгоритм вычисления инсоляции в четвертой задаче был также проверен [Smulsky, Krotov, 2014] расчетом инсоляции по орбитальным данным М. Миланковича, Дж. Ляскара и др. Новый алгоритм дал те же результаты, что и алгоритм М. Миланковича.

Физическая причина отличия новой теории от прежней

Как уже отмечалось ранее, согласно новым решениям для углов θ и ψ , ось вращения Земли \vec{N} вращается вокруг вектора \vec{M}_2 (см. рис. 1) и совершает относительно него колебания. По рассчитанным θ и ψ мы определили угол наклона θ_{M_2} между вектором \vec{M}_2 и осью \vec{N} , а также угол прецессии ψ_{M_2} плоскости экватора относительно плоскости, перпендикулярной \vec{M}_2 . Оказалось, что основной период колебаний углов θ_{M_2} и ψ_{M_2} равен 41.1 тыс. лет. Это обусловлено тем, что ось орбиты Земли \vec{S} прецессирует по часовой стрелке вокруг вектора \vec{M} с периодом $P_{prS} = 68.7$ тыс. лет, а ось Земли \vec{N} также по часовой стрелке вращается вокруг вектора \vec{M}_2 с периодом $P_{prN} = 25.74$ тыс. лет. Так как эти оси прецессируют в одном направлении, влияние орбитального движения воздействующих тел на вращательное движение Земли будет зависеть от их относительной скорости прецессии. Период этого воздействия в точности равен $P_{pr} = 41.1$ тыс. лет, т.е. это именно тот период, с которым колеблются углы θ_{M_2} и ψ_{M_2} .

В прежней астрономической теории палеоклимата, как уже отмечалось, основной период колебаний угла наклона ε равнялся 41 тыс. лет. Эта теория основывалась на упрощенном рассмотрении задачи о вращении Земли. В результате такого упрощения положения векторов \vec{M}_2 и \vec{M} совпадали (см. рис. 1), что и приводило к периоду 41 тыс. лет.

В новой теории (см. рис. 1) вектора \vec{M}_2 и \vec{M} осей прецессии не совпадают, поэтому моменты сил воздействия всех тел на Землю имеют больший диапазон

колебаний. Вследствие этого увеличивается диапазон колебаний угла θ относительно неподвижной орбиты 3. Дополнительно к этому увеличивается диапазон колебаний угла ε между подвижными векторами \vec{S} и \vec{N} . В итоге амплитуда колебаний угла ε по новой теории превышает амплитуду колебаний по прежней теории в 7–8 раз.

Таким образом, периодом колебаний угла ε в прежней теории эволюции оси Земли является период относительной прецессии P_{pr} оси вращения \vec{N} Земли и оси ее орбиты \vec{S} . Поэтому физической причиной неверных результатов прежней теории является то, что в ней оси прецессии \vec{M} и \vec{M}_2 оси орбиты \vec{S} и оси вращения \vec{N} Земли соответственно совпадали.

Окончательная проверка новой теории

Окончательной проверкой новой астрономической теории изменения палеоклимата является ее сопоставление с результатами, полученными по палеоклимату в науках о Земле. Анализ исследований геологов, географов и других специалистов по палеоклимату показал [Смутьский, 2016а], что четыре экстремума летней инсоляции Q_s^{65N} за последние 50 тыс. лет (4.16, 15.88, 31.28 и 46.44 тыс. л.н.) соответствуют серединам голоцена, последнего ледникового периода, теплого периода и предпоследнего ледникового максимума соответственно. Эти события называют по-разному в разных регионах мира, но все они происходили как в Сибири, так и в Европе и Северной Америке.

ЭВОЛЮЦИЯ УГЛА НАКЛОНА ОСИ ЗЕМЛИ И ИНСОЛЯЦИИ ЗЕМЛИ ЗА ПОСЛЕДНИЙ 1 МЛН ЛЕТ

Изменение угла наклона оси Земли ε за последний 1 млн лет показано линией 1 на рис. 2, а. Для сравнения приведено изменение угла ε по решениям по прежней теории на примере работы [Laskar et al., 2004] (линия 2). Горизонтальными линиями показаны диапазоны колебаний угла наклона ε в этих двух решениях. Согласно нашему решению, наибольшее значение угла $\varepsilon = 32.078^\circ$ приходится на 111.6 тыс. л.н., при этом в эпоху 31 тыс. л.н. $\varepsilon = 32.018^\circ$, т.е. чуть меньше. Наименьшее значение $\varepsilon = 14.676^\circ$ приходится на эпоху 250.8 тыс. л.н., при этом в эпоху 46 тыс. л.н. такой минимум немного не достигнут. При $T > 330$ тыс. л.н. амплитуды колебаний имеют меньшие значения. Эта же тенденция наблюдается для изменений ε по прежним решениям (линия 2), например, минимум $\varepsilon = 22.076^\circ$ достигается в эпоху 232 тыс. л.н., а максимальное значение $\varepsilon = 24.455^\circ$ – в эпоху 212 тыс. л.н., т.е. далее, до 1 млн л.н., амплитуды колебаний имеют меньшие значения. **В целом диапазон колебаний угла ε по новым решениям в 7.3 раза больше, нежели по прежним.**

Изменение инсоляции за летнее калорическое полугодие на широте 65° с.ш. Q_s^{65N} показано линией 1 на рис. 2, б. Следует отметить, что продолжительность астрономических полугодий изменяется, поэтому рассматриваются равные калорические полугодия: любой день летнего калорического полугодия теплее любого дня зимнего калорического полугодия. Колебания инсоляции (см. рис. 2, б) практически софазны изменениям угла ε . Инсоляция на этой широте отражает

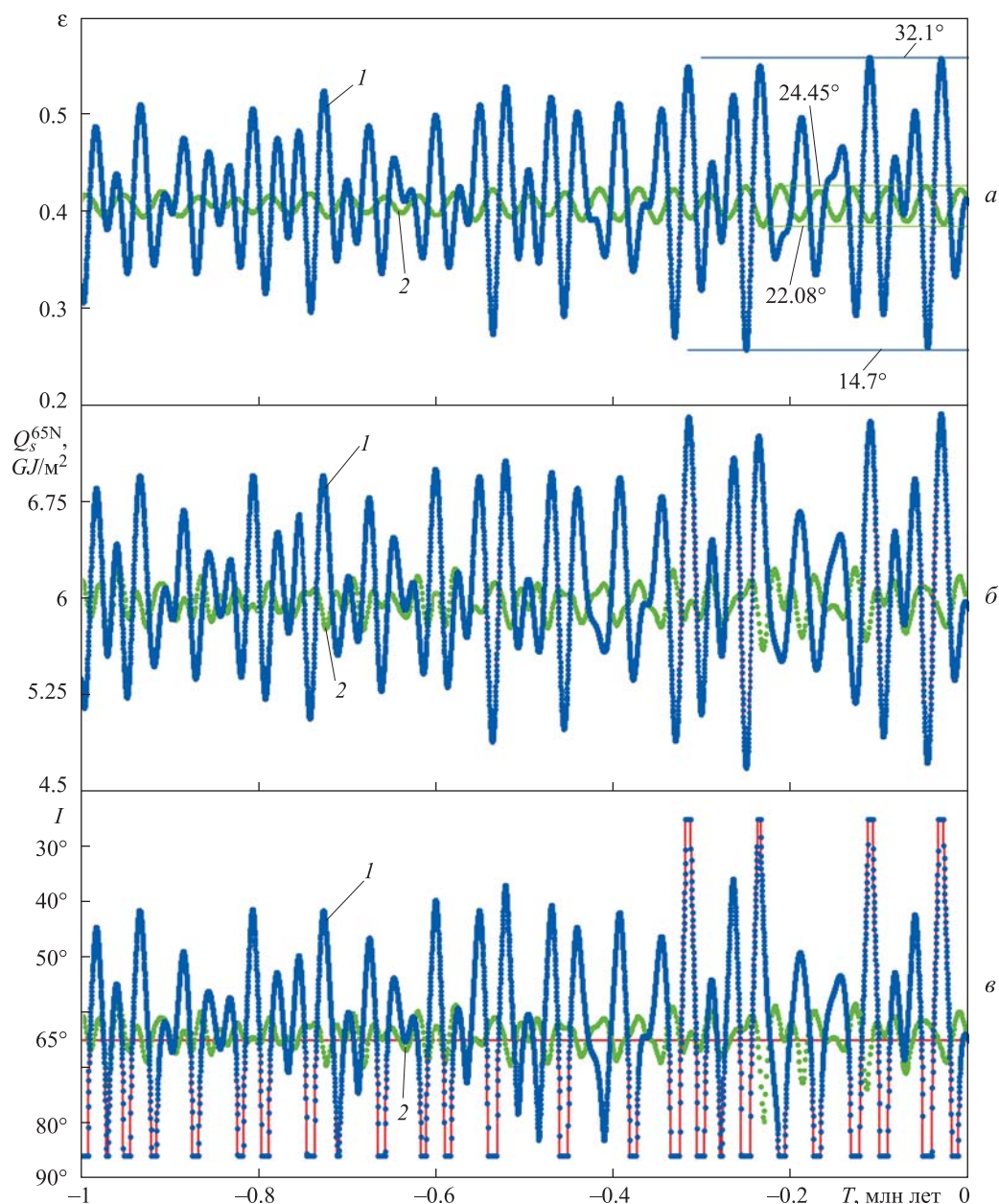


Рис. 2. Эволюция угла наклона ε (а), а также летних инсоляций Q_s^{65N} (б) и I (в) за последний 1 млн лет

I – результаты по новой астрономической теории; 2 – результаты по прежним теориям на примере работы [Laskar et al., 2004]. ε – угол наклона экватора Земли к плоскости ее орбиты, рад. В градусах приведены максимальные и минимальные значения угла ε ; Q_s^{65N} – инсоляция за летнее калорическое полугодие на 65° с.ш., ГДж/м²; I – инсоляция в эквивалентных широтах за летнее калорическое полугодие на 65° с.ш.; T – время, млн л.н. от 30.12.1949 г.

изменение инсоляции в высоких широтах ($\varphi > 45^\circ$), и аналогично ей изменяется количество тепла за год Q_T [Смольский, 2016а]. Поэтому максимумы Q_s^{65N} свидетельствуют о теплых периодах на Земле на широтах $\varphi > 45^\circ$, а минимумы – о холодных периодах.

Как видно на рис. 2, б, самый теплый период с максимумом $Q_s^{65N} = 7.432$ ГДж/м² наступил 31.2 тыс. л.н. Близко к этому значению было потепление 316 тыс. л.н. А максимум летней инсоляции в момент 111.6 тыс. л.н., когда ε достигает максимума, заметно ниже, нежели 31.2 тыс. л.н. Это обусловлено тем, что инсоляция зависит не только от угла ε , но и от других

параметров: эксцентриситета орбиты e и угла положения перигелия φ_{py} . Последний определяет положение перигелия на орбите относительно точки весеннего равноденствия γ , через которую проходит линия пересечения плоскости экватора с плоскостью орбиты. Солнце приходит в точку γ в день весеннего равноденствия. Поэтому угол φ_{py} – это угол между моментами нахождения Солнца в день весеннего равноденствия и в день наименьшего расстояния от Солнца до Земли.

Самый холодный период с инсоляцией $Q_s^{65N} = 4.679$ ГДж/м² наступил 251.2 тыс. л.н. Почти такое же уменьшение количества тепла Q_s^{65N} происходило

46 тыс. л.н. Как видно на графике, на интервале времени больше 330 тыс. л.н. таких больших колебаний климата уже не происходило.

На рис. 2, в эти же данные показаны в виде инсоляции I в эквивалентных широтах. Величина I представляет летнюю инсоляцию Q_s^{65N} в эпоху T как широту φ в современную эпоху $T = 0$, на которой инсоляция также равна Q_s^{65N} . Верхние горизонтальные участки свидетельствуют о том, что летняя инсоляция на 65° с.ш. была больше, чем современная на экваторе, тогда как нижние участки – о том, что эта инсоляция была меньше, чем сейчас на полюсе. Как видно из графика I (линия I на рис. 2, в), за последний 1 млн лет было четыре теплых эпохи, в которые количество солнечного тепла летом было больше, чем сейчас на экваторе. А холодных эпох, когда количество тепла было меньше, чем сейчас на полюсе, насчитывается 23. Не все они одинаковы: одни более интенсивные, другие – менее. Отмеченные на рис. 2, в количества холодных и теплых эпох характерны для инсоляции I на широте 65° . Для инсоляции I на широте 80° количество холодных эпох станет еще больше, тогда как на широте 55° их станет совсем мало, а на широте 45° они вообще исчезнут. (Напомним, что все расчеты рассматриваются для Северного полушария, но проводились расчеты и для Южного полушария.) Поэтому интенсивность похолоданий и потеплений устанавливается по инсоляции Q_s^{65N} [Смутьский, 2016а].

На рис. 2, б–в линиями 2 показаны инсоляции Q_s^{65N} и I , рассчитанные нами на основании параметров ε , φ_{py} и e из работы [Laskar et al., 2004]. Как видно из сравнения с нашими результатами (линии I), колебания инсоляции по прежним теориям в 7–8 раз меньше. У палеоклиматологов такие малые колебания инсоляции всегда вызывали сомнения в том, что они могли приводить к значительным похолоданиям и потеплениям в прошлом [Большаков, Капица, 2011; Смутьский, 2013а]. Наши решения по инсоляции убеждают, что ее колебания, обусловленные взаимодействиями в Солнечной системе, действительно приводят к существенным похолоданиям и потеплениям в высоких широтах. Еще более убедительные свидетельства появляются

при изучении эволюции структуры инсоляций по всему земному шару [Смутьский, 2016а]. Сопоставление новых данных об изменении инсоляции с имеющимися данными о палеоклимате Западной Сибири за последние 50 тыс. лет показало, что ключевые события – оптимум голоцена, сарганское и ермаковское оледенения и каргинское межледниковье между ними – совпадают с экстремумами инсоляции как по времени, так и по интенсивности [Смутьский, 2016а, б]. Эти совпадения позволяют полагать, что представленные на рис. 2 изменения инсоляции за последний 1 млн лет определяют колебания палеоклимата на этом интервале.

КОЛЕБАНИЯ КЛИМАТА ЗА ПОСЛЕДНИЙ 1 МЛН ЛЕТ

На интервале последние 200 тыс. лет мы ввели 13 инсоляционных периодов изменений климата, а также шесть его градаций: от очень холодного до очень теплого [Смутьский, 2016а]. На рис. 3 эти градации климата нанесены на график инсоляции Q_s^{65N} . Линией I показан средний уровень инсоляции на широте 65° . За последние 20 млн лет ее среднее значение составило $Q_{sm} = 6.055$ ГДж/м². По пересечению кривой Q_s^{65N} с линией I определяются границы периодов [Смутьский, 2016а]. На интервале 200 тыс. лет мы ввели инсоляционные периоды $0_p, 1_p, 2_p, \dots, 12_p$. На рис. 3 некоторые из них отмечены. Тем самым следующий минимум Q_s^{65N} можно обозначить как 13_p .

