

АТМОСФЕРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И КЛИМАТ

УДК 551.583.7:551.79

**ОРБИТАЛЬНЫЕ ФАКТОРЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КРИОСФЕРУ ЗЕМЛИ  
(НА ПРИМЕРЕ АНАЛИЗА АНТАРКТИЧЕСКИХ КЕРНОВ)**

**В.А. Большаков, В.А. Федин**

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический ф-т,  
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; vabolshakov@mail.ru*

Проведен анализ записи антарктических кернов, прежде всего станции Dome C. Показано, что палеоклиматические записи ледового керна Антарктиды отражают глобальные климатические изменения плейстоцена и, следовательно, могут быть вызваны орбитальными вариациями инсоляции, имеющими глобальный характер. Проведено краткое сопоставление (и показаны преимущества) новой концепции орбитальной теории палеоклимата с теорией М. Миланковича и теоретическими версиями его последователей. Сравнение записи  $\delta D$  с орбитально-климатической диаграммой выявило их существенное подобие, что, в частности, указывает на возможность прямого воздействия эксцентриситетных вариаций инсоляции на изменения климата последних 800 тысяч лет. Сделан вывод, что глобальные колебания климата в циклах оледенение–межледниковье, выражающиеся в циклических колебаниях температуры Антарктиды с амплитудой более  $10^\circ\text{C}$ , должны были отражаться и на изменении криосферы Земли в целом. Эти изменения криосферы, в свою очередь, должны были проявлять также орбитальные циклические периоды, главными из которых в плейстоцене являются 41- и 100-тысячелетние периоды.

*Орбитальная теория, палеоклиматические записи ледовых кернов Антарктиды, эксцентриситет*

**ORBITAL FACTORS OF IMPACT ON EARTH'S CRYOSPHERE  
(ON THE EXAMPLE OF ANALYSIS OF THE ANTARCTIC CORES)**

**V.A. Bol'shakov, V.A. Fedin**

*Lomonosov Moscow State University, Department of Geography,  
119991, Moscow, Leninskie Gory, 1, Russia; vabolshakov@mail.ru*

Analysis of the Antarctic cores records, first of all from the station Dome C, has been carried out. It has been demonstrated that the paleoclimatic records of the Antarctica's ice core represent the global climatic changes of Pleistocene. Brief comparison of the new orbital theory with Milankovichs theory and the theories of his followers has been fulfilled. The comparison of  $\delta D$  record with the orbital-climatic diagram revealed their essential similarity that indicates in particular the possibility of direct impact of eccentricity variations of insolation on the climate change during the last 800 thousand years. A conclusion has been made that the global climate fluctuations in glaciation–interglacial cycles (particularly in the cyclic changes of Antarctica's temperature with amplitude of more than  $10^\circ\text{C}$ ) should be reflected in the changes of the whole Earth's Cryosphere. These changes of the Cryosphere, in turn, had also to demonstrate the orbital cyclicity, the main of which in the Pleistocene are of 41 and 100 thousand-year periodicities.

*Orbital theory, paleoclimatic records of the Antarctica's ice cores, eccentricity*

**ВВЕДЕНИЕ**

Изучение феномена плейстоценовых оледенений имеет длительную, почти двухвековую историю. К настоящему времени получено огромное количество эмпирических палеоклиматических данных, в которых зафиксированы связанные с

циклами оледенения–межледниковья изменения природной среды. Эти данные получены при исследовании как глубоководных, так и континентальных отложений различного генезиса. Они отражают изменения глобального объема льда, тем-

Редколлегия журнала “Криосфера Земли” приняла решение о публикации данной статьи в дискуссионном порядке, руководствуясь актуальностью поставленной авторами проблемы. Редколлегия приглашает всех желающих принять участие в дискуссии о воздействии орбитальных факторов на климат и криосферу Земли на страницах журнала.

пературы, влажности, состава и циркуляции атмосферы. Несмотря на это, до сих пор не создана теория, корректно описывающая причины столь поразительных, глобальных колебаний климата. Были предложены десятки теоретических версий, нередко взаимоисключающих друг друга [Шварцбах, 1955]. Наибольшее развитие и признание получила орбитальная (или астрономическая) теория палеоклимата, которая начала развиваться примерно в середине XIX в. [Adhémar, 1842; Croll, 1875; Bol'shakov et al., 2012].

Достаточно очевидно, что создание корректной теории изучаемого явления заключается не только в непротиворечивом объяснении накопленных эмпирических данных. Такая теория должна давать прогноз развития этого явления при изменении параметров системы, что особенно актуально в настоящее время, учитывая антропогенное влияние на природную среду. Кроме того, теория, корректно объясняющая эмпирические данные, естественно, подтверждает и принятую при ее создании интерпретацию этих данных. Указанное обстоятельство также актуально при развитии теории ледниковых циклов плейстоцена. Дело в том, что, хотя точка зрения о существовании в плейстоцене циклически повторявшихся глобальных покровных оледенений считается преобладающей, ряд исследователей ее отрицают. Поэтому создание корректной теории ледниковых циклов плейстоцена явилось бы еще одним веским доводом в пользу концепции покровных оледенений.

В 1976 г. Дж. Хейс, Дж. Имбри и Н. Шеклтон [Hays et al., 1976], изучая донные колонки, поднятые в Индийском океане, показали, что не менее 80 % климатической изменчивости последних 500 тыс. лет связаны с орбитальными вариациями с характерными периодичностями около 100, 41, 23 и 19 тыс. лет. Это хорошо подтверждало орбитальную гипотезу палеоклимата об обусловленности глобальных колебаний климата вариациями инсоляции, связанными с квазипериодическими изменениями орбитальных параметров. Однако эти же данные выявили существенные противоречия с теорией М. Миланковича, общепринятой в качестве основной версии орбитальной теории [Миланкович, 1939].

Попытки модернизировать теорию Миланковича не привели к решению появившихся проблем, главными из которых остаются так называемая проблема 100-тысячелетнего периода и проблема среднеплейстоценового перехода. Их решение видится в разработке представлений о механизмах глобальных климатических колебаний плейстоцена и сопоставлении новых теоретических разработок с наиболее надежными, длительными и информативными палеоклиматическими записями. Именно к таким записям относятся и данные, полученные по ледовым кернам Антарктиды.

В связи со сказанным выше представляется актуальным сопоставить палеоклиматические записи ледовых кернов Антарктиды с положениями новой концепции орбитальной теории палеоклимата, развиваемой в работах [Большаков, 2001, 2003; Большаков, Капица, 2011; Bol'shakov, 2008].

Новая концепция отличается кардинально иным по сравнению с традиционным взглядом на определение климатической значимости вариаций отдельных орбитальных элементов. Суть его заключается в обязательности рассмотрения полных годовых и глобальных вариаций инсоляции, вызываемых изменениями каждого орбитального элемента, а также нахождения и учета специфических для каждого орбитального элемента обратных связей, преобразующих эти инсоляционные сигналы в климатические изменения. При этом указывается, что сила воздействия различных обратных связей и даже само их наличие могут изменяться в зависимости от глобального климатического состояния, например в термо- и гляциоэры. Целью данной работы предполагается рассмотрение с позиций новой концепции влияния орбитальных вариаций на климатические колебания (в том числе на криосферу Земли) в плейстоцене на примере анализа палеоклиматических записей ледовых кернов Антарктиды.

