

В предлагаемой вниманию читателей статье кратко изложена история развития орбитальной теории палеоклимата, создание которой всё ещё не завершено. Способна ли эта теория быть основой создания корректных палеоклиматических моделей, дающих адекватное представление о работе климатической машины нашей планеты? На этот вопрос и пытаются ответить авторы, намечая направление её дальнейшего совершенствования.

УРОКИ РАЗВИТИЯ ОРБИТАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ПАЛЕОКЛИМАТА

В.А. Большаков, А.П. Капица

В январе 2011 г. исполнилось 190 лет со дня рождения выдающегося шотландского учёного Джеймса Кролля. Он был разносторонним исследователем, интересовавшимся и естественными, и гуманитарными науками (в частности, философией), но наибольший вклад он внёс в развитие орбитальной теории палеоклимата. К сожалению, этот вклад до сих пор не оценён по достоинству, что стало особенно очевидным сейчас, спустя почти 150 лет после публикации первых работ Кролля по данной теме. Также очевидна и необходимость извлечения уроков из весьма поучительной, почти 170-летней истории развития орбитальной теории, которая не завершена и поныне. Актуальность вопроса определяется прежде всего существующими острыми разногласиями в оценке антропогенных факторов при прогнозировании глобальных климатических изменений.



Авторы работают на географическом факультете Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. БОЛЬШАКОВ Вячеслав Александрович — доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории новейших отложений и палеогеографии плейстоцена. КАПИЦА Андрей Петрович — член-корреспондент РАН, заведующий кафедрой рационального природопользования.

Современная ситуация очень напоминает ту, о которой более 50 лет назад писал М. Шварцбах, анализируя развитие теории палеоклимата после признания в XIX в. большинством учёных существования покровных оледенений в геологическом прошлом: «...Настоящий расцвет климатических гипотез начался только с открытия “ледникового периода”. Более 50 теорий ледниковых эпох было предложено для объяснения этих столь поразительных колебаний. С того времени учение об изменении климата становится на весьма ненадёжную почву. Это лучше всего видно из курьёзного обстоятельства, что одно и то же явление объясняется совершенно по-разному. Так, по Кроллю и Пильгриму, развитию ледников благоприятствовала суровая зима, а по Кеппену — мягкая; извержения вулканов Фрэх рассматривает в качестве причины тёплых периодов, а Хантингтон — ледниковых; Дюбуа и другие причину оледенения видят в ослаблении интенсивности солнечной радиации, а Симпсон — в её усилении. Если ранее считалось установленным, что ледниковые периоды следуют за процессами горообразования, то Филиппи и Ширмейзен дали обратное толкование этой зависимости и объясняли орогенез как результат ледниковых периодов. Вундт с соавторами считает причиной ледниковых периодов изменение путей Гольфстрима, а Берман и другие полагают, что Гольфстрим, способствующий увеличению влажности, является основным фактором возникновения ледниковых периодов. Есть даже и такие исследователи, которые совсем отрицают существование ледниковых периодов и все факты, собранные по этому вопросу, не считают признаками изменения климата» [1, с. 214]. Наиболее общепринятой сейчас является орбитальная теория, но её развитие продолжает оставаться противоречивым.

РАЗВИТИЕ ОРБИТАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТ Ж. АДЕМАРА ДО М. МИЛАНКОВИЧА

Как известно [2, 3], орбитальная гипотеза палеоклимата, направленная на объяснение существования в геологическом прошлом оледенений, впервые была высказана Ж. Адемаром [4]. (Напомним, что главным постулатом орбитальной теории палеоклимата, которую часто называют астрономической теорией, является утверждение об обусловленности глобальных климатических изменений — оледенений и межледниковий — вариациями приходящей к Земле солнечной радиации. Вариации инсоляции вызваны квазипериодическими изменениями трёх орбитальных элементов — эксцентриситета эллиптической орбиты Земли, угла наклона земной оси к плоскости эклиптики и прецессии земной оси.) Адемар связывал изменения климата с прецессией равноденствий и полагал, что оледенение будет в том полушарии, день зимнего солнцестояния которого приходится на афелий. Это приводит к увеличенным сезонным контрастам инсоляции в данном полушарии, холодной длительной зиме и жаркому короткому лету. В противоположном полушарии контрасты инсоляции будут понижены и мягкая короткая зима будет сопровождаться прохладным длительным летом. По мнению Адемара, именно холодная длинная зима и является причиной оледенения в первом полушарии. Соответственно, в другом полушарии в это время будет межледниковье.

В геологической части теория Адемара испытала сильное влияние идей катастрофизма и довольно быстро была отвергнута современниками. В астрономической части теория была опровергнута английским астрономом Дж. Гершелем и немецким естествоиспытателем А. Гумбольдтом [2, 3, 5]. Они указывали, что средняя температура полушария определяется количеством калорий солнечной энергии, которое оно получает за год, а не за полугодие. А так как связанное с прецессией изменение годового количества солнечной энергии равно нулю для любого из полушарий (поскольку, например, понижение зимней инсоляции компенсируется увеличением летней инсоляции), то нет причин для противоположных изменений климата в этих полушариях. Соответственно, нет причин и для наступления оледенений в одном полушарии и межледниковий — в другом.

Тем не менее два десятилетия спустя орбитальная гипотеза Ж. Адемара была вновь востребована Дж. Кроллем в “Теории вековых изменений земного климата” [2, 6, 7]. Несмотря на то, что Кроль также считал, что к оледенению в данном полушарии приводят климатические условия, характеризующиеся холодными длительными зимами, его теория явилась громадным шагом вперёд в

обосновании влияния орбитально обусловленных вариаций инсоляции на глобальные изменения климата. Кроль начал свою работу примерно на 20 лет позже опубликования книги Адемара, и ко времени выхода в свет его главного труда “Климат и время в их геологических взаимоотношениях” [2] наука существенно продвинулась вперёд. Он хорошо знал новые достижения астрономии, физики, метеорологии, геологии. Ему было известно и приведённое выше мнение Гумбольдта и Гершеля о необходимости учёта полного годового количества тепла при анализе глобальных климатических колебаний.

