

ОРБИТАЛЬНЫЕ ФАКТОРЫ ДОЛГОПЕРИОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ КЛИМАТА ПЛЕЙСТОЦЕНА

В.А. Большаков

МГУ им. М.В. Ломоносова, географический факультет,
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, yabolshakov@mail.ru

Резюме. Кратко изложены основы и история развития орбитальной теории палеоклимата. Показано, что главными недостатками теории Миланковича являются использование для палеоклиматического моделирования вариаций неполной инсоляции и механизма линейного отклика на эти вариации изменений температуры, а также отсутствие должного учёта обратных связей в климатической системе. Изложена новая концепция орбитальной теории палеоклимата, представляющая новый взгляд на принципы глобального климатического воздействия орбитальных вариаций инсоляции. Сделан вывод, что наиболее вероятным механизмом, с единых позиций объясняющим главные проблемы орбитальной теории палеоклимата плейстоцена, является механизм, предполагающий элементы резонансного отклика на орбитальные воздействия.

Ключевые слова. Орбитальная теория палеоклимата, инсоляция, ледниковые циклы, плейстоцен, изотопно-кислородные данные

ORBITAL FACTORS OF LONG-PERIOD CLIMATE OSCILLATIONS IN PLEISTOCENE

V.A. Bol'shakov

*Department of Geography, Moscow State University,
Leninskiye gory, 1, 119991, Moscow, Russia, e-mail: yabolshakov@mail.ru*

Summary. The fundamentals and history of the orbital theory of paleoclimate are briefly outlined. It is shown that main drawbacks of the Milankovitch theory are the use of discreet variations of the insolation in modeling the paleoclimate and linear transformation of these variations into temperature changes, as well as ignoring the feedbacks in the climate system. A new concept of the orbital theory of paleoclimate presented in the paper provides a new perspective on the influence of orbital variations of the insolation on the global climate. The conclusion is made that the resonance response to the orbital forcing most consistently explains the main features of climate oscillations in Pleistocene.

Keywords: Orbital theory of paleoclimate, insolation, ice age, cycles, Pleistocene, oxygen isotope data.

Введение

Среди многочисленных гипотез, выдвинутых для объяснения существовавших в геологическом прошлом оледенений, наибольшее распространение получила орбитальная гипотеза (теория), которую часто

называют астрономической теорией, или теорией Миланковича (Миланкович, 1939). Однако, два последних названия менее удачны. Первое – потому, что выдвигались и другие астрономические (космические) гипотезы. Например, одна из них предполагала существенные колебания солнечной постоянной, другая – попадание Солнечной системы в пояс космической пыли при её движении вокруг центра Галактики. Второе название обозначает лишь одну из версий орбитальной теории палеоклимата, связанную с именем создателя этой версии М. Миланковича.

Итак, орбитальная теория палеоклимата (ОТП) – это теория, связывающая глобальные колебания климата, прежде всего оледенения и межледниковья плейстоцена, с вариациями приходящей к Земле солнечной радиации (инсоляции). Эти изменения вызваны колебаниями орбитальных параметров планеты, характеризующих положение Земли и её оси вращения в пространстве при движении планеты по орбите вокруг Солнца. Несмотря на то, что орбитальная гипотеза была предложена более 150 лет назад, строгая орбитальная теория палеоклимата не создана до сих пор.

Особая актуальность корректной разработки ОТП плейстоцена заключается в уникальной возможности понимания работы глобальной климатической машины, опираясь на огромный эмпирический материал. Ведь накопленные к настоящему времени данные по глобальным колебаниям климата, особенно по оледенениям и межледниковьям последнего миллиона лет, содержат ценную информацию о причинно-следственных связях изменений климата с вариациями инсоляции, обусловленными орбитальными факторами. Таким образом, открывается возможность разработать модель климатической системы Земли, входным сигналом в которой являются вариации инсоляции на верхней границе атмосферы, а выходным – эмпирические палеоклиматические данные. Климатическая система Земли и есть тот механизм, включающий в себя многочисленные прямые и обратные связи, который преобразует инсоляционные сигналы в изменения земного климата.

К сожалению, представления о работе климатической машины противоречивы. Построение корректной теории климатической системы, исходя лишь из теории Миланковича (Миланкович, 1939), представляется автору невозможным (Большаков, 2003а, 2013а). В то же время такая теория очень нужна. Ведь уже в течение длительного времени остаются нерешенными важные проблемы ОТП плейстоцена: преобладание 100-тысячелетней периодичности в колебаниях климата последнего миллиона лет, причины и механизм среднеплейстоценового перехода и др.

Анализ развития орбитальной теории и ее проблем (Большаков, 2001, 2003а, 2010; Большаков, Капица, 2011) привел к разработке новой концепции ОТП, основой которой является новый взгляд на механизмы воздействия вариаций орбитальных элементов на климат.

Целью настоящей статьи, с одной стороны, является популяризация идей новой концепции ОТП, изложенной в работах (Большаков, 2001, 2003а; Bol'shakov, 2008), а с другой стороны – обобщение результатов исследования проблем орбитальной теории, получивших отражение в публикациях (Большаков, 2010, 2014, 2015; Bol'shakov, Kuzmin, 2014).

Орбитальные элементы и их влияние на инсоляцию

Гравитационное взаимодействие Земли с другими планетами Солнечной системы, а также с Луной и Солнцем, вызывают квазипериодические (циклические) изменения трёх орбитальных элементов: эксцентриситета эллиптической орбиты Земли e , угла наклона ε земной оси к перпендикуляру к плоскости эклиптики и прецессионного изменения проекции земной оси на плоскость эклиптики (рис. 1, 2). Изменения перечисленных орбитальных параметров приводят к вариациям приходящей на верхнюю границу атмосферы Земли солнечной радиации.

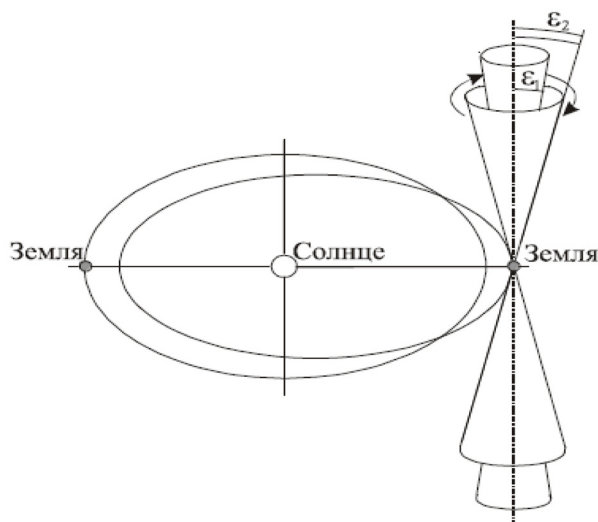


Рисунок 1 – Орбитальные элементы Земли.

При вариациях эксцентриситета происходит смещение эллиптической орбиты Земли относительно Солнца и изменение степени её вытянутости, за счёт изменения длины малой оси эллипса орбиты. Стрелкой показана прецессия земной оси. Подчёркнём принципиальные структурные различия вариаций инсоляции, связанных с тремя орбитальными элементами (Большаков, 2003а; Bol'shakov, 2008).

1. Только вариации эксцентриситета e (главные гармоники около 400 и 100 тысяч лет, рис. 2а) изменяют приходящую к Земле в целом полную годовую солнечную радиацию, хотя эти изменения невелики. За последний миллион лет они не превышали 0,2%. Инсоляция увеличивается при увеличении e и уменьшается при его уменьшении, когда орбита Земли приближается к круговой.

2. Вариации угла наклона земной оси ε к перпендикуляру к плоскости эклиптики (основная гармоника 41 тысяч лет, рис. 2б), если считать форму Земли шарообразной, что близко к действительности, не изменяют инсоляцию всей планеты, но перераспределяют её по широтам: увеличение инсоляции высоких широт обоих полушарий сопровождается её уменьшением в низких широтах и наоборот. При увеличении угла ε увеличивается

годовая инсоляция «высоких» (выше 44°) широт и уменьшается годовая инсоляция «низких» (ниже 43°) широт обоих полушарий. При уменьшении ϵ происходят обратные изменения инсоляции. При изменении ϵ происходит и изменение сезонных контрастов инсоляции, особенно заметное в высоких широтах. Так, при увеличении ϵ контрасты летней и зимней инсоляции возрастают, так как увеличивается летняя инсоляция и уменьшается зимняя; при уменьшении ϵ , наоборот, сезонные контрасты уменьшаются. Изменение полной годовой инсоляции высоких широт происходит за счет того, что увеличение или уменьшение летней инсоляции превышает противоположное изменение зимней (Croll, 1875; Миланкович, 1939).

3. Климатическая прецессия (главные гармоники 23 и 19 тысяч лет, рис. 2с) приводит к изменению сезонных контрастов инсоляции, однако при этом годовое изменение инсоляции равно нулю для любой широты, так как увеличение летней инсоляции компенсируется уменьшением зимней и наоборот. Прецессионные изменения противоположны в разных полушариях и модулируются изменениями эксцентриситета (рис. 2а, 2с).