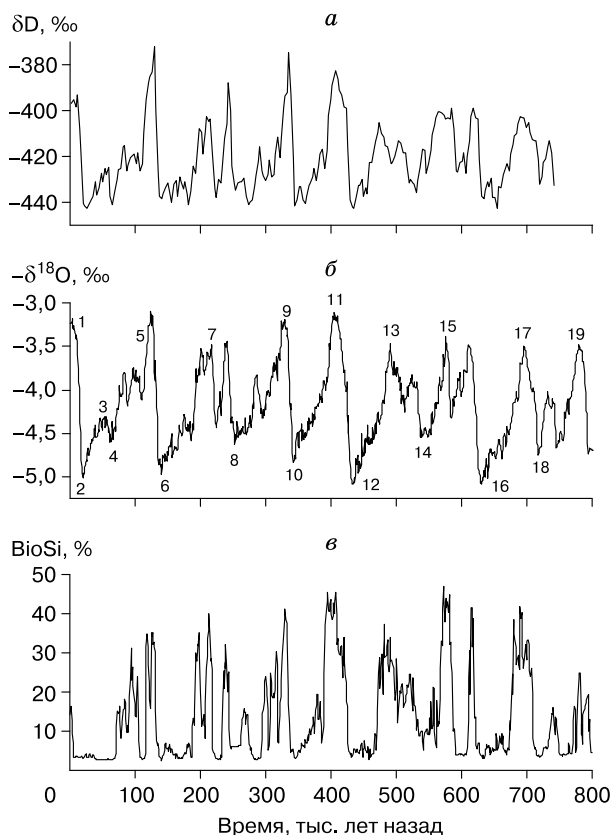
#### ПАЛЕОКЛИМАТИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ ПО ЛЕДОВЫМ КЕРНАМ И СОПОСТАВЛЕНИЕ С АНАЛОГИЧНОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ ПО ГЛУБОКОВОДНЫМ И КОНТИНЕНТАЛЬНЫМ РАЗРЕЗАМ

Различные показатели, регистрируемые в кернах льда, такие как  $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ , содержание пыли, являются косвенными (прокси) показателями, характеризующими климатические изменения. Они отображают изменения температуры ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ), концентрации парниковых газов, определяющих тепловой режим планеты, а содержание пыли в керне указывает на изменения атмосферной циркуляции, в частности ее интенсивности. При этом один из главных возникающих вопросов: являются ли показания, фиксируемые в ледовых кернах Антарктиды, изменениями региональными или они отражают также глобальные колебания климата? Очевидно, что ответ на этот вопрос может быть дан только при сравнении антарктических палеоклиматических записей с аналогичными записями в других регионах планеты. Конечно, эти записи должны быть также непрерывны, хорошо датированы и отражать палеоклиматические изменения по возможности в численной, удобной для анализа форме. Именно такими объектами являются изотопно-кислородные (ИК) кривые глубоководных осадков и записи изменения содержания биогенного кремнезема (BioSi) в осадках оз. Байкал (рис. 1).

Согласно [Карabanов и др., 2001], изменения BioSi отражают межледниковья и оледенения (термохроны и криохроны) в Сибирском регионе. В целом байкальская запись охватывает 12 млн лет. Хронология этой записи для последних 5 млн лет основана прежде всего на палеомагнитных данных и предположении о постоянстве скорости седиментации внутри палеомагнитных датированных уровней. На рис. 1, в представлена запись BioSi для последних 800 тыс. лет, согласно [Williams et al., 1997], с нашими поправками возрастной модели по методу, изложенному в [Большаков, 2003; Большаков и др., 2005].

Для сопоставления с ИК-записями по глубоководным осадкам мы выбрали наиболее используемую в настоящее время запись LR04 (см. рис. 1, б) [Lisiecki, Raymo, 2005]. Она представляет собой глобально осредненную по 57 колонкам Мирового океана для последних 5,3 млн лет запись  $\delta^{18}\text{O}$  по бентосным (обитающим в придонных водах) фораминиферам. На рис. 1, б запись  $\delta^{18}\text{O}$  также дана для последних 800 тыс. лет. Как известно, изменения  $\delta^{18}\text{O}$  по бентосным фораминиферам отражают изменения глобального объема льда и температуры. Повышение содержания тяжелого изотопа кислорода по колонкам отражает увеличение глобального объема льда и понижение температуры (оледенение), понижение  $\delta^{18}\text{O}$  – соответственно уменьшение объема льда и повышение температуры (межледниковье). Максимумам и минимумам на ИК-кривой присвоена определенная нумерация. Пикам с пониженными значениями  $\delta^{18}\text{O}$  (графические максимумы на рис. 1, б) присвоены нечетные номера (межледниковые морские изотопные стадии – МИС), а с повышенными значениями  $\delta^{18}\text{O}$  (графические минимумы) – четные номера (ледниковые МИС).

Для сравнения с этими палеоклиматическими записями в настоящей работе (см. рис. 1, а) рассматривается изменение содержания дейтерия в ледовом керне антарктической станции Dome C [EPICA..., 2004]. Ледовые керны этой станции охватывают наиболее длительный временной интервал (740 тыс. лет). Вариации дейтерия выбраны потому, что именно они наиболее надежно и непосредственно переводятся в изменения температуры [Jouzel, 2013]. Временная шкала записи  $\delta\text{D}$  станции Dome C основана на: а) подсчете годовых слоев льда; б) корреляции с изотопно-кислородной глубоководной шкалой; в) модели растекания льда. Сопоставление указанных палеоклиматических записей показывает их высокую степень подобия (см. рис. 1). Хорошо выделяются все главные (100-тысячелетние) климатические циклы оледенения–межледниковья. Более того, можно отметить даже сходство внутренней структуры межледниковий и оледенений в записях этих циклов. Коэффициент корреляции записей  $\delta^{18}\text{O}$  LR04 и



**Рис. 1. Сопоставление палеоклиматических записей:**

а – антарктической станции Dome C [EPICA..., 2004]; б – глобально осредненной изотопно-кислородной записи LR04 [Lisiecki, Raymo, 2005] (для удобства сравнения значения  $\delta^{18}\text{O}$  умножены на -1); цифры у ИК-кривой – номера морских изотопных стадий (МИС); в – байкальской записи биогенного кремнезема [Williams et al., 1997].

$\delta\text{D} - 0,72$ ; он увеличивается до 0,8, если сдвинуть кривую  $\delta\text{D}$  в сторону омоложения записи  $\delta\text{D}$  на 3 тыс. лет. Возможно, последнее обстоятельство указывает на систематическую несогласованность в оценке абсолютного возраста палеоклиматических событий, зафиксированных в этих записях. Однако не исключено, что оно отражает объективный временной сдвиг в записи только температуры (в ледовом керне) и записи глобального объема льда + температуры в глубоководных осадках.

Сопоставление исходных палеоклиматических записей по ледовому керну Антарктиды, ИК глубоководной записи LR04, отложениям осадков оз. Байкал (см. рис. 1) приводит к выводу, что запись  $\delta\text{D}$  по станции Dome C в основном представляет глобальные климатические изменения, происходящие в целом одинаково и синхронно по земному шару. В частности, она отражает колебания глобальной температуры с амплитудой око-

ло 10 °С (в месте отбора керна) в цикле оледенение–межледниковье [Jouzel, 2013]. Таким образом, с учетом этих данных представления о развитии обширных, циклически повторяющихся покровных оледенений, прежде всего развивавшихся в Северном полушарии, кажутся логичными. Увеличение (уменьшение) глобального объема льда логично сопоставляется с понижением (повышением) температуры планеты, определившим и изменения содержания  $\text{BioSi}$  в осадках оз. Байкал.

