

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. М.В. ЛОМОНОСОВА

ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

ЛАБОРАТОРИЯ НОВЕЙШИХ ОТЛОЖЕНИЙ  
И ПАЛЕОГЕОГРАФИИ ПЛЕЙСТОЦЕНА

В.А. БОЛЬШАКОВ

НОВАЯ КОНЦЕПЦИЯ  
ОРБИТАЛЬНОЙ  
ТЕОРИИ ПАЛЕОКЛИМАТА

МОСКВА 2003

## Глава 1. ЭВОЛЮЦИЯ ОРБИТАЛЬНОЙ (АСТРОНОМИЧЕСКОЙ) ТЕОРИИ ПАЛЕОКЛИМАТА В XIX – ПЕРВОЙ ПОЛОВИНЕ XX ВЕКА.

### 1.1 Открытие существования ледникового периода в геологическом прошлом и развитие представлений об оледенениях Земли.

Поскольку развитие орбитальной теории палеоклимата было изначально направлено на объяснение феномена оледенений в геологическом прошлом, необходимо хотя бы в общих чертах коснуться этого явления. Более подробные сведения об истории развития ледниковой теории можно найти, например, в замечательных публикациях К. К. Маркова [1986] и Дж. Имбри и К. П. Имбри [1988].

Сейчас хорошо известно, что Земля в геологическом прошлом подвергалась неоднократным оледенениям. Это были периоды, когда огромная часть суши покрывалась ледниками. В плейстоцене мощность ледников, которые развивались в основном в Северном полушарии, достигала 2-3 километров и они распространялись на юг в Европе примерно до 48° северной широты (с.ш.), а в Северной Америке достигали даже 38° с.ш. [Марков, Величко, 1967]. Результаты наступания и последующего таяния этих огромных ледников отразились в различных формах рельефа ледниковых областей (например, Клиско-Дмитровская гряда в России), в эрозии ледникового ложа, когда на скальных породах, по которым двигались ледники, оставались характерные штрихи, в наличии на возвышенных местах отдельных, принесенных издалека (эратических) валунов, достигавших огромных размеров, и конечно-моренных гряд, сложенных в основном из валунов и щебня, а также в существовании хорошо выделяемых в геологических разрезах горизонтов основных морен, представляющих сочетание тяжелых суглинков с галькой и валунами местных, транзитных и удаленных питающих провинций. Например, для Европейской части России поставщиком эратического материала были Скандинавский и Североуральский центры оледенения [Марков, Величко, 1967].

Разрастание ледников вызывало понижение глобальной температуры, увеличение широтных температурных градиентов и усиление циркуляции атмосферы и гидросферы, смещение путей циклонов и антициклонов. В результате смещались и зоны повы-

шенной увлажненности и иссушения, при общем увеличении сухости климата в периоды оледенений. Поскольку развитие оледенения происходило за счет изъятия воды (путем ее испарения и выпадения в виде снега в высоких широтах) из Мирового океана, его уровень понижался на 100-150 метров, что существенно увеличивало площадь суши.

Однако в начале XIX века эти данные ещё не были известны, а находки в горах и на возвышенностях эратических валунов с характерной штриховкой или целых моренных гряд объясняли воздействием вод Всемирного библейского потопа. Первыми, кто в 20-х – 40-х годах XIX столетия связали эти явления с ледниками, были швейцарские ученые И. Венец, Ж. Шарпантье и Л. Агассис. Этому, по-видимому, способствовало то обстоятельство, что они могли непосредственно наблюдать следы воздействия современных горных ледников в Альпах.