Линиями $2_c, 1_c, 1_p, 2_t$ на рис. 3 обозначены границы начала уровней климата: очень холодного, холодного, теплого, очень теплого соответственно. Как видно по выходу Q_s^{65N} за границы 2_c и 2_p за последний 1 млн лет очень холодных периодов было шесть, а очень теплых – четыре. Значительно больше было холодных периодов, а именно 16, и теплых – 16. Остальные периоды были умеренно холодными и умеренно теплыми. Современная эпоха ($T = 0$) является умеренно холодной. Кроме того, как видно на рис. 3, имеется ряд интервалов времени, когда происходит одно или несколько колебаний инсоляции Q_s^{65N} вокруг среднего значения Q_{sm} . При этом в максимуме не достигается первый теплый

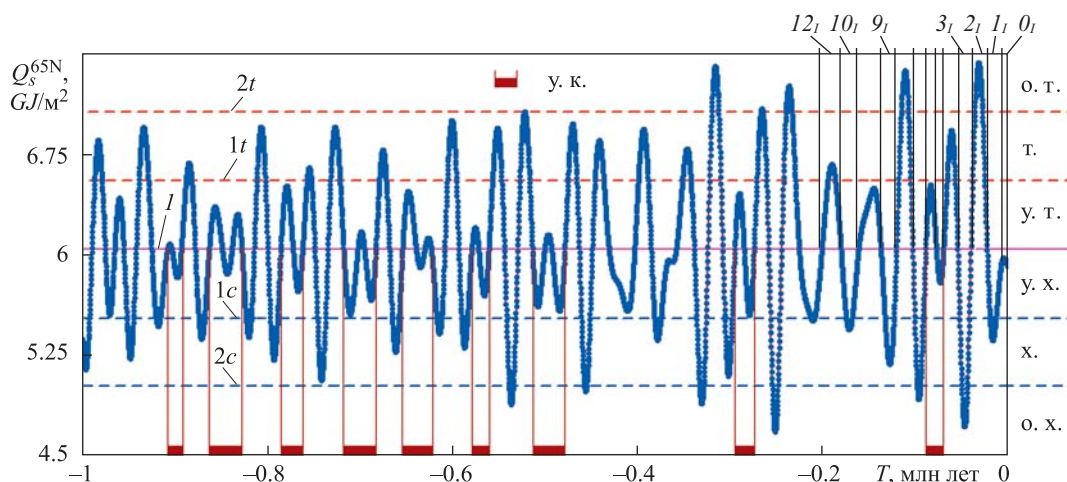


Рис. 3. Уровни изменения климата на фоне вариаций летней инсоляции за последний 1 млн лет

I – средняя инсоляция Q_{sm} ; 1_t и 2_t – соответственно первая и вторая границы теплых уровней; 1_c и 2_c – соответственно первая и вторая границы холодных уровней; у.т., т., о.т. – теплые уровни (у – умеренно; о – очень); у.х., х., о.х. – холодные уровни (у – умеренно; о – очень); у.к. – периоды умеренного климата. $0_p, 1_p, \dots, 12_p$ – инсоляционные периоды

уровень (I_1) климата, а в минимуме – первый холодный (I_2) уровень климата, поэтому их можно назвать периодами умеренного климата (у.к.). На рис. 3 эти периоды отмечены как «у.к.» и затушеваны на оси времени T . За последний 1 млн лет их было 9. В периоды умеренного климата имеются фазы потепления и похолодания, но их интенсивность не доходит до границ уровней теплового и холодного климата. Таких фаз в период умеренного климата может быть несколько.

ЭВОЛЮЦИЯ ОРБИТАЛЬНОГО И ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЙ ЗЕМЛИ И ЕЕ ИНСОЛЯЦИИ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 5 МЛН ЛЕТ

Как уже отмечалось, инсоляция Земли зависит от трех параметров орбитального и вращательного движений Земли – e , φ_{pp} и ε . Их эволюция, а также изменение инсоляций Q_s^{65N} и I за последние 5 млн лет приведены на рис. 4. На этом интервале эксцентриситет e колеблется в пределах от 0.0022 до 0.0629 с периодами 94.5 тыс. лет, 413 тыс. лет и 2.31 млн лет (см. рис. 4, а).

Угол φ_{pp} перигелия изменяется от 1.776 рад. на 30.12.1949 г. до -1445.7 рад. в эпоху 5 млн л.н. Это изменение свидетельствует о вращении перигелия в направлении орбитального движения Земли. На рис. 4, б приведены текущие периоды T_{pp} вращения на интервалах в 20 тыс. лет. Как видно, периоды вращения неравномерные, они изменяются от 13.8 до 41.8 тыс. лет. В среднем эти изменения происходят в пределах от 19 до 25 тыс. лет; средний за последние 5 млн лет период вращения перигелия $T_{ppm} = 21.7$ тыс. лет.

Колебания угла наклона ε происходят нерегулярно и с разными амплитудами (см. рис. 4, в). Основным периодом колебания, средний за последние 5 млн лет, $T_{\varepsilon m} = 25.73$ тыс. лет. Он равен периоду прецессии оси Земли. Период колебаний в конкретную эпоху может отличаться от среднего периода примерно на 1000 лет. Могут быть и более существенные отличия: например, 4.6 млн л.н. один минимум ε вырождается, и за три интервала $T_{\varepsilon m}$ происходит два колебания, т.е. период колебаний становится равным 38.6 тыс. лет. Амплитуда колебаний переменная и изменяется от нулевой до максимальной равной 9° . В среднем амплитуда составляет 2.74° , а среднее значение угла наклона равно 23.8° при современном его значении 23.44° .

На интервале последние 5 млн лет нет повторяющихся участков изменения угла наклона ε . Распределение больших амплитуд колебаний также нерегулярно. Имеются два участка с очень большими амплитудами: 0–0.25 млн л.н. и 2.2–2.8 млн л.н. Также имеются участки с очень малыми амплитудами колебаний, например, ≈ 3.3 млн л.н. и ≈ 4.2 млн л.н. Экстремальные значения ε приведены на рис. 4, в: 32.68° в эпоху $T = 2.6582$ млн л.н. и 14.68° в эпоху $T = 0.2508$ млн л.н. Таким образом, наибольшая амплитуда колебаний оси Земли за последние 5 млн лет составляет $\Delta\varepsilon_{Amx} = 9^\circ$.

Колебания летней инсоляции Q_s^{65N} , как и угла наклона ε , происходят нерегулярно и с разными амплитудами (см. рис. 4, г). Основным периодом колебания, средний за последние 5 млн лет, $T_{Q_s^{65N}} = T_\varepsilon = 25.73$ тыс. лет. Период колебаний в конкретную эпоху может отличаться от среднего периода на 1000 лет, а при вырождении промежуточных колебаний, например 4.4 млн л.н., может быть

порядка 38.6 тыс. лет. Амплитуда колебаний переменная и изменяется от нулевой до максимальной равной 1.38 ГДж/м². В среднем амплитуда равна 0.426 ГДж/м², а среднее значение летней инсоляции – 6.060 ГДж/м² при современном его значении 5.922 ГДж/м².

Картина колебаний летней инсоляции Q_s^{65N} (см. рис. 4, г) подобна колебаниям ε , но полностью с ними не совпадает. Соотношение между экстремумами может быть другим, например первые четыре наибольших колебания инсоляции Q_s^{65N} на интервале 0–0.3 млн л.н. рассогласованы по амплитуде с первыми наибольшими колебаниями ε . Отмеченные для угла ε участки больших колебаний имеются также для колебаний инсоляции Q_s^{65N} . Однако встречаются случаи очень низких значений инсоляции Q_s^{65N} , например в эпоху $T \approx 1.5$ млн л.н., в то время как угол ε при этом не достиг еще самого низкого минимума.

Мы полагаем, что большие значения инсоляции Q_s^{65N} отмечают теплые периоды в высоких широтах, а малые – ледниковые периоды. Поэтому в целом из сравнения графиков Q_s^{65N} и ε следует, что большие значения угла наклона ε приводят к потеплениям в высоких широтах, а малые – к оледенениям.

На рис. 4, д показана эволюция летней инсоляции I в эквивалентных широтах за последние 5 млн лет. Как уже упоминалось, самые нижние значения $I \approx 90^\circ$ свидетельствуют, что на 65° с.ш. летом тогда тепла было меньше, чем сейчас на полюсе. Самые верхние значения $I \approx 23^\circ$ отмечают эпохи, когда летом тепла на 65° с.ш. было больше, чем сейчас в тропиках (т.е. в экваториальной области). Таких эпох за последние 5 млн лет было 15. Все похолодания с $I \approx 90^\circ$ были неодинаковыми, и самых сильных было примерно столько же, сколько и самых сильных потеплений, т.е. 15. Преимущественно, как видно из графика Q_s^{65N} (см. рис. 4, г), сильные похолодания сопутствуют сильным потеплениям, поэтому к положениям 15 максимумов I может быть привязано примерно столько же сильных похолоданий. Как видно из графика I , распределение значительных колебаний климата неравномерно на интервале последние 5 млн лет: имеются интервалы 0.3–1.3 и 2.8–3.8 млн л.н., когда такие большие колебания климата не происходили (см. рис. 4, д).

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНСОЛЯЦИИ ПО ШИРОТЕ В САМУЮ ТЕПЛУЮ И САМУЮ ХОЛОДНУЮ ЭПОХИ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 20 МЛН ЛЕТ

На рис. 5 сопоставлены инсоляции за год Q_T , за летнее Q_s и зимнее Q_w калорические полугодия за три эпохи на интервале последние 20 млн лет: в современную $T = 0$, в самую теплую $T = 9.2475$ млн л.н. и в самую холодную $T = 18.945$ млн л.н. Эти эпохи характеризуются следующими значениями летней инсоляции на 65° с.ш. (Q_s^{65N}): 5.9, 7.58 и 4.51 ГДж/м² соответственно. Углы наклона ε в эти эпохи составляли 23.44° , 32.66° и 14.06° соответственно.

Летняя инсоляция Q_s принимает минимальное значение на полюсах и достигает максимума в тропических широтах ($\varphi = \varepsilon$), а вблизи экватора имеет локальный минимум. От холодной эпохи (линия 3) к теплой (линия 2) летняя инсоляция Q_s на полюсах изменяется более чем в 2.2 раза. На широте 65° она изменяется в 1.68

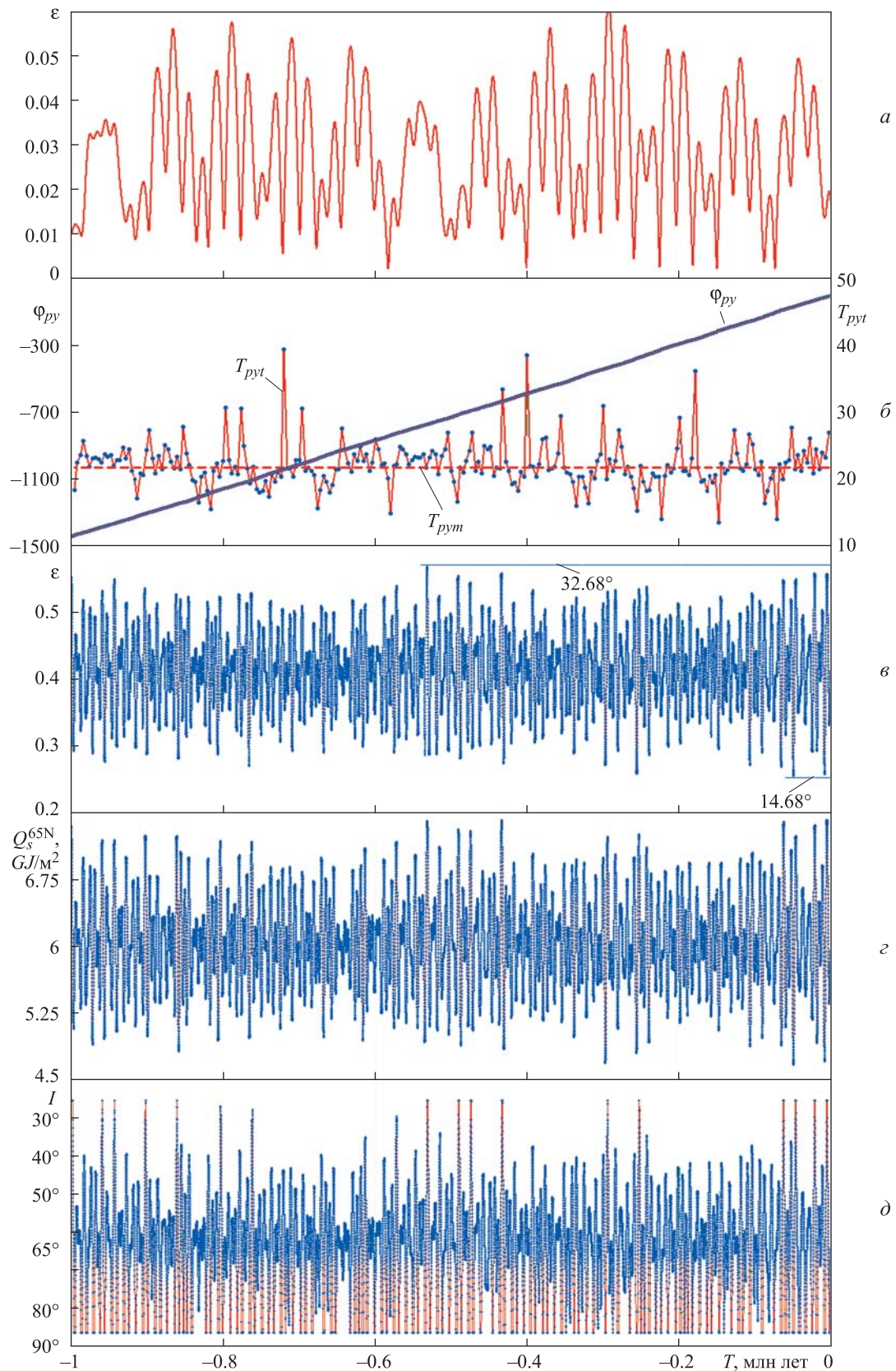


Рис. 4. Эволюция эксцентриситета орбиты Земли e (а), угла положения перигелия φ_{py} (б), угла наклона ε (в), а также летних инсоляций Q_s^{65N} (г) и I (д) за последние 5 млн лет

T_{pyt} – текущий период вращения перигелия (тыс. лет), скользящий средний на интервале времени 20 тыс. лет; $T_{pyt} = 21.7$ тыс. лет – средний период вращения перигелия. Ост. обозн. см. на рис. 2

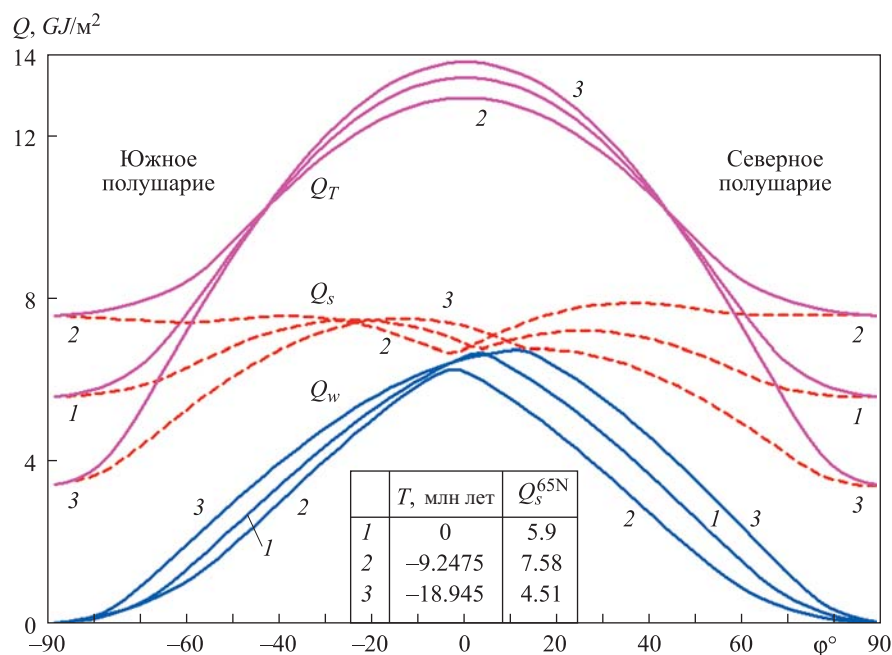


Рис. 5. Сравнение широтных изменений инсоляций за год Q_T , летней Q_s и зимней Q_w за три эпохи в течение последних 20 млн лет

Эпохи: 1 – современная; 2 – самая теплая; 3 – самая холодная. Q_s^{65N} – инсоляция за летнее калорическое полугодие на 65° с.ш., ГДж/м²; T – время от 30.12.1949 г., млн л.н.

раза. В теплую эпоху (линия 2) летняя инсоляция Q_s имеет экваториальный минимум в Южном полушарии, а в холодную эпоху (линия 3) – в Северном полушарии. При этом в холодную эпоху северный максимум инсоляции Q_s практически вырождается, и она имеет только один максимум в Южном полушарии. Таким образом, эта холодная эпоха – $T = 18.945$ млн л.н. – характеризуется очень холодным летом во всем Северном полушарии.