Кроль понимал незначительность прямого воздействия орбитально обусловленных вариаций инсоляции на глобальный климат, поскольку связанные с эксцентриситетом (e) изменения инсоляции очень малы (десятые доли процента), а среднегодовое изменение инсоляции всей Земли, обусловленное вариациями двух других орбитальных элементов — прецессии и наклона земной оси — равно нулю (является, как он писал, “скомпенсированным”). Кроль осознавал экстравагантность своей новой идеи, которая — он был уверен — объясняла связь между орбитально обусловленными вариациями инсоляции и оледенениями: “Доказывать, что чисто астрономические причины могут дать такой эффект, было бы просто абсурдно... Важный факт, однако, был упущен: хотя оледенение не является прямым результатом увеличения e , последнее может, тем не менее, сделать это косвенно. Хотя возрастание эксцентриситета может не иметь прямой тенденции к понижению температуры и покрытию всей страны льдом, тем не менее оно способно вовлечь в действие физические агенты, которые произведут данный эффект” [2, р. 13].

Под физическими агентами Кроль подразумевает обратные связи, которые в цепочке “воздействующая причина — результат” взаимно усиливают друг друга. Таким образом, Кроль первым ввёл в рассмотрение влияние положительных обратных связей, усиливающих климатическое воздействие орбитально обусловленных вариаций инсоляции и трансформирующих указанные вариации в глобальные климатические изменения — оледенения и межледниковья.

Кроль рассматривал два механизма положительных обратных связей: между температурой и площадью снежного и ледового покрова (альбедная связь) и между глобальной температурой и смещением экваториального течения Атлантики, причём главное место в развитии оледенения он отводил второму механизму, предварительно показав огромное влияние Гольфстрима на климат Европы. Необходимым условием осуществления предложенного механизма Кроль считал высокое значение эксцентриситета e земной орбиты. Он полагал, что только связанные с повышенным

значением e особенно холодные и длительные зимы, сопровождаемые выпадением аномального количества снега, будут обеспечивать работу механизма положительной обратной связи, приводящего к дальнейшему понижению температуры, несмотря на то, что понижение зимней инсоляции сопровождается соответствующим повышением летней.

Пользуясь формулами, данными Леверье, Кролль рассчитал изменения эксцентриситета за 3 млн. лет до 1800 г. и на 1 млн. лет после этой даты. Согласно его вычислениям, особенно большие значения эксцентриситета были за последний миллион лет в периоды времени от 980 до 720 тыс. и от 240 до 80 тыс. лет назад. Именно с этими периодами он связывал возможные оледенения. Следовательно, Дж. Кролль был первым, кто использовал астрономические вычисления для оценки геологического возраста палеогеографических событий. Согласно Кроллю, последнее оледенение на Земле закончилось около 80 тыс. лет назад.

По теории Кролля, оледенения на Земле происходили в периоды особенно больших значений эксцентриситета. В эти длительные промежутки времени попеременно, примерно через 10,5 тыс. лет (среднее время полупериода климатической прецессии), подвергалось оледенению каждое из полушарий, а именно то, в котором, в соответствии с прецессионными изменениями, день зимнего солнцестояния приходился на прохождение Земли афелия. В то же время в другом полушарии были особенно тёплые условия. Очевидно, такие оледенения не являются в полном смысле слова глобальными. Периоды времени с промежуточными значениями эксцентриситета трактовались Кроллем как межледниковья и сопоставлялись с отложениями, разделявшими моренные горизонты.

В своей книге Кролль выделил главу, посвящённую климатическому влиянию вариаций угла наклона ε земной оси к перпендикуляру к плоскости эклиптики, которое он не учитывал в основной теории. Отчасти это было связано с тем, что достаточно точные данные об изменении во времени угла ε были получены позже, чем для прецессии и эксцентриситета, Стоквеллом в 1873 г. и Пильгримом в 1904 г. [2, 8]. Тем не менее Кролль осознавал важность учёта вариаций данного орбитального элемента.

Рассмотрение климатического влияния вариаций наклона земной оси Кролль проводил, пользуясь расчётами Мича [2, pp. 399, 400]. Согласно им, при увеличении угла ε годовое количество солнечного тепла в высоких широтах возрастает, а в низких уменьшается. Наоборот, уменьшение ε вызовет снижение инсоляции и, соответственно, температуры высоких широт, что приведёт к увеличению в этих областях снежного и ледового покрова. Поскольку воздействие альбедной поло-

жительной обратной связи усилит первоначальное похолодание и образование ледового покрова обоих полушарий, Кролль сделал вывод, что уменьшение угла наклона должно способствовать глобальному оледенению. Соответственно, увеличение ε должно приводить к потеплению и таянию снега и льда в полярных областях. (Отметим, что в то время это был нетривиальный результат, так как некоторые исследователи, которых Кролль в своей книге критикует, считали, что увеличение угла ε приводит, наоборот, к похолоданию в высоких широтах, например, якобы за счёт понижения широты полярного круга).

Колебание наклона земной оси, приводящее к однофазному изменению климатических условий в высоких широтах обоих полушарий, может усиливать в одном полушарии и ослаблять в другом климатическое воздействие прецессионно-эксцентриситетного механизма оледенений. Так, похолодание рассматриваемого полушария будет усиливаться, если нахождение точки зимнего солнцестояния в афелии совпадает по времени с минимальным значением угла ε , и ослабляться, если угол наклона будет вблизи его максимальных значений. Кролль понимал, что это усложняет его теорию, и, видимо, поэтому он не рассмотрел данный вопрос более обстоятельно.