Если посмотреть на проблему более широко, то отражение этой 100-тысячелетней цикличности можно отметить и в других показателях, характеризующих эволюцию природной среды за последний миллион лет. Изменение этих показателей также согласуется с общей картиной цикличности повторяющихся обширных покровных оледенений, перемежаемых межледниковьями. Прежде всего это существенные (с амплитудой более 100 м) изменения уровня Мирового океана. Естественно, что трансгрессии соответствовали таянию ледников, межледниковьям, а регрессии – оледенениям, так как питание ледников осуществлялось за счет воды из океана вследствие ее испарения. Хронологическое соответствие этих значительных колебаний уровня моря с оледенениями и межледниковьями ИК-шкалы надежно установлено по крайней мере для последних 500 тыс. лет [Frigola et al., 2012]. Корреляция колебаний  $\delta D$  (температуры) в ледовой записи по станции Восток в Антарктиде с колебаниями уровня Мирового океана приведена в работе [Petit et al., 1999].

С циклами оледенения–межледниковья также логично связывается формирование лессово-почвенных горизонтов. Как правило, образование лессов соотносится с периодами оледенений, которые характеризуются пониженной температурой и влажностью, повышенной интенсивностью циркуляции атмосферы (последнее подтверждается повышением концентрации пыли в ледовом керне, приходящимся на “ледниковые” интервалы, характеризующиеся снижением температуры, или понижением  $\delta D$  [Котляков, Лориус, 2000]). Наоборот, формирование почв соотносится с межледниковьями, во время которых увеличивается влагообеспеченность, температура, наблюдается меньшая контрастность климата. В итоге можно считать достаточно хорошо доказанным, что палеоклиматическая запись станции Dome C (и станции Восток) в основном отражает глобальные колебания климата последних 740 тыс. лет. В то же время эта запись подтверждает глобальность палеоклиматических изменений, зафиксированных, например, в ИК-данных по глубоководным осадкам. Поэтому запись  $\delta D$  вполне может быть использована для проверки теоретических выводов, получаемых при разработке различных версий теории палеоклимата.

### ОСНОВЫ ТЕОРИИ МИЛАНКОВИЧА, ПРОТИВОРЕЧИЯ ЭМПИРИЧЕСКИМ ДАННЫМ И ПОПЫТКИ ЕЕ МОДЕРНИЗАЦИИ

В настоящее время астрономическая (орбитальная) теория обычно ассоциируется с теорией сербского ученого Милутина Миланковича [1939]. Его теория хорошо известна и получила практически повсеместное признание. М. Миланкович был первым, кто математически строго рассчитал орбитально обусловленные изменения инсоляции. Еще одна особенность теории Миланковича (ТМ), в отличие от других версий орбитальной теории, заключается в следующем. Климатическая значимость вариаций орбитальных элементов в ТМ определяется количественным вкладом каждого элемента в рассчитанную им суммарную инсоляционную диаграмму (кривую), а даты оледенений Северного полушария для последних 600 тыс. лет определяются наиболее глубокими минимумами инсоляционной диаграммы. Согласно ТМ, изменения температуры поверхности Земли для отдельных широт и сезонов года подобны соответствующим изменениям инсоляции под этими широтами [Миланкович, 1939, диаграмма 4]. Именно эти основные положения ТМ должны анализироваться в сопоставлении с эмпирическими данными.

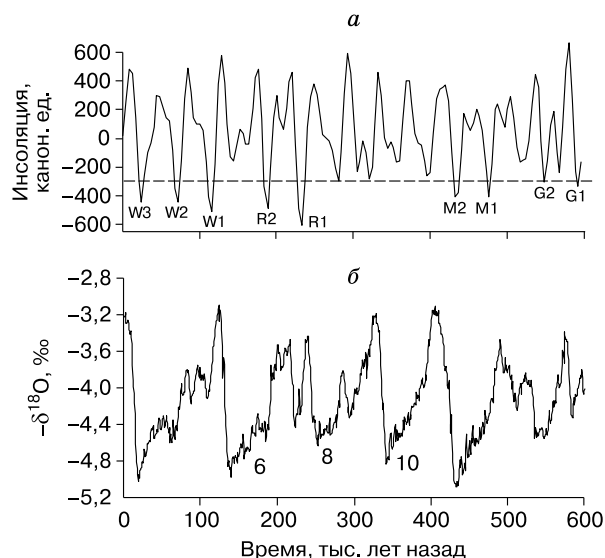
Улучшение качества эмпирических данных, которое было связано прежде всего с возможностью отбора колонок глубоководных отложений, разработкой и применением изотопно-кислородного метода, привело во второй половине XX в. к важному открытию. В работе [Hays et al., 1976] показано, что периоды главных климатических колебаний последних 500 лет практически совпадают с основными периодами вариаций орбитальных элементов. Более того, было обнаружено и фазовое соответствие этих колебаний, что практически не оставляло сомнений в существовании связи основных климатических колебаний плейстоцена с орбитально обусловленными вариациями инсоляции. Таким образом, орбитальная гипотеза была, наконец, подтверждена.

Подтверждение орбитальной гипотезы имело большое значение и впоследствии послужило основой для целого ряда открытий. В то же время полученные эмпирические данные выявили существенные противоречия с теорией Миланковича. Впервые несоответствия между теорией и эмпирическими данными были обобщены только недавно [Большаков, 2001, 2003; Elkibbi, Rial, 2001]. Как уже отмечалось, М. Миланкович напрямую сопоставлял изменения температуры на различных широтах планеты с рассчитанными им изменениями сезонной инсоляции для этих широт. Самые глубокие минимумы его инсоляционной диаграммы, рассчитанной для летнего калорического полугодия под 65° с.ш., он интерпретировал как

оледенения Северного полушария. На рис. 2 видны основные (всего их больше шести) противоречия ТМ эмпирическим ИК-данным: временное несоответствие в целом оледенений диаграммы Миланковича оледенениям ИК-кривой и отсутствие 100-тысячелетней периодичности оледенений на диаграмме Миланковича.

К главным противоречиям ТМ относится и так называемая проблема среднеледниковой эпохи (СПП) – смена преобладающей периодичности ледниковых циклов от 41-тысячелетней к 100-тысячелетней, происшедшая около 1240 тыс. лет назад [Большаков, 2013б]. Оригинальное проявление связанных с СПП противоречий дано авторами работы [Tabor et al., 2014, p. 41]. Они пишут: “Одним из наиболее интригующих противоречий теории Миланковича эмпирическим записям является отсутствие сильного прецессионного сигнала в изменениях глобального объема льда (т. е. в бентосных записях  $\delta^{18}\text{O}$  по седиментационным колонкам) раннего плейстоцена (2,588–0,781 млн лет), несмотря на то, что прецессия обеспечивает основную изменчивость величин летней инсоляции высоких широт... Этот явный провал теории Миланковича привел к новым гипотезам о том, как орбитальные циклы влияют на объем льда”.