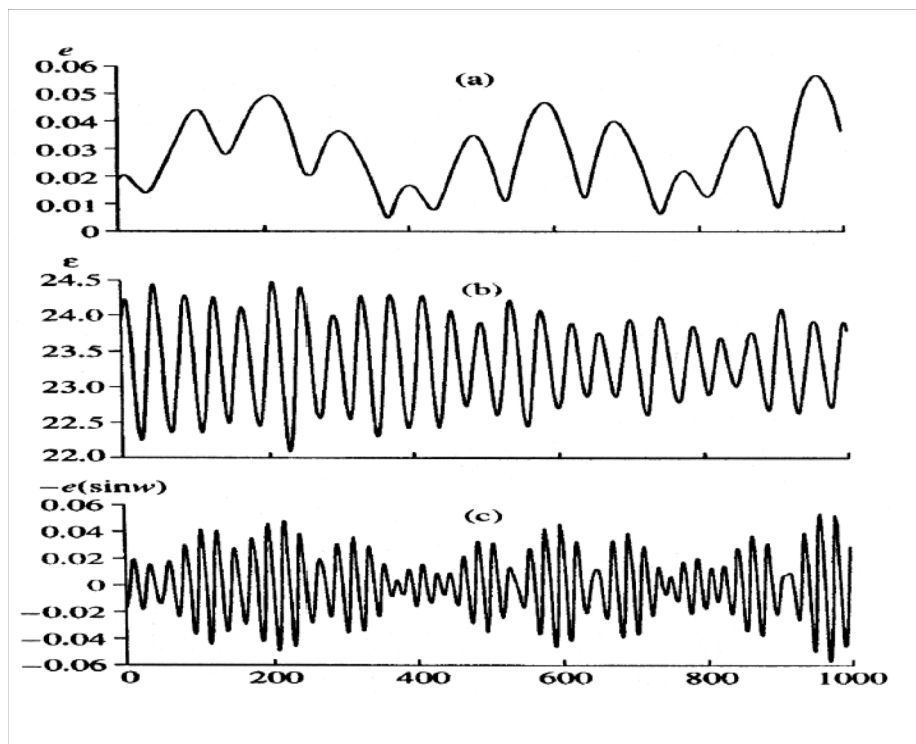


Рисунок 2 – Изменения эксцентриситета e (а), угла наклона земной оси ϵ (в градусах) (b), и климатической прецессии $e(\sin w)$ (с) за последний миллион лет (по (Berger, Loutre, 1991)). Прецессионный индекс $e(\sin w)$, где w – долготы перигелия относительно точки весеннего равноденствия, пропорционален разности расстояний между Землей и Солнцем в день летнего солнцестояния и зимнего солнцестояния Северного полушария. Прецессионный индекс взят со знаком «минус», чтобы графические минимумы рис. 2с соответствовали похолоданиям, как и на рис. 2а и 2б.

Вследствие прецессионного изменения сезонных контрастов инсоляции в том полушарии, день зимнего солнцестояния которого придётся на афелий, будут осуществляться климатические условия с длительной холодной зимой и жарким коротким летом, в соответствии с увеличенными контрастами инсоляции. В то же время в противоположном полушарии, с пониженными контрастами сезонной инсоляции, длительное прохладное лето будет сменяться мягкой короткой зимой. Очевидно, что различия в длительности зимы и лета будут тем больше, чем больше эксцентриситет орбиты Земли.

Основные этапы развития орбитальной теории

Считается, что орбитальная гипотеза палеоклимата была впервые высказана (опубликована) Ж.Адемаром в 1842г. (Adhemar, 1842). Адемар связывал изменения климата с прецессией равноденствий и полагал, что оледенение будет в том полушарии, день зимнего солнцестояния которого приходится на афелий. По мнению Адемара, именно холодная длинная зима и является причиной оледенения в указанном полушарии. Соответственно, в другом полушарии в это время будет межледниковье. Подтверждение своей теории Адемар видел в оледенении Антарктиды, расположенной в полушарии, контрасты инсоляции которого соответствуют именно длинной холодной зиме и жаркому короткому лету.

Однако теория Адемара противоречила представлениям Дж. Гершеля и А.Гумбольдта (Большаков, 2003а; Имбри, Имбри, 1988; Croll, 1875). Они указывали, что средняя температура полушария определяется не соотношением длительности зимы и лета, а количеством калорий солнечной энергии, которое оно получает за весь год. А так как годовое количество солнечной энергии одинаково для каждого полушария и не зависит от прецессии, то нет причин для противоположных изменений климата (температуры) 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 его «Теории вековых изменений земного климата» (Croll, 1875). Кроллю было известно приведённое выше мнение Гершеля и Гумбольдта, он понимал незначительность *прямого* воздействия орбитально обусловленных вариаций инсоляции на глобальный климат. Тем не менее, Кролль полагал, что эти вариации инсоляции могут вовлечь в действие физические агенты, которые приведут к глобальным изменениям климата, в частности, к оледенениям, несмотря на противофазные изменения связанных с прецессией зимней и летней инсоляции. (Кролль, как и Адемар, полагал, что оледенение будет в полушарии, характеризующемся наличием длительной холодной зимы).

Под физическими агентами Кролль подразумевал обратные связи, которые в цепочке «воздействующая причина – результат» взаимно усиливают друг друга. Таким образом, Дж. Кролль первым ввел в рассмотрение влияние *положительных обратных связей*, усиливающих климатическое

воздействие орбитально обусловленных вариаций инсоляции и трансформирующих указанные вариации в глобальные климатические изменения – оледенения и межледниковья. Кролль рассматривал в основном два механизма влияния на температуру положительных обратных связей: 1) изменения площади снежного и ледового покрова (альбедная связь) и 2) смещение экваториального течения Атлантики. Кролль впервые правильно описал механизм влияния вариаций наклона земной оси на глобальный климат. Однако он всё же не учитывал его в основной части своей теории, считая главным влияние прецессии.

По теории Кролля, оледенения на Земле происходили в периоды особенно больших значений эксцентриситета, когда прецессионные контрасты инсоляции в одном из полушарий особенно велики. В эти длительные промежутки времени попеременно, примерно через 10,5 тысяч 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 Землей афелия. В то же время в другом полушарии были, наоборот, межледниковые условия.

К концу XIX столетия были обнаружены противоречия теории Кролля эмпирическим данным. Это послужило основной причиной отказа от теории Кролля. К сожалению, и достижения Дж. Кролля были забыты. Наибольшее сожаление вызывает то, что не было оценено по достоинству главное, выдающееся достижение его теории – открытие положительных обратных связей в климатической системе.

М. Миланкович начал свои исследования на полвека позже Дж. Кролля. Его версия орбитальной теории палеоклимата отличалась от развитых ранее теорий Адемара, Кролля и др. математически строгими вычислениями орбитально обусловленных вариаций инсоляции на верхней границе атмосферы. В своих расчётах Миланкович пренебрёг прямым вкладом изменений эксцентриситета в инсоляционную кривую: основной количественный вклад в вариации инсоляции обеспечивался прецессией и изменениями угла наклона земной оси. Кроме этого, в отличие от Кролля, он считал, по совету метеоролога В.П. Кёппена (Миланкович, 1939; Имбри, Имбри, 1988), что оледенению в данном полушарии способствует не холодная длительная зима, а прохладное длительное лето.

Суть теории Миланковича (ТМ) заключается в том, что он придавал прямую палеоклиматическую значимость вычисленным им неполным (*для летнего* калорического полугодия и на 65°с.ш.) вариациям инсоляции. Например, наименьшие значения летней инсоляции на 65°с.ш. интерпретировались им как оледенения (рис. 3). Выделенные Миланковичем на его инсоляционной диаграмме четыре оледенения за последние 600 тысяч лет хорошо соотносились с распространённой тогда альпийской схемой Пенка и Брюкнера, в которой выделялись оледенения Вюрм, Рисс, Миндель и Гюнц, причём миндель-рисское межледниковье также было самым длительным. Данное обстоятельство поспособствовало широкому признанию

теории Миланковича. Однако, по мере развития науки, с получением новых эмпирических и расчётных данных, эта теория подвергалась всё большей критике, что в целом привело в 60 годах XX века к отказу от этой теории.

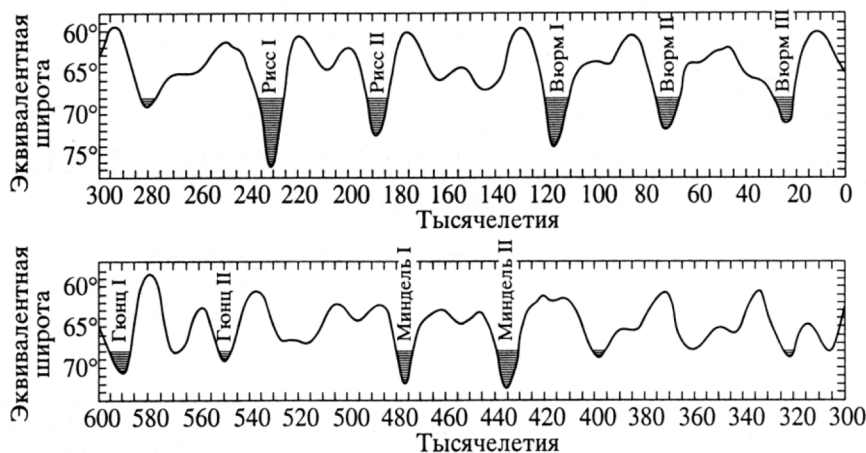


Рисунок 3 – Вековой ход летних сумм радиации на 65° северной широты (инсоляционная диаграмма Миланковича). Затенёванные участки соответствуют оледенениям (по (Миланкович, 1939, Диаграмма II)). «Эквивалентная широта» – это та широта, которая в настоящее время получает столько же тепла, как и широта 65° с.ш. в рассматриваемое тысячелетие геологического прошлого.

Резюмируя, можно сказать, что теория Миланковича оказала двоякое влияние на развитие орбитальной теории палеоклимата. С одной стороны, это был шаг вперёд, связанный с использованием точных математических расчётов инсоляции. С другой стороны, развитие орбитальной теории было отброшено почти на столетие назад, во времена Адемара – ведь Миланкович не принял во внимание обоснованное заключение Гершеля и Гумбольдта: для объяснения глобальных колебаний климата он использовал вычисления полугодовой инсоляции, да ещё под одной широтой! Кроме того, используя линейный механизм климатического усиления, Миланкович придавал прямую палеоклиматическую значимость вычисленным им вариациям инсоляции. Вследствие этого для разработки теории ему оказалось не нужным в должной степени развивать дальше предложенные Кроллем механизмы обратных связей.

В 1976г. Хейс, Имбри и Шеклтон (Hays et al., 1976), путём анализа глубоководных палеоклиматических данных показали, что около 80% глобальной климатической изменчивости последних 500 тысяч лет связаны с орбитальными периодичностями. Очень важно то, что была показана не только близость выявленных главных периодичностей палеоклиматических записей орбитальным периодичностям – около 100, 41, 23 и 19 тысяч лет. (Палеоклиматическая запись – представленное в численной или гра-

фической форме изменение косвенных (проху) климатических характеристик во времени; например, изотопно-кислородная запись). Было получено и фазовое соответствие орбитальных сигналов и палеоклиматического отклика. Например, выделенная 40-тысячелетняя палеоклиматическая компонента отставала по фазе (как и должно быть, учитывая инерцию климатической системы) от соответствующего ей изменения инсоляции, связанного с колебаниями наклона земной оси. При этом уменьшение угла ϵ соответствовало похолоданию на климатической кривой, что согласуется с механизмом глобального климатического влияния вариаций наклона земной оси, разработанным ещё Дж. Кроллем (Croll, 1875). Таким образом, исследование (Hays et al., 1976) не оставляло сомнений в правильности орбитальной гипотезы палеоклимата.