К концу XIX столетия были обнаружены существенные противоречия между теорией Кролля и эмпирическими данными. И европейские, и американские учёные пришли к выводу, что оледенения в разных полушариях происходили не противофазно, а практически одновременно и что последнее оледенение завершилось не 80 тыс. лет назад, как следовало из теории, а примерно 10 тыс. лет назад. Это послужило основной причиной отказа от теории Кролля.

Расхождение теории с эмпирическими данными указывает на её несостоятельность. Определяя главные её недостатки с позиций современных данных об оледенениях плейстоцена, можно сделать вывод, что основной из них заключается в ошибочности главного положения о том, что оледенения связаны только с обусловленными прецессией сезонными контрастами инсоляции, промодулированными изменениями эксцентриситета. Наше заключение следует из известных фактов, что оледенения плейстоцена происходили практически одновременно в обоих полушариях, что не согласуется с противофазным влиянием прецессии, и приходились на минимальные значения эксцентриситета (рис. 1), то есть именно на то время, когда прецессионные изменения минимальны, а не максимальны, как требует теория Кролля. Кроме того, анализ изотопно-кислородных записей глубоководных колонок показал наименьшее влияние прецессии на глобальные изменения последнего миллиона лет.

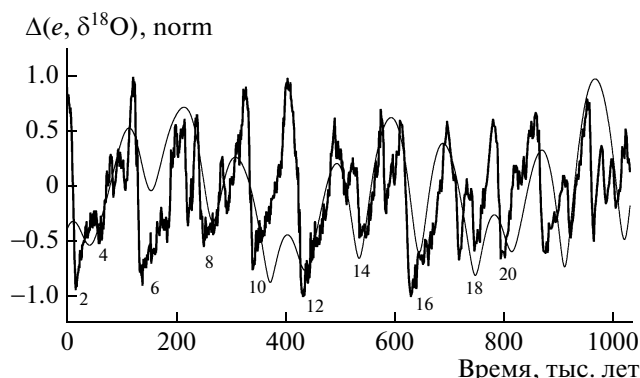


Рис. 1. Сравнение нормированных изменений эксцентриситета (по [20], тонкая линия) и изотопно-кислородной кривой LR-04 (по [17], утолщённая линия) для последнего миллиона лет

Для удобства сравнения значения $\delta^{18}\text{O}$ ИК кривой умножены на -1 так, чтобы уменьшение $\delta^{18}\text{O}$ соответствовало увеличению глобального объёма льда. Цифры у ИК-кривой — номера чётных (ледниковых) ИК-стадий, при этом стадии 2 и 4 представляют на ИК-кривой одно — вюрмское (валдайское) оледенение

Конечно, такое заключение легко сделать сейчас, с позиций современных научных знаний. А во второй половине XIX столетия, когда геологи только начали осознавать масштабы времени геологических изменений, записанных в последовательностях осадочных и изверженных пород, когда первые шаги делались в изучении природы тепла и теплообмена, когда ещё недавно была открыта планета Нептун, теория Кролля была огромным шагом вперёд в понимании взаимодействия астрономических и земных факторов, определяющих климатические условия планеты последнего миллиона лет. Его работа, особенно в части введения в рассмотрение факторов положительной обратной связи, вовлечённых в процесс глобальных климатических изменений и, по сути дела, обуславливающих интенсивность и глобальность климатического воздействия орбитальных вариаций инсоляции, намного опередила своё время.

Последнее обстоятельство определило и ещё один существенный изъян теории — качественное рассмотрение влияния положительных обратных связей в процессе трансформации вариаций инсоляции в глобальные климатические изменения. Однако этот недостаток так же, как и отсутствие во времена Кролля точных расчётов вариаций наклона земной оси, связан с недостаточным уровнем развития науки той эпохи. Заметим, и сейчас, 150 лет спустя, создание математически строгой модели палеоклиматов плейстоцена, с точным расчётом (и даже учётом) влияния всех обратных связей, является нерешённой проблемой.

К сожалению, многие достижения Дж. Кролля были забыты. Так, его имя не упоминается среди

основателей метода астрохронологии. Однако наибольшее сожаление вызывает то, что не оценено по достоинству главное достижение его теории — открытие положительных обратных связей в климатической системе. Была забыта и причина, заставившая Кролля рассматривать обратные связи: высказанная Гершелем и Гумбольдтом необходимость учёта воздействия полных годовых вариаций инсоляции при объяснении глобальных колебаний климата. Сказанное убедительно подтверждается развитием теории Миланковича и его последователей.

Известный сербский учёный М. Миланкович начал исследования на 50 лет позже Дж. Кролля. Его версия орбитальной теории палеоклимата отличалась от развитых ранее теорий Адемара и Кролля математически строгими вычислениями орбитально обусловленных вариаций инсоляции на верхней границе атмосферы. В расчётах Миланкович пренебрёг вкладом изменений эксцентриситета в инсоляционную кривую: основной количественный вклад в вариации инсоляции обеспечивался прецессией и изменениями угла наклона земной оси [9]. Кроме того, в отличие от Кролля, он считал, что оледенению в данном полушарии способствует не холодная длительная зима, а прохладное длительное лето. Отсюда следует, что Миланкович, как и его предшественники, отводил прецессии главную роль в климатическом воздействии орбитальных элементов. Миланкович придавал прямую палеоклиматическую значимость вычисленным им дискретным (для летнего калорического полугодия на 65° с.ш.) вариациям инсоляции для последних 600 тыс. лет. Например, наименьшие значения летней инсоляции на 65° с.ш. интерпретировались им как оледенения. Более того, он предполагал линейное соотношение между вычисленными им летней и зимней инсоляцией разных широт и летней и зимней температурами на этих широтах [9]. Выделенные Миланковичем на его инсоляционной диаграмме четыре оледенения за последние 600 тыс. лет хорошо соотносились с распространённой тогда альпийской схемой Пенка и Брюкнера, в которой были видны оледенения Вюрм, Рисс, Миндель и Гюнц. Данное обстоятельство способствовало широкому признанию его теории. Однако по мере развития науки теория Миланковича подвергалась всё большей критике, что привело к отказу от неё в 60-х годах XX в. [3, 5].