Зимняя инсоляция Q_w на полюсах равна нулю и монотонно возрастает к экватору. В экваториальной области Q_w имеет максимум на той же широте ϕ , на которой расположен минимум летней инсоляции Q_s . От холодной эпохи (линии 3) к теплой (линии 2) зимняя инсоляция Q_w больше всего изменяется на средних широтах, при этом для рассматриваемых эпох изменения в Северном полушарии почти в 2 раза больше, чем в Южном. Зимняя инсоляция в холодную эпоху (линии 3) на всех широтах больше, чем в теплую эпоху (линии 2), т.е. зимы в холодные эпохи теплее, нежели в теплые.

Годовая инсоляция Q_T монотонно увеличивается от полюсов к экватору. На экваторе находится ее максимум, и годовая инсоляция симметрична относительно экватора, т.е. количество тепла за год одинаково в обоих полушариях. От холодной эпохи (линии 3) к теплой (линии 2) инсоляция Q_T за год на полюсах увеличивается почти во столько же раз, что и летняя Q_s . С уменьшением широты разница между годовыми инсоляциями уменьшается, и на широте $\approx 45^\circ$ годовая инсоляция не изменяется. В экваториальной области изменения Q_T обратны ее изменениям в высоких широтах: в холодную эпоху (линии 3) тепла за год больше, чем в теплую (линии 2), например на экваторе величина Q_T в

холодную эпоху больше в 1.07 раза по сравнению с теплой, при этом изменение инсоляции Q_T в 4 раза меньше, чем в высокоширотной области. Таким образом, основные изменения инсоляции происходят в высоких широтах.

ЭВОЛЮЦИЯ ЛЕТНЕЙ ИНСОЛЯЦИИ Q_s^{65N} ЗА ПОСЛЕДНИЕ 20 МЛН ЛЕТ

Представленные на рис. 4 изменения угла наклона и инсоляции за последние 5 млн лет имеют вид почти сливающихся колебаний на интервале последних 20 млн лет, поэтому рассмотрение в таком виде этих параметров за большие промежутки времени уже невозможно. В то же время существует необходимость визуальной оценить изменения инсоляции Земли за весь исследованный интервал времени – 20 млн лет. С этой целью на рис. 6 представлено изменение инсоляции Q_s^{65N} (линии 1) с разбивкой на 10 интервалов по 1 млн лет за первые 10 млн лет (от настоящей эпохи до 10 млн л.н.), а на рис. 7 – за следующие 10 млн лет (с 10 млн л.н. до 20 млн л.н.). Для сравнения приведены результаты прежних теорий на примере работы [Laskar et al., 2004] (линии 2). На этих графиках нанесены границы первого и второго теплых уровней (1c, 2c) и первого и второго холодных уровней (1s, 2s). Эти границы позволяют классифицировать динамику изменения палеоклимата за последние 20 млн лет.

Как видно на рис. 6, за первый 1 млн лет, с левым отсчетом оси времени $T_1 = -1$ млн лет = 1 млн л.н., было четыре периода с $Q_s^{65N} > 2t$ и шесть периодов с $Q_s^{65N} < 2c$, т.е., как уже отмечалось ранее, было четыре очень теплых периода и шесть очень холодных. Величины

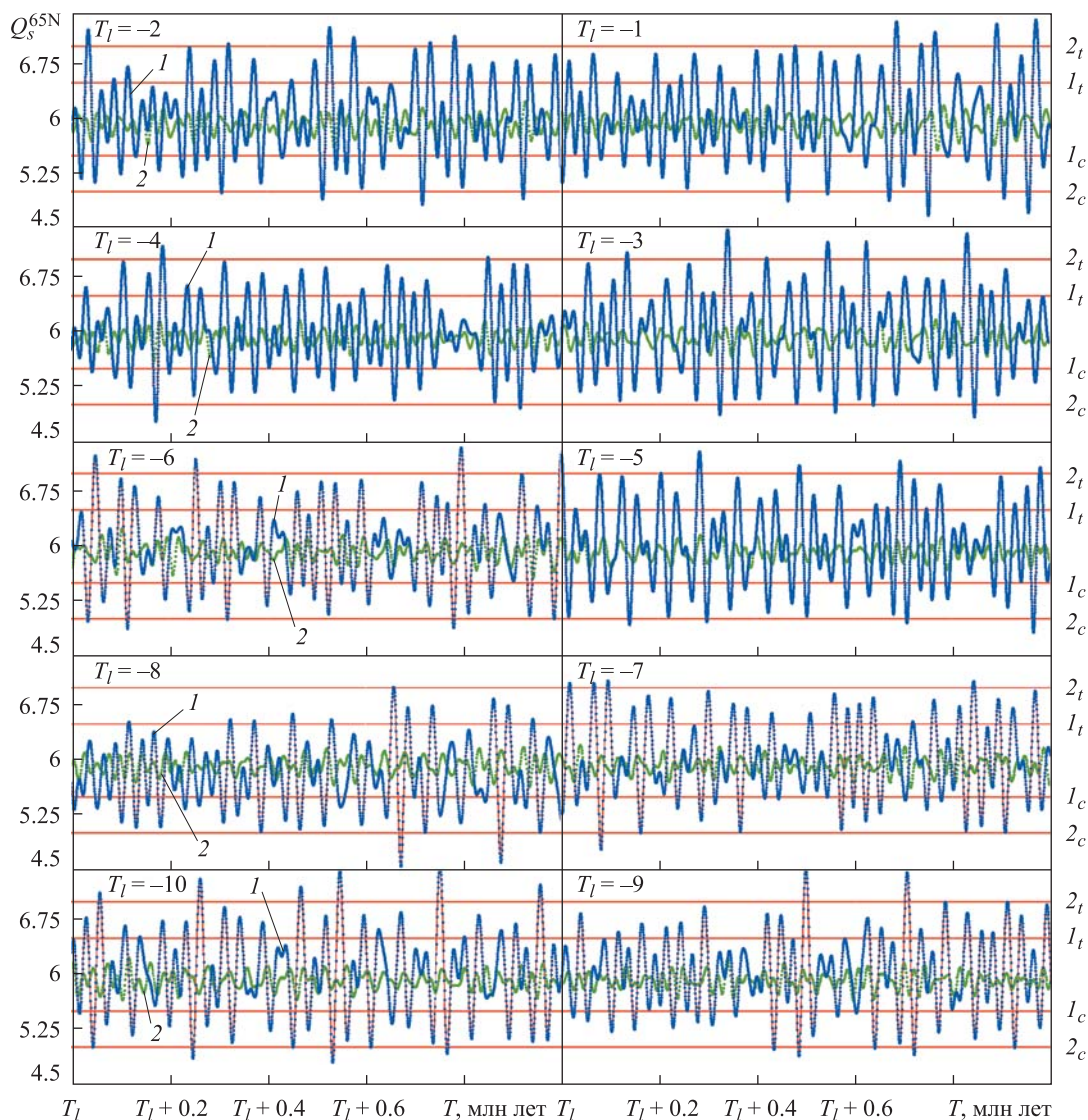


Рис. 6. Эволюция летней инсоляции Q_s^{65N} за последние 10 млн лет с разбивкой на 10 интервалов по 1 млн лет по нашим результатам (1) и по результатам [Laskar et al., 2004] (2)

T_l – левый отсчет по оси времени, млн лет; 1_t , 2_t и 1_c , 2_c – первая и вторая границы теплых (t) и холодных (c) уровней соответственно

Q_s^{65N} по-разному превышают вторые уровни, поэтому эти периоды имеют разную интенсивность и разную длительность. Пренебрегая этим отличием, классифицируем палеоклимат на миллионлетних интервалах времени по количеству превышений вторых уровней 2_t и 2_c (табл. 1). Всего было 122 превышения вторых уровней, из них 67 случаев очень теплого климата и 55 – очень холодного. Таким образом, в среднем за 1 млн лет происходит около шести превышений вторых уровней, при этом очень теплых периодов в среднем имеется 3.4, а очень холодных – 2.8.

Распределим миллионлетние интервалы на три группы климата: обычного, неспокойного и спокойного. С учетом среднего числа превышений равного 6 к группе обычного климата отнесем интервалы с числом превышений от 5 до 7. Как видно из приведенных в табл. 1 данных, их было 8. В группе обычного климата (например, интервал с $T_l = 12$ млн л.н. на рис. 7) может быть по три очень теплых периода

и по три очень холодных. В других миллионлетних интервалах количество тех или иных периодов может на единицу отличаться. Только на интервале с $T_l = 7$ млн л.н. было четыре очень теплых периода и лишь один очень холодный.

К группе неспокойного климата отнесем интервалы с числом превышений от 8 до 10. Как видно из данных табл. 1, в них может быть до шести очень теплых периодов, как в интервале $T_l = 10$ млн л.н., и до шести очень холодных периодов (как в интервале $T_l = 1$ млн л.н.). Таких интервалов неспокойного климата имеется 7. Последний миллион лет ($T_l = 1$ млн л.н.), в котором мы живем, входит в эту группу, при этом последние колебания инсоляции, превышающие уровень 2, происходили 300 тыс. л.н.

К группе спокойного климата отнесем интервалы с числом превышений от 2 до 4. Таких интервалов было пять. В этих миллионлетних интервалах бывает либо по одному очень тепломu и одному очень холодному

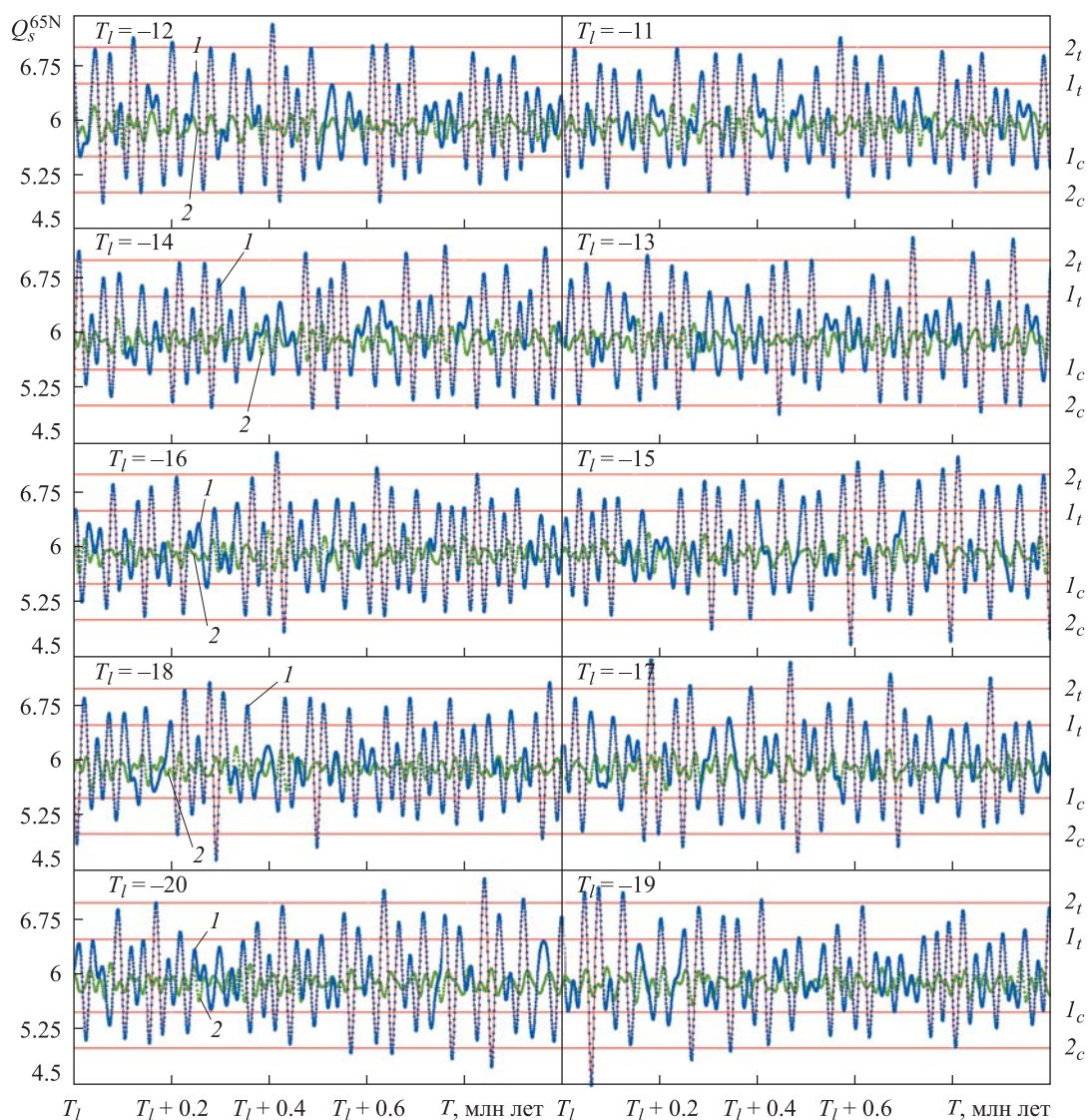


Рис. 7. Эволюция летней инсоляции Q_s^{65N} в интервале 10–20 млн л.н. с разбивкой на 10 интервалов по 1 млн лет

Обозн. см. на рис. 6

периоду, как в интервале с $T_l = 11$ млн л.н., либо по два таких периода ($T_l = 9$ млн л.н.). В других интервалах спокойного климата число сильных похолоданий или сильных потеплений не превышает двух.

Как уже отмечалось, в этой классификации миллионлетних интервалов не учитывается интенсивность и продолжительность сильных потеплений и похолоданий. В работе [Смульский, 2016б] была выполнена классификация по инсоляции I в эквивалентных широтах. Как видно из приведенных на рис. 2 и 4 данных, при достижении величиной I наибольших значений появляются очень теплые периоды, когда на широте 65° летом поступает больше тепла, чем сейчас в экваториальной зоне. При классификации по этим периодам учитываются интенсивность и длительность очень теплых периодов, однако в этом случае не учитывается распределение очень холодных периодов. В работе [Смульский, 2016б] их количество приравнено количеству холодных периодов. В такой классификации

миллионлетние интервалы также разбиты на три группы: беспокойного, обычного и спокойного климата. Эти две классификации в общем согласуются. Дополнительное применение инсоляции I при классификации по инсоляции Q_s^{65N} позволяет учесть интенсивность и продолжительность очень теплых периодов. Таких периодов по классификации по I было 47. Тем самым из 67 очень теплых периодов по классификации с Q_s^{65N} можно исключить 20 периодов, не достигших определенной интенсивности и длительности.

На рис. 6 и 7 каждый из пяти графиков – это график за два последовательных периода по 1 млн лет. В середине этих двухмиллионлетних интервалов имеются несколько интервалов по 1 млн лет, когда больших колебаний инсоляции не было, т.е. они также относятся к группе спокойного климата.

Представленные на рис. 6 и 7 результаты и их анализ показывают, что на интервале последние 20 млн лет происходят стабильные колебания угла наклона ϵ

Таблица 1. Количество случаев, когда летняя инсоляция Q_s^{65N} больше второго теплого уровня 2_t или меньше второго холодного 2_c на миллионлетних интервалах времени

T_t	2_t	2_c	$2_t + 2_c$
1	4	6	10
2	5	3	8
3	5	3	8
4	1	2	3
5	5	3	8
6	3	2	5
7	4	1	5
8	0	2	2
9	2	2	4
10	6	3	9
11	1	1	2
12	3	3	6
13	4	3	7
14	5	2	7
15	4	4	8
16	2	1	3
17	4	4	8
18	2	4	6
19	4	2	6
20	3	4	7
Всего	67	55	122

Примечание. T_t – левая граница миллионного интервала, млн л.н.; $2_t + 2_c$ – сумма выходов за пределы уровней 2_t и 2_c .

и инсоляции I . Проявившиеся за первые 50 тыс. лет пределы колебаний угла ε от 14.8 до 32.1° [Смольский, 2016а] остаются практически неизменными в течение 20 млн лет.