Противоречия и недостатки теории Миланковича

Исследование Хейса и др. (Hays et al., 1976) показало, что более 50% климатических изменений характеризуются эксцентриситетной 100-тысячелетней периодичностью, которой нет в ТМ. Это повлекло за собой и изменение, в целом, дат оледенений, по сравнению с датами, рассчитанными Миланковичем. Таким образом, было выявлено первое существенное противоречие ТМ эмпирическим данным (получившее название «проблема 100-тысячелетнего периода»), за которым последовали и другие (Большаков, 2003а; Большаков, Капица, 2011). Выделим ещё три из них:

1. Около миллиона лет назад основная климатическая периодичность изменилась от 41 тысяч лет к 100 тысяч лет, что не согласуется с теорией Миланковича, поскольку характер вариаций орбитальных элементов не изменялся в это время (проблема «среднеплейстоценового перехода»).
2. Ледниковые события, согласно эмпирическим данным, попадают на минимумы эксцентриситета, тогда как в теории Миланковича они (самые глубокие минимумы на инсоляционной диаграмме) в основном приходятся на повышенные значения эксцентриситета.
3. Глобальные климатические изменения синхронны (в пределах тысячи лет) в обоих полушариях (по крайней мере, для максимума последнего оледенения и оптимума голоцена), тогда как соответствующие этим климатическим событиям экстремумы инсоляционных кривых, вычисленных Миланковичем для летнего калорического полугодия на 65° северной и южной широты, смещены не менее, чем на 5 тысяч лет. Это обусловлено противофазным влиянием прецессии в противоположных полушариях.

Для преодоления этих противоречий было сделано немало попыток «модернизировать» теорию Миланковича. Например, было предложено использовать месячную или даже суточную летнюю инсоляцию под 65°с.ш. вместо полугодовой инсоляции, использованной Миланковичем. Очевидно, что это даже худший вариант, поскольку прецессионный вклад

в среднемесячные, а тем более суточные вариации инсоляции, ещё выше, чем в полугодовые. Это выявило ещё одно противоречие между теорией Миланковича и эмпирическими данными – несоответствию между наибольшей амплитудой прецессионной гармоник инсоляционного воздействия (месячными или суточными вариациями летней инсоляции под 65°с.ш.) и наименьшей амплитудой той же гармоник в климатических палеоданных (рис. 4).

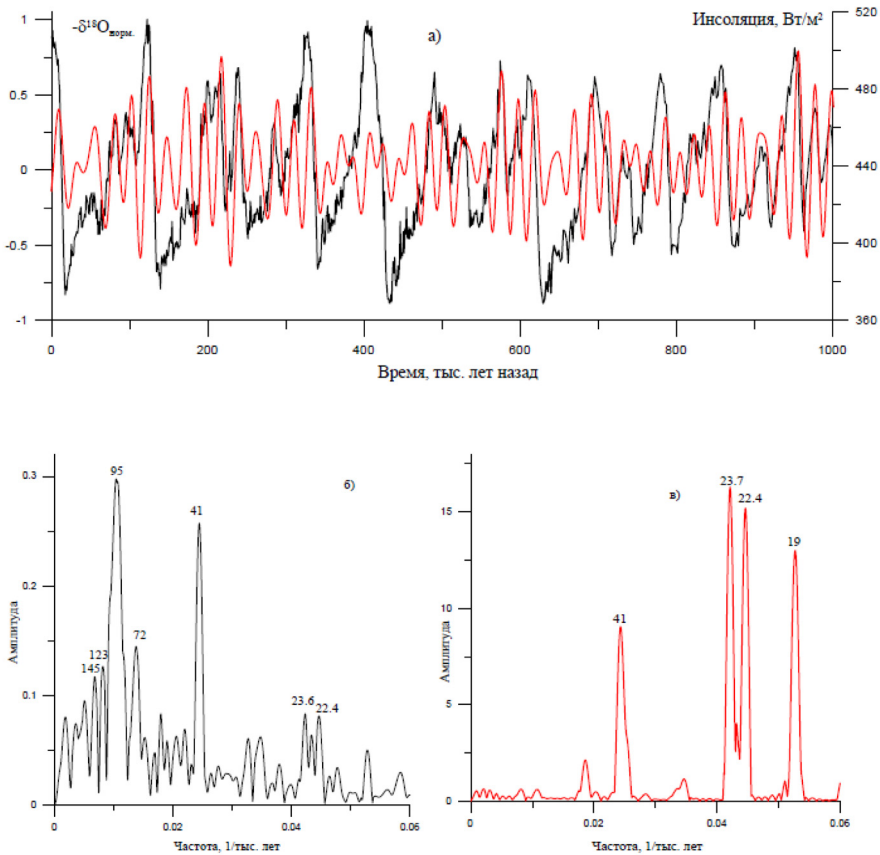


Рисунок 4 – Сопоставление изменений изотопно-кислородной (ИК) кривой LR04 (Lisiecki, Raymo, 2005) с изменениями июльской инсоляции под 65°с.ш. (Berger, Loutre, 1991): а) красная линия – изменения инсоляции, черная – нормированные изменения LR04, взятые со знаком «минус» для удобства сопоставления с кривой инсоляции; б) амплитудно-частотный спектр ИК кривой; в) амплитудно-частотный спектр инсоляционной кривой. Цифры на графиках – наиболее значимые гармоники ИК и инсоляционных вариаций.

Проведённый анализ ТМ (Большаков, 2003а) выявил её следующие основные недостатки.

1. Придание палеоклиматической значимости рассматриваемым индивидуально вариациями инсоляции, вычисленным для отдельных географических широт и полугодий. Это пренебрежение обоснованным мнением Гершеля и Гумбольдта о необходимости учёта реально действующей, полной годовой инсоляции, усугублённое приданием глобальной климатической значимости неполным вариациям инсоляции только для одной широты. При этом глобально палеоклиматически значимыми Миланкович считал изменения летней инсоляции на 65°с.ш. , однако математически строгого обоснования выбора именно лета и этой широты Северного полушария сделано не было. Также не было показано, почему можно пренебречь противофазными изменениями зимней инсоляции.

2. Отсутствие должного учёта обратных связей. Это проявляется прежде всего в том, что Миланкович (1939), предполагая линейный механизм климатического отклика на вариации инсоляции, напрямую сопоставлял изменения летней и зимней температуры для разных широт с вычисленными им вариациями летней и зимней инсоляции этих широт. В результате получалось, что, например, во время оледенений летняя температура средних и низких широт должна уменьшаться, а зимняя – увеличиваться, что, как теперь известно, не соответствует действительности.

3. Отсутствие учёта качественных различий инсоляционных сигналов, связанных с вариациями различных орбитальных элементов. В инсоляционной кривой Миланковича механически соединены качественно (структурно) различные инсоляционные сигналы отдельных орбитальных элементов (см. выше). Это делает неправомерным использование инсоляционного сигнала как единого целого при палеоклиматическом анализе и моделировании. Данное заключение представляется достаточно очевидным, исходя из того, что различные структурно сигналы будут по-разному воздействовать на климатическую систему, в частности, неодинаково реагировать на те или иные обратные связи (альбедную, связанную с парниковыми газами, аэрозолями и т.д.). Оно подтверждается и тем фактом, что в климатических колебаниях первой половины плейстоцена (2600-1300 тысяч лет назад) выделена практически только одна орбитальная периодичность, представляющая вариации наклона земной оси.

Исходя из перечисленных недостатков ТМ, был сделан вывод (Большаков, 2012), что инсоляционная диаграмма Миланковича, рассчитанная для летнего калорического полугодия под 65°с.ш. , не имеет глобальной палеоклиматической значимости и не может быть достаточной для современных палеоклиматических интерпретаций и моделирования. Здесь необходимо отметить критическое отношение к использованию неполной инсоляции в работе (Imbrie, 1982, p. 413): «У исследователей также была тенденция полагать, что они могут моделировать ответ системы, исходя из кривой радиации, представляющей входной сигнал для одной широты и сезона (Milankovitch, 1941; Kukla, 1968; Broecker and van Donk, 1970). Так как никто не может быть уверен, какая инсоляционная кривая, если она есть, была решающей, исследователи имеют широкие возможности выбрать ту кривую, которая согласуется с их данными. Понятно, что выте-

кающая из этого двусмысленность много сделала, чтобы подорвать доверие к обоснованности временных предсказаний. Начиная с 1976г., с приходом численных моделей, учитывающих влияние инсоляции для всех широт и сезонов, эта ситуация была значительно улучшена».

О новой концепции орбитальной теории палеоклимата

Отмеченные недостатки теории Миланковича привели к необходимости создания новой концепции орбитальной теории палеоклимата. Она была сформулирована следующим образом (Большаков, 2003а).

Глобальные колебания климата, характеризующиеся периодичностями в десятки-сотни тысяч лет, определяются вариациями поступающей солнечной радиации, вызванными изменениями орбитальных элементов Земли. Климатическая значимость вариаций каждого орбитального элемента определяется: а) спецификой изменения полной годовой, с учетом внутригодовой изменчивости (летней и зимней, или для всех месяцев года) и глобальной (для всех широт Земли) инсоляции; б) земными обратными связями, избирательно (специфически) преобразующими соответствующие инсоляционные сигналы. Степень и характер воздействия обратных связей, в конечном итоге и трансформирующих орбитальные инсоляционные сигналы в глобальные климатические колебания, зависят от глобального палеогеографического (распределение по поверхности планеты материков и океанов) и палеоклиматического (термозеры и гляциоэры) состояния Земли.

Таким образом, новая концепция имеет следующие четыре существенных отличия от теории Миланковича.

1. Учет реально действующих, полных годовых и для всей поверхности Земли, вариаций инсоляции, в отличие от полугодовых, среднемесячных, или даже суточных, вариаций инсоляции под 65°с.ш. в ТМ и ее последователей. Иными словами, в новой концепции предлагается обязательно учитывать различия временной и пространственной структуры инсоляционных сигналов, обусловленных вариациями всех трех орбитальных элементов.