Теория Миланковича оказала двоякое влияние на развитие орбитальной теории палеоклимата. С одной стороны, это был шаг вперёд, связанный с использованием математически точных расчётов инсоляции. С другой стороны, развитие орбитальной теории было отброшено почти на столетие назад. Миланкович не принял во внимание обоснованное заключение Гершеля и Гумбольдта: для объяснения глобальных колебаний климата

он использовал вычисления полугодовой инсоляции, да ещё на одной широте. Поскольку Миланкович, применяя линейный механизм климатического усиления, придавал прямую палеоклиматическую значимость вычисленным вариациям инсоляции, для разработки теории ему не нужно было привлекать и развивать предложенные Кроллем механизмы обратных связей. (Он использовал альбедную связь для установления механизма климатического воздействия вариаций наклона земной оси, что уже было сделано Кроллем.)

ЭМПИРИЧЕСКИЕ ПАЛЕОКЛИМАТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ВТОРОЙ ПОЛОВИНЫ XX СТОЛЕТИЯ И МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЕОРИИ МИЛАНКОВИЧА

Это был важный этап развития орбитальной теории, связанный с эмпирическим подтверждением глобального климатического влияния вариаций инсоляции, обусловленных квазипериодическими изменениями элементов земной орбиты. Впервые в публикации Дж. Хейса, Дж. Имбри и Н. Шеклтона [10] проанализированы изотопнокислородная (ИК) и другие палеоклиматические записи двух глубоководных колонок Индийского океана. В публикации не только показано, что глобальные колебания климата последних 500 тыс. лет обусловлены в основном вариациями орбитальных элементов, но и выявлены существенные противоречия теории Миланковича с эмпирическими данными, подтверждённые и обобщённые другими исследователями [11–16 и др.]. Таким образом, с 1976 г. начался новый, весьма противоречивый этап развития орбитальной теории.

Основные противоречия теории Миланковича.

- Климатическая цикличность последнего миллиона лет в первую очередь определяется 100-тысячелетней периодичностью, соотносимой с вариациями эксцентриситета, непосредственное воздействие которого не рассматривается. Соответственно, число оледенений и их даты отличаются от аналогичных параметров оледенений инсоляционной диаграммы Миланковича, сконструированной для летней инсоляции на 65° с.ш.

- Ледниковые события, согласно эмпирическим данным, попадают на минимумы эксцентриситета (см. рис. 1), тогда как в теории Миланковича они (самые глубокие минимумы на инсоляционной диаграмме) приходятся на максимумы эксцентриситета.

- Согласно теории Миланковича, изменения температуры подобны вычисленным им полугодовым изменениям инсоляции (так называемый линейный механизм усиления вариаций инсоляции). Поскольку изменение инсоляции для низких и умеренных широт определяется прецесси-

ей, изменения летней и зимней инсоляции, а также летней и зимней температуры находятся в противофазе даже для 55° и 65° с.ш. Следовательно, согласно Миланковичу, летняя температура уменьшается, а зимняя увеличивается во время оледенений, тогда как во время межледниковий летняя температура возрастает, а зимняя уменьшается [9, диаграмма 4]. Однако сейчас хорошо известно, что летняя и зимняя температуры менялись в фазе во время оледенений и межледниковий плейстоцена [18, 19].

- Около миллиона лет назад основная климатическая периодичность изменилась от 41 тыс. лет до 100 тыс. лет, что не согласуется с теорией Миланковича, поскольку вариации орбитальных элементов существенно в это время не менялись.

- Глобальные климатические изменения синхронны в обоих полушариях (по крайней мере, для максимума последнего оледенения и оптимума голоцена), тогда как инсоляционные кривые, вычисленные Миланковичем для 65° северной и южной широты, смещены не менее, чем на 5 тыс. лет, в определении временного положения инсоляционных минимумов и максимумов, соответствующих этим климатическим событиям.

Согласно логике, теория, противоречащая эмпирическим данным, неверна. Следовательно, теория Миланковича должна быть отвергнута, как было сделано полвека назад в первый раз по отношению к этой теории и более 100 лет назад по отношению к теории Кролля [3, 5]. Однако наши предшественники оказались последовательнее наших современников 1980-х годов XX в., которые начали “модернизировать” теорию Миланковича. Попытки последователей учёного разрешить указанные противоречия привели к появлению новых проблем. Одним из главных звеньев модернизации было использование месячной (рис. 2, а) или даже суточной летней инсоляции на 65° с.ш. вместо полугодовой инсоляции, использованной Миланковичем. Очевидно, что это даже худший вариант, ведь прецессионный вклад в среднемесячные, а тем более суточные вариации инсоляции ещё выше, чем в полугодовые.

Указанная модернизация не привела к решению известных проблем теории Миланковича и его последователей. Наоборот, она породила новое противоречие между теорией и эмпирическими данными — несоответствие между наибольшей амплитудой прецессионной гармоники инсоляционного воздействия (месячными или суточными вариациями летней инсоляции на 65° с.ш.) и наименьшей амплитудой 23-тысячелетней гармоники палеоклиматической записи $\delta^{18}\text{O}$ (рис. 2, б, в).