Экстремальные углы наклона и значения инсоляции появляются в нерегулярном порядке. Такой нерегулярный порядок наступления событий обычно называют хаотическим, однако в данном случае эти события строго детерминированы и происходят в результате влияния многих факторов, определяющих орбитальное движение тел Солнечной системы и вращательное движение Земли. Поэтому рассматриваемый пример является тем случаем, когда события, воспринимаемые нами как хаотически происходящие, оказываются обусловленными строго детерминированными причинами. В данном случае этими детерминированными причинами являются: 1) гравитационное воздействие планет, Солнца и Луны на орбитальное движение Земли; 2) воздействие этих тел на вращательное движение Земли; 3) влияние параметров этих движений на инсоляцию Земли.

Итак, глобальные изменения климата на Земле на рассматриваемых интервалах времени происходят нерегулярно, но строго детерминированно. По-видимому, и другие события, например короткопериодические изменения климата или изменения погоды, со временем будут рассмотрены с учетом всех влияющих факторов и, несмотря на их кажущуюся хаотичность, будут строго детерминированно определены.

Рассмотренные выше изменения инсоляции и разные составляющие движения Земли могут быть получены любым исследователем с помощью программы *Insl2bd.mcd*, которая имеется в свободном доступе [Смольский, 2013б]. Теория расчета инсоляции содержится в работе [Smulsky, Krotov, 2014]. Параметры орбитального и вращательного движений Земли за последние 5 млн лет представлены в файле *OrAl0-5Mu.prn*, на интервале 6–10 млн л.н. – в файле *OrAl-5-10Mu.prn* и на интервале 11–20.369 млн л.н. – в файле *OrAl-11-20Mu.prn*.

ИЗМЕНЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ИЗОТОПА КИСЛОРОДА ^{18}O В МОРСКИХ ОТЛОЖЕНИЯХ ПО ГЛУБИНЕ

В последние годы в литературе по палеоклимату стало традицией привязывать все события к морским изотопным стадиям (МИС). Сформировалось представление, что морские изотопные стадии однозначно определяют сменяющие друг друга эпохи потепления и похолодания и хорошо совпадают с результатами астрономической теории изменения климата [Калмычков и др., 2007]. Чтобы удостовериться в этом, рассмотрим развитие и состояние исследований по этой проблеме.

Морские изотопные стадии определены по содержанию изотопа кислорода ^{18}O в глубоководных отложениях Мирового океана. В настоящее время в атмосфере Земли среднее содержание трех стабильных изотопов кислорода составляет: ^{16}O – 99.759 %; ^{17}O – 0.037 %; ^{18}O – 0.204 % [Макрыгина, 2011]. Содержание изотопа ^{18}O по отношению к ^{16}O в атмосфере равно $r_a = ^{18}\text{O}/^{16}\text{O} = 2.045 \cdot 10^{-3}$. В морских отложениях, ледовых кернах, сталагмитах и других объектах величина r не сильно отличается от этой величины, поэтому содержание изотопа ^{18}O приводят по отношению к стандарту в тысячных долях, или промилле (‰):

$$\delta^{18}\text{O} = 1000 \cdot (r - r_s) / r_s, \quad (1)$$

где r_s – кислородное отношение для стандарта.

Со временем стандарт и значение r_s изменяются. Раньше в качестве стандарта использовался стандарт PDB, название которого происходит от белемнитов из формации P-D меловых отложений Южной Каролины, США. (Эти белемниты были выбраны в качестве стандарта по причине очень однородного изотопного состава.) С 1990-х годов Международным агентством по атомной энергии (г. Вена, Австрия) рекомендуется использовать стандарты VPDB ($r_{s,VPDB} = 2.067 \cdot 10^{-3}$) на основе белемнитов и VSMOW ($r_{s,VSMOW} = 2.052 \cdot 10^{-3}$) на основе средней океанической воды.

Когда со второй половины XX в. началось исследование глубоководных отложений Мирового океана, оказалось, что в этих отложениях наблюдается некоторое изменение $\delta^{18}\text{O}$, особенно на первых десятках метров толщины отложений. На рис. 8 приведено изменение

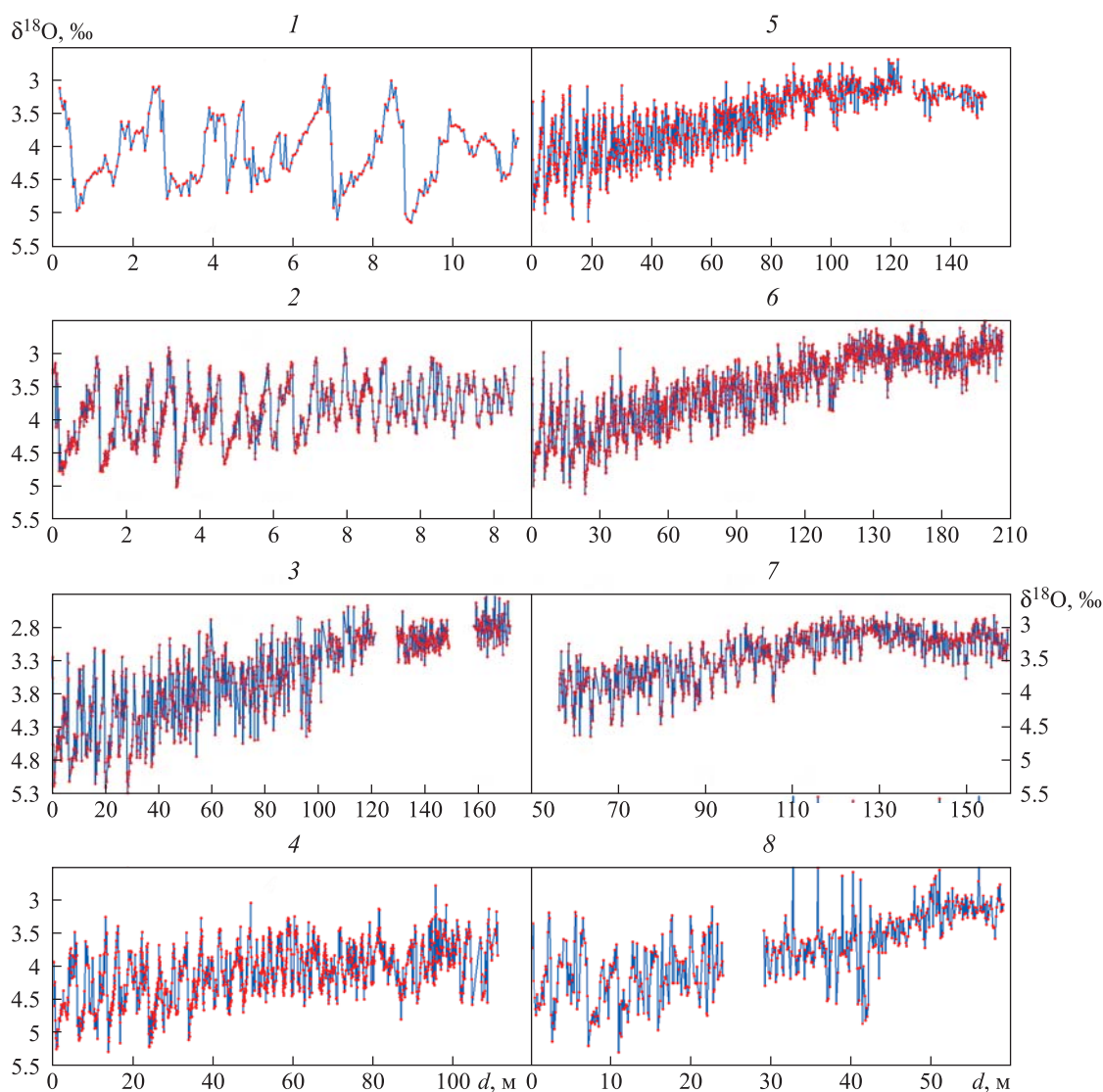


Рис. 8. Изменение содержания изотопа кислорода $\delta^{18}\text{O}$ в глубоководных отложениях Мирового океана по данным разных авторов по отношению к стандарту PDB

1 – по [Bickert, Wefer, 1996]; 2 – по [Herbert et al., 2001]; 3 – по [Bickert et al., 1997]; 4 – по [Shackleton et al., 1990]; 5 – по [Mix et al., 1995a]; 6 – по [Mix et al., 1995b]; 7 – по [Haug, Tiedemann, 1998]; 8 – по [Shackleton, Hall, 1984]. 1–7 – цит. по [Lisiecki, Raymo, 2005]. d – глубина от морского дна, м

$\delta^{18}\text{O}$ в отложениях из разных мест Атлантического (1, 3, 7, 8) и Тихого (2, 4, 5, 6) океанов. В основном скважины находились в экваториальных широтах; лишь скв. 8 располагалась на 56° с.ш. При построении графиков использовалась перевернутая шкала: меньшие значения наверху, а большие – внизу. Толщина отложений варьировала от 11.62 м (график 1) до 206.26 м (график 6). Величина $\delta^{18}\text{O}$ изменяется от 2.5 до 5.3 ‰.

Отметим общие закономерности. На начальных глубинах отложений, например для графика 1 до глубины 10 м, а для графика 3 до глубины 35 м, содержание изотопа кислорода $\delta^{18}\text{O}$ колеблется вокруг среднего значения $\delta^{18}\text{O}_{m0} \approx 4.05 \pm 0.15$ ‰. Амплитуда наибольших колебаний $\delta^{18}\text{O}_{d0} \approx 1$ ‰. Наряду с наибольшими колебаниями присутствуют более частые колебания, но с меньшими амплитудами.

Начиная с глубины 30–40 м среднее значение содержания изотопа кислорода $\delta^{18}\text{O}_m$ в отложениях начинает уменьшаться (на графиках поднимается вверх) и к концу интервалов глубины d опускается до $\delta^{18}\text{O}_{mf} \approx 3$ ‰ и даже до 2.8 ‰ для графика 3.

Структура колебаний $\delta^{18}\text{O}$ в глубоководных отложениях в пределах глубины 50 м показана на рис. 9. Верхние точки графиков пронумерованы с 1s по 15s в соответствии с морскими изотопными стадиями согласно работе [Lisiecki, Raymo, 2005]. Вверху отложений ($d = 0$) отмечается минимальное значение содержания изотопа кислорода $\delta^{18}\text{O}$ порядка 3 ‰ (на графиках – самая верхняя точка), после чего идет быстрое увеличение (на некоторых графиках с колебаниями) до величин порядка 5 ‰. После этого максимума идет более плавное колебательное уменьшение до следующего минимума порядка 3 ‰. Такие серии пилообразного вида с

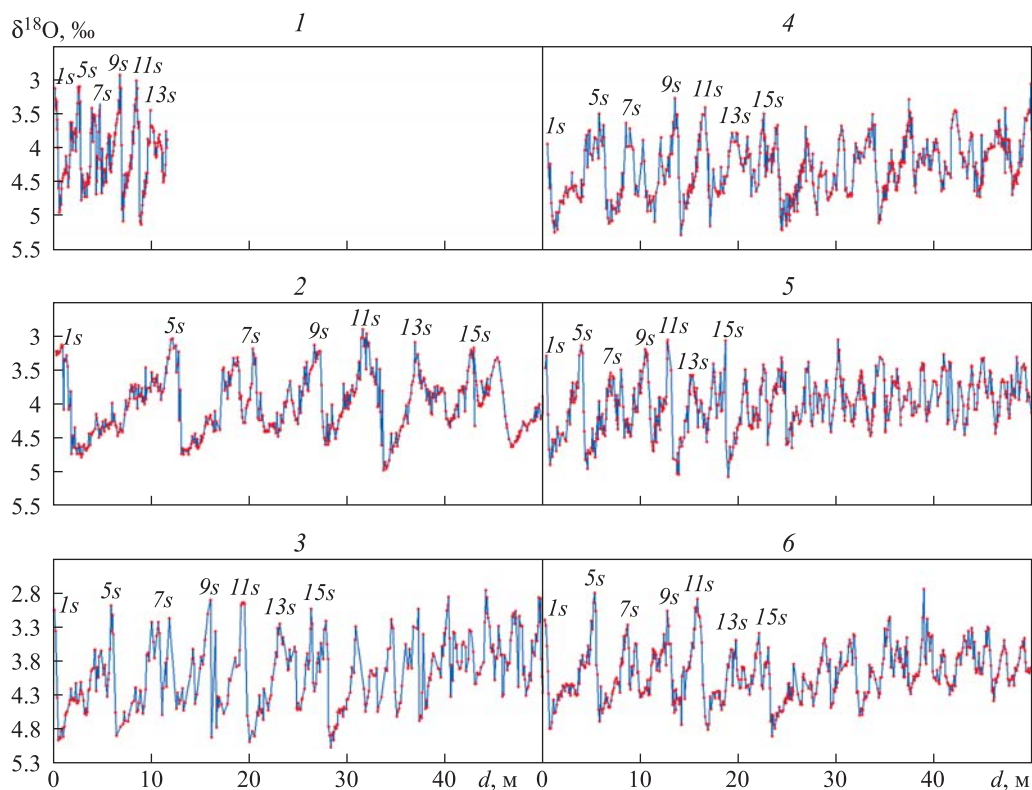


Рис. 9. То же, что на рис. 8, но в пределах 50-метровой толщины глубоководных отложений
1–6 – то же, что на рис. 8. 1s–15s – экстремумы морских изотопных стадий MIS1–MIS15 соответственно

крутым увеличением и плавным уменьшением изотопа $\delta^{18}\text{O}$ повторяются 3–4 раза. На каждой скважине серии таких колебаний по форме различны, однако первые две серии качественно подобны на разных скважинах. Для третьей и четвертой серий это подобие исчезает.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ВАРИАЦИЙ ИЗОТОПА ^{18}O НАКОПЛЕНИЯМИ ИЗОТОПА ^{16}O В ЛЕДНИКОВЫХ ШИТАХ

Существование серий колебаний $\delta^{18}\text{O}$ в глубоководных отложениях привело к предположению, что все они обусловлены одними и теми же внешними изменениями. В качестве этих внешних изменений принято изменение климата. В этом предположении прослеживается следующая логика.

Повышенное содержание более тяжелого изотопа ^{18}O в раковинах отложений может свидетельствовать о повышенном содержании этого изотопа в морской воде соответствующего времени. А повышенное его содержание в морской воде может быть, в свою очередь, объяснено более легким испарением из воды изотопа ^{16}O и накоплением его в полярных ледниковых щитах. Тогда уменьшенное содержание $\delta^{18}\text{O}$ в отложениях должно свидетельствовать об обогащении воды Мирового океана более легким изотопом ^{16}O за счет таяния ледниковых щитов, которое возможно при потеплении климата. Тогда, возвращаясь к графикам $\delta^{18}\text{O}$ на рис. 8 и 9, верхние экстремумы серий, которые являются минимумами $\delta^{18}\text{O}$, можно интерпретировать как теплые периоды, а нижние экстремумы – как ледниковые периоды.

Астрономическая теория изменения климата дает функциональную зависимость количества солнечного тепла от времени для разных широт Земли. Ее создатель, М. Миланкович, показал, что изменение летней инсоляции на широте 65° в Северном полушарии может служить индикатором потеплений и похолоданий в высоких широтах Земли. Поэтому возникло естественное желание связать между собой экстремумы $\delta^{18}\text{O}$ и экстремумы инсоляции и тем самым определить возраст колебаний изотопной кривой. Эта работа проводилась разными группами ученых на протяжении более двух десятков лет (табл. 2).

В работе [Lisiecki, Raymo, 2005] упоминается 10 групп ученых, которые работали над этой проблемой. Изучалось содержание $\delta^{18}\text{O}$ в раковинах донных организмов (бентос) или обитающих в поверхностном слое (планктон). Так как предполагается, что общие одинаковые условия приводят к одинаковому изменению $\delta^{18}\text{O}$ в отложениях из разных мест Мирового океана, появляется цель создать один набор изменений $\delta^{18}\text{O}$, который будет обобщать данные по нескольким скважинам. В табл. 2 некоторым обобщающим наборам присвоены имена, как правило, по первым буквам фамилий авторов. Указан также возраст каждого набора; буквой n отмечены наборы, для которых авторы не определяли возрастную шкалу. Последний набор LR04 [Lisiecki, Raymo, 2005] включает наибольшее число скважин и имеет наибольшую протяженность по времени. Создание общего набора по данным нескольких скважин и присвоение ему возраста осуществляется методами, которые со временем развиваются и совершенствуются.