После обнаруженных несоответствий были предприняты попытки модернизировать ТМ так, чтобы она могла адекватно решить возникшие проблемы и объяснить конкретные особенности климатических циклов плейстоцена. Вначале все попытки модернизировать теорию сводились к тому, чтобы объяснить 100-тысячелетние циклы, основываясь на теории Миланковича. Также появились на свет альтернативные теории, одна из которых изложена в работах [Muller, MacDonald, 1995, 1997]. Циклы оледенений связываются авторами с вариациями наклона плоскости земной орбиты по отношению к инвариантной плоскости Солнечной системы, которые характеризуются преобладающим, практически единственным периодом 100 тыс. лет. Изменение положения плоскости эклиптики в пространстве, по мнению авторов, приводит к тому, что Земля периодически попадает в поток космической пыли большей или меньшей плотности, что изменяет инсоляцию и, соответственно, климат Земли. График изменения наклона эклиптики в целом неплохо соответствует ИК-кривым при условии 33-тысячелетнего запаздывания климатического отклика на предполагаемый новый астрономический сигнал. Данная теория вызывает существенные сомнения, прежде всего из-за очень большого временного фазового различия астрономического сигнала и климатического отклика. Второе возражение – циклы оледенения–межледниковья являются квазиперио-



**Рис. 2. Сопоставление инсоляционной диаграммы М. Миланковича (а, инсоляция в условных канонических единицах) с ИК-кривой LR04 (б).**

W1–W3 – три стадии оледенения вюрм; R1, R2 – две стадии оледенения рисс; M1, M2 – две стадии оледенения миндель; G1, G2 – две стадии оледенения гюнц. На диаграмме Миланковича не отражены оледенения, соответствующие МИС 6, 8, 10.

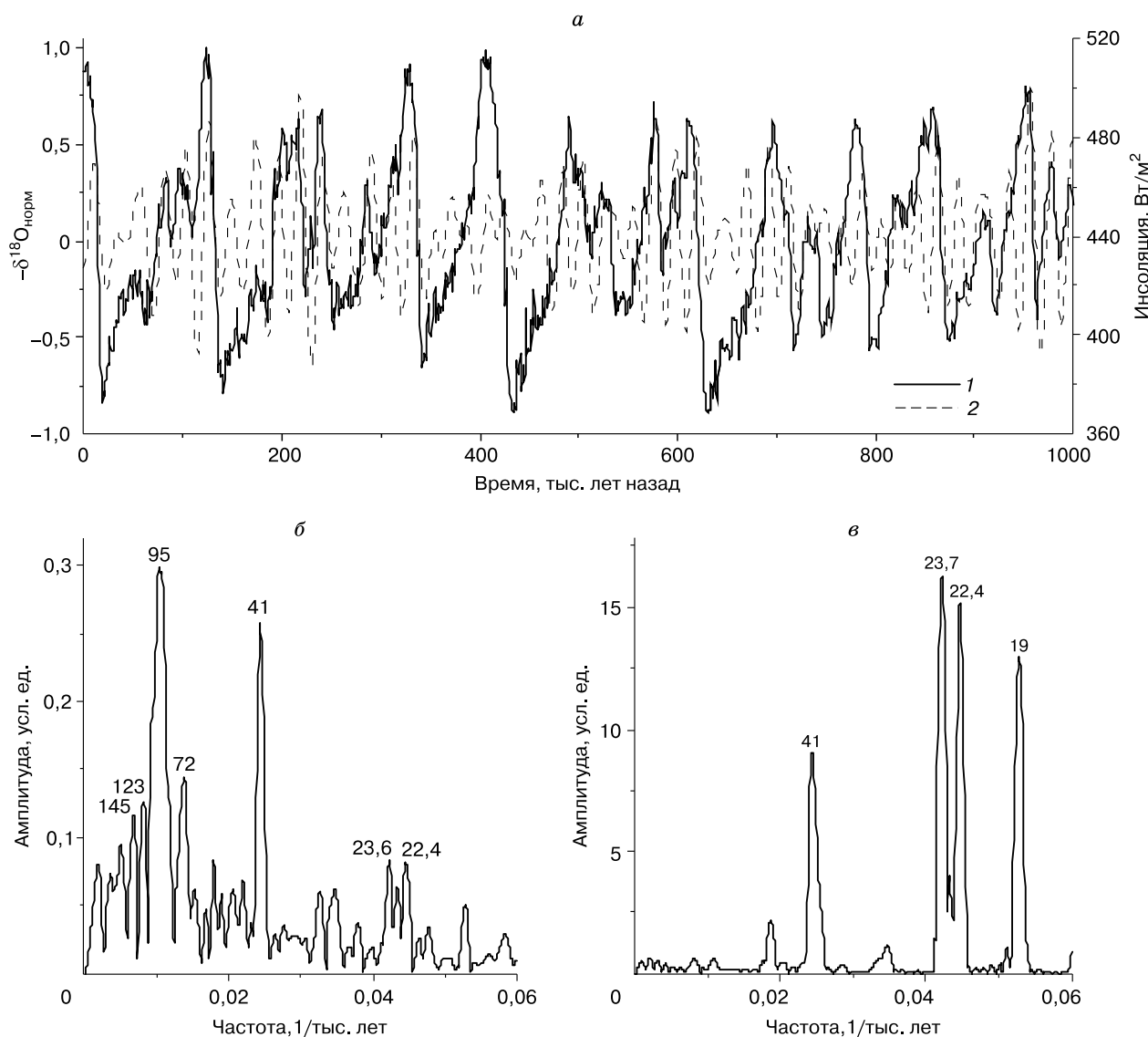
дическими, т. е. не имеют постоянного периода 100 тыс. лет, который есть в теории Мюллера и Макдональда.

Свои модификации в теорию Миланковича внес А. Берже. Для начала он произвел перерасчет вариаций орбитальных элементов, учитывая более точные приближения для параметров орбит и масс планет [Berger, 1977; Berger, Loutre, 1991]. Несоответствие рассчитанных им по методу Миланковича вариаций инсоляции летних калорических полугодий для разных широт, в частности для  $65^\circ$  с.ш., ИК-данным привело его к выводу, что “характеристика реальных палеоклиматов по кривым солнечной радиации Миланковича только на основании идентификации соответствующих максимумов и минимумов иллюзорна, так как она всегда приводит к видимому согласию” [Berger, 1978, p. 9]. Поэтому А. Берже предлагает вместо вариаций полугодовой инсоляции использовать для палеоклиматических интерпретаций среднемесячные и даже суточные вариации инсоляции. Основанием для такого вывода было следующее: “Миланковичские калорические полугодия маскируют внутригодовую изменчивость и ее вариации...”, и поэтому “...моделирование прошлого климата требует знания дневной или месячной инсоляции вместо либо в дополнение к миланковичской сезонной инсоляции” [Berger, 1980, p. 116].

Логика сделанного А. Берже предложения учитывать “внутригодовую изменчивость” требует использования для палеоклиматических интерпретаций вариаций среднемесячной инсоляции всех месяцев. Однако в дальнейшем он обычно использовал для различных интерпретаций и создания палеоклиматических моделей вариации только июньской (или июльской) инсоляции под 65° с.ш. Кривая среднемесячной инсоляции отличается от кривой полугодовой инсоляции прежде всего увеличенным вкладом прецессионной составляющей (по сравнению с вкладом за счет вариаций наклона земной оси). Таким образом, введение среднемесячной инсоляции подобно ис-

пользованию полугодовой инсоляции для широт ниже 65°. Следовательно, данное нововведение А. Берже вряд ли способствует разрешению противоречий ТМ, что иллюстрирует рис. 3.