2. В отличие от ТМ, согласно которой климатические, в частности температурные, изменения определяются в основном (а для умеренных и низких широт просто подобны) вычисленным специфическим вариациям инсоляции, в новой концепции не меньшая роль отводится земным обратным связям, благодаря которым происходит преобразование и усиление климатического воздействия слабых инсоляционных сигналов.

3. Перечисленные в первых двух пунктах особенности новой концепции приводят к выводу о возможности непосредственного климатического воздействия вариаций инсоляции, связанных со всеми тремя орбитальными элементами, а не только с прецессией и наклоном земной оси, как в теории Миланковича и его последователей. Это позволяет предложить простое решение известной проблемы 100-тысячелетнего периода.

4. В новой концепции говорится о зависимости от глобального климатического состояния планеты степени и характера влияния земных обрат-

ных связей на силу климатического воздействия орбитально обусловленных вариаций инсоляции. Отсюда вытекают логичные представления о специфике климатических колебаний, характеризующихся орбитальными периодичностями, в течение термо- и гляциоэр фанерозоя, не всегда правильно интерпретируемые палеоклиматологами (Большаков, 2003б). С этих же позиций предложено объяснение СПП (Большаков, 2001, 2003а; Bol'shakov, Kuzmin, 2014). Поскольку характер орбитальных вариаций в плейстоцене оставался одним и тем же, смена основной периодичности климатических колебаний объясняется изменением отклика климатической системы на орбитальное воздействие, вызванным переходом планеты в целом в новое климатическое состояние, характеризующееся увеличением глобального объема льда и понижением температуры (см. ниже).

Построение орбитально-климатической диаграммы (ОКД)

Итак, для создания корректной теории палеоклимата необходимо учитывать полные годовые и глобальные изменения инсоляции (с учетом внутrigодовой изменчивости и для всех широт) и все воздействующие на них обратные связи в климатической системе Земли. В настоящее время эта задача не представляется полностью разрешимой, по крайней мере, по двум причинам:

- недостаточное знание механизмов обратных связей, самыми сложными из которых считаются влияние облачности и аэрозолей;
- огромный ресурс компьютерного времени, требуемый для таких расчётов.

Тем не менее, исходя из положений новой концепции и эмпирических данных о влиянии вариаций орбитальных элементов на климат, был предложен (Большаков, 2000) простой способ построения палеоклиматической диаграммы, которая названа ОКД. ОКД представляет условную относительную вероятность ΔP осуществления оледенений (для отрицательных ΔP) и межледниковий (для положительных ΔP) за последний миллион лет. Такая диаграмма была построена как сумма центрированных (т.е. вычисленных относительно среднего значения) вариаций орбитальных элементов, умноженных на так называемые коэффициенты климатической значимости (ККЗ). ККЗ находились путем подбора так, чтобы получаемая ОКД в наибольшей степени соответствовала палеоклиматическим изотопно-кислородным кривым (рис. 5а и 5б). Наиболее подходящими оказались ККЗ, равные 1, 0,7 и -0,55 соответственно для вариаций эксцентриситета, наклона земной оси и прецессии. Соотношение абсолютных значений ККЗ указывает на то, что наибольший вклад в ОКД и, соответственно, в климатические изменения вносят вариации эксцентриситета, наименьший – прецессионные вариации, что соответствует эмпирическим данным (см. рис. 4б).

Здесь необходимо остановиться на двух особенностях построения

ОКД. Первая – это учёт равноправного, наряду с двумя другими орбитальными элементами, непосредственного воздействия на глобальный климат вариаций эксцентриситета. Использование неполных вариаций инсоляции Миланковичем и его последователями автоматически приводило к пренебрежению прямыми эксцентриситетными вариациями инсоляции: «Однако, прямое влияние эксцентриситета на глобальный энергетический баланс Земли очень мало» (Ganopolski, Calov, 2011, p. 1415). Поэтому преобладание эксцентриситетной периодичности в палеоклиматических записях плейстоцена объяснялось разными экзотическими гипотезами. Например, в работе (Hays et al., 1976) предполагалось, что эксцентриситетный инсоляционный сигнал усиливался «нелинейно», а сигналы двух других орбитальных элементов усиливались «линейно».

Однако, новая концепция ОТП, предполагающая необходимость рассмотрения полных вариаций инсоляции, приводит к принципиально иному рассмотрению данной проблемы. Согласно перечисленным выше структурным особенностям инсоляционных сигналов трёх орбитальных элементов, единственным, изменяющим годовую инсоляцию всей Земли (которая и должна рассматриваться при анализе глобальных колебаний климата), является эксцентриситетный сигнал. Полные годовые и глобальные вариации инсоляции двух других элементов равны нулю. С этих логичных, как представляется, позиций «нелинейно» должны усиливаться, наоборот, нулевые сигналы этих двух орбитальных элементов, чтобы быть выраженными в глобальных палеоклиматических записях. Таким образом, действительная значимость вариаций орбитальных элементов будет в значительной мере определяться специфическими обратными связями, усиливающими воздействие того или иного орбитального инсоляционного воздействия.

Как уже отмечалось выше, точный расчёт обратных связей представляет сложную проблему. Поэтому упрощенный учёт обратных связей – на качественном уровне – является второй особенностью построения ОКД. Дж. Кролль первым указал на возможность климатического воздействия нулевых («скомпенсированных», как он писал) орбитальных инсоляционных сигналов. Наиболее наглядно это можно продемонстрировать на примере объяснения механизма глобального климатического влияния вариаций наклона земной оси. Для решения этого вопроса необходимо использовать введенный Кроллем альбедный механизм положительной обратной связи, усиливающий орбитально обусловленные вариации инсоляции.

Достаточно очевидно, что наибольшее изменение альбеда земной поверхности обусловлено вариациями площади снежного и ледового покрова более холодных и заснеженных высоких широт обоих полушарий. Поскольку в низких широтах такой же сильной обратной связи нет из-за отсутствия столь же обширного динамично изменяющегося снежного и ледового покрова, то глобальные колебания климата, связанные с колебаниями наклона земной оси, будут в основном определяться вариациями инсоляции высоких широт.

Легко представить работу такого механизма. Допустим, угол ϵ уменьшается, вследствие чего уменьшается годовая инсоляция высоких широт. Уменьшение годовой инсоляции вызывает понижение среднегодовой температуры, что приводит к увеличению площади снежного и ледового покрова в этих широтах, т.е. к увеличению альбедо. Последнее вызывает, за счет положительной альбедной обратной связи, дополнительное понижение температуры и дальнейшее расширение площади снега и льда. Процесс похолодания в высоких широтах обоих полушарий будет продолжаться, ежегодно усиливаясь в связи с направленным понижением годовой инсоляции, в течение полупериода (примерно 20,5 тысяч лет) вариаций наклона земной оси. Разумеется, описанный процесс похолодания будет распространяться посредством циркуляции атмосферы и гидросферы и на низкие широты. После этого угол ϵ начнет возрастать, вызывая увеличение инсоляции высоких широт, и механизм обратной связи будет теперь работать на потепление по следующей цепочке: увеличение инсоляции $\rightarrow$ повышение температуры $\rightarrow$ уменьшение площади снега и льда (таяние) $\rightarrow$ уменьшение альбедо $\rightarrow$ повышение температуры и т.д.

Однако столь же прозрачный механизм прямого климатического влияния вариаций инсоляции, приводящего к глобальному похолоданию или потеплению, для прецессионных изменений инсоляции придумать сложно. Как уже говорилось, во-первых, прецессионные изменения инсоляции противофазны для разных полушарий. Во-вторых, и это главное, прецессия не изменяет полного годового количества солнечной энергии, приходящей к каждой широте Земли, поскольку увеличение летней инсоляции компенсируется точно таким же уменьшением зимней, и наоборот. Как такой скомпенсированный (по сути – нулевой для каждой широты) инсоляционный сигнал будет усиливаться какой-либо положительной обратной, например, той же альбедной, связью – вопрос не тривиальный.

Его рассмотрение с чисто качественных позиций привело к следующему предположению (Большаков, 2003а). В Северном, континентальном полушарии, развитию оледенения должны способствовать условия, характеризующиеся длительным прохладным летом и мягкой короткой зимой. Такие малоконтрастные климатические условия ассоциируются с морским типом климата, более благоприятствующим развитию оледенения, нежели более сухой континентальный климат. При этом существующие одновременно в Южном полушарии условия с длительной холодной зимой и жарким коротким летом могут способствовать похолоданию этого океанического полушария (более подробно см. (Большаков, 2010)). Иными словами, учет физико-географических различий противоположных полушарий может сгладить проблему противофазного климатического влияния прецессии в этих полушариях. В таком случае ОКД можно считать эталоном глобальных колебаний климата последнего миллиона лет. Итак, при построении ОКД предполагалось, что уменьшение эксцентриситета орбиты и угла наклона земной оси к перпендикуляру к плоскости эклиптики приводят к глобальному похолоданию. Также был принят опи-

санный сейчас механизм глобального климатического влияния прецессии (поэтому у ККЗ прецессии стоит знак «минус»).

Вначале ОКД была построена для последнего миллиона лет (Большаков, 2000, 2003а), затем было показано, что 100-тысячелетние циклы имеют место в более широком интервале времени – около 1240 тысяч лет (Большаков, 2013б, 2014). На рис. 5 ОКД продолжена до 1500 тысяч лет назад для сравнения с изотопно-кислородной (ИК) записью LR04 (Lisiecki and Raymo, 2005). ИК запись LR04 представляет собой составную, глобально осредненную по 57 глубоководным колонкам палеоклиматическую запись по бентосным фораминиферам для интервала времени от современности до 5,3 млн. лет назад.