Объяснение существования эратических скоплений как наносов, отложенных ледниками, долгое время принимали в штыки сторонники версии библейского потопа, а также предложенной в 1833 году Ч. Лайелем дрейфовой теории. Согласно этой теории, валуны транспортировались в различные места дрейфующими айсбергами и отлагались по мере таяния последних. Это неплохо вписывалось и в концепцию потопа. И тем не менее ледниковая теория пробивала себе дорогу. Особая заслуга в этом принадлежит Л. Агассису, который, в частности, смог убедить в своей правоте пользующихся в то время большим авторитетом английских ученых У. Бакленда и Ч. Лайеля [Имбри, Имбри, 1988]. После опубликования своего основного труда «Исследование о ледниках» [Agassiz, 1840] он успешно пропагандировал свои взгляды, переехав в США. Согласно К.К. Маркову [1986, с.63], отметившему в соответствующих цитатах склонность Агассиса к идеям катастрофизма, главные положения его теории следующие: «1. В Альпах древние ледники спускались до основания гор. Альпы напоминали в то время ледяное море. «Это ледяное море посылало во все стороны через большие долины древние ледяные потоки вниз, к Швейцарским и Итальянским равнинам». 2. За пределами Альп «земля покрывалась ледяной корой, простиравшейся от Северного полюса на большую часть Северного полушария» — на территорию Европейской части России и Северной Америки».

В этом кратком обзоре первого этапа развития ледниковой теории хотелось бы отметить две особенности процесса научного познания, проявившиеся при развитии представлений о древнем оледенении, и отмеченные в публикациях К.К. Маркова и Дж. и К.П. Имбри. Первая связана с необходимостью *борьбы* за новые представления. В книге [Имбри, Имбри, 1988, с.43] об этом говорится так: «...Прошло еще двадцать лет (после 1840 года – В.Б.), прежде чем большинство британских геологов действительно приняли ледниковую теорию. Почему же система представлений, ценность которой сейчас совершенно очевидна, тогда столкнулась со столь сильными противодействием? Ответить на это просто. Скорее всего, здесь проявила себя природа людей, которые вообще не прислушались нового без сопротивления, особенно если это новое – иден, противоречащее давно устоявшимся научным истинам или религиозным убеждениям. А ведь теория Агассиса бросала вызов и тем и другим. Причина в данном случае – не столько в религии, сколько в приверженности к старым догмам, которую нередко отождествляют с научной ортодоксальностью».

Вторая особенность процесса научного познания касается необходимости здравого смысла, поскольку, на мой взгляд, даже самые «неожиданные озарения» в какой-либо фантастичной идее имеют свою логику и основания, в конечном счете, на здравомыслии, включающем в себя цепочку логично построенных и понятных умозаключений. В связи с этим приведу яркий пример из книги [Имбри, Имбри, 1988, с. 25] любопытного враншесствия, случившегося с Ж. Шарпайтом в Альтах: «На своем пути по долине Часли и Лургерия я увидел на Бруннической дороге старого лесоруба из Мейрингена. Некоторое время мы шли с ним вместе и разговаривали. Когда же я сошел на край тропы и стал осматривать большой гранитный валун, он заметил: «Таких камней здесь много, однако они не местные, а принесены издалека, от самого Гримзеля: они ведь состоят из гайсбертских гранитов, которых здесь совсем нет». Когда же я спросил, как, по его мнению, эти камни достигли здешних мест, он ответил без колебаний: «Это Гримзельский ледник пронес и отложил их на обоих бортах долины. В прошлом он должен был доходить до самого Берна, но вода же затащила валуны на такую высоту над дном долины, ведь для этого здесь должны были бы образоваться целые озера». Этот славный старик

не мог знать о рукописи, лежащей в моем кармане. А ведь в ней было подтверждение его гипотезы». Добавлю, что описанная встреча произошла в то время, когда большинство ученых в том числе и Л. Агассис, еще отрицали ледниковую теорию.

Борьба идей активно продолжалась и во второй половине 19-го века, на следующем этапе развития ледниковой теории. Если первый этап можно в основном считать этапом развития теории горного оледенения Азьи, то на втором этапе существенно расширилась географически доказательная эмпирическая база теории *материкового* оледенения. Она охватила обширные пространства Центральной и Восточной Европы, Шотландии, Скандинавии, Сибири, Северной Америки. Среди зарубежных ученых большой вклад в развитие теории внесли голландец Дж. Гейки швед О. Торель, американец Д. Дена. Особое большое значение имела работа [Geikie, 1874]. В ней дана решительная критика идей катастрофизма Ж. Кювье (результатом которых была и теория погоя), а также отрицается теория дрейфа. Одним из первых Дж. Гейки сделал очень важное заключение о *многократности оледенений*. Более точно, он считал надежю установленной одну межледниковую эпоху и допускал наличие нескольких более древних межледниковий и, соответственно, оледенений.