На рис. 3 проведено сравнение ИК записи LR04 с кривой июльской инсоляции под 65° с.ш. Явно выраженное несходство этих кривых подтверждается и математическим анализом. Коэффициент корреляции двух кривых равен 0,24; он увеличивается до максимального (но все-таки низкого) значения 0,34, если инсоляцию сдвинуть на 3 тыс. лет вперед. Амплитудно-частотные спектры двух кривых показывают, что это несходство обусловлено в основном двумя причинами: а) от-



**Рис. 3.** Нормированные изменения изотопно-кислородной кривой LR04 (линия 1) и изменения июльской инсоляции под 65° с.ш. (линия 2) [Berger, Loutre, 1991] для последнего миллиона лет (а).

Данные спектрального временного анализа изменений: б –  $\delta^{18}O$ , в – инсоляции. Цифры у кривых – периоды наиболее значимых гармоник соответствующих изменений, тыс. лет.

существованием в спектре инсоляции 100-тысячелетней гармоника, которая преобладает в палеоклиматической записи; б) обратным соотношением вклада в соответствующие (палеоклиматические и инсоляционные) изменения со стороны прецессии (периоды около 23 и 19 тыс. лет) и наклона земной оси (период около 41 тыс. лет). Видно, что основной вклад в инсоляцию дает прецессия, а в климатические изменения – большой (относительно прецессии) вклад дает вариация наклона земной оси.

Дж. Имбри с соавторами [Imbrie et al., 1993, p. 730] предложили обобщающую концептуальную модель, в которой “массивные ледниковые щиты Северного полушария идентифицируются как наибольший источник инерции, который, устанавливая взаимодействие с атмосферой, океаном и литосферой, производит внутреннее термическое воздействие, которое управляет 100-тысячелетним циклом оледенения... В этой модели всякий раз, как комбинация 41- и 23-тысячелетних циклов, воздействуя на ледниковые щиты, уводит их далеко от равновесия, щиты сами управляют атмосферными процессами и устанавливают механизмы в атмосфере, которые передают климатическую энергию в полосу частот 100-тысячелетнего периода. Изменяя альбедо, управляя ветрами и изменяя свойства воздушных масс во взаимодействии с океаном и сушей, процесс роста и уменьшения ледниковых щитов вызывает изменения океанской циркуляции. Эти изменения усиливают начальные небольшие отклики на внешние воздействия путем транспортировки тепла в северные широты и изменения концентрации атмосферного CO<sub>2</sub>”. Как конкретно происходит передача энергии из полосы частот 23- и 41-тысячелетнего периодов в 100-тысячелетнюю полосу, не уточняется. Таким образом, механизм возникновения 100-тысячелетнего цикла остается невыясненным, отсюда появление последующих публикаций [Berger et al., 1999; Ganopolski, Calov, 2011].

Десятилетия работы по совершенствованию ТМ и, соответственно, развитию орбитальной гипотезы привели к ряду существенных достижений. Получено огромное количество уникальных эмпирических данных, составляющих основу исследований в этом направлении. Убедительно показана связь орбитально обусловленных вариаций инсоляции с глобальными изменениями палеоклимата. Разработана новая изотопно-кислородная климатохронологическая шкала плейстоцена, определен новый возраст палеомагнитной инверсии Матуйма–Брюнес и т. д. Тем не менее, как и следовало ожидать, попытки совершенствования противоречащей эмпирическим данным теории оказались также противоречивыми и малоубедительными. Более того, эти попытки являются не совершенствованием старой, а развитием новой, однако довольно неопределенной и непоследовательной теории.

## О НОВОЙ КОНЦЕПЦИИ ОРБИТАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ПАЛЕОКЛИМАТА

Противоречия теории Миланковича эмпирическим данным указывают на то, что у этой теории есть недостатки. В основном они сводятся к следующему [Большаков, 2001, 2003].

1. В палеоклиматической части своей теории М. Миланкович практически не учитывал влияние обратных связей в климатической системе Земли. Таким образом, одно из наиболее выдающихся открытий в (палео)климатологии, сделанное во второй половине XIX столетия Дж. Кроллем, – открытие обратных связей в климатической системе – не получило дальнейшего развития.

2. В своих палеоклиматических интерпретациях М. Миланкович не учитывал *реально действующих на всю Землю полных годовых вариаций инсоляции*, связанных со всеми орбитальными элементами. Он основывался на дискретных вариациях инсоляции (например, на изменениях инсоляции летнего калорического полугодия под 65° с.ш.), чего, конечно, делать нельзя, учитывая известные особенности связанных с отдельными орбитальными элементами вариаций инсоляции. Здесь имеются в виду противофазные изменения прецессионной инсоляции, происходящие как в разных полушариях Земли, так и на отдельных широтах в течение зимних и летних полугодий. Они приводят к тому, что, с одной стороны, связанные с прецессией изменения инсоляции всей Земли равны нулю и, с другой стороны, равны нулю полные годовые изменения инсоляции на любой широте. Также противофазны обусловленные колебаниями наклона земной оси изменения инсоляции высоких и низких широт, что опять же не изменяет инсоляцию всей Земли. И *только вариации эксцентриситета изменяют полную годовую инсоляцию всей Земли*, хотя это изменение невелико – оно не превышало 0,2 % в столетнем цикле за последние 2 млн лет.

Таким образом, использование дискретных вариаций инсоляции для палеоклиматических интерпретаций, и тем более для палеоклиматического моделирования, в работах М. Миланковича и его последователей нельзя признать правильным, так как *она не отражает непрерывных и глобальных, т. е. реально действующих, изменений инсоляции*, обусловленных вариациями всех трех орбитальных элементов. В то же время учет полных годовых орбитальных вариаций инсоляции для всех широт позволяет с *принципиально иных, нежели общепринятые, позиций* подойти к рассмотрению влияния вариаций орбитальных элементов на климат Земли.

Например, после установления факта, что главные изменения климата в последний миллион лет связаны со 100-тысячелетними вариациями эксцентриситета, общепризнанным стало мнение,

что ввиду относительной малости связанных с эксцентриситетом изменений инсоляции механизм климатического усиления для этих изменений должен быть принципиально иным, чем для вариаций инсоляции, обусловленных двумя другими орбитальными элементами (предполагалось, что непосредственное воздействие эксцентриситетных вариаций инсоляции не могло вызвать столь значительных, 100-тысячелетних циклов оледенения–межледниковья последнего миллиона лет). Так, если прецессионный и связанный с наклоном земной оси сигналы усиливались “линейно”, то эксцентриситетному сигналу приписывается некий “нелинейный” механизм усиления.