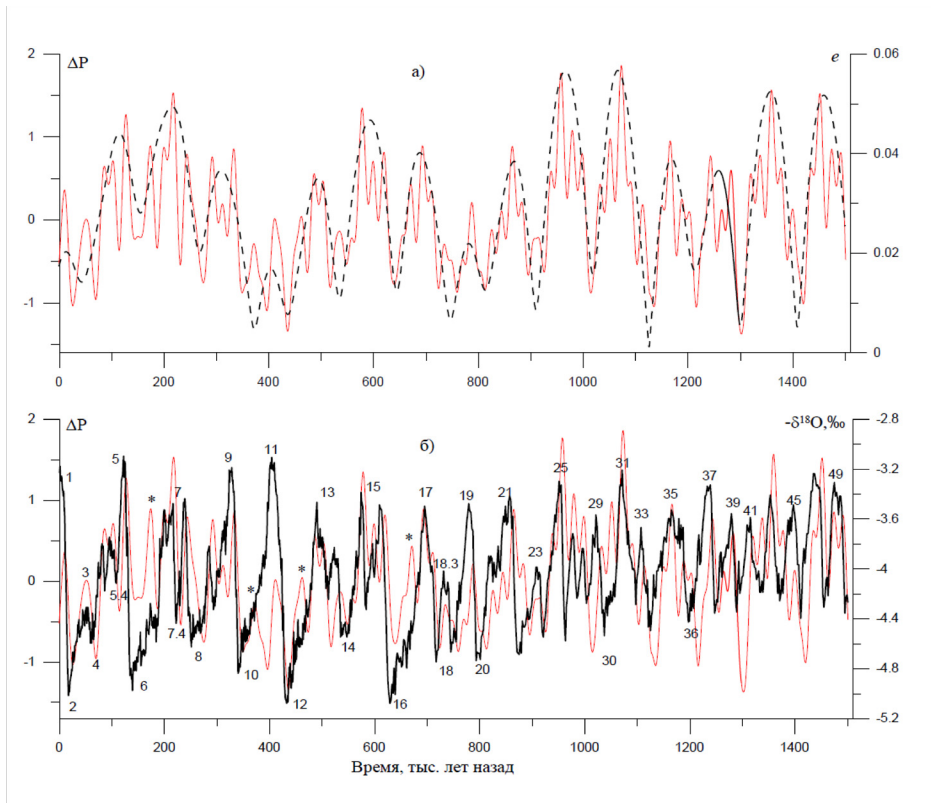


Рисунок 5 – Сравнение орбитально-климатической диаграммы (ОКД, тонкая красная линия): с вариациями эксцентриситета e (Berger, Loutre, 1991), рисунок 5а, штриховая линия) и ИК кривой LR04 (Lisiecki, Raymo, 2005) рисунок 5б, черная сплошная линия;). ΔP – условная относительная вероятность потеплений (межледниковий) или похолоданий (оледенений), соответственно для положительных и отрицательных значений ΔP . На рисунке 5б цифрами показаны традиционно используемые морские изотопные стадии (МИС) и подстадии ИК-шкалы. Обратите внимание на то, что изменения $\delta^{18}O$ умножены на (-1) для удобства сравнения с ОКД, поэтому графические «максимумы» или «минимумы» ИК записи LR04, о которых говорится в тексте, реально отвечают соответственно пониженным или повышенным, положительным значениям $\delta^{18}O$ для бентосных фораминифер. Другие пояснения см. в тексте.

Вариации тяжелого изотопа кислорода $\delta^{18}\text{O}$ отражают колебания глобального объема льда и глубоководной температуры: увеличение $\delta^{18}\text{O}$ (на рисунке 5б – минимумы ИК кривой) указывает на увеличение глобального объема льда и уменьшение температуры (похолодание), уменьшение $\delta^{18}\text{O}$ (максимумы на рис. 5) – на потепление. Наиболее выраженные максимумы и минимумы трактуются как межледниковья и оледенения и называются морскими изотопными стадиями (МИС). Межледниковым стадиям присвоены нечетные номера, ледниковым – четные (рис. 5б).

Некоторые результаты сопоставления ОКД и LR04

Сравнение рис. 5а и 5б показывает, что продемонстрированное в работе (Haas et al., 1976) для последних 500 тысяч лет совпадение оледенений на ИК-кривой с минимумами эксцентриситета можно распространить до 1200 тысяч лет. В этом интервале времени ОКД неплохо согласуется с LR04. Наиболее хорошо это сходство проявляется и по хронологии, и по форме кривых для стадий 1 – 5, 7 (с глубоким минимумом в середине стадии – подстадия 7.4), 13 – 15, 17 – 21. Особо отметим, что соответствующий МИС 19 максимум диаграммы приходится на интервал времени 770–790 тысяч лет. Это соответствует новой оценке возраста палеомагнитной инверсии Матуйма–Брюнес – около 780 тысяч лет (Spell, McDougall, 1992; Cande, Kent, 1995), которая приходится примерно на середину МИС 19 (deMenocal et al., 1990; Schneider et al., 1992; Bassinot et al., 1994; Tauxe et al., 1996; Большаков, 1999).

ОКД логично опережает по времени ИК-запись изменения глобального объема льда и температуры, отражая инерцию ответа климатической системы на орбитальное (инсоляционное) воздействие. Эта инерционная задержка для наиболее надежно определенных временных реперов позднего неоплейстоцена оценивается в 5-6 тысяч лет, что позволяет хронометрировать ИК-записи путем временного сопоставления наиболее характерных экстремумов (максимумов потепления или похолодания) ИК-записей и ОКД (Большаков, 2003в; Большаков и др., 2005). Таким образом, ОКД гораздо лучше сопоставляется с ИК записью LR04, нежели кривые неполной инсоляции (Большаков, 2012; рис. 4а и рис. 5б).

Отметим частные соответствия ОКД и LR04, связанные с максимумами МИС 3, МИС 18.3, МИС 23. Эти три потепления на ИК-кривой имеют общие особенности. Они приходятся на минимальные значения эксцентриситета, однако отражают межстадиальные потепления внутри оледенений. Следовательно, эти потепления связаны с совокупным однонаправленным изменением двух орбитальных параметров – прецессии и угла наклона земной оси, которое, в соответствии с вызываемыми ими изменениями инсоляции, должно приводить к потеплению (см. рис 2 б, в; рис. 4а). Отметим здесь и случаи также логичного, но противоположного, вызывающего похолодание при максимуме е инсоляционного климатического воздействия вариаций угла ϵ и прецессии. Например, подстадии 5.4 и 7.4 отражают наиболее существенные похолодания внутри межлед-

никовых МИС 5 и МИС 7 (рис. 5б). Они приходятся на максимумы эксцентриситета, но обусловлены приводящими к похолоданию изменениями параметров прецессии и угла ε , хорошо отраженными на ОКД.

Тем не менее, есть и несоответствия, которые вполне ожидаемы при столь простом способе построения диаграммы палеоклиматических изменений (более подробно см. (Большаков, 2014)). Остановимся на несоответствиях, отмеченных звездочкой на рис. 5б. Они представляют практически не отраженные в ИК-записи, но тем не менее значительные максимумы ОКД, которые приходятся на понижения или даже минимумы e . Из этого следует, что максимумы ОКД связаны с совокупным однонаправленным увеличением двух других орбитальных параметров – прецессии и угла наклона земной оси, которое должно приводить к потеплению. Однако в отмеченных конкретных случаях указанные орбитальные воздействия, по-видимому, не влияют должным образом на климатические изменения, так как не проявляются в значительном потеплении (уменьшении объема льда) на ИК кривой. Данный факт следует отметить особо, поскольку он касается важной проблемы установления механизмов отклика климатической системы на орбитальное инсоляционное воздействие. Вероятно, рассматриваемая ситуация связана с особенностями процессов трансформации инсоляционного сигнала в самой климатической системе, так как есть случаи, рассмотренные нами выше, когда аналогичный сигнал, наоборот, отражается потеплением на ИК кривой.

Таким образом, возвращаясь к отмеченным звездочкой на рис. 5б максимумам ОКД, можно констатировать, что за последний миллион лет климатическое воздействие вариаций инсоляции, обусловленных прецессией и наклоном земной оси, не всегда адекватно, в соответствии с общепринятыми механизмами их климатического влияния, отражалось в палеоклиматической записи.

В целом же эксцентриситетные 100-тысячелетние циклы ОКД хорошо согласуются с аналогичными циклами ИК-записи последних 1240 тысяч лет, до максимума МИС 37, как видно на рис. 5б. Далее ИК запись представлена меньшими, но более однородными по амплитуде, относительно равномерными и более короткопериодными колебаниями, которые затруднительно объединить в 100-тысячелетние циклы. Таким образом, изменение ритмики оледенений, или среднеледниковый переход (СПП, смена 41-тысячелетней цикличности, связанной с вариациями наклона земной оси, на эксцентриситетную 100-тысячелетнюю) совпадает с максимумом МИС 37 и соответствует 1,240 млн. лет по хронологии LR04 и 1,239 млн. лет по хронологии ОКД, с учетом задержки в 5 тысяч лет (Большаков, 2013б, 2014).

Это явление сопровождалось увеличением среднего объема льда на планете, большим размахом колебаний уровня Мирового океана, глобального объема льда и глобальной температуры в циклах оледенение–межледниковье, что не могло не отразиться на многих геофизических параметрах Земли. Несмотря на столь значительную, связанную с СПП перестройку природной среды, согласованного мнения о причинах и механизме этого явления до сих пор нет.

О механизме СПП

Проблема СПП заключается в основном в том, что смена ритмики оледенений произошла, несмотря на то, что орбитально обусловленные вариации инсоляции, с которыми, в основном, связывают глобальные колебания климата в плейстоцене, не изменяли своего характера в течение всего четвертичного периода (последние 2,6 млн. лет).

Одной из попыток объяснения СПП можно рассматривать, например, работу (Berger et al., 1999). Авторы предлагают модель изменения объёма льда на планете за последние 3 миллиона лет. В этой модели рассматривается два внешних фактора, воздействующих на климатическую систему Земли: линейное уменьшение концентрации CO_2 в течение трёх миллионов лет и вариации инсоляции июля на 65°с.ш. По мысли авторов, уменьшение концентрации CO_2 вызывает постепенное глобальное понижение температуры и рост глобального объёма льда. По мере роста объёма льда климатическая система будет по-разному реагировать на инсоляционный сигнал. В интервале времени 3-1 млн. лет назад, когда объём ледников был невелик, будет действовать механизм Миланковича, согласно которому оледенения наступают тогда, когда летняя (в данном случае июльская) инсоляция достигает минимума. Авторы работы (Berger et al., 1999, fig. 1, б) полагают, что такой механизм позволяет лучше всего проявляться 41-тысячелетнему воздействию вариаций наклона земной оси, хотя в изменениях месячной инсоляции, как это видно и из приведённого выше рис. 4, очевидно преобладание влияния прецессии.