В конце 2006 г. была опубликована статья под названием “В защиту Миланковича”. В ней Г. Роэ замечает: «Движение вперёд задерживалось недо-

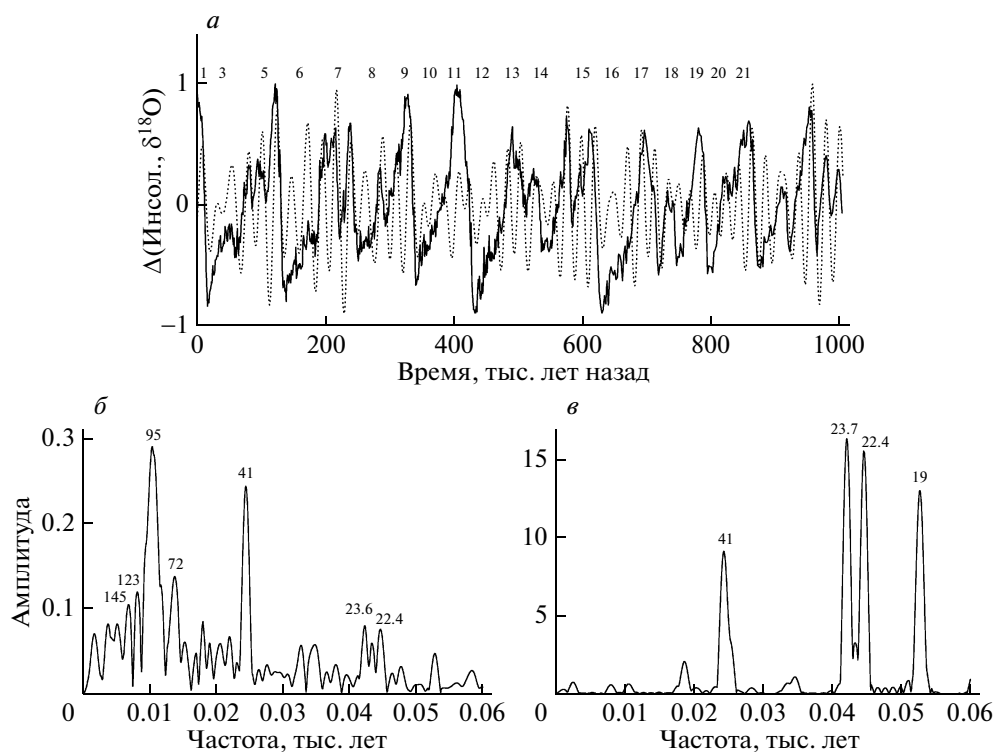


Рис. 2. Сравнение изотопно-кислородных данных и среднемесячной инсоляции

a – нормированные изменения изотопно-кислородной кривой LR-04 ($\delta^{18}\text{O}$, сплошная линия) и июльской инсоляции 65° с.ш. (по [20], точечная линия) для последнего миллиона лет. Цифры над ИК-кривой означают общепринятые номера ИК-стадий; нечётные стадии соответствуют межледниковьям (максимумы), чётные – оледенениям (минимумы ИК-кривой); *б, в* – данные спектрального временного анализа изменений: $\delta^{18}\text{O}$ (*б*) и инсоляции (*в*), показанных на рис. 2, *a*. Цифры над кривыми указывают периоды (тыс. лет) наиболее значимых гармоник соответствующих изменений

статком хорошо сформулированной, конкретной и общепринятой гипотезы. Термин “гипотеза Миланковича” используется различными способами – от простого ожидания обнаружить орбитальные частоты во временных сериях палеоклиматических показателей до представления, что вся климатическая изменчивость на временных шкалах от 10^3 до 10^6 лет фундаментально управляется орбитальными вариациями. Где-то посредине этих двух представлений находится неопределённое утверждение, которое можно обнаружить во многих учебниках, что орбитальные вариации являются причиной, или хронометром, плейстоценовых оледенений. Фразы типа “кривые Миланковича”, “инсоляция Миланковича”, “частоты Миланковича”, “воздействие Миланковича” и “циклы Миланковича” заполнили литературу, дополняя эту неясную картину» [21].

С приведённым высказыванием во многом можно согласиться, хотя непонятно, от кого защитил Миланковича автор. (Публикации [5, 12, 13, 22], в которых теория Миланковича последовательно критиковалась и, в частности, использовались те же доводы, вплоть до совпадения с приведёнными Роэ фразами, в его статье не упоминаются.) В самом деле, правильная формулировка

теории Миланковича – почему-то запутанный вопрос. Например, в предисловии к сборнику трудов Международной конференции “Миланкович и климат”, подписанном известными редакторами сборника, теория Миланковича определяется так: “Суть теории Миланковича заключается в том, что главные флуктуации глобального климата, связанные с ледниковым циклом, вызваны вариациями приходящей солнечной радиации – вариациями, которые в свою очередь вызваны медленными изменениями геометрии земной орбиты, происходящими в ответ на предсказуемые изменения гравитационного поля, воздействующего на Землю” [23, p. ix]. Ещё один пример – начало статьи [24]: “Теория Миланковича, заключающаяся в том, что климат контролируется вариациями орбитальных параметров Земли, получила широкое признание”. Однако данные определения описывают не конкретную теорию Миланковича, а более общую орбитальную гипотезу, которая задолго до М. Миланковича использовалась в качестве основы для развития различных версий орбитальной теории палеоклимата Ж. Адемаром, Дж. Кроллем и другими учёными. Тем не менее именно такая неверная трактовка теории Миланковича является общепринятой.

К сожалению, Роэ не приводит ни одной исходной формулировки теории Миланковича, а даёт новую формулировку, то есть, строго говоря, другую теорию: “В этой статье предлагается и защищается особая формулировка гипотезы Миланковича: орбитально обусловленные вариации летней инсоляции высоких северных широт находятся в противофазе со скоростью изменения объёма ледниковых щитов” [21]. Отсюда можно сделать вывод, что появление публикации [21] — ещё одно признание существования недостатков в теории Миланковича. Добавим, что новая формулировка также не решает ни одной проблемы теории Миланковича, а только усложняет сопоставление теории с эмпирическими данными.