Однако, учитывая, что отклик на орбитальные сигналы (климатическое изменение) является непрерывным и глобальным, необходимо рассматривать также полный, непрерывный и глобальный инсоляционный входной сигнал. А такой полный входной сигнал, обусловленный прецессией и вариациями угла наклона земной оси ( $\epsilon$ ), как известно, равен нулю, тогда как эксцентриситетный сигнал, хотя и невелик, но больше нуля. С этих позиций именно “нелинейный”, т. е. какой-то необычно сильный, механизм усиления следует искать для преобразования в климатические изменения связанных с двумя первыми орбитальными элементами входных сигналов, – ведь эти сигналы равны нулю. Тем не менее последователи М. Миланковича продолжают оставаться на “дискретных” инсоляционных позициях, увеличивая трудность интерпретации эмпирических данных с позиций орбитальной теории палеоклимата [Большаков, 2013а]. Это выражается, в частности, в появлении после 1976 г. огромного количества статей, в которых решаются проблемы “100-тысячелетнего периода” и “среднеплейстоценового перехода”. Однако общепринятого объяснения этим явлениям нет до сих пор.

Учитывая указанные выше недостатки “классической” теории Миланковича и его последователей, для дальнейшего развития орбитальной теории палеоклимата и для адекватного объяснения с позиций орбитальной теории широкого спектра эмпирических данных была предложена новая концепция орбитальной теории палеоклимата [Большаков, 2001, 2003]. Она сформулирована следующим образом. 1. Степень и характер климатического воздействия вариаций орбитальных элементов зависят от глобального палеоклиматического состояния Земли (от термоэры до гляциоэры), определяемого, скорее всего, как земными, так и космическими причинами. 2. Определение климатической значимости вариаций каждого из трех орбитальных элементов требует учета специфики непрерывных во времени и пространстве изменений инсоляции, а также одновременного учета и более точной разработки механизмов земных климатических обратных связей, с помо-

щью которых орбитальные сигналы трансформируются в глобальные климатические изменения.

Таким образом, новая концепция приводит к иному взгляду на механизм глобальных изменений палеоклимата. При этом, исходя из тех же эмпирических данных, которые анализировались другими авторами, могут быть получены выводы, существенно отличающиеся от выводов этих авторов. На основе новой концепции был предложен упрощенный способ построения диаграммы (кривой), представляющей, подобно инсоляционной диаграмме Миланковича, палеоклиматические изменения. Поскольку в качестве первичного фактора, управляющего климатическими колебаниями плейстоцена, рассматриваются вариации орбитальных элементов, она была названа орбитально-климатической диаграммой (ОКД) [Большаков, 2003].

При создании ОКД были учтены следующие положения [Большаков, 2000, 2001, 2003]. Прежде всего эмпирические данные указывают на то, что необходимо учитывать *непосредственное* влияние вариаций *всех трех* орбитальных элементов, включая эксцентриситет ( $e$ ). Прямое воздействие вариаций  $e$  хорошо проявляется в ИК-кривых, причем не только в периоде их основных изменений, но и в фазе. Последнее выражается в том, что минимумам  $e$ , приводящим к уменьшению инсоляции, соответствуют четные, холодные стадии ИК-кривой. Помимо этого, как было показано выше в случае воздействия полных вариаций инсоляции, *прямое воздействие эксцентриситета может быть рассмотрено наравне с другими орбитальными элементами*. Одновременно должны быть разработаны индивидуальные для каждого орбитального элемента механизмы обратных связей, позволяющие преобразовать соответствующие сигналы в глобальные климатические изменения.

Требование учета непрерывных во времени, т. е. действующих в течение всего года, и глобальных (для всей Земли) вариаций инсоляции удовлетворяется следующим образом. При построении ОКД рассматриваются самые общие, качественные представления о глобальном климатическом воздействии вариаций орбитальных элементов. При этом предполагается, что вызванное изменением каждого орбитального элемента (исключая прецессию) уменьшение инсоляции приводит к похолоданию и увеличению объема льда, а увеличение инсоляции приводит к потеплению и таянию льда. Эти вариации существенно усиливаются посредством вовлечения положительных обратных связей. При построении ОКД принимались следующие механизмы (результаты) глобального климатического воздействия вариаций орбитальных элементов в плейстоцене, которые логично вытекают из влияния вариаций орбитальных параметров на изменение инсоляции (более подробно см. [Большаков, 2003, 2010]).

1. Уменьшение (или увеличение) эксцентриситета приводит к соответствующему уменьшению (увеличению) инсоляции и глобальному похолоданию (потеплению). (Утверждение в статье [Мельников, Смутьский, 2004, с. 4] о том, что при увеличении эксцентриситета инсоляция уменьшается, по-видимому, является опiskeй.)

2. Уменьшение (увеличение) угла наклона земной оси ведет к уменьшению (увеличению) инсоляции высоких широт обоих полушарий и, учитывая механизм альбедной обратной связи, к похолоданию (потеплению) в обоих полушариях Земли.

3. При учете вариаций прецессии глобальному оледенению, например, будут способствовать климатические условия с длительным прохладным летом (и мягкой короткой зимой) в Северном полушарии и длительной холодной зимой (и жарким коротким летом) в Южном полушарии, что осуществляется при нахождении Земли в афелии летом для Северного полушария.

При построении ОКД графики изменения за последний миллион лет всех трех орбитальных элементов строились так, чтобы их минимумы соответствовали похолоданиям. Для этого изменения прецессионного индекса  $e \sin \omega$  (где  $\omega$  – долгота перигелия относительно точки весеннего равноденствия) умножались на  $-1$ . Логично предположить, что временные интервалы наименьших совокупных значений вариаций всех трех орбитальных элементов и будут приходиться на оледенения. Однако прежде, чем складывать графики для нахождения этих совокупных минимальных значений, кривые необходимо нормировать, так как они отражают различные (в том числе по физической сути) параметры изменений. В результате каждая из нормированных кривых вариаций орбитальных параметров ограничивается интервалом от  $-1$  до  $1$ . Далее, рассчитывая совокупное изменение орбитальных элементов путем сложения всех трех графиков, имеющих теперь одинаковый масштаб, необходимо учесть, что разные орбитальные элементы имеют разную палеоклиматическую значимость. Это следует из эмпирических данных, согласно которым различным периодам климатических изменений соответствуют и разные амплитуды (интенсивность) этих изменений, а также согласуется с нашими представлениями о влиянии структуры отдельных орбитальных сигналов на их климатические проявления. Поэтому нормированным изменениям каждого орбитального элемента придавался различный вес, или коэффициент климатической значимости (ККЗ).