Иной механизм воздействия инсоляции на климат во временном интервале 1-0 млн. лет назад, когда из-за уменьшения CO_2 и понижения температуры глобальный объём льда увеличился. Авторы считают, что при этом оледенения начинают длиться дольше, чем межледниковья. Далее они пишут: «В этом ледниковом мире осуществление межледниковий требует очень большой летней инсоляции высоких широт, т.е. совпадения высокого эксцентриситета, большого угла наклона земной оси и лета Северного полушария в перигелии... Поскольку эксцентриситет достигает максимума примерно каждые 100 тысяч лет, межледниковья происходят каждые 100 тысяч лет. Это особенно ясно для последних 0.8 млн. лет: в нашей модели полное, или почти полное таяние ледников Северного полушария происходит, только когда июльская инсоляция для 65°с.ш. превышает $460 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$, что также относится к временам высокого эксцентриситета» (Berger et al., 1999, p.8).

Помимо отсутствия обоснования линейного уменьшения концентрации CO_2 и неубедительного объяснения преобладания 41-тысячелетней периодичности оледенений в интервале времени 3-1 млн. лет назад, в работе (Berger et al., 1999) есть 4 существенных недостатка в обосновании смены 41-тысячелетней периодичности оледенений 100-тысячелетней периодичностью, т.е. в установлении механизма СПП. Первый заключается в том, что для последнего миллиона лет объясняется наступление не оледенений, а межледниковий. Эта задача искусственна, поскольку она искажает дей-

ствительное положение дел: изменения климата кайнозоя и, в частности, плейстоцена, заключались именно в похолодании и в постепенном увеличении объёма льда. И на рубеже 1 млн. лет назад, в процессе СПП, похолодание продолжалось, но мир этого времени нельзя назвать «ледниковым». Это следует хотя бы из того, что три четверти планеты занимал Океан, в основном, свободный ото льда. Необходимо помнить и то, что большая часть суши даже во время максимального распространения оледенений на территории Европы и Северной Америки (от высоких широт до 50 и 40 градусов северной широты соответственно) в плейстоцене также была свободна ото льда. Так что исходное, базовое состояние «плейстоценового мира» всё же межледниковье, а не оледенение.

Поэтому надо объяснять наступление не межледниковий, а оледенений, что, кстати, и делали основатели орбитальной теории на разных стадиях её развития, в том числе М. Миланкович. На мой взгляд, то, что межледниковье является исходным состоянием, отражено и в несимметричной пилообразной форме ИК кривых последнего миллиона лет, согласно которым переход к оледенению происходит обычно медленнее, труднее, чем возвращение к межледниковью. Такая динамика изменений логично связывается с тем, что выход из более устойчивого состояния в менее устойчивое состояние требует больших энергетических затрат, нежели возвращение назад в более устойчивое состояние.

Второй недостаток видится в следующем. В периоды максимальных значений эксцентриситета имеют место не только максимальные, но и минимальные значения месячной инсоляции, следующие за максимальными через ~ 11 тысяч лет (см. рис. 4а). Это происходит из-за решающего вклада в месячную инсоляцию прецессионной компоненты, которая модулируется эксцентриситетом. Исходя из этого факта, необходимо объяснить, почему значительные увеличения инсоляции приводят к таянию, уменьшению объёма льда, а следующие прямо за ними тоже значительные уменьшения инсоляции не вызывают возвращения к оледенению. Авторы (Berger et al., 1999) это почему-то не рассматривают. Тогда остается неясным – а что же приводит к оледенению? Если следовать логике авторов, это должно быть значительное уменьшение июльской инсоляции. Однако, поскольку оледенения приходились, как известно, на минимумы эксцентриситета, соответствующие минимумы инсоляции, как правило, будут менее глубокими, чем те, которые приходятся на максимумы e (рис. 4а). Очевидное противоречие здесь заключается в том, что к межледниковью приводят условия с максимальным в 100-тысячелетнем цикле значением инсоляции, а к оледенению – условия с наименее (а не наиболее) глубоким минимумом инсоляции.

Третий недостаток заключается в том, что авторы работы (Berger et al., 1999), по-видимому, забыли о главной, 400-тысячелетней периодичности изменений e , которая определяет, в частности, изменения амплитуды вариаций эксцентриситета в 100-тысячелетнем цикле (рис. 5а). Поэтому максимальные значения инсоляции, соответствующие некоторым максимумам e , могут быть меньше (или равны) максимумов инсоляции, прихо-

дящихся на некоторые минимумы эксцентриситета. Примером могут быть изменения инсоляции, приходящиеся на интервалы времени непосредственно до и сразу после 400 тысяч лет назад (рис. 4а). Изменения инсоляции незначительны и примерно подобны в этих интервалах времени, однако более раннему интервалу соответствует на ИК шкале самое значительное за последний миллион лет потепление, отражающее известную «проблему МИС 11» (Большаков, 2010). А практически таким же колебаниям инсоляции, происходящим сразу после 400 тысяч лет назад, соответствует оледенение МИС 10 (см. рис. 4а, 5б). Отсюда сразу следует, что не колебания месячной инсоляции являются причиной 100-тысячелетнего цикла.

Помимо этого, наличие главного цикла e , 400-тысячелетнего, должно приводить, согласно механизму авторов (Berger et al., 1999), к проявлению в палеоклиматических записях последнего миллиона лет, наряду с 100-тысячелетней, и 400-тысячелетней периодичности. Однако, как известно (Большаков, 2003б, 2015; Imbrie et al., 1993), 400-тысячелетняя цикличность климатических изменений в плейстоцене отсутствует.

Четвертый, решающий недостаток модели заключается в том, что она использует входной сигнал, не отражающий всю реально воздействующую на климатическую систему инсоляцию, а только её часть – инсоляцию июля на 65°с.ш. Это следует и из приведенной выше цитаты, и из рис. 6 статьи (Berger et al., 1999), на котором результаты моделирования сопоставляются с инсоляцией июля на 65°с.ш. Очевидно, что если входной сигнал неадекватен действительности, то трудно ожидать адекватных, реальных результатов от используемой модели. Видимо, авторы понимают это, поскольку декларируют необходимость использования вариаций полной годовой и для всех широт инсоляции, см. статьи (Berger et al., 1998; Loutre et al., 2004).

Обратимся к механизму СПП, изложенному в публикациях (Большаков, 2001, 2003а, Bol'shakov, Kuzmin, 2014). Согласно этим работам, среднеплейстоценовый переход может быть связан с механизмом, напоминающим механизм параметрического резонанса. Возможность резонанса, или автоколебаний в климатической системе и, следовательно, наличие у этой системы собственных частот допускается рядом авторов, например, (Сергин, Сергин, 1969, 1978; Hagelberg et al., 1991; Ashkenazy, Tziperman, 2004 и др.). В соответствии с этим механизмом, изменения внешних условий вызывают изменения параметров системы и ее резонансных частот (периодов). Под изменением внешних условий подразумевается направленное похолодание в интервале времени от 3 до 1 млн. лет назад, которое началось еще в эоцене. Это должно было привести к изменению объема ледников высоких широт и, следовательно, к изменению их инерционности и периода собственных колебаний. Возможный механизм изменения цикличности климатических осцилляций на рубеже 1 млн. лет назад может быть представлен следующим образом.

До одного миллиона лет назад объем льда не был достаточно велик, а температура поверхности планеты не была достаточно низка, чтобы обе-

спечить разрастание ледников до размеров, сравнимых с размерами ледниковых щитов второй половины плейстоцена. В этом случае изменение объема ледников, сосредоточенных в основном в высоких широтах, управлялось относительно короткопериодным воздействием вариаций наклона земной оси, в соответствии с обнаруженной эмпирически 41-тысячелетней периодичностью этих изменений. Напомню, что климатическое воздействие вариаций наклона земной оси наиболее эффективно как раз в высоких широтах (Croll, 1875; Миланкович, 1939; Большаков, 2003а). Основываясь на полученных данных, логично предположить, что такова же была и периодичность собственных (резонансных) ледниковых осцилляций в это время. Длиннопериодное воздействие эксцентриситетных вариаций инсоляции и определяемые ими осцилляции глобальной температуры оказывались слишком слабыми, чтобы вызвать дальнейшее разрастание ледниковых щитов. С течением времени, при нарастании глобального похолодания, увеличивались и объём, и площадь ледников.

Вероятно, около 1,2 миллиона лет назад, температура поверхности планеты и масса ледников в высоких широтах стали критическими по отношению к влиянию изменений инсоляции, вызванных 100-тысячелетними вариациями эксцентриситета. В этом случае, с одной стороны, «эксцентриситетное» понижение температуры оказывалось уже достаточным для предотвращения таяния распространяющихся от высоких широт ледников в более низких широтах. С другой стороны, с увеличением массы и площади ледников увеличились и положительные обратные связи за счет альбедо и содержания в атмосфере парниковых газов, которые, в свою очередь, усиливали распространение оледенения. Естественно, также повысилась и постоянная времени (резонансный период) собственных ледниковых осцилляций, заключающихся в разрастании и распаде ледников. Видимо, совокупное действие этих трех факторов и определило новую ритмику оледенений последнего миллиона лет.

Таким образом, динамика развития глобальных оледенений в последние три миллиона лет определяется в основном совместным воздействием вариаций эксцентриситета и наклона земной оси, усиленных влиянием положительных обратных связей, на фоне глобального понижения температуры. Осознавая некую гипотетичность предложенного резонансного механизма, тем не менее, в его поддержку приведу следующие доводы. Во-первых, это хорошая выраженность 100-тысячелетних эксцентриситетных циклов в записи LR04, подобная аналогичным циклам, отражённым в орбитально-климатической диаграмме (Большаков, 2013; 2014, см. также рис. 5). То обстоятельство, что главные минимумы и максимумы ОКД в 100-тысячелетнем цикле хорошо соответствуют, с некоторым опережением по времени, аналогичным минимумам и максимумам бентосной кривой LR04, подтверждает механизм прямого климатического воздействия вариаций эксцентриситета в последние 1240 тысяч лет. Напомню, что основной вклад в ОКД дают вариации эксцентриситета, а возможность непосредственного, прямого влияния на климат вариаций эксцентриситетной инсоляции следует из новой концепции (Большаков, 2003а, 2014) ОТП

и подтверждается совпадением минимумов с оледенениями – см. рис. 5.