В заключение ещё раз подчеркнём, что и ранее обращалось внимание на некорректность формулировок понятия “теория Миланковича” [5, 25]. Признание данного факта в зарубежной научной печати впервые появилось в статье в 2006 г. А это указывает, что авторы многих научных работ, как зарубежных, так и российских, употребляя в течение длительного времени термин “теория Миланковича”, использовали его некорректно, не понимая его истинного смысла. Всё это плохо согласуется с предъявляемыми наукой требованиями применения точных и конкретных определений и понятий, их соответствия действительности и не способствует повышению доверия к результатам соответствующих научных изысканий. Добавим также, что наметились некоторые сдвиги в уточнении сути теории Миланковича: в работе [26] эта теория называется авторами не теорией колебаний климата, как её называл Миланкович, и не астрономической теорией палеоклимата, как её часто называют, а теорией инсоляции. Полагаем, что это может указывать на публичное признание авторами [26] недостатков палеоклиматической части теории Миланковича. Сказанное выше привело автора [27] к заключению, что утверждение о правильности теории Миланковича является одной из наиболее длительных научных мистификаций XX в.

УРОКИ ИСТОРИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ОРБИТАЛЬНОЙ ТЕОРИИ

Незнание истории развития орбитальной теории приводит к появлению в авторитетных журналах таких статей, как: “Может ли средняя годовая инсоляция изменять климат?” [28] или: “41-тысячелетний мир: ещё одна нерешённая тайна Миланковича” [16] и др. Утвердительный ответ на вопрос в заголовке первой статьи дал более 130 лет назад Дж. Кролль, рассматривая климатическое влияние вариаций угла наклона земной оси. Относительно “41-тысячелетнего мира” следует возразить, что это не “тайна Миланковича”, а противоречие его теории.

В работах [5, 29] было подчёркнуто, что строгий учёт различных обратных связей является одним из главных условий создания корректной орбитальной теории палеоклимата, так как именно учёт специфики обратных связей во времени и пространстве может разрешить проблему нулевых среднегодовых изменений инсоляции земного шара, связанных с вариациями угла наклона земной оси и прецессией. Поэтому необходимо разработать точный механизм климатического воздействия вариаций различных орбитальных элементов, прежде всего прецессии.

Традиционная интерпретация климатического влияния прецессии — “оледенение может развиваться, если только лето высоких северных широт достаточно прохладное, чтобы предотвратить таяние выпавшего зимой снега, что приводит, таким образом, к положительному годовому балансу снега и льда” [16, p.1] — не является достаточно корректной. Это толкование не полное, поскольку принимает во внимание только половину прецессионного воздействия — холодное лето, тогда как необходимо говорить о реально действующем полном годовом инсоляционном цикле, то есть о длительном прохладном лете и короткой мягкой зиме или длительной холодной зиме и жарком коротком лете. Именно для полного годового инсоляционного цикла должен быть найден конкретный механизм климатического усиления прецессии. При этом нельзя исключить возможности одновременного осуществления представления Миланковича (длинное прохладное лето и короткая мягкая зима благоприятны для оледенения) в Северном полушарии и противоположного представления Кролля — в Южном [5, 25].

Необходимо также помнить, что более прохладное лето в высоких широтах наступает не только, когда оно соотносится с наибольшим расстоянием от Солнца, но и когда угол наклона земной оси уменьшается, что приводит к снижению среднегодовой (и прежде всего летней) инсоляции в высоких широтах обоих полушарий. В то же время вызванные прецессией сезонные климатические контрасты происходят в противофазе в различных полушариях, а изменение среднегодовой прецессионной инсоляции равно нулю для любой широты.

Главной причиной более сильного глобального климатического влияния в плейстоцене наклона земной оси, по сравнению с прецессией, является то, что вариации ϵ обеспечивают однофазное изменение среднегодовой инсоляции высоких широт обоих полушарий, которое в свою очередь усиливается альбедной обратной связью. Таким образом, влияние угла наклона, а не прецессии становится главной причиной климатического воздействия летних температур в упомянутой выше интерпретации. Однако рассмотрение в качестве орбитального воздействия месячной, а

тем более суточной инсоляции автоматически предполагает, что главный вклад в изменения инсоляции даёт прецессия (см. рис. 2). Отсюда и возникают неверные представления многих исследователей о преобладающем влиянии прецессии на глобальные изменения климата в плейстоцене. Например, в работе [30] приведены варианты астрономического воздействия на климатическую систему Земли. Климатическое воздействие орбитальных элементов в публикации соответствует механизму оледенений Миланковича: холодная, то есть соответствующая оледенению, орбита характеризуется большим эксцентриситетом, малым углом наклона земной оси и нахождением Земли в перигелии во время зимнего солнцестояния Северного полушария, что приводит к низким значениям летней инсоляции. Горячая — межледниковая — орбита характеризуется также большим эксцентриситетом, но максимальным углом ϵ и нахождением Земли в перигелии во время летнего солнцестояния в Северном полушарии, следствием чего является максимальное значение июньской инсоляции.

Такие представления авторов противоречат эмпирическим данным. Как уже указывалось (см. рис. 1), оледенения соответствуют минимальным значениям эксцентриситета, а межледниковья — максимальным (что согласуется с механизмом прямого воздействия непосредственных эксцентриситетных вариаций инсоляции, которого придерживаемся мы). Поэтому понятие “холодная орбита” практически несовместимо с максимальным значением $e = 0.07$. Далее, если сопоставить график июньской (или июльской, рис. 2, а) инсоляции с ИК-кривой, видно, что ледниковые стадии приходятся далеко не на самые низкие значения инсоляции, особенно в интервале 300–500 тыс. лет назад. Но даже и в течение последних 200 тыс. лет наибольшим объёмом льда на планете соответствуют величины июньской инсоляции в интервале от 450 до 475 Вт/м². Последняя цифра близка к современному значению инсоляции 477.6 Вт/м², а ведь сейчас межледниковье. Приведённый пример ещё раз демонстрирует необоснованность использования вариаций месячной инсоляции для палеоклиматических интерпретаций.