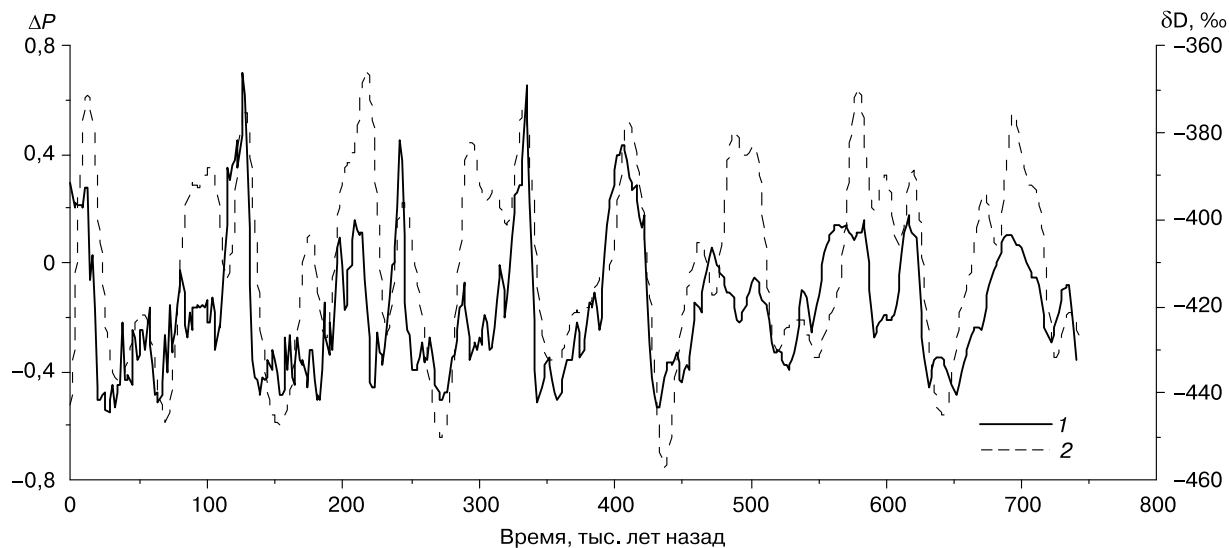
Наиболее заметные климатические изменения последнего миллиона лет характеризуются периодичностью около 100 тыс. лет, что связывается с вариациями эксцентриситета. Поэтому для эксцентриситетной кривой был принят наиболь-

ший ККЗ, равный 1. Для двух других орбитальных элементов ККЗ находились путем подбора, так чтобы полученная суммарная кривая в наибольшей степени соответствовала имеющимся надежным (и с достаточной степенью разрешения) изотопно-кислородным кривым, которые в настоящее время являются наиболее достоверными записями глобальных климатических изменений. Эти коэффициенты оказались равными 0,7 для угла наклона земной оси и  $-0,55$  для прецессии. По сути своего построения, ОКД представляет условную относительную вероятность ( $\Delta P$ ) наступления потеплений (межледниковий) для положительных  $\Delta P$  или похолоданий (оледенений) для отрицательных  $\Delta P$ . Сравнение полученной таким способом ОКД с ИК записью LR04 в интервале 0–1240 тыс. лет назад показало хорошее, учитывая простоту и прозрачность построения ОКД, подобие. Коэффициент корреляции двух кривых, с учетом задержки климатического отклика на орбитальное воздействие в 5,5 тыс. лет, равен 0,57.

#### ОРБИТАЛЬНЫЕ ЦИКЛЫ В ЗАПИСИ ЛЕДОВОГО КЕРНА СТАНЦИИ ДОМЕ С

Для сравнения с записью  $\delta D$  ледового керна используем усовершенствованную, новую ОКД (ОКДн), в которой исключено влияние 400-тысячелетней эксцентриситетной гармоники [Большаков, Прудковский, 2013]. Оказалось, что коэффициент корреляции между этими кривыми (рис. 4), при учете климатического сдвига на 5 тыс. лет, равен 0,76. На обеих кривых четко проявляется 100-тысячелетний эксцентриситетный цикл, что подтверждает механизм прямого воздействия эксцентриситетного инсоляционного сигнала. Представляет интерес также проведение спектрально-временного анализа записи  $\delta D$ . При этом надо понимать, что результаты такого анализа зависят от многих факторов. Это прежде всего качество записей, которое в данном случае определяется однозначностью палеоклиматической интерпретации выбранного показателя (параметра), отсутствием искажений седиментационной или ледовой записи в целом, отсутствием влияния на палеоклиматическую запись побочных (неклиматических) факторов, амплитудой его изменения, корректностью (точностью) временной шкалы записи. Выделение главных гармоник временных периодичностей зависит от длительности временного ряда, частоты отбора (временного шага) анализируемых проб (образцов) и даже от стохастических причин. По-видимому, все эти факторы сказались при проведении спектрального временного анализа исследуемой записи (рис. 5).

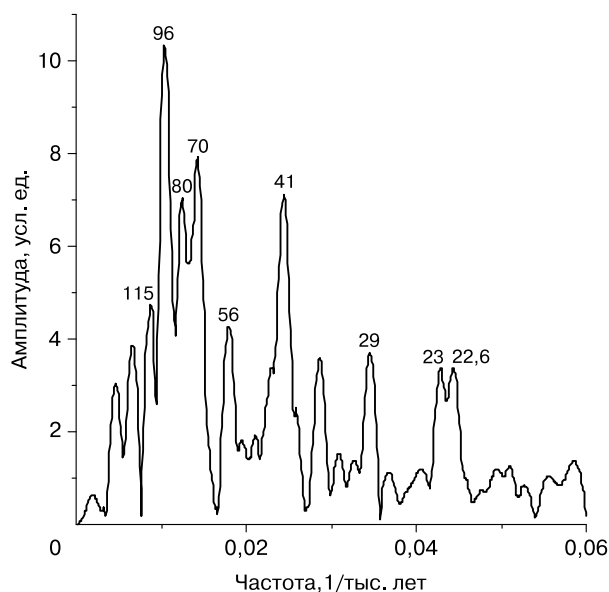
Тем не менее проведенный спектрально-временной анализ этой записи выявил орбитальные цикличности. На рис. 5 к эксцентриситетным следует отнести периоды 96 и 115 тыс. лет, к прецес-



**Рис. 4. Сопоставление записи  $\delta D$  станции Dome C (кривая 1) с орбитально-климатической диаграммой (кривая 2) ОКДн.**

$\Delta P$  – относительная вероятность похолоданий и потеплений.

сионным – периоды 23 и 22,6 тыс. лет. Отметим, что прецессионные периоды, так же как и на спектрально-временных диаграммах глубоководных изотопно-кислородных записей, выражены наиболее слабо. Для спектральной диаграммы ледового керна логичным выглядит более сильное проявление (по сравнению, например, с глубоководными записями) 56- и 29-тысячелетних гармоник, кото-



**Рис. 5. Амплитудно-частотный спектр записи  $\delta D$  ледового керна станции Dome C.**

Цифры у кривой – наиболее значимые выделенные в записи периодичности (в том числе орбитальные), тыс. лет.

рые выделяются как наиболее заметные гармоники вариаций наклона земной оси, помимо имеющей преобладающее значение 41-тысячелетней периодичности [Berger, Loutre, 1991]. Данный факт может быть обусловлен тем, что относительные изменения инсоляции, связанные с колебанием наклона земной оси, наибольшие в высоких широтах, в которых и находится станция Dome C.

То, что вариации угла наклона земной оси проявляются в записи  $\delta D$  станции Dome C сильнее, чем прецессионные вариации, объясняется с позиций новой концепции орбитальной теории палеоклимата, следующими обстоятельствами. Прецессионные вариации не изменяют годовой инсоляции на любой широте, тогда как связанные с наклоном земной оси годовые вариации инсоляции соответственно высоких и низких широт не равны нулю. Более того, вариации угла  $\epsilon$  однофазны в обоих полушариях, для этих вариаций есть общепринятый механизм их усиления. Данные обстоятельства и определяют, по нашему мнению, более сильное воздействие на климатические изменения плейстоцена вариаций наклона земной оси по сравнению с прецессионными вариациями. Особенно это превосходство проявляется в период 2,7–1,24 млн лет назад, когда на глубоководных ИК-кривых фиксируются практически только одни 41-тысячелетние климатические колебания.