Таблица 2. Примечательные наборы $\delta^{18}\text{O}$ в фораминиферах океанических отложений (цит. по [Lisiecki, Raymo, 2005])

Набор, источник	Исследуемый материал*	Приблизительная длина временного интервала
SPECMAP [Imbrie et al., 1984]	5p	750 тыс. лет
[Pisias et al., 1984]	5b	300 тыс. лет (<i>n</i>)
[Prell et al., 1986]	11p, 2b	750 тыс. лет (<i>n</i>)
[Williams et al., 1988]	3p, 1b	1.9 млн лет
[Raymo et al., 1990]	3b	2.5 млн лет
[Bassinot et al., 1994]	2p	900 тыс. лет
S95, сост. [Shackleton et al., 1995]	3b, в рядах	6 млн лет
[Karner et al., 2002]	6–13b	860 тыс. лет
NW04 [Huybers, Wunsch, 2004]	5p, 5b	780 тыс. лет
LR04 [Lisiecki, Raymo, 2005]	57b	5.3 млн лет

* Цифры – количество скважин; p – планктон; b – бентос.

СПЕЦИФИКА ИЗМЕНЕНИЯ $\delta^{18}\text{O}$ В КОНКРЕТНОЙ СКВАЖИНЕ

В одном из первых наборов изменений содержания $\delta^{18}\text{O}$ [Shackleton, Hall, 1984] авторы присваивали возраст по шкале палеомагнитных инверсий (табл. 3). В упомянутой работе исследовалось содержание $\delta^{18}\text{O}$ в бентосе отложений Атлантического океана (скв. 552A; 56°02.56' с.ш., 23°13.39' в.д.), находящихся на глубине 2311 м. Возраст для всего исследованного керна длиной $d_{\text{max}} = 58.97$ м был определен интерполяцией данных табл. 3. На рис. 10 представлено изменение $\delta^{18}\text{O}$ за последние 1.2 млн лет в виде графика 1 и на интервале от 1.49 до 3.51 млн л.н. в виде графика 2. На графике 1 можно уверенно различить только три характерные серии с вершинами 1s, 5s, 7s и 9s на интервале 0–550 тыс. л.н., при этом вершины приходятся на эпохи: 1s – 5 тыс. л.н.; 5s – 109.5 тыс. л.н.; 7s – 249 тыс. л.н.; 9s – 530 тыс. л.н. Вершины, как отмечалось, представляют собой максимумы потеплений. Расстояния между ними составляют 104.5, 139.5 и 281 тыс. лет соответственно. Таким образом, временные интервалы для этих серий изменяются более чем в 2 раза; подобие колебаний в них также весьма условное. Идентифицировать дальнейшие серии, даже с таким подобием, затруднительно.

Рассмотрим специфику изменения изотопа кислорода $\delta^{18}\text{O}$, приведенную в работе [Shackleton, Hall, 1984]. Содержание $\delta^{18}\text{O}$ определялось в 21 виде придонных организмов. Так как содержание ^{18}O в каждом виде отличается, авторы ввели соответствующие поправки. Например, для вида *Uvigerina peregrina* она равна нулю, для *Cibicidoides wuellerstorfi* – 0.64 ‰, а для *Hoeglundina elegans* – (–0.4 ‰), т.е. размах изменения $\delta^{18}\text{O}$ по особям равен 1 ‰, что сопоставимо с амплитудой $\delta^{18}\text{O}_{\text{A0}} \approx 1$ ‰ (см. рис. 10). В этой же работе приводятся данные по определению $\delta^{18}\text{O}$ в одной и той же точке керна по разным видам организмов. С учетом поправок различия составляют: $\Delta\delta^{18}\text{O} = 0.3; 0.31; 0.35; 0.41;$

0.49; 0.54; 0.58; 0.76 ‰. Мы привели ряд наибольших значений, чтобы показать, что наибольшая из них величина – 0.76 ‰ – не является исключением из правил, она подкреплена целым рядом значений, которые к ней приближаются. Тем не менее, если даже мы ограничимся предпоследней величиной этого ряда 0.58 ‰, то она уже весьма существенна. Амплитуда колебаний $\delta^{18}\text{O}$ на первом участке (см. рис. 10, 1), как уже отмечалось, достигает 1 ‰, а на последнем (см. рис. 10, 2) – 0.5 ‰. Таким образом, разброс по видам сопоставим с амплитудой колебаний изотопно-кислородной зависимости.

В работе [Shackleton, Hall, 1984] выполнено также несколько определений $\delta^{18}\text{O}$ в одной и той же точке для одного и того же вида. На рис. 10, график 3, представлена динамика изменения во времени содержания изотопа $\delta^{18}\text{O}$ в планктонных фораминиферах *Globigerina atlantica*. Разность между определениями принимает значения 0.03; 0.11; 0.27; 0.31; 0.38; 0.4 ‰. Амплитуда колебаний замеров изотопа кислорода в планктоне составляет около 0.25 ‰, поэтому в данном случае погрешность замеров по одному виду превышает амплитуду колебаний.

Следует иметь в виду, что значения $\delta^{18}\text{O}$ для конкретной фораминиферы отличаются для разных частей ее скелета [Захаров и др., 2006], поэтому отмеченные отличия замеров могут и не быть погрешностями определения. Однако при рассмотрении зависимости изотопа $\delta^{18}\text{O}$ от глубины d или от времени разные значения $\delta^{18}\text{O}$ в одной и той же точке выступают как погрешности.

Из сравнения содержания $\delta^{18}\text{O}$ в бентосе (1, 2) и планктоне (3) на рис. 10 следует, что в среднем в планктонных фораминиферах содержание $\delta^{18}\text{O}$ на 1.5 ‰ меньше. Что же касается колебаний, то некоторые из них совпадают по фазе, а некоторые находятся в противофазе с колебаниями $\delta^{18}\text{O}$ в бентосе, т.е. фораминиферы бентоса и планктона по-разному отражают изменение содержания $\delta^{18}\text{O}$ во времени. Следует, однако, отметить общее свойство этих двух зависимостей:

Таблица 3. Возраст инверсий магнитного поля Земли (по [Shackleton, Hall, 1984])

Глубина от морского дна, м	Возраст, млн лет	Идентификация
0	0	Верх керна
14.6	0.73	Базис хрона Брунча
20.1	0.98	Базис подхрона Джамилло
32.1	1.66	Верх подхрона Олдувай
43.2	2.47	Верх хрона Гаусса
47.8	2.99	Базис подхрона Каена
56.6	3.40	Базис хрона Гаусса

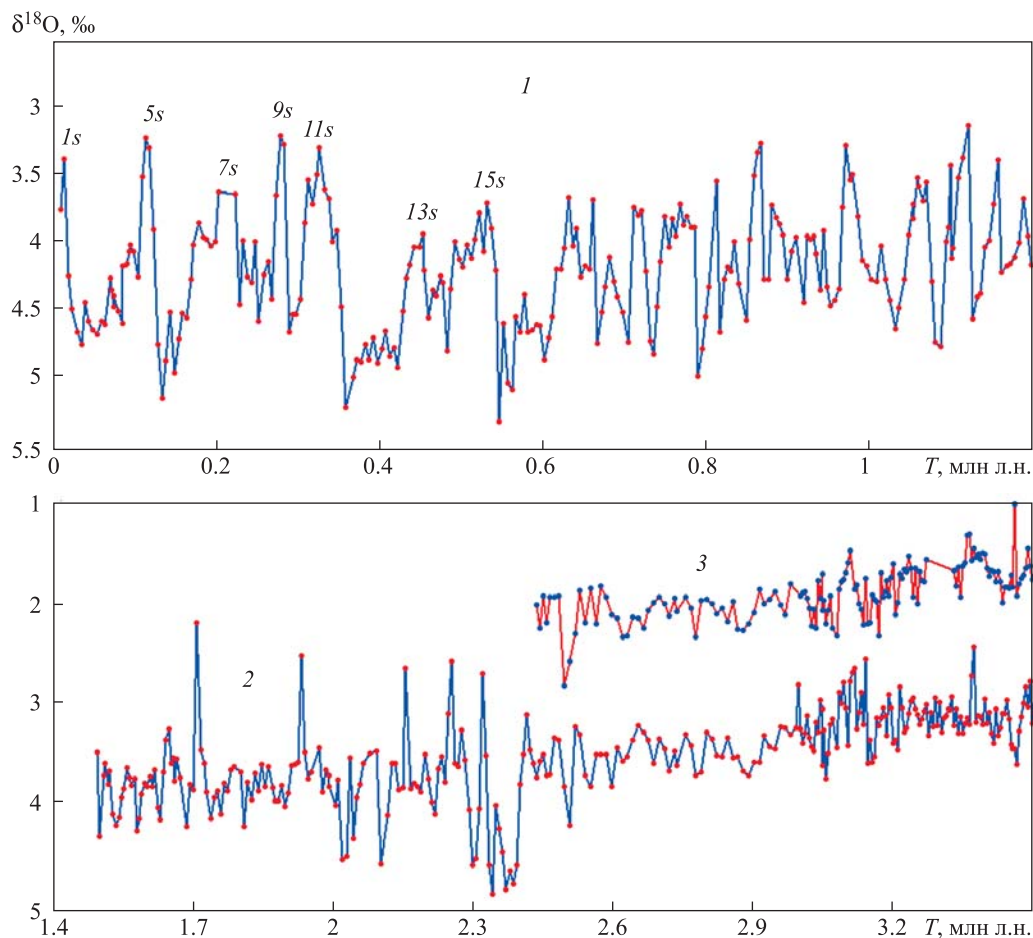


Рис. 10. Изменение содержания изотопа кислорода $\delta^{18}\text{O}$ в бентосе (1, 2) и планктоне (3) из отложений скв. 552A в Северной Атлантике в зависимости от возраста T [Shackleton, Hall, 1984]

Усл. обозн. те же, что на рис. 8, 9

содержание $\delta^{18}\text{O}$ в глубоководных отложениях со временем уменьшается.

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ ОБОБЩЕННОГО НАБОРА LR04

Рассмотрим, как формировалась в дальнейшем временная модель содержания изотопа кислорода ^{18}O . Прежняя астрономическая теория изменения климата давала небольшие колебания инсоляции. Они, как уже

упоминалось, обусловлены изменениями эксцентриситета e и углов перигелия φ_{pl} и наклона ε . Главные периоды колебаний эксцентриситета $T_e = 94.5$ тыс. лет; угла наклона $T_\varepsilon = 41$ тыс. лет [Imbrie et al., 1984]; средний период обращения перигелия орбиты $T_{p_{pl}} = 21.7$ тыс. лет. Период T_e здесь приведен по прежней астрономической теории. Так как период 109.5 тыс. лет первой серии колебаний $\delta^{18}\text{O}$ близок к периоду эксцентриситета T_e , то в дальнейшем к этому периоду, округленному до

100 тыс. лет, подгонялись изотопные кривые. Более короткие колебания $\delta^{18}\text{O}$ подгонялись к периодам 41 тыс. лет и 19–23 тыс. лет.

Как уже отмечалось, в работе [Lisiecki, Raymo, 2005] создан общий набор данных по $\delta^{18}\text{O}$ на основании содержания этого изотопа кислорода в глубоководных отложениях из 57 мест Мирового океана. Преимущественно определения относятся к Атлантическому океану, порядка 15 – к Тихому океану и две – к Индийскому океану. Каждая запись содержит две величины: $\delta^{18}\text{O}$ и глубину d определения. Как видно из представленных на рис. 8 данных, глубины d одних и тех же колебаний $\delta^{18}\text{O}$ в разных отложениях различаются в несколько раз, поэтому необходимо глубину d привести ко времени t , чтобы иметь возможность усреднить амплитуду одинаковых пиков колебаний по всем отложениям. При этом, естественно, предполагается, что все пики колебаний $\delta^{18}\text{O}$ в разных местах Мирового океана обусловлены одной и той же причиной, а именно, переносом воды в виде пара с более легким изотопом ^{16}O из Мирового океана в ледниковые щиты. Эта идея нашла воплощение в разработках, например, [Imbrie J., Imbrie J.Z., 1980], где проводились расчеты по изменению объема льда V_{ic} на Земле. Авторы, опираясь на прежнюю астрономическую теорию изменения климата, предположили, что изменение объема льда должно выражаться через изменение инсоляции. В качестве таковой они выбрали инсоляцию Q_{mx}^{65N} 21 июня на 65° с.ш. из работы [Berger, Loutre, 1991]. Конечно, логичнее было бы в качестве причины изменения объемов льда взять инсоляцию Q_s^{65N} за весь летний период, однако эта величина в работе [Berger, Loutre, 1991] не приводилась. Модель льда основывалась на линейном дифференциальном уравнении

$$\frac{dV_{ic}}{dt} = \frac{1 \pm b}{T_m} \cdot (Q_{mx}^{65N} - V_{ic}), \quad (2)$$

где b – константа нелинейности; T_m – средняя постоянная времени.

Размерности величин Q_{mx}^{65N} и V_{ic} в уравнении (2) не совпадают, однако для авторов это не является существенным, так как объем льда V_{ic} рассматривается в относительных единицах и не сопоставляется с действительными объемами льда на Земле. В работах [Imbrie J., Imbrie J.Z., 1980; Berger, Loutre, 1991] величины V_{ic} и Q_{mx}^{65N} используются как y и x . Мы приводим модель льда этих авторов в форме (2), чтобы более наглядно показать ее сущность.

Уравнение (2) является линейным дифференциальным уравнением для функции V_{ic} со свободной функцией Q_{mx}^{65N} . Это уравнение имеет частное решение, которое изменяется подобно свободной функции Q_{mx}^{65N} . По существу, в качестве объема льда была взята функция Q_{mx}^{65N} .

Процесс подгонки отдельных записей $\delta^{18}\text{O}$ к функции Q_{mx}^{65N} в работе [Lisiecki, Raymo, 2005] является многостадийным. Он включает опыт подгонки предшествующих авторов; использовалась в том числе полученная зависимость для объема льда V_{ic} на Земле. Затем основные методические приемы были отработаны на подгонке первых семи записей, представленных на рис. 8. Эти приемы были использованы в программе,

названной авторами «программа графической корреляции». С помощью этой программы подбирались скорости седиментации для отдельных записей $\delta^{18}\text{O}$ так, чтобы их пики соответствовали функции Q_{mx}^{65N} . При этом использовалась ручная корректировка, чтобы не допустить больших скоростей седиментации.

ИЗОТОПНО-КИСЛОРОДНЫЙ НАБОР LR04 И ИНСОЛЯЦИЯ

Полученный в работе [Lisiecki, Raymo, 2005] суммарный набор данных LR04 для изотопа кислорода $\delta^{18}\text{O}$ за последние 5 млн лет представлен на рис. 11. График инсоляции Q_{mx}^{65N} на 21 июня на рассматриваемых интервалах времени практически не отличается от графика летних инсоляций Q_s^{65N} . Поскольку же палеоклимат определяет инсоляция не за один день, а за все летнее полугодие, на рис. 11 набор LR04 сопоставлен с графиками инсоляции за летнее полугодие: Q_{sl}^{65N} по [Laskar et al., 2004] (верхний график) и Q_s^{65N} по новой астрономической теории (нижний график). Наибольшая амплитуда колебаний инсоляции Q_s^{65N} по новой астрономической теории в 4 раза превышает наибольшую амплитуду колебаний инсоляции Q_{sl}^{65N} по прежней теории.

Как видно из данных на рис. 11, на интервале последние 5 млн лет нет подобия колебаний изотопной кривой $\delta^{18}\text{O}$ и летних инсоляций. Инсоляционные кривые Q_{sl}^{65N} и Q_s^{65N} не имеют тренда; наблюдаются временные вариации амплитуды колебаний, но в целом на всем исследуемом интервале пределы изменения амплитуды остаются неизменными. Как было показано ранее на рис. 6 и 7, такой характер изменения инсоляции Q_s^{65N} сохраняется на интервале последние 20 млн лет и отражает характер изменения орбиты Земли и всей Солнечной системы за исследованный промежуток времени – 100 млн лет [Мельников, Смольский, 2009]. В отличие от инсоляционных зависимостей кривая $\delta^{18}\text{O}$ имеет выраженный тренд: ее среднее значение изменяется от 4.3‰ в начале исследуемого периода до 3‰ в конце, т.е. она уменьшается почти в 1.4 раза. Уменьшается (в 4.5 раза) также амплитуда колебаний: с 0.9‰ в начале исследуемого периода до 0.2‰ в конце.