Анализ эмпирических данных плейстоцена (а не только голоцена) очень важен для прикладного использования — разработки моделей палеоклимата и их применения при прогнозе глобальных изменений. Дело в том, что в эмпирических данных о плейстоцене (примерно последние 2.6 млн. лет) чётко выделяется закономерная цикличность глобальных климатических колебаний. Кроме того, около 1 млн. лет назад зафиксирована смена их периодичности от 41-тысячелетней, обусловленной вариациями наклона земной

оси, к 100-тысячелетней, связываемой с вариациями эксцентриситета. Всё это даёт уникальную возможность определения механизма работы “климатической машины” Земли при создании корректных палеоклиматических моделей. Разработка таких моделей позволит проверить наши предположения о механизмах климатического влияния и степени воздействия разнообразных обратных связей, изменяющихся как во времени (в течение всего плейстоцена), так и в пространстве (для континентальных и морских разрезов различных широтных и долготных поясов) и преобразующих вариации инсоляции в глобальные климатические изменения. Для этого в первую очередь в цепочке «входной сигнал (вариации инсоляции) → “климатическая машина” → выходной сигнал (палеоклиматические данные)» должны быть как можно более адекватно определены входной и выходной сигналы.

Понятно, что палеоклиматические данные имеют какую-то степень недостоверности. Однако именно они доказали справедливость орбитальной гипотезы. Поэтому не доверять этим данным в рамках указанной выше схемы нелогично. Следовательно, если входной сигнал также будет адекватным, можно надеяться на корректное определение механизма преобразования вариаций инсоляции в климатические изменения. Если же входной сигнал не будет представлять реально действующую инсоляцию, то и полученные при его использовании представления о работе “климатической машины” нельзя признать обоснованными. Соответственно, недостоверными будут и прогнозы климатических изменений. К сожалению, именно такая ситуация создания некорректных палеоклиматических моделей и климатических прогнозов наблюдалась в течение последних 30 лет вследствие использования входного сигнала, не отражающего вариаций полной инсоляции.

Для разработки климатических моделей необходимо не только учитывать все обратные связи, но и правильно, хотя бы на качественном уровне, представлять механизм их климатического влияния. Общеизвестны разногласия по поводу климатического влияния изменения концентрации углекислого газа, трудности с учётом влияния аэрозолей, неопределённости с механизмом резонанса в климатической системе и другие проблемы. Тем не менее отмечаются недостаточно чёткие представления относительно более простых случаев.

В работах [16, 28] большое внимание уделяется гипотезе о том, что “максимум инсоляционного градиента (при уменьшении наклона земной оси ϵ — В.Б., А.К.) усиливает атмосферную транспортировку пара от низких широт к полюсу.. Более то-

го, охлаждение высоких широт и увеличившаяся атмосферная поставка благоприятствуют распространению снега в Северном полушарии. Значит, этот механизм предполагает возможную прямую связь между средней годовой инсоляцией и началом оледенения” [28, р. 9]. Однако не надо забывать, что увеличенная атмосферная циркуляция (при пониженных значениях угла ϵ), связанная непосредственно с возрастанием температурных градиентов, а не градиентов инсоляции, есть в первую очередь отрицательная обратная связь, поскольку она направлена на уменьшение температурных градиентов. Такое воздействие осуществляется благодаря переносу из низких в высокие широты тёплого и влажного воздуха и за счёт высвобождения латентного тепла при выпадении осадков. На существование такой отрицательной обратной связи, сглаживающей климатические контрасты высоких и низких широт, указывает известный факт: соларный климат Земли должен иметь гораздо большие широтные градиенты температуры, нежели существующий климат.

Таким образом, вызванная градиентом температуры обратная связь будет стремиться ослабить положительную альбедную обратную связь. Конечно, следует помнить, что главным механизмом усиления наклона земной оси является альбедная обратная связь Кролля, увеличивающая воздействие изменения среднегодовой инсоляции высоких широт. Этот механизм является первопричиной возрастания температурных градиентов и, следовательно, усиления атмосферной циркуляции при уменьшении наклона земной оси. То, что положительная альбедная обратная связь больше, чем отрицательная, обусловленная градиентом температуры, доказывается обнаружением частоты вариаций угла наклона во всех палеоклиматических записях. Рассмотренные здесь механизмы подтверждаются эмпирическими данными [31]: усиление атмосферной циркуляции, зафиксированное по увеличению количества пыли в ледовом керне станции “Восток”, коррелирует с понижением угла наклона земной оси.

Ещё одним примером неприятия (или непонимания) уроков исторического развития орбитальной теории стала недавно опубликованная статья Д. Пайяра [32]. Упомянув в историческом обзоре о Дж. Кролле, Пайяр ничего не пишет о главном в его теории — введении в рассмотрение влияния положительных обратных связей в процессе климатических изменений. (Заметим, что это общая тенденция: например, авторы статьи [26], называя главные достижения, полученные в процессе развития орбитальной теории, даже не упоминают имени Кролля.) Поэтому, как и все последователи Миланковича, Пайяр придаёт самостоя-

тельную климатическую значимость орбитально обусловленным вариациям инсоляции. Вторым фактором, воздействующим на климат, он считает изменения CO_2 , ссылаясь на данные по изменению содержания в атмосфере концентрации углекислого газа, зафиксированные в ледовом керне Антарктиды. При этом, по Пайяру, эти два фактора воздействуют на изменения климата независимо. Его не смущает даже известный факт запаздывания вариаций CO_2 относительно вариаций температуры.

Естественно, взгляды Пайяра на процесс палеоклиматических колебаний не согласуются, например, с представлениями новой концепции орбитальной теории палеоклимата [5], опирающейся на критический анализ истории развития орбитальной теории. Согласно новой концепции, сила воздействия орбитально обусловленных вариаций инсоляции на климат определяется характером обратных связей, существующих в рассматриваемый период времени. Таким образом, CO_2 (в процессе его изменений в циклах “оледенение — межледниковье”, зафиксированных в ледовых кернах) может оказывать влияние на колебания климата независимо от вариаций инсоляции, а именно как фактор положительной обратной связи, вовлечённый в процесс изменений климата. Более конкретно — предполагается, очень упрощённо, такая цепочка взаимодействий в процессе климатических колебаний плейстоцена [5]: изменение инсоляции → первичное изменение температуры, прежде всего высоких широт → изменение площади снежного и ледового покрова → положительная альбедная обратная связь и последующее глобальное изменение температуры → изменение концентрации CO_2 плюс дальнейшее изменение площади снега и льда → обратные связи за счёт альбедо и парникового эффекта → итоговое изменение температуры.