## ВЫВОДЫ

1. Сопоставление записи  $\delta D$  с ОКД выявило их существенное подобие, что указывает на определяющее влияние орбитальных вариаций инсо-

ляции на колебания климата в Антарктиде и, в частности, на возможность прямого воздействия эксцентриситетных вариаций инсоляции на изменение климата последних 800 тысяч лет.

2. Глобальные колебания климата в циклах оледенения–межледниковья, выражающиеся в циклических колебаниях температуры Антарктиды с амплитудой более 10 °С, по-видимому, должны были отражаться и на изменении криосферы Земли в целом. Эти изменения криосферы, в свою очередь, должны были проявлять орбитальные цикличности, главными из которых в плейстоцене являются 41- и 100-тысячелетние периоды.

### Литература

- Большаков В.А.** Новый способ построения диаграммы палеоклиматических изменений плейстоцена // Докл. РАН, 2000, т. 374, № 5, с. 692–695.
- Большаков В.А.** Новая концепция астрономической теории палеоклимата: шаг вперед, после двух шагов назад // Физика Земли, 2001, № 11, с. 50–61.
- Большаков В.А.** Новая концепция орбитальной теории палеоклимата / В.А. Большаков. М., Изд-во Моск. ун-та, 2003, 256 с.
- Большаков В.А.** Проблема межледниковой 11-й морской изотопной стадии с позиций новой концепции орбитальной теории палеоклимата // Океанология, 2010, т. 50, № 2, с. 236–247.
- Большаков В.А.** Ответ на комментарии И.И. Смутьского // Вестн. РАН, 2013а, т. 83, № 1, с. 40–44.
- Большаков В.А.** Исследование характеристик “среднеплейстоценового перехода” с помощью сопоставления изотопно-кислородной записи LR04 с орбитально-климатической диаграммой // Докл. РАН, 2013б, т. 449, № 3, с. 338–341.
- Большаков В.А., Иванова Е.В., Прудковский А.Г.** Некоторые результаты применения нового метода хронометрирования палеоклиматических записей глубоководных колонок донных осадков // Океанология, 2005, т. 45, № 6, с. 916–926.
- Большаков В.А., Капица А.П.** Уроки развития орбитальной теории палеоклимата // Вестн. РАН, 2011, т. 81, № 7, с. 603–612.
- Большаков В.А., Прудковский А.Г.** Совершенствование орбитально-климатической диаграммы как инструмента интерпретации и анализа палеоклиматических записей плейстоцена // Вестн. МГУ. Сер. 5. География, 2013, № 6, с. 30–39.
- Карabanov E.B., Prokopenko A.A., Kuz'min N.I. и др.** Оледенения и межледниковья Сибири – палеоклиматическая запись из озера Байкал и ее корреляция с западно-сибирской стратиграфией (эпоха прямой полярности Брюнес) // Геология и геофизика, 2001, т. 42, № 1–2, с. 48–63.
- Котляков В.М., Лориус К.** Четыре климатических цикла по данным ледяного ядра из глубокой скважины на станции Восток в Антарктиде // Изв. РАН. Сер. геогр., 2000, № 1, с. 7–19.
- Мельников В.П., Смутьский И.И.** Астрономические факторы воздействия на криосферу Земли и проблемы их исследования // Криосфера Земли, 2004, т. VIII, № 1, с. 3–14.
- Миланкович М.** Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата / М. Миланкович. М.; Л., ГОНТИ, 1939, 207 с.
- Шварцбах М.** Климаты прошлого. Введение в палеоклиматологию / М. Шварцбах. М., Изд-во иностр. лит., 1955, 283 с.
- Adhémar J.A.** Revolutions de la mer: Déluges Périodiques, Carilian-Goeury et V. Dalmont. Paris, France, 1842, 184 p.
- Berger A.** Support for the astronomical theory of climatic change // Nature, 1977, vol. 269, p. 44–45.
- Berger A.** Theorie astronomique des paleoclimates, une nouvelle approche // Bull. Soc. Belge Geologie, 1978, vol. 87, p. 9–25.
- Berger A.** The Milankovitch astronomical theory of paleoclimates: a modern review // Vistas Astron., 1980, vol. 24, p. 103–122.
- Berger A.L., Loutre M.F.** Insolation values for the climate of the last 10 million years // Quatern. Sci. Rev., 1991, vol. 10, p. 297–317.
- Berger A., Li X., Loutre M.** Modelling northern hemisphere ice volume over the last 3 Ma // Quatern. Sci. Rev., 1999, vol. 18, p. 1–11.
- Bol'shakov V.A.** How long will the “precession epoch” last in terms of Pleistocene glacial cycles? // Rus. J. Earth Sci., 2008, vol. 10, ES3004, doi: 10.2205/2008ES000299.
- Bol'shakov V.A., Kapitsa A.P., Rees W.G.** James Croll: a scientist ahead of his time // Polar Record, 2012, vol. 48, No. 2, p. 201–205.
- Croll J.** Climate and time in their geological relations: a theory of secular changes of the Earth's climate. London, Edward Stanford, 1875, 577 p.
- Elkibbi M., Rial J.** An outsider's review of the astronomical theory of the climate: is the eccentricity-driven insolation the main driver of the ice ages? // Earth-Sci. Revs., 2001, vol. 56, p. 161–177.
- EPICA community members.** Eight glacial cycles from an Antarctic ice core // Nature, 2004, vol. 429, p. 623–628.
- Frigola J., Canals M., Cacho I. et al.** A 500 kyr record of global sea-level oscillations in the Gulf of Lion, Mediterranean Sea: new insights into MIS 3 sea-level variability // Climat. Past, 2012, vol. 8, p. 1067–1077.
- Ganopolski A., Calov R.** The role of orbital forcing, carbon dioxide and regolith in 100 kyr glacial cycles // Climat. Past, 2011, vol. 7, p. 1415–1425, doi:10.5194/cp-7-1415-2011.
- Hays J.D., Imbrie J., Shackleton N.** Variation in the Earth's orbit: pacemaker of the ice ages // Science, 1976, vol. 194, p. 1121–1132.
- Imbrie J., Berger A., Boyle A. et al.** On the structure and origin of major glaciation cycles. 2. The 100,000-year cycle // Paleoceanography, 1993, vol. 8, p. 699–735.
- Jouzel J.** A brief history of ice core science over the last 50 years // Climat. Past, 2013, vol. 9, p. 2525–2547.
- Lisiecki L.E., Raymo M.E.** A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic  $\delta^{18}\text{O}$  records // Paleoceanography, 2005, vol. 20, PA 1003, doi: 10.1029/2004PA001071, 2005.
- Muller R., MacDonald G.** Glacial cycles and orbital inclination // Nature, 1995, vol. 377, p. 107–108.
- Muller R., MacDonald G.** Glacial cycles and astronomical forcing // Science, 1997, vol. 277, p. 215–218.
- Petit J., Jouzel J., Raynaud D. et al.** Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica // Nature, 1999, vol. 399, p. 429–436.
- Tabor C.R., Poulsen C.J., Pollard D.** Mending Milankovitch's theory: obliquity amplification by surface feedbacks // Climat. Past, 2014, vol. 10, p. 41–50.
- Williams D.F., Peck J., Karabanov E.V. et al.** Lake Baikal record of continental climate response to orbital insolation during the past 5 Million years // Science, 1997, vol. 278, p. 1114–1117.

Поступила в редакцию  
5 июня 2014 г.