Если рассматривать структуру колебаний, то имеющаяся вначале пилообразная структура колебаний $\delta^{18}\text{O}$ по истечении первого 1 млн лет исчезает. Подобной структуры колебаний в изменениях Q_{sl}^{65N} и Q_s^{65N} нет. В дальнейшем изменения колебаний $\delta^{18}\text{O}$ в фазах уменьшения и увеличения становятся симметричными, поэтому на участке времени 1.3–1.8 млн л.н. авторы набора LR04 приводят сопоставление $\delta^{18}\text{O}$ с инсоляцией Q_{mx}^{65N} .

На рис. 12 мы приводим сравнение набора LR04 с инсоляцией 21 июня по данным [Laskar et al., 2004]. Видно, что частота колебаний инсоляции Q_{mx}^{65N} примерно в 2 раза больше, чем частота колебаний кривой $\delta^{18}\text{O}$, при этом некоторые пики колебаний совпадают, а некоторые – нет. Поэтому даже на этом отдельном участке продолжительностью 0.5 млн лет добиться совпадения колебаний этих зависимостей путем подбора скорости седиментации авторам набора LR04 [Lisiecki, Raymo, 2005] не удалось.

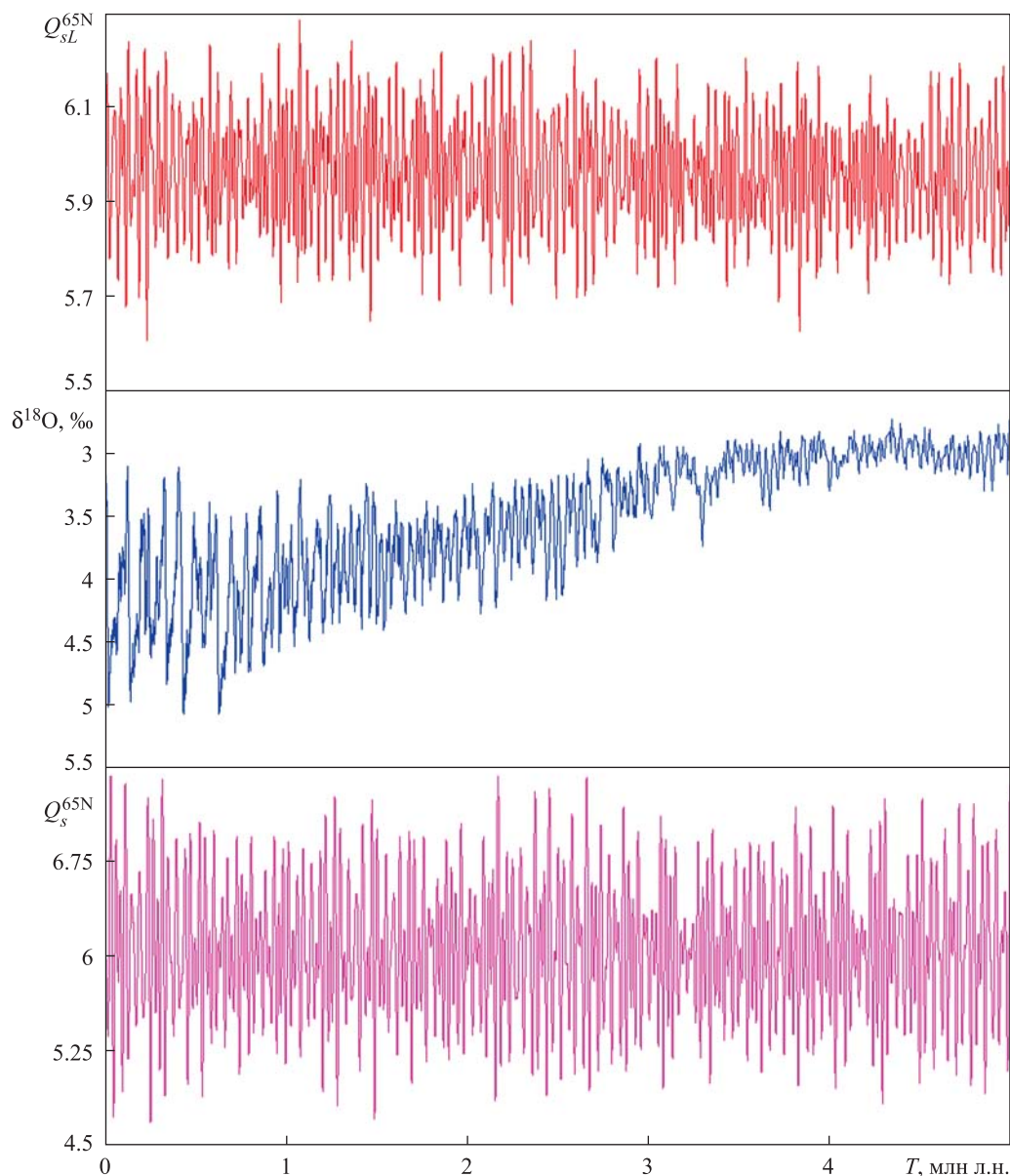


Рис. 11. Сравнение изменений летних инсоляций (Q_{sl}^{65N} и Q_s^{65N} , ГДж/м²) и изотопно-кислородного набора LR04 ($\delta^{18}O$) за последние 5 млн лет

Q_{sl}^{65N} – летняя инсоляция на 65° с.ш. по прежней теории на примере работы [Laskar et al., 2004]; Q_s^{65N} – то же по новой астрономической теории

Зависимость скорости седиментации v_{sd} от времени для набора LR04 [Lisiecki, Raymo, 2005] показана линией v_{sdLR} на рис. 13. Скорость седиментации $v_{sd} = dd/dT$ подбиралась для каждой точки набора LR04. Она варьирует от 8.15 до 1.95 см/тыс. лет, т.е. размах колебаний изменяется в 4.18 раза. Самые большие скорости седиментации в наборе LR04 характерны для современной эпохи. Для отдельных записей $\delta^{18}O$ скорость седиментации изменяется еще в больших пределах.

Скорость седиментации отложений, рассчитанная по инверсиям магнитного поля Земли (см. табл. 3) для скв. 552A [Shackleton, Hall, 1984], в среднем в 2 раза меньше (см. рис. 13). Она остается неизменной на интервалах в сотни тысяч лет, при этом диапазон ее изменения также в 2 раза меньше.

Характер изменения скорости седиментации набора LR04 не имеет физического объяснения. Ее вид обусловлен подбором соответствия отдельных пиков в разных записях и в совокупности – соответствием инсоляционной зависимости Q_{mx}^{65N} . Вследствие разных целей таким подбором не удастся добиться подобия набора LR04 с инсоляцией как на всем интервале последние 5.3 млн лет (см. рис. 11), так и на ограниченном участке 1.3–1.8 млн л.н. (см. рис. 12).

В работе [Lisiecki, Raymo, 2005] проводится спектральный анализ набора LR04 за последние 650 тыс. лет. В нем присутствуют частоты 100, 41, 23 и 19 тыс. лет, которые входили в прежнюю модель инсоляции и связаны с периодами изменения эксцентриситета e , угла наклона ϵ и перигелия ϕ_{py} . Как видно из (2), подгонка возраста пиков $\delta^{18}O$ осуществлялась на

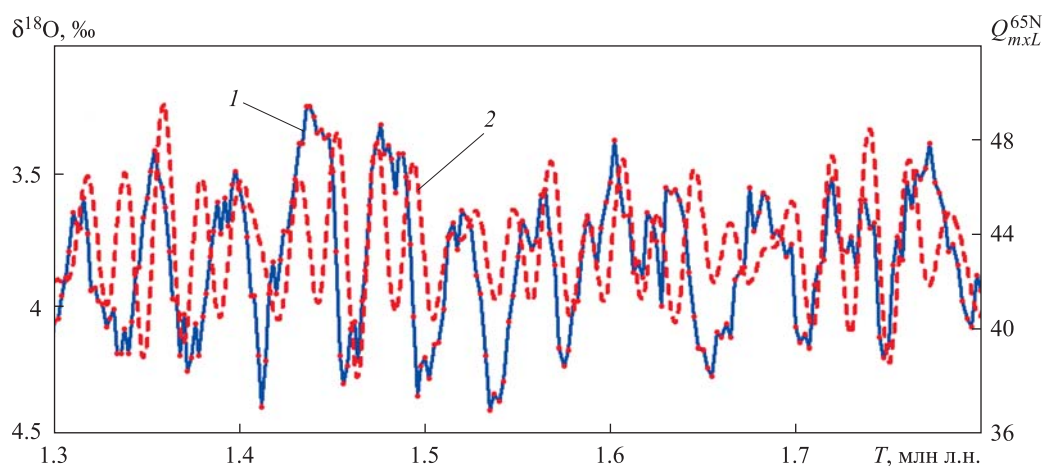


Рис. 12. Сравнение изотопно-кислородного набора LR04 по [Lisiecki, Raymo, 2005] (1) с инсоляцией в день летнего солнцестояния (2) на интервале 1.3–1.8 млн л.н.

Q_{mxL}^{65N} – инсоляция по прежней теории [Laskar et al., 2004], МДж/м²

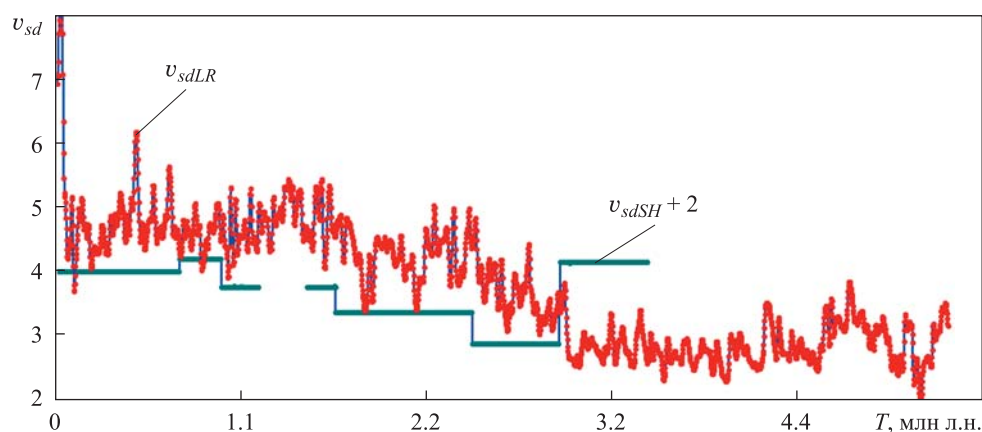


Рис. 13. Зависимость скорости седиментации v_{sd} (см/тыс. лет) от времени

v_{sdLR} – скорость для набора LR04 [Lisiecki, Raymo, 2005]; v_{sdSH}^{+2} – скорость в отложениях скв. 552A [Shackleton, Hall, 1984], увеличенная на 2 см/тыс. лет

основании инсоляции Q_{mx}^{65N} , в которую эти периоды входят. Поэтому наличие этих периодов в статистике набора LR04 свидетельствует не о внутренней сущности набора, а о наличии подгонки записей $\delta^{18}O$ к инсоляции. К сожалению, факт подгонки наборов $\delta^{18}O$ к инсоляции Q_{mx}^{65N} или не принимается во внимание, или неизвестен, поэтому многие последователи изотопно-кислородной истории Земли полагают, что в наборах $\delta^{18}O$ зафиксированы изменения орбитальных параметров Земли [Большаков, Капица, 2011]. Однако пилообразные участки изменения $\delta^{18}O$ (см. рис. 11), которые приурочивают к составляющим 100 тыс. лет периодам изменения эксцентриситета, после 600 тыс. лет исчезают. Многими авторами, в том числе работы [Большаков, Капица, 2011], это интерпретируется как изменение динамики орбиты Земли.

Следует отметить, что наличие в статистике двух временных рядов одинаковых частот не является доказательством их функциональной связи. Это

обстоятельство может являться только предпосылкой для изучения взаимозависимости свойств рассматриваемых рядов с целью нахождения связей между ними.

Как мы уже отмечали, динамика орбиты Земли в исследованном нами интервале 100 млн лет неизменна: колебания всех параметров орбиты как Земли, так и других планет и Луны происходят в неизменных пределах [Мельников, Смольский, 2009]. Это согласуется с решениями всех исследователей, в том числе [Laskar et al., 2004], на интервалах времени, значительно превышающих 5 млн лет. Что же касается вращательного движения, то в исследованном нами интервале последние 20 млн лет динамика его также остается неизменной. Поэтому предположения, навеянные ошибочной трактовкой наборов $\delta^{18}O$, об изменении динамики орбиты после 600 тыс. лет являются неверными.

Аналогично рис. 11, на рис. 14 с изотопной зависимостью $\delta^{18}O$ из набора LR04 сопоставлены инсоляции Q_s^{65NL} и Q_s^{65N} , но только за первые 600 тыс. лет.

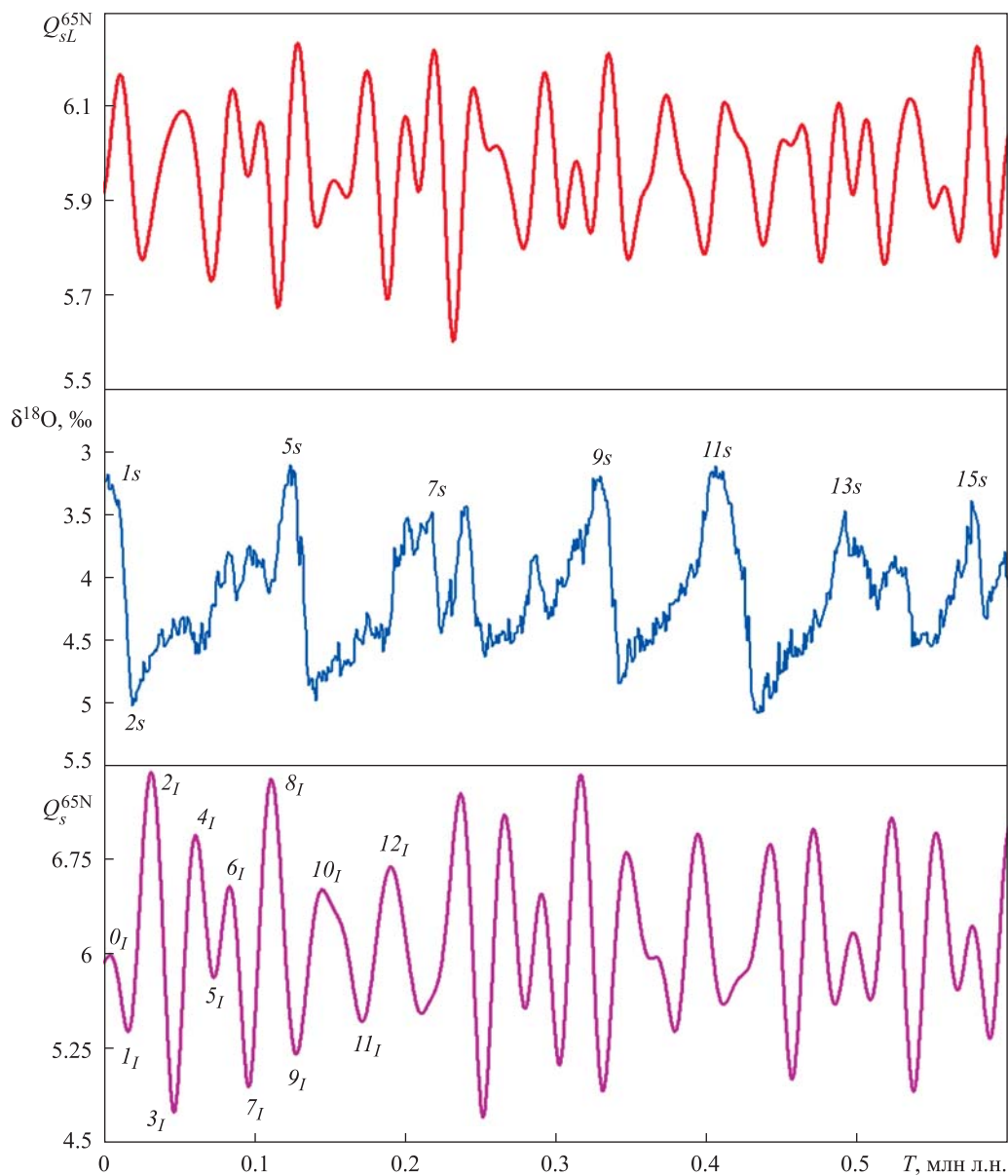


Рис. 14. Сравнение изменений летних инсоляций Q_s^{65NL} и Q_s^{65N} и изотопно-кислородного набора LR04 за последние 600 тыс. лет

$1s$ – $15s$ – морские изотопные стадии; 0_I , 1_I – 12_I – инсоляционные периоды изменения климата за последние 200 тыс. лет. Ост. обозн. те же, что на рис. 11

Видно, что структуры колебаний инсоляции как по прежней теории (Q_s^{65NL}), так и по новой (Q_s^{65N}) существенно отличаются от структуры колебаний $\delta^{18}O$. В инсоляционных зависимостях отсутствуют характерные пилообразные серии колебаний $\delta^{18}O$. Отсутствуют также короткие колебания типа «дрожаний» $\delta^{18}O$ с периодом 2–5 тыс. лет. Самые короткие колебания в инсоляционных зависимостях имеют период порядка 20 тыс. лет. Верхние точки $\delta^{18}O$ соответствуют потеплениям, а нижние – похолоданиям. Как видно из графиков Q_s^{65NL} и Q_s^{65N} , потепления и похолодания, согласно инсоляционным кривым, наступают в другие эпохи и повторяются с другой частотой, нежели по изотопно-кислородной кривой $\delta^{18}O$.