Что касается нашей страны, то, согласно К.К. Маркову [1986, с. 83]: «В разработке теории материкового оледенения в России можно выделить три этапа. *Первый этап*. Теорию о материковой природе древнего оледенения высказывают и обосновывают в России: К. Ф. Рулье – в 1852 г., Г.Е. Шуровский – в 1856 г., Ф.Б. Шмидт – в 1871 г., П.А. Кропоткин – в 1873-1876 гг. *Второй этап*. Теория материкового оледенения стала окончательно господствовать в России к середине 80-х годов XIX столетия. *Третий этап*. Выявляются закономерности распространения древнего оледенения. Русские исследователи отмечают своеобразие условий распространения и развития оледенения». Так же образом, начало разработки ледниковой теории в России, связываемое с именами профессоров Московского университета К.Ф. Рулье и Г.Е. Шуровского, хотя было более поздним, чем в Европе, было тем не менее, и более основательным. Например, уже в 1856 г. Г.Е. Шуровский опубликовал схему ледникового покрова Русской равнины, в общих чертах исцехо передающую очертания границ максимального

го оледенения, которые приняты сейчас; в схеме даже намечен донской ледниковый язык.

Большое влияние на развитие теории оказала работа П.А. Кропоткина «Исследования о ледниковом периоде», первый том которой был опубликован в 1876 г. Она была основана на собственных обширных исследованиях автора в Сибири, Финляндии и Швеции и на обобщении данных других исследователей. П.А. Кропоткин, практически одновременно с Дж. Гейки и независимо от него, опровергает гипотезу потопа и теорию плавучих льдов (дрифтовую теорию Ч. Лайеля). Так, в докладе, сделанном на заседании Географического общества, он говорил: «Все валуны, рассеянные по средней и северной России, доставлены туда из Финляндии ледниками, а не плавающими льдинами, как это большей частью предполагалось доселе». В отличие от Гейки, Кропоткин большее внимание уделял физическим и географическим аспектам проблемы. Например, он довольно подробно рассмотрел физические свойства льда, прежде всего имея в виду объяснение процесса его движения. П.А. Кропоткин первым отметил, что континентальный климат Сибири, вследствие его сухости, неблагоприятен для оледенения. К.К. Марков [1986, с. 74] так определяет главный итог работы П.А. Кропоткина: «Итак, в своем основном труде П.А. Кропоткин развивает теорию материкового оледенения. Он пишет про «обширные ледяные покровы в тысячу, две и три тысячи метров толщины», которые расползались «по стране, какого бы она ни была рельефа», до предела, который ставили или усиливающиеся таяние, или рельеф».

Таким образом, к концу 19-го века позиции теории материкового оледенения существенно утвердились. При этом процесс оледенения огромных площадей суши рассматривался не сам по себе, а в связи с другими природными изменениями – колебаниями уровня океана, а также имеющими свою специфику для отдельных регионов планеты многообразными климатическими вариациями. Большое значение имело установление неоднократности оледенений в геологическом прошлом.

## 1.2 Попытки теоретического объяснения существования ледниковых эпох.

Развитие представлений о существовании оледенений в геологическом прошлом повлекло за собой и многочисленные попытки теоретического объяснения этого феномена. Как пишет М. Шварцбах [1955, с. 214]: «...настоящий расцвет климатических гипотез начался только с открытия «ледникового периода». Более 50 «теорий ледниковых эпох» было предложено для объяснения этих столь поразительных колебаний климата. Таким образом, с этого времени учение об изменении климата становится на весьма ненадежную почву. Это лучше всего видно из того курьезного 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 считает причиной теплых периодов, а Хаггингтон – ледниковых периодов; Дюбуа и другие считают причиной оледенения ослабления интенсивности солнечной радиации, а Симпсон – ее усиление. 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 и другие считают причиной ледниковых периодов изменение путей Гольфстрима, а Берман и другие полагают, что Гольфстрим, способствующий увеличению влажности, является вообще основной причиной возникновения ледниковых периодов. Имеются даже и такие исследователи, которые совсем отрицают существование ледниковых периодов и все факты, собранные по этому вопросу, не считают признаками изменения климата [Sandberg, 1943]».