Можно сделать вывод, что забвение основных положений палеоклиматической теории Дж. Кролля задержало развитие теории палеоклимата. Нет сомнений в том, что, если бы влиянию на климат открытых Кроллем обратных связей было ранее уделено должное внимание, современная климатология также была бы сейчас на более высокой стадии развития. К сожалению, выдающееся предвидение Дж. Кролля появилось слишком рано, намного опередив своё время.

Нельзя не отметить и некритичное, необъективное отношение к орбитальной теории палеоклимата, незнание истории её развития большинством исследователей, что также не способствовало и не способствует её дальнейшему развитию.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты № 11-05-00147а и № 04-05-64208а.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Шварцбах М.* Климаты прошлого. Введение в палеоклиматологию. М.: ИЛ, 1955.
2. *Croll J.* Climate and time in their geological relations: a theory of secular changes of the Earth's climate. L.: Edward Stanford, 1875.
3. *Имбри Дж., Имбри К.П.* Тайны ледниковых эпох. М.: Прогресс, 1988.
4. *Adhémar J.A.* Révolutions de la mer: Déluges Périodiques, Carilian-Goeury et V. Dalmont. P., 1842.
5. *Большаков В.А.* Новая концепция орбитальной теории палеоклимата. М.: Изд-во МГУ, 2003.
6. *Croll J.* On the physical cause of the change of climate during geological epochs // *Philosophical Magazine*. 1864. V. 28. P. 121–137.
7. *Croll J.* On the change in the obliquity of the ecliptic, its influence on the climate of the polar regions and on the level of the sea // *Philosophical Magazine*. 1867. V. 33. P. 426–445.
8. *Imbrie J.* Astronomical theory of the Pleistocene Ice Ages: a brief historical review // *Icarus*. 1982. V. 50. P. 408–422.
9. *Миланкович М.* Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. М.–Л.: ГОНТИ, 1939.
10. *Hays J.D., Imbrie J., Shackleton N.* Variation in the Earth's orbit: Pacemaker of the ice ages // *Science*. 1976. V. 194. P. 1121–1132.
11. *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. V. 8. P. 699–735.
12. *Большаков В.А., Большаков П.В.* Астрономическая теория палеоклимата – новая концепция // *Стратиграфия. Геологическая корреляция*. 1999. № 6.
13. *Большаков В.А.* Новая концепция астрономической теории палеоклимата: шаг вперед, после двух шагов назад // *Физика Земли*. 2001. № 11.
14. *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-Science Reviews*. 2001. V. 56. P. 161–177.
15. *Paillard D.* Glacial cycles: toward a new paradigm // *Revs. Geophys.* 2001. V. 39. P. 325–346.
16. *Raymo M.E., Nisancioglu K.* The 41-kyr world: Milankovitch's other unsolved mystery // *Paleoceanography*. 2003. V. 18. P. 1011.
17. *Lisiecki L.E., Raymo M.E.* A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records // *Paleoceanography*. 2005. V. 20. P. 1003.
18. *Ruddiman W.F., McIntyre A.* Oceanic mechanisms for amplification of the 23.000-year ice-volume cycle // *Science*. 1981. V. 212. P. 617–627.
19. *Kandiano E.S., Bauch H.A.* Surface ocean temperatures in the Northeast Atlantic during the last 500000 years: Evidence from foraminiferal census data // *Terra Nova*. 2003. V. 15 P. 265–271.
20. *Berger A.L., Loutre M.F.* Insolation values for the climate of the last 10 million years // *Quat. Sci. Rev.* 1991. V. 10. P. 297–317.
21. *Roe G.* In defence of Milankovitch // *Geophys. Res. Letters* 2006. V. 33. L24703.
22. *Bol'shakov V.A.* Modern climatic data for the Pleistocene: Implications for a new concept of the orbital theory of paleoclimate // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2003. V. 5 (2). P. 125–143.
23. *Milankovitch and Climate*, NATO ASI / Eds. Berger A.L. et al. Reidel. Dordrecht, 1984.
24. *Clemens S., Tiedemann R.* Eccentricity forcing of Pliocene-Early Pleistocene climate revealed in a marine oxygen-isotope record // *Nature*. 1997. V. 385. P. 801–804.
25. *Большаков В.А.* Проблема межледниковой 11-й морской изотопной стадии с позиций новой концепции орбитальной теории палеоклимата // *Океанология*. 2010. № 2.
26. *Crucifix M., Loutre M., Berger A.* The climate response to the astronomical forcing // *Space Science Reviews*. 2006. V. 125. P. 213–226.
27. *Большаков В.А.* Новая концепция астрономической теории палеоклимата // *Проблемы палеогеографии и стратиграфии плейстоцена*. М.: Изд-во МГУ, 2000.
28. *Loutre M.F., Paillard D., Vimeix F., Cortijo E.* Does mean annual insolation have the potential to change the climate? // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2004. V. 221. P. 1–14.
29. *Bol'shakov V.A.* How long will the “precession epoch” last in terms of Pleistocene glacial cycles? // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2008. V. 10.
30. *Loutre M., Berger A.* No glacial-interglacial cycle in the ice volume simulated under a constant astronomical forcing and variable CO_2 // *Geophys. Res. Lett.* 2000. V. 27. № 6. P. 783–786.
31. *Petit J., Jouzel J., Raynaud D. et al.* Climate and atmospheric history of the past 420000 years from the Vostok ice core, Antarctica // *Nature*. 1999. V. 399. P. 429–436.
32. *Paillard D.* Climate and the orbital parameters of the Earth // *Geoscience*. 2010. V. 342. P. 273–285.