Во-вторых, резонансный механизм предполагает избирательность: резонансно усиливаются только те сигналы, периоды которых близки характерным периодам собственных колебаний в климатической системе. В данном случае эта избирательность проявляется в том, что в последний миллион лет резонансно усиливается именно 100-тысячелетний, а не 400-тысячелетний, эксцентриситетный сигнал. Основываясь на этом предположении, предложен способ усовершенствования ОКД (Большаков, Прудковский, 2013), из которой был исключен вклад 400-тысячелетней эксцентриситетной составляющей. Полученная новая орбитально-климатическая диаграмма еще лучше соответствует ИК-записи LR04 – коэффициент корреляции, при учете задержки климатического отклика на 6 тысяч лет, увеличился с 0,57 до 0,74. Данное обстоятельство может также служить подтверждением предложенного резонансного механизма.

В-третьих, согласно предложенной схеме, дальнейшее увеличение площади распространения ледников приведет не только к увеличению их объема, но и к увеличению периода собственных ледниковых осцилляций. Поэтому при дальнейшем разрастании кайнозойского оледенения следует ожидать климатического проявления более длительного эксцентриситетного цикла, 400-тысячелетнего, который не проявлялся в течение последних 3 млн лет (Imbrie et al., 1993; Lisiecki, 2010; Большаков, 2015). Именно такая возможность подтверждается опубликованными данными (Heckel, 1986; Veevers, Powell, 1987), согласно которым в течение максимальной фазы пермо-карбонового оледенения проявлялась 400-тысячелетняя климатическая цикличность, выражавшаяся в колебаниях уровня океана. Как известно, пермо-карбоновое оледенение Гондваны отличалось большими, по сравнению с плейстоценовым, размерами – граница его распространения доходила до 30° южной широты (Veevers, Powell, 1987).

Помимо этого, резонансному механизму логично соответствует наблюдаемая эмпирически прямая зависимость между амплитудой климатических колебаний и их периодичностью в плейстоцене. Значит, приведённые выше данные можно считать подтверждающими предложенный резонансный механизм связи между колебаниями инсоляции, обусловленными вариациями угла наклона земной оси и эксцентриситета, изменениями объема ледниковых щитов и ритмики их разрастания и убывания.

Отчётливо выраженная как в ОКД, так и в ИК-записи LR04 столетняя эксцентриситетная цикличность предполагает закономерное наступление следующего оледенения при условии сохранения глобальной палеоклиматической обстановки последнего миллиона лет. Последнее означает, в частности, сохранение среднего глобального объема льда, так как если он растает вследствие антропогенного воздействия, то исчезнет самая сильная обратная связь – альбедная. Увеличение же объема льда может привести, в согласии с резонансным механизмом, к проявлению 400-тысячелетней ледниковой цикличности.

Итак, при сохранении природного климатического тренда, время последующего оледенения может быть определено посредством продол-

жения ОКД на 100 тысяч лет в будущее. Такая процедура была выполнена (Большаков, 2003а) и получено, что в будущем следует ожидать две фазы оледенения, экстремумы которого наступят через 20-21 тысяч и 59-60 тысяч лет (рис. 6). Полученный результат противоречит заключению работы (Berger et al., 2003), согласно которой оледенения не должно быть в предстоящие 100 тысяч лет из-за низкого значения эксцентриситета, обусловленного его 400-тысячелетней цикличностью.

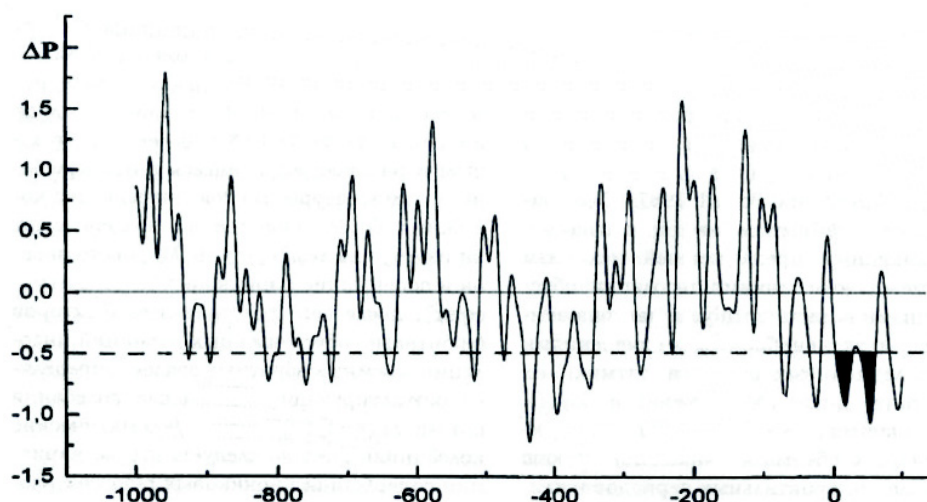


Рисунок 6 – Продолжение ОКД с коэффициентами климатической значимости 1 : 0,7 : 0,55 на 100 тысяч лет в будущее. Затушёванные участки – фазы прогнозируемого оледенения, экстремумы которого на ОКД приходятся на 15 тысяч и 54 тысяч лет (с учетом климатической задержки – 20-21 тысяч и 59-60 тысяч лет вперёд). По оси абсцисс – время в тысячах лет. При построении диаграммы использованы результаты вычислений из работы (Berger, Loutre, 1991). Данные вычислений любезно предоставлены автору M.F. Loutre.

Однако, похожая ситуация, с пониженным значением e , имела место 400 тысяч лет назад, но оледенение МИС 10 (рис. 5б), в соответствии с стотысячелетней цикличностью эксцентриситета, имело место. Если проводить полную аналогию сравнения ОКД и LR04 в интервале предстоящих 100 тысяч лет (рис. 6) с интервалом времени 430-330 тысяч лет назад на рис. 5б, можно допустить отсутствие будущей фазы оледенения около 20 тысяч лет. Это можно обосновать невыраженностью в палеоклиматической ИК-записи обозначенного звездочкой максимума около 370 тысяч лет назад (и, соответственно, важного в данном случае предстоящего ему минимума, отражающего похолодание) ОКД. Тем не менее, фаза оледенения 60 тысяч лет, в соответствии с изложенными выше представлениями о механизме стотысячелетнего цикла оледенений и сравнением с рис. 5б, должна быть, аналогично оледенению МИС 10. Поэтому возникает естественное сомнение в обоснованности сделанного в работе (Berger et al., 2003) прогноза. В частности, возникает вопрос: «Как могут авторы, не

решившие проблему 100-тысячелетней периодичности последнего миллиона лет, делать прогноз на 100 тысяч лет вперед?»).

О «геохимической» теории оледенений плейстоцена

В последние годы отмечено появление публикаций, в которых в качестве управляющего воздействия на климатическую систему рассматриваются вариации углекислого газа CO_2 . Наиболее обстоятельно это отражено в заказном обзоре («invited review») Д. Пайяра (Paillard, 2015) под названием «Четвертичные оледенения: от наблюдений к теориям». Именно непригодность астрономической теории Миланковича для объяснения проблемы стотысячелетнего периода привела автора (Paillard, 2015) к необходимости развития новой, «геохимической» теории. Суть ее заключается в утверждении, что основным фактором, определяющим четвертичные оледенения, наряду с орбитально обусловленными вариациями инсоляции, являются независимые колебания CO_2 в атмосфере, воздействующие на климат Земли посредством парникового эффекта. Иными словами, вариации CO_2 , как и вариации инсоляции, рассматриваются в качестве входного сигнала, воздействующего на климатическую систему.

Таким образом, изменения CO_2 являются, по мнению Пайяра, не следствием, а причиной глобальных климатических колебаний в плейстоцене. Поскольку изменения CO_2 , зафиксированные в ледовых ядрах Антарктиды (Petit et al., 1999; Jouzel, 2013), подобны изменениям температуры в Антарктиде и изменениям $\delta^{18}\text{O}$ глубоководных осадков, то в записях CO_2 имеют место те же орбитальные периодичности, которые зафиксированы в указанных палеоклиматических записях. Тогда, используя простой линейный механизм преобразования CO_2 -сигнала, легко объяснить наличие орбитальных периодичностей в палеоклиматических записях и, в частности, получить решение проблемы стотысячелетней периодичности оледенений. Но тогда для объяснения оледенений становится не нужной теория Миланковича. Данное заключение следует признать логичным, учитывая показанные выше недостатки ТМ и ее противоречия эмпирическим данным.

А вот с позиций новой концепции орбитальной теории нет нужды как раз в геохимической теории. (Кстати, то же утверждал по поводу «гипотезы CO_2 » Миланкович (1939, с. 167), считая свою теорию достоверно объясняющей оледенения плейстоцена: «Нам нет надобности прибегать к помощи подобных гипотез»). В самом деле, не представляется разумным начинать разработку новой теории, не исчерпав всех возможностей первоначальной. Это тем более верно, что в работе (Hays et al., 1976) подтверждены используемые в орбитальной теории механизмы климатического воздействия отдельных орбитальных элементов. Так, оледенения совпадают с минимумами эксцентриситета, соответствующими уменьшениям

глобальной инсоляции; похолодания в 40-тысячелетней гармонике палеоклиматических изменений соответствуют понижению угла наклона земной оси; обусловленные прецессией понижения контрастов инсоляции Северного полушария совпадают с фазами похолодания в 23-тысячелетней гармонике палеоклиматических записей.

Ещё одним доводом против отказа от орбитальной теории является то, что перед геохимической теорией, помимо проблемы определения механизма колебаний CO_2 , встанут те же проблемы объяснения в полученной эмпирически записи CO_2 наличия орбитальных периодичностей и соотношения степени их влияния на изменения CO_2 . Совсем неразрешимой, с позиций не зависящих от изменения земного климата вариаций CO_2 , представляется проблема СПП, которая как раз предполагает зависимость климатического отклика на внешнее воздействие от общего климатического состояния Земли. И последнее. Учитывая, что новая концепция ОТП даёт объяснение главным особенностям климатических колебаний в плейстоцене, развивать новую теорию нет необходимости. Напомню, что колебания CO_2 в новой концепции рассматриваются как одна из положительных обратных связей, возникающих в процессе климатических изменений, контролируемых орбитально обусловленными вариациями инсоляции.

Заключение

Проведённое рассмотрение истории развития орбитальной теории палеоклимата и анализ теоретических версий ОТП, развитых Миланковичем и его последователями, показывает их недостаточность для решения важных проблем палеоклиматов плейстоцена. Главным недостатком теоретических версий является использование, в качестве управляющего сигнала, неполных вариаций инсоляции.