Сказанное более полувека назад М. Шварцбахом остается отчасти справедливым и сейчас, особенно когда рассматриваются гипотезы, объясняющие существование ледниковых эр фанерозоя и докембрия [Авсюк, 1996; Баренбаум, Ясаманов, 2001; Будыко и др., 1986; Чумаков, 1984, 2001; Williams, 1993].

Из относительно недавних теорий, которые предлагаются для объяснения четвертичных оледенений, следует отметить распространенную во второй половине 20-го века так называемую стохастическую теорию климата. В книге [Имбри, Имбри, 1988, с. 74] эта теория описывается так: «Ее исходным постулатом служит до-

пущение, что одним из самых **изначальных**, **глубинных** свойств климата является крупномасштабная изменчивость. Известно, что в коротких масштабах времени случайные изменения климатических характеристик **происходят из месяца в месяц и из года в год**. Стохастическая же теория **еще и утверждает, что чем продолжительнее изучаемый интервал времени, тем амплитуда этих изменений больше**. Причем делаются ссылки на тот факт, что климатические различия, наблюдаемые между соседними десятилетиями, обычно превосходят различия между соседними годами, входящими в те же десятилетия. Теория предполагает, что этот тренд сохраняется безгранично, то есть, что если брать все более длительные интервалы времени, то размах наблюдаемых изменений будет непрерывно нарастать. И уж конечно, все это подкрепляется **изохронными математическими аргументами**».

Очевидно, что стохастическая теория, вообще говоря, находится в противоречии с детерминистическими теориями, предполагающими, что климатические изменения являются **причиной обусловленной и закономерно взаимосвязанной последовательностью событий**. Однако рассмотрим, например, длительное, около 50 млн. лет, кайнозойское похолодание. Оно не было монотонным (т.е. в процессе направленного понижения глобальной температуры были и похолодания и потепления [Величко 2002]) и привело к самым значительным, **циклическим климатическим колебаниям плейстоцена типа оледенение-межледниковье, продолжительностью около 100 тыс. лет**. Если бы мы не знали причину глобальных климатических колебаний плейстоцена, то, поскольку точные причины кайнозойского похолодания пока неизвестны, объяснение климатических изменений кайнозоя, в принципе, можно было бы пытаться проводить и с детерминистических и со стохастических позиций. Мне более импонирует детерминистический подход, так как я надеюсь, что причины кайнозойского похолодания, как и других ледниковых эр фанерозоя, будут найдены. При этом, даже в случае детерминистического подхода, по-видимому, нельзя полностью исключить наличие случайных климатических колебаний в процессе рассматриваемых изменений. Однако стохастические изменения в данном случае будут иметь подчиненный характер. Критерием правильности того или иного подхода, как всегда,

является практика, т.е. оценка соответствия теоретических выводов эмпирическим данным.

В связи с этим рассмотрим, например, результаты использования «динамико-стохастической модели циклов оледенений», приведенные в книге [Добровольский, 2002]. На стр. 201 этой публикации указано, что «изучение процессов в масштабах времени тысяч и десятков тысяч лет позволяет проверить на соответствующем материале гипотезу о фундаментальной роли вероятностных (стохастических) процессов в науках о Земле и, следовательно, еще раз подтвердить целесообразность вероятностного (стохастического) подхода к изучению современных процессов. Кроме того, палеоисследования дают возможность проверить конкретные гипотезы о характере используемых моделей и временных границах их применимости».