Еще большее несоответствие между $\delta^{18}O$ и инсоляцией имеется на отрезке времени последние 50 тыс. лет, близком к современной эпохе. Согласно $\delta^{18}O$, при $T = 0$ (см. рис. 14) современный климат является таким же теплым, как и самые теплые климаты в истории Земли за последние 600 тыс. лет. Эпохе $T = 0$ присвоена морская изотопная стадия МИС-1 ($1s$ на рис. 14). Согласно прежней модели инсоляции (Q_s^{65NL}), современный климат является промежуточным; в прошлом он был теплее, а 10 тыс. л.н. наступил пик потепления. До него шло непрерывное похолодание с пиком 25 тыс. л.н. Согласно изотопно-кислородной кривой $\delta^{18}O$, пик похолодания ($2s$ на рис. 14) приходился на 18 тыс. л.н., т.е. когда по Q_s^{65NL} приближался пик потепления. Аналогично и другие стадии (MIS-3, MIS-4,

MIS-5 и т.д.) не согласуются с прежней моделью инсоляции Q_s^{65NL} .

В работах [Смульский, 2016а, б] показано, что климат Земли за последние 50 тыс. лет изменялся в последовательности, определенной инсоляционными периодами $0_p, 1_p, 2_p, 3_p$ (см. рис. 14). Ближе к современной эпохе было небольшое потепление с пиком 5 тыс. л.н. (0_p), так называемый оптимум голоцена. Ему предшествовал последний ледниковый период (1_p) с максимумом 16 тыс. л.н., до него было сильное потепление (2_p) с пиком 31 тыс. л.н., которому предшествовало очень сильное похолодание (3_p) с максимумом 46 тыс. л.н. Видно, что все эти изменения климата за последние 50 тыс. лет не согласуются с изменениями $\delta^{18}O$, за исключением стадии MIS-2 ($2s$ на рис. 14). Пик этого похолодания – 18 тыс. л.н. – близок к пику похолодания 1_p 16 тыс. л.н. На фоне остальных расхождений это совпадение следует рассматривать как чисто случайное.

Подводя итоги анализа изменений $\delta^{18}O$ за последние 5 млн лет, следует сказать, что, несмотря на большой объем данных по содержанию изотопа кислорода в донных отложениях и их разнообразную статистическую обработку, полученные наборы $\delta^{18}O$ не согласуются с изменениями инсоляции, а также с надежно установленными результатами по изменению климата за последние 50 тыс. лет. Имеющиеся в этих наборах тренды в прошлое на потепление, а также уменьшение вдвое амплитуды климатических колебаний противоречат неизменности динамики орбитального и вращательного движений Земли.

ВОЗМОЖНАЯ ПРИЧИНА ВАРИАЦИЙ ИЗОТОПА КИСЛОРОДА ^{18}O В МОРСКИХ ОТЛОЖЕНИЯХ

Интерпретация вариаций $\delta^{18}O$ в морских отложениях периодическими накоплениями кислорода ^{16}O в ледниковых щитах основана на предположении, что содержание $\delta^{18}O$ на Земле неизменно. Однако в последние десятилетия выяснилось, что в атмосфере Земли происходят колебания содержания изотопов бериллия ^{10}Be , углерода ^{14}C и кислорода ^{18}O [Арсланов, 1987; Solanki et al., 2004; Wang et al., 2005; Steinhilber et al., 2012]. В настоящее время эти колебания связывают с изменениями солнечной активности [Solanki et al., 2004; Steinhilber et al., 2012]. В наибольшей степени изучено поведение изотопа ^{14}C , с помощью которого осуществляется радиоуглеродная хронометрия. Одна из первых международных шкал IntCal98, установленная по содержанию ^{14}C в кольцах деревьев с уточнением по его содержанию в ленточных глинах и других источниках, создана для последних 11.4 тыс. лет, а одна из последних шкал – IntCal04 – на последние 26 тыс. лет [Reimer et al., 2004]. Эти шкалы представляют изменение содержания радиоактивного изотопа ^{14}C в атмосфере (рис. 15) и используются для корректировки радиоуглеродных дат, т.е. для перевода их в календарные.

Выяснилось, что в ледовых кернах Гренландии и Антарктиды изменение ^{10}Be согласуется с изменением содержания ^{14}C [Solanki et al., 2004; Steinhilber et al., 2012]. Согласно современному представлению, радиоактивные изотопы ^{10}Be и ^{14}C образуются в атмосфере Земли под воздействием космических частиц [Svensmark, 1998; Steinhilber et al., 2012]. В то же время вариации количества космических частиц в атмосфере Земли согласуются

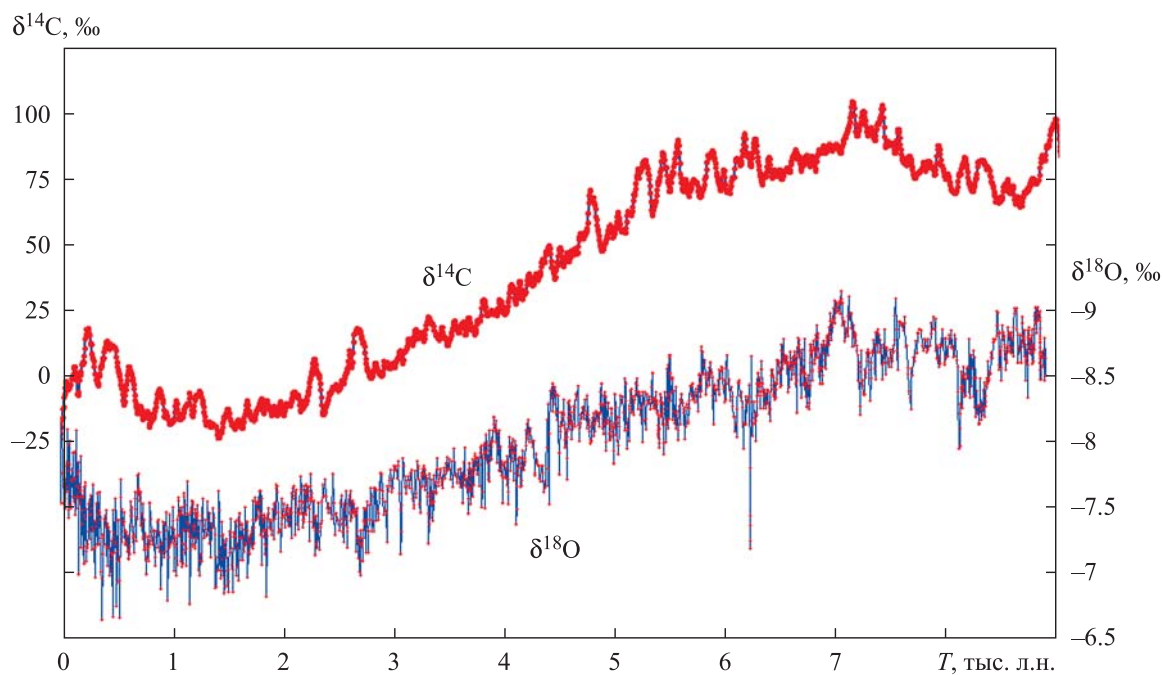


Рис. 15. Короткопериодические изменения изотопов углерода ^{14}C [Reimer et al., 2004] и кислорода ^{18}O [Wang et al., 2005] за последние 9 тыс. лет в атмосфере Земли

T – время, тыс. л.н. от 1950 г.

Таблица 4. Характерные периоды колебаний (P) и амплитуды ($\delta^{18}O_a$) содержания изотопа ^{18}O в сталагмитах из пещеры Дунгэ и в наборе LR04

Сталагмит DA		Набор LR04	
P , тыс. лет	$\delta^{18}O_a$, ‰	P , тыс. лет	$\delta^{18}O_a$, ‰
0.025	0.07	4.7	0.07
0.035	0.23	20	0.25
0.025, выброс	0.5	100	0.9
7, тренд	1.5		

с периодом вращения Солнца вокруг его оси и периодом его орбитального движения вокруг центра масс Солнечной системы [Gil, 2009; Charvátová, Heida, 2014; Planetary influence..., 2016]. Активность Солнца в виде числа Вольфа, определяющего количество солнечных пятен, согласуется с орбитальным движением Солнца [Charvátová, Heida, 2014; Planetary influence..., 2016]. Эти результаты позволили создать теории вариации активности Солнца и изотопов ^{10}Be и ^{14}C за несколько тысяч лет [Solanki et al., 2004; Steinhilber et al., 2012; Salvador, 2013; Charvátová, Heida, 2014].

При исследовании содержания изотопа кислорода ^{18}O в сталагмитах пещер Дунгэ (Dongge) и Хулу (Hulu) в Китае и пещеры Оман в Индии, а также в ледовых ядрах Гренландии и Антарктиды [Dykoski et al., 2005; Wang et al., 2005; Steinhilber et al., 2012] выяснилось, что его изменения согласуются с изменениями содержания радиоактивных изотопов ^{10}Be и ^{14}C . Таким образом, вариации всех этих изотопов обусловлены вариациями солнечной активности. Их периоды измеряются годами, десятилетиями и столетиями.

В короткопериодических вариациях $\delta^{18}O$, например в сталагмитах DA (см. рис. 15) и D4 из пещеры Дунгэ [Dykoski et al., 2005; Wang et al., 2005], можно выделить колебания (табл. 4) с периодом 25 лет и амплитудой $\delta^{18}O_a = 0.07$ ‰, а также с периодом 35 лет и амплитудой 0.23 ‰. Имеются также отдельные выбросы 0.7 ‰ продолжительностью 25 лет. Кроме того, на протяжении 7 тыс. лет имеется тренд с уменьшением $\delta^{18}O$ на 1.5 ‰ и последующим крутым увеличением до прежних значений [Dykoski et al., 2005]. Колебания изотопа $\delta^{18}O$ в наборе LR04 за последние 100 тыс. лет мы также представили в табл. 4. Как первые, так и вторые колебания нерегулярны и имеют разные амплитуды, поэтому эти периоды и амплитуды осреднены.

Данные по сталагмитам получены с интервалом 5 лет, а в наборе LR04 – с интервалом 1000 лет. Поэтому колебания $\delta^{18}O$ в атмосферном воздухе с периодами 25 и 35 лет могут соответствовать колебаниям $\delta^{18}O$ в морских отложениях с периодами 4.7 и 20 тыс. лет: их амплитуды соразмерны. Отдельные выбросы и тренд $\delta^{18}O$ в сталагмитах могут восприниматься как колебания в морских отложениях с периодами порядка 100 тыс. лет: их амплитуды также соразмерны.

Таким образом, одной из вероятных причин колебания $\delta^{18}O$ в морских отложениях могут являться более короткие периоды колебания $\delta^{18}O$ в атмосферном воздухе. За 1000 лет измерения первых происходят

десятки колебаний последних, а фиксируется только одно из них. Поэтому, вообще говоря, замеры донных отложений разных скважин могут представлять собой набор случайных чисел, функционально не связанный с причиной изменения $\delta^{18}O$ в них.

Так как короткопериодические изменения $\delta^{18}O$ в атмосферном воздухе согласуются с изменениями изотопов ^{10}Be и ^{14}C , а последние возникают в атмосфере Земли, то, по-видимому, ^{18}O также образуется в атмосфере. Отсюда следует, что величина $\delta^{18}O$ в морских отложениях должна увеличиваться в будущее и уменьшаться в прошлое. Именно это уменьшение величины $\delta^{18}O$ в прошлое демонстрируют как отдельные наборы (см. рис. 8), так и агрегированный набор LR04 (см. рис. 11).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате взаимодействия тел Солнечной системы происходит изменение орбиты Земли и положения ее оси вращения. Это приводит к перераспределению солнечного тепла по широте Земли. Наибольшие изменения происходят в высоких широтах. При этом по сравнению с современной эпохой могут быть эпохи, когда тепла на широте 65° в Северном полушарии больше, чем сейчас на экваторе, или же эпохи, когда его меньше, чем на полюсе. Времена наступления таких эпох согласуются с последними двумя оледенениями и межледниковым периодом между ними.

На интервале последние 200 тыс. лет по экстремумам летней инсоляции введены 13 инсоляционных периодов и определены их границы. На интервале последний 1 млн лет рассмотрены виды климатов, существовавших на Земле, а также их градации. На интервале последние 20 млн лет показано, что эти климаты повторяются. Частота появления наиболее экстремальных климатов непостоянна и нерегулярна. Однако все эти изменения, обусловленные эволюциями орбитального и вращательного движений Земли, являются строго детерминированными.

В результате анализа изотопно-кислородной кривой и сопоставления ее с изменением инсоляции Земли и палеоклиматом показано, что морские изотопные стадии не отражают ни известные изменения климата, ни колебания инсоляции. Эволюция орбитального и вращательного движений Земли является единственной известной на сегодня причиной колебаний климата с периодами в десятки тысяч лет. Определяемые этим эпохи наступления потепления и похолодания в настоящее время также являются наиболее обоснованными.

Введенные инсоляционные периоды могут быть рекомендованы палеоклиматологам для анализа прошедших на Земле изменений за последние миллионы лет и привязки их к времени.

БЛАГОДАРНОСТИ

Представленные результаты новой астрономической теории изменения климата основаны на решении задач об орбитальном и вращательном движениях Земли с помощью суперкомпьютеров ЦКП Сибирского суперкомпьютерного центра Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН.

Возможность получить данные по содержанию изотопов кислорода в морских отложениях и анализировать их появилась благодаря персональной веб-странице профессора Лорейн Лисецки (Lorraine Lisiecki). Профессор Нильс-Аксель Мернер (Nils-Axel Mörner) любезно предоставил свою книгу, а также свои статьи и статьи своих коллег, которые помогли составить цельное мнение о короткопериодических изменениях концентраций изотопов в атмосфере Земли. Профессор Юнцзинь Ван (Yongjin Wang) также любезно снабдил меня своими работами и работами своих коллег по содержанию изотопов кислорода в сталагмитах.