Предложенная автором новая концепция ОТП, свободная от этого недостатка, предлагает, пока в основном на качественном уровне, решение основных проблем палеоклиматов плейстоцена: проблем преобладания 100-тысячелетней периодичности и отсутствия 400-тысячелетней периодичности палеоклиматических колебаний, проблемы среднеплейстоценового перехода. Впервые предложенное единое, комплексное решение этих проблем внутренне непротиворечиво и хорошо соответствует эмпирическим данным о плейстоцене, что выгодно отличает его от других способов объяснения указанных проблем.

Дальнейшая работа в этом направлении видится в конкретизации механизмов, предложенных для решения указанных проблем, с использованием (и получением), по возможности, количественных характеристик. Также необходимо более широкое сопоставление полученных результатов с эмпирическими данными, с привлечением палеоклиматических данных, охватывающих более широкий (за пределами плейстоцена) временной

интервал, как для океанских, так и для континентальных отложений. При этом остаётся актуальной проблема возможно более точной временной привязки палеоклиматических записей.

Литература

Большаков В.А. 1999. О глубине фиксации палеомагнитной записи и климатостратиграфическом положении инверсии Мату-яма–Брюнес в глубоководных осадках // Физика Земли, №6, с. 93-96.

Большаков В.А. 2000. Новый способ построения диаграммы палеоклиматических изменений плейстоцена // Докл. АН. География, т. 374, №5, с. 692-695.

Большаков В.А. 2001. Новая концепция астрономической теории палеоклимата: шаг вперед, после двух шагов назад // Физика Земли, №11, с. 50-61.

Большаков В.А. 2003а. Новая концепция орбитальной теории палеоклимата. –М.: МГУ, 256 с.

Большаков В.А. 2003б. Климатические циклы фанерозоя с позиций новой концепции орбитальной теории палеоклимата // Известия РАН. Серия Географическая, №3, с. 14-25.

Большаков В.А. 2003в. Новый способ хронометрирования изотопно-кислородных записей колонок глубоководных осадков // Докл. АН. т. 388, №1, с. 105-108.

Большаков В.А. 2010. Проблема межледниковой 11-й морской изотопной стадии с позиций новой концепции орбитальной теории палеоклимата // Океанология, т. 50, №2, с. 236-247.

Большаков В.А. 2012. Орбитально-климатическая диаграмма как альтернатива использования дискретных инсоляционных кривых для палеоклиматических интерпретаций и корреляций. // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода, т. 83, с.95-103.

Большаков В.А. 2013а. Ответ на комментарии И.И. Смутьского // Вестник РАН, т. 83, №1, с. 40-44.

Большаков В.А. 2013б. Исследование характеристик «среднеплейстоценового перехода» с помощью сопоставления изотопно-кислородной записи LR04 с орбитально-климатической диаграммой // Докл. АН, т. 449, №3, с. 338-341.

Большаков В.А. 2014. Связь глобальных колебаний климата в плейстоцене с вариациями орбитальных параметров Земли // Стратиграфия. Геологическая корреляция, т. 22, №5, с. 97-112.

- Большаков В.А. 2015. Проблема 400-тысячелетней периодичности природных изменений плейстоцена: анализ эмпирических данных по глубоководным и континентальным разрезам // Стратиграфия. Геологическая корреляция, т. 23, №1, с. 50-67.
- Большаков В.А., Капица А.П. 2011. Уроки развития орбитальной теории палеоклимата // Вестник РАН, т. 81, №7, с. 603-612.
- Большаков В.А., Прудковский А.Г. 2013. Совершенствование орбитально-климатической диаграммы как инструмента интерпретации и анализа палеоклиматических записей плейстоцена. // Вестник МГУ, Сер. 5, География, №6, с. 30-39.
- Большаков В.А., Иванова Е.В., Прудковский А.Г. 2005. Некоторые результаты применения нового метода хронометрирования палеоклиматических записей глубоководных колонок донных осадков // Океанология, т. 45, №6, с. 916-926.
- Имбри Дж., Имбри К.П. 1988. Тайны ледниковых эпох. –М.: Прогресс, 264 с.
- Миланкович М. 1939. Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. –М.: –Л.: ГОНТИ, 207 с.
- Сергин В.Я., Сергин С.Я. 1969. Как возникали оледенения Земли. // Природа, №9, с.10-17.
- Сергин В.Я., Сергин С.Я. 1978. Системный анализ проблемы больших колебаний климата и оледенения Земли. –Л.: Гидрометеоиздат, 279 с.
- Adhémar J.A., 1842. *Revolutions de la Mer: Déluges Périodiques*. Carilian-Goeury et V. Dalmont, Paris.
- Ashkenazy Y., E. Tziperman 2004. Are the 41 kyr glacial oscillations a linear response to Milankovitch forcing? // *Quat. Sci. Revs.* V. 23. P. 1879-1890
- Bassinot F.C., Labeyrie L.D., Vincent E., Quidelleure X., Shackleton N.J., Lancelot Y., 1994. The astronomical theory of climate and the age of the Brunhes-Matuyama magnetic reversal. // *Earth and Planetary Science Letters* 126, 91-108.
- Berger A.L., Loutre M.F., 1991. Insolation values for the climate of the last 10 million years. // *Quaternary Science Reviews* 10, 297-317.
- Berger A.L., Loutre M.F., Gallee H., 1998. Sensitivity of the LLN climate model to the astronomical and CO₂ forcings over the last 200 ky. // *Climate Dynamics* 14, 615-629.
- Berger A., Li X., Loutre M. 1999. Modelling northern hemisphere ice volume over the last 3 Ma. // *Quaternary Science Reviews* 18, 1–11.
- Berger A., Loutre M.F., Crucifix M. 2003. The Earth's climate in the next hundred thousand years (100 kyr.). *Surveys in Geophysics*, V. 24 P. 117-138

Bol'shakov V.A. 2008. How long will the «precession epoch» last in terms of Pleistocene glacial cycles? // *Rus. J. Earth Sci.* V. 10. ES3004, doi: 10.2205/2008ES000299.

Bol'shakov V.A. and Ya.V. Kuzmin. 2014. Evolution and variability of the pleistocene ice ages: A new view. // *Russ. J. Earth. Sci.*, 2014. 14, ES1003, doi:10.2205/2014ES000537.

Broecker W., van Donk J., 1970. Insolation changes, ice volumes, and the ^{18}O record in deep-sea cores. // *Reviews of Geophysics and Space Physics* 8, 169-198.

Cande S.C., Kent D.V., 1995. Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the Late Cretaceous and Cenozoic. // *Journal of Geophysical Research* 100(B4), 6093-6095.

Croll J. 1875. Climate and time in their geological relations: a theory of secular changes of the Earth's climate. London: Edward Stanford, 577 p.

De Menocal P.B., Ruddiman W.F., Kent D.V., 1990. Depth of post-depositional remanence acquisition in deep-sea sediments: a case study of the Brunhes-Matuyama reversal and oxygen isotopic Stage 19.1. // *Earth and Planetary Science Letters* 99, 1-13.

Ganopolski A., Calov R. 2011. The role of orbital forcing, carbon dioxide and regolith in 100 kyr glacial cycles // *Clim. Past* V. 7. P. 1415-1425

Hagelberg T., Pisias N., Elgar S. 1991. Linear and nonlinear couplings between orbital forcing and the marine $\delta^{18}\text{O}$ record during the Late Neogene. // *Paleoceanography* V. 6. P. 729-746.

Hays J.D., Imbrie J., Shackleton N. 1976. Variation in the Earth's orbit: Pacemaker of the ice ages. // *Science*. V. 194. P. 1121-1132.

Heckel P.H. 1986. Sea-level curve for Pennsylvanian eustatic marine transgressive-regressive depositional cycles along midcontinent outcrop belt, North America // *Geology* V.14. P. 330-334.

Imbrie J. 1982. Astronomical theory of the Pleistocene Ice Ages: A brief historical review. // *Icarus* 50, 408-422.

Imbrie J., Berger A., Boyle E.A., Clemens S.C., Duffy A., Howard W.R., Kukla G., Kutzbach J., Martinson D.G., McIntyre A., Mix A.C., Molino B., Morley J.J., Peterson L.C., Pisias N.G., Prell W.L., Raymo M.E., Shackleton N.J., Toggweiler J.R. 1993. On the structure and origin of major glaciation cycles. 2. The 100,000-year cycle // *Paleoceanography* V.8, P. 699-735.

Jouzel J. A 2013 A brief history of ice core science over the last 50 years // *Clim. Past*, V.9, P. 2525-2547.

Kukla G.J. 1968. Comment to: Pleistocene epoch and the evolution of man. // *Current Anthropology* V.9. P. 37.

- Lisiecki L.E., 2010. Links between eccentricity forcing and the 100,000-year glacial cycle. *Nature Geosciences* 3, 349-352.
- Lisiecki L.E., Raymo M.E. 2005. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. // *Paleoceanography* V. 20, PA 1003; doi:10.1029/2004PA001071.
- Loutre M.F., Paillard D., Vimeix F., Cortijo E. 2004. Does mean annual insolation have the potential to change the climate? // *Earth and Planetary Science Letters* V. 221. P. 1-14.
- Milankovitch M., 1941. *Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem*. Royal Serbian Academy, Beograd.
- Paillard D. 2015. Quaternary glaciations: from observations to theories // *Quatern. Sci. Rev.* V. 107. P. 11-24.
- 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. V.399 P.429-436.
- Schneider D.A., Kent D.V., Mello G.A., 1992. A detailed chronology of the Australasian impact event, the Brunhes-Matuyama geomagnetic polarity reversal, and global climate change. // *Earth and Planetary Science Letters* 111, 395-405.
- Spell T., McDougall I., 1992. Revisions to the age of the Brunhes-Matuyama boundary and the Pleistocene geomagnetic polarity timescale. // *Geophysical Research Letters* 19, 1181-1184.
- Tauxe L., Herbert T., Shackleton N., Kok Y., 1996. Astronomical calibration of the Matuyama-Brunhes boundary: consequences for magnetic remanence acquisition in marine carbonates and Asian loess sequences. // *Earth and Planetary Science Letters* 140, 133-146.
- Veevers J.J., Powell C.M.A. 1987. Late Paleozoic glacial episodes in Gondwanaland reflected in transgressive-regressive depositional sequence in Euramerica. // *Geological Society of America Bulletin* V.94. P. 475-487.