Свою точку зрения на детерминистическое объяснение плейстоценовых циклов оледенений автор излагает следующим образом [Добровольский, 2002, с. 202]: «Причины этих циклов до сих пор вызывают споры. Наиболее распространена теория Миланковича, который связал циклы оледенения с изменениями инсоляции вследствие циклов параметров орбиты Земли вокруг Солнца со сходными периодами. Однако, периодические изменения инсоляции в теории Миланковича очень малы, и для того, чтобы объяснить громадные изменения земных оболочек различные исследователи предлагают механизмы и модели, *якобы* (курсив мой – В.Б.) усиливающие периодический «сигнал» инсоляции. Как правило, предлагаемые механизмы – детерминистические, включающие в себя сложные нелинейные обратные связи. Очевидный недостаток этих теорий заключается в том, что предлагаемые модели климатической системы из-за включения в них упомянутых выше сложных механизмов требуют знания большого количества параметров, оценить которые даже для современного состояния климата не представляется возможным (например, коэффициент вертикального обмена тепла в глубинных слоях океана и параметры процессов внутри ледниковых щитов). *Нами предложен намного более простой и, с нашей точки зрения, более естественный подход к моделированию ледниковых циклов, который требует минимальных предположений о характере процессов*».

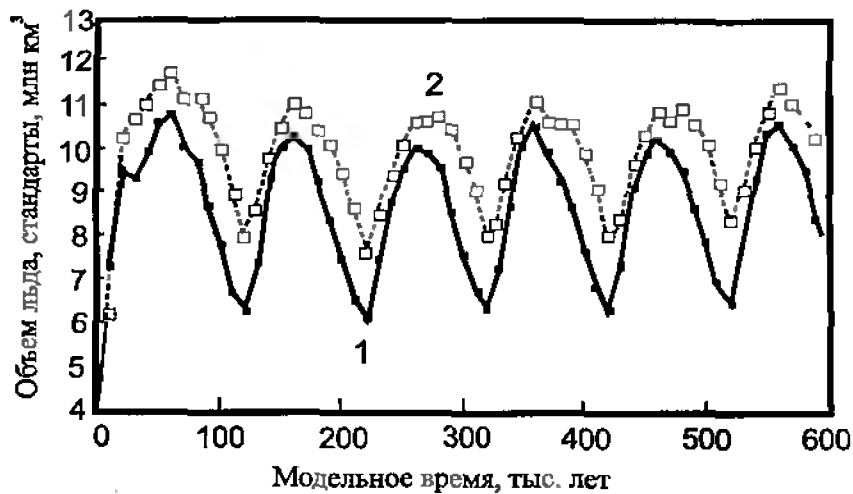


Рис. 1. Средние изменения объема льда в модели (1); изменения стандартов (2). Эксперимент с внешним возбуждением с периодом 100 тыс. лет. (Рисунок взят из работы [Добровольский, 2002]).

Изменения глобального объема льда, полученные с помощью предлагаемой модели, показаны на рис. 1 (рисунок 5.5 рассматриваемой публикации). В книге так описаны полученные данные: «На рис. 5.5 показаны изменения объема льда в эксперименте по возбуждению модели изменениями инсоляции по Миланковичу. Очевидно, что модель воспроизводит 100-тысячелетние колебания без каких-либо предположений о наличии сложных механизмов усиления небольшого внешнего сигнала». Что касается «изменений инсоляции по Миланковичу», то, во-первых, в инсоляционных кривых Миланковича нет составляющей, имеющей 100-тысячелетнюю периодичность (см. ниже). Во-вторых, вариации эксцентриситета, с которыми, на мой взгляд, непосредственно связаны «100-тысячелетние» колебания плейстоцена, не имеют строгой периодичности. В связи с этим, в частности, длительность главных климатических циклов плейстоцена колеблется, согласно эмпирическим данным, примерно от 70 до 120 тыс. лет. Таким образом, результаты модели не согласуются с эмпирическими данными. С другой стороны, у меня, возможно как у неспециалиста по моделированию, возникает вопрос: «В чем же заключается стохас-

тичность предложенной модели, если выходной сигнал в ней в точности соответствует сигналу внешнего возбуждения, отражая его частоту и, очевидно, фазу?». (Этот вопрос, наверное, в большей степени относится к С. Nicolis, получившей похожий результат еще в 1982 году).