В заключение выражаю признательность рецензенту за полезные советы и замечания, которые были направлены на более доступное и ясное изложение материала статьи.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Арсланов Х.А. Радиоуглерод: Геохимия и геохронология. Л.: Изд-во ЛГУ, 1987. 300 с.
- Большаков В.А., Катица А.П. Уроки развития орбитальной теории палеоклимата // Вестн. РАН. 2011. Т. 81, № 7. С. 603–612.
- Гребеников Е.А., Смутьский И.И. Эволюция орбиты Марса на интервале времени в сто миллионов лет // Сообщения по прикладной математике. М.: ВЦ им. А.А. Дородницына РАН, 2007. 63 с. <http://www.ikz.ru/~smulski/Papers/EvMa100m4t2.pdf>
- Захаров Ю.Д., Смышляева О.П., Попов А.М., Шигета Я. Изотопный состав позднемезозойских органогенных карбонатов Дальнего Востока (стабильные изотопы кислорода и углерода, основные палеоклиматические события и их глобальная корреляция). Владивосток: Дальнаука, 2006. 204 с.
- Калмычков Г.В., Кузьмин М.И., Покровский Б.Г., Кострова С.С. Изотопный состав кислорода створок диатомовых водорослей из осадков оз. Байкал: Изменение среднегодовых температур в Центральной Азии за последние 40 тыс. лет // Докл. РАН. 2007. Т. 412, № 5. С. 675–678.
- Крутко П.Д., Максимов А.И., Скворцов Л.М. Алгоритмы и программы проектирования автоматических систем. М.: Радио и связь, 1989. 306 с.
- Макрыгина В.А. Геохимия отдельных элементов: Учеб. пособие. Новосибирск: ГЕО, 2011. 195 с.
- Мельников В.П., Смутьский И.И. Астрономическая теория ледниковых периодов: Новые приближения. Решенные и нерешенные проблемы. Новосибирск: ГЕО, 2009. 98 с. <http://www.ikz.ru/~smulski/Papers/AsThAnR.pdf>
- Мельников В.П., Смутьский И.И., Смутьский Я.И. Составная модель вращения Земли и возможный механизм взаимодействия континентов // Геология и геофизика. 2008. № 11. С. 1129–1138.
- Смутьский И.И. Математическая модель Солнечной системы // Теоретические и прикладные задачи нелинейного анализа. М.: ВЦ им. А.А. Дородницына РАН, 2007. С. 119–138. <http://www.ikz.ru/~smulski/Papers/MatMdSS5.pdf>
- Смутьский И.И. Анализ уроков развития астрономической теории палеоклимата // Вестн. РАН. 2013а. Т. 83, № 1. С. 31–39. <https://doi.org/10.7868/S0869587313010118>
- Смутьский И.И. Программа расчета инсоляции Земли в среде MathCad. Тюмень: Ин-т криосферы Земли СО РАН, 2013б. <http://www.ikz.ru/~smulski/Data/Insol/>
- Смутьский И.И. Основные положения и новые результаты астрономической теории изменения климата. Тюмень: Ин-т криосферы Земли СО РАН, 2014. 30 с. Деп. в ВИНИТИ РАН. № 258-В2014. <http://www.ikz.ru/~smulski/Papers/OsPoATLP3.pdf>
- Смутьский И.И. Новые результаты по инсоляции Земли и их корреляция с палеоклиматом Западной Сибири в позднем плейстоцене // Геология и геофизика. 2016а. Т. 57, № 7. С. 1393–1407.
- Смутьский И.И. Эволюция оси Земли и палеоклимата за 200 тысяч лет. Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Acad. Publ., 2016б. 228 с.
- Хайпер Э., Нерсетт С.П., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. М.: Мир, 1990. 513 с.
- Шараф Ш.Г., Будникова Н.А. Вековые изменения элементов орбиты Земли и астрономическая теория колебаний климата // Тр. Ин-та теор. астрономии. Вып. XIV. Л.: Наука, 1969. С. 48–109.
- Bassinot F.C., Labeyrie L.D., Vincent E., Quidelleur X., Shackleton N.J., Lancelot Y. The astronomical theory of climate and the age of the Brunhes–Matuyama magnetic reversal // Earth Planet. Sci. Lett. 1994. V. 126. P. 91–108.
- Berger A., Loutre M.F. Insolation values for the climate of the last 10 million years // Quatern. Sci. Rev. 1991. N 10. P. 297–317.
- Bickert T., Wefer G. Late quaternary deep water circulation in the South Atlantic: Reconstruction from carbonate dissolution and benthic stable isotopes // The South Atlantic: Present and past circulation / Eds G. Wefer et al. N.Y.: Springer, 1996. P. 599–620.
- Bickert T., Curry W.B., Wefer G. Late Pliocene to Holocene (2.6–0 Ma) western equatorial Atlantic deep-water circulation: Inferences from benthic stable isotopes // Proc. Ocean Drill. Progr. Sci. Results. 1997. V. 154. P. 239–254.
- Bretagnon P., Rocher P., Simon J.L. Theory of the rotation of the rigid Earth // Astronomy and Astrophysics. 1997. V. 319. P. 305–317.
- Charvátová I., Heida P. Responses of the basic cycles of 178.7 and 2402 yr in solar–terrestrial phenomena during the Holocene // Pattern Recognition in Physics. 2014. N 2. P. 21–26. <https://doi.org/10.5194/prp-2-21-2014>
- Dykoski C.A., Edwards L.R., Cheng H., Yuan D., Cai Y., Zhang M., Lin Y., Qing J., An Z., Revenaugh J. A high-resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave, China // Earth Planet. Sci. Lett. 2005. V. 233. P. 71–86.
- Gil A. Rigidity spectrum of the 27-Day variation of the Galactic cosmic ray intensity in different epochs of Solar activity // Computer algebra systems in teaching and research: Evolu-

- tion, control and stability of dynamical systems. Siedlce, Poland: WSFiZ, 2009. P. 196–202.
- Haug G.H., Tiedemann R. Effect of the formation of the Isthmus of Panama on Atlantic Ocean thermohaline circulation // *Nature*. 1998. V. 393. P. 673–676.
- Herbert T.D., Schuffert J.D., Andreasen D., Heusser L., Lyle M., Mix A., Ravelo A.C., Stott L.D., Herguera J.C. Collapse of the California current during glacial maxima linked to climate change on land // *Science*. 2001. V. 293. P. 71–76.
- Huybers P., Wunsch C. A depth-derived Pleistocene age model: Uncertainty estimates, sedimentation variability, and nonlinear climate change // *Paleoceanography and Paleoclimatology*. 2004. V. 19, is. 1. <https://doi.org/10.1029/2002PA000857>
- Imbrie J., Imbrie J.Z. Modeling the climatic response to orbital variations // *Science*. 1980. V. 207. P. 943–953.
- Imbrie J., Hays J.D., Martinson D.G., McIntyre A., Mix A.C., Morley J.J., Pisias N.G., Prell W.L., Shackleton N.J. The orbital theory of Pleistocene climate: Support from a revised chronology, of the marine $\delta^{18}\text{O}$ record // *Milankovitch and climate*. Pt. 1 / Ed. A. Berger. N.Y.: Springer, 1984. P. 269–305.
- Karner D.B., Levine J., Medeiros B.P., Muller R.A. Constructing a stacked benthic $\delta^{18}\text{O}$ record // *Paleoceanography and Paleoclimatology*. 2002. V. 17, is. 3. P. 2-1–2-16. <https://doi.org/10.1029/2001PA000667>
- Laskar J. Marginal stability and chaos in the Solar System // *Dynamics, ephemerides and astrometry of the Solar system* / Eds S. Ferraz Mello et al. Netherlands: IAU, 1996. P. 75–88.
- Laskar J., Robutel P., Joutel F., Gastineau M., Correia A.C.M., Levrard B. A Long-term numerical solution for the Earth // *Astron. and Astrophys.* 2004. V. 428. P. 261–285.
- Lisiecki L.E., Raymo M.E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records // *Paleoceanography and Paleoclimatology*. 2005. V. 20, is. 1. <https://doi.org/10.1029/2004PA001071>
- Mix A.C., Le J., Shackleton N.J. Benthic foraminiferal stable isotope stratigraphy from Site 846: 0–1.8 Ma // *Local and global climate changes: Proc. Ocean Drill. Progr. sci. results*. 1995a. V. 138. P. 839–847.
- Mix A.C., Pisias N.G., Rugh W., Wilson J., Morey A., Hagelberg T.K. Benthic foraminifer stable isotope record from Site 849 (0–5 Ma) // *Local and global climate changes: Proc. Ocean Drill. Progr. sci. results*. 1995b. V. 138. P. 371–412.
- Planetary influence on the Sun and the Earth, and a modern book-burning / Ed. N.-A. Mörner. N.Y.: Nova Publ., 2016. 196 p.
- Pisias N.G., Martinson D.G., Moore Jr. T.C., Shackleton N.J., Prell W., Hays J., Boden G. High resolution stratigraphic correlation of benthic oxygen isotope records spanning the last 300,000 years // *Mar. Geol.* 1984. V. 56. P. 119–136.
- Prell W.L., Imbrie J., Martinson D.G., Morley J.J., Pisias N.G., Shackleton N.J., Streeter H.F. Graphic correlation of oxygen isotope stratigraphy: Application to the Late Quaternary // *Paleoceanography and Paleoclimatology*. 1986. N 1. P. 137–162.
- Raymo M.E., Ruddiman W.F., Shackleton N.J., Oppo D.W. Evolution of Atlantic-Pacific $\delta^{13}\text{C}$ gradients over the last 2.5 m. y. // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1990. V. 97. P. 353–368.
- Reimer P.J., Baillie M.G.L., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Bertrand C., Blackwell P.G., Buck C.E., Burr G., Cutler K.B., Damon P.E., Edwards R.L., Fairbanks R.G., Friedrich M., Reimer R.W., Remmele S., Southon J.R., Stuiver M., Talamo S., Taylor F.W., Plicht J., Weyhenmeyer C.E. IntCal04 terrestrial radiocarbon age calibration, 0–26 cal kyr BP // *Radiocarbon*. 2004. V. 46. P. 1029–1058.
- Salvador R.J. A mathematical model of the sunspot cycle for the past 1000 yr // *Pattern Recogn. Phys.* 2013. N 1. P. 117–122. <https://doi.org/10.5194/prp-1-117-2013>
- Shackleton N.J., Hall M.A. Oxygen and carbon isotope stratigraphy of DSDP Hole 552A: Plio-Pleistocene glacial history // *Initial Rep. Deep Sea Drill. Project*. 1984. V. 81. P. 599–609.
- Shackleton N.J., Berger A., Peltier W.R. An alternative astronomical calibration of the Lower Pleistocene timescale based on OOP Site 677 // *Trans. R. Soc. Edinburgh Earth Sci.* 1990. V. 81. P. 251–261.
- Shackleton N. J., Hall M.A., Pate D. Pliocene stable isotope stratigraphy of OOP Site 846 // *Proc. Ocean Drill. Progr. Sci. Results*. 1995. V. 138. P. 337–356.
- Smulsky J.J. The influence of the planets, Sun and Moon on the evolution of the Earth's axis // *IJAA*. 2011. V. 1, N 3. P. 117–134. <https://doi.org/10.4236/ijaa.2011.13017>
- Smulsky J.J. Galactica software for solving gravitational interaction problems // *Appl. Phys. Res.* 2012a. V. 4, N 2. P. 110–123. <https://doi.org/10.5539/apr.v4n2p110>
- Smulsky J.J. The system of free access Galactica to compute interactions of N-bodies // *IJMCS*. 2012b. V. 4, N 11. P. 1–20. <https://doi.org/10.5815/ijmcs.2012.11.01>
- Smulsky J.J. Fundamental principles and results of a new astrophysical theory of climate change // *Advances in Astrophysics*. 2016. V. 1, N 1. P. 1–21.
- Smulsky J.J., Krotov O.I. New computing algorithm of the Earth's insolation // *Appl. Phys. Res.* 2014. V. 6, N 4. P. 56–82. <https://doi.org/10.5539/apr.v6n4p56>
- Solanki S.K., Usoskin I.G., Kromer B., Schüssler M., Beer J. An unusually active Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years // *Nature*. 2004. V. 431. P. 1084–1087.
- Steinhilber F., Abreu J.A., Beer J., Brunner I., Christl M., Fischer H., Heikkilä U., Kubik P.W., Mann M., McCracken K.G., Miller H., Miyahara H., Oerter H., Wilhelms F. 9,400 years of cosmic radiation and solar activity from ice cores and tree rings // *PNAS*. 2012. V. 109 (16). P. 5967–5971. <https://doi.org/10.1073/pnas.1118965109>
- Svensmark H. Influence of cosmic rays on Earth's climate // *Phys. Rev. Lett.* 1998. V. 81, N 22. P. 5027–5030.
- Wang Y., Cheng H., Edwards R.L., He Y., Kong X., An Z., Wu J., Kelly M.J., Dykoski C.A., Li X. The Holocene Asian monsoon: Links to solar changes and North Atlantic climate // *Science*. 2005. V. 308 (5723). P. 854–857.
- Williams D.F., Thunell R.C., Tappa E., Rio D., Raffi I. Chronology of the Pleistocene oxygen isotope record: 0–1.88 m. y B.P. // *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 1988. V. 64. P. 221–240.

Сведения об авторе

СМУЛЬСКИЙ Иосиф Иосифович – Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Федеральный исследовательский центр. Россия, 625026, г. Тюмень, ул. Малыгина, д. 86. E-mail JSmulsky@mail.ru

A NEW THEORY OF CHANGE IN THE INSOLATION OF THE EARTH OVER MILLIONS OF YEARS AGAINST MARINE ISOTOPE STAGES

© 2020 J.J. Smulsky

Institute of Earth's Cryosphere, Tyumen Scientific Center, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Federal Research Center, Tyumen, Russia

e-mail: JSmulsky@mail.ru

Abstract. The results of the new astronomical theory of the paleoclimate are studied for intervals of 1, 5 and 20 million years ago. On the interval of 1 million years, the evolution of the obliquity ε , insolation Q_s^{65N} for the summer half-year, insolation I in equivalent latitudes and the evolution of these parameters according to the former theory are considered. The range of the obliquity oscillation ε according to the new theory is from 14.7° to 32.1° , and in the previous theory from 22.08° to 24.45° . That is, the amplitude of the oscillations is increased 7–8 times. In the same respect, the insolation variations increased too. On the basis of the summer insolation Q_s^{65N} the six gradations of the climate have been introduced from very cold to very warm. For the interval of 5 million years, the oscillations of the orbital and rotational motion parameters of the Earth and various components of insolation, their periods and amplitudes are considered. The eccentricity of the orbit e varies with periods of 94.6 thousand years, 413 thousand years and 2.31 million years, and the periods of perihelion rotation relative to the equator are uneven and vary from 13.8 to 41.8 thousand years. These periods are also present in changes of the obliquity and insolation. The latitude distributions of the insolation for the summer and the winter caloric half-years and of the annual insolation in three different epochs are considered: the modern, the coldest and the warmest. The greatest changes in summer and annual insolation occur in high latitudes. Statistics of very cold and very warm periods are considered for 20 million years. On average, for 1 million years there can be 6 such periods. In restless intervals of time they can occur 10, and in quiet intervals can be 2. The measuring results of the oxygen isotope ^{18}O content in marine sediments are analyzed. It is shown that they do not agree with the change in the insolation of the Earth, both in the previous theory and in the new one. In addition, variations in the isotope ^{18}O contradict known changes of the paleoclimate. From the analysis of short-period variations of radioactive isotopes, as well as ^{18}O in stalagmites and glacial cores, it follows that variations in ^{18}O in marine sediments can be caused not by fluctuations in the paleoclimate, but by the ^{18}O changes in the Earth's atmosphere.

Keywords: insolation, paleoclimate, causes of change in the climate, variations ^{18}O .

About the author

SMULSKY Joseph Josephovich – Institute of Earth's Cryosphere, Tyumen Scientific Center, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Federal Research Center. Russia, 625026, Tyumen, Malygina st., 86. E-mail: JSmulsky@mail.ru

Cite this article as: Smulsky J.J. A new theory of change in the insolation of the Earth over millions of years against marine isotope stages, *Geofizicheskie Protssesy i Biosfera* (Geophysical Processes and Biosphere), 2020, vol. 19, no. 1, pp. 96–121 (in Russian). <https://doi.org/10.21455/gpb2020.1-7>

English version: *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2020, vol. 56, iss. 7. ISSN: 0001-4338 (Print), 1555-628X (Online). <https://link.springer.com/journal/volumesAndIssues/11485>