Настораживает высказанное С.Г. Добровольским неоднократно предположение о возможности 100-тысячелетних колебаний глобального объема льда без наличия «сложных механизмов усиления», т.е. без влияния обратных связей. С одной стороны, сделанный им вывод вызывает большие сомнения, поскольку противоречит результатам многочисленных теоретических и эмпирических исследований, имеющих более чем столетнюю историю. Эти исследования показали, что палеоклиматические изменения плейстоцена, выразившиеся в трехкратном изменении глобального объема льда и понижении средней температуры поверхности Земли примерно на 5°C, не могут быть обусловлены «очень слабыми», по выражению самого автора, непосредственными (без влияния положительных обратных связей) колебаниями инсоляции, вызванными вариациями орбитальных элементов Земли.

С другой стороны, непонятно, почему С.Г. Добровольский, фактически отрицая результаты этих исследований, даже не упоминает о них. Ведь они широко признаны, в них вложен труд и усилия многих людей, и если в их исследованиях обнаружены противоречия или ошибки, необходимо показать эти ошибки, прежде чем игнорировать полученные выводы и предлагать свой способ решения проблемы. Конечно, заманчиво получить результат, не учитывая изменений в энергетическом балансе планеты за счет изменений альбедо, циркуляции атмосферы и гидросферы, наличия парниковых газов в атмосфере и т.д. Однако здравый смысл не позволяет не учитывать факторов, влияющих на климат, при изучении изменений последнего. В связи с этим возникает ощущение, что результат использования динамико-стохастической модели в данном случае предопределен использованием реальных эмпирических данных. Так, в модели [Добровольский, 2002, с. 202-204] используются полученные, в частности, «из данных палеореконовструкций», верхний и нижний пределы глобального объема льда, параметров стандартов случайных приращений и временного шага модели. Здесь уместно напомнить, что данная модель (как, вероят-

но, и следовало ожидать, учитывая ее стохастический характер) противоречит требованиям к численным моделям климата, предъявленным М.И. Будыко [1977, с. 86]: «Первое из требований – модель не должна включать эмпирических данных о распределении отдельных элементов климата, в особенности тех, которые существенно меняются в процессе изменений климата. Второе – модель должна реалистично учитывать все виды притоков тепла, которые заметно влияют на поле температуры, причем должно быть обеспечено выполнение закона сохранения энергии. Третье – модель должна включать учет основных обратных связей между различными элементами климата».

Коснусь еще одного результата использования динамико-стохастической модели циклов оледенений. Он связан с тем, что [Добровольский, 2002, с.208]: «...воспроизведенные численно карты оледенения и другие результаты модели ..., по мнению специалистов в области палеогеографии, реалистично воспроизводят реконструируемые ситуации далекого прошлого и их отдельные характерные особенности [Селиванов, 1996]». Согласно этим картам оледенения, ледниковый покров мощностью более 200 м. покрывает не только большую часть Европы и Северной Америки, но и всю Сибирь, Приморье и Аляску. Однако, в соответствии с мнением одних из наиболее компетентных специалистов в области палеогеографии, К.К. Маркова и А.А. Величко [1967], большая часть территорий трех последних регионов была свободна ото льда во время оледенения. Таким образом, рассмотренный частный пример публикации С.Г. Добровольского говорит не в пользу стохастической модели климатических изменений при объяснении циклических оледенений плейстоцена.

Особо отметим, что для объяснения ледниковых эпох был предложен ряд гипотез астрономического характера. Оледенения связывали с возможностями изменения солнечной постоянной; попадания солнечной системы, при ее движении вокруг центра галактики, в потоки космической пыли; существенно больших, чем за последний миллион лет, изменений угла наклона  $\epsilon$  плоскости экватора Земли к плоскости эклиптики, а также с изменениями инсоляции (приходящей к Земле солнечной радиации), обусловленными циклическими вариациями элементов земной орбиты. Однако большинство этих гипотез пока не поддаются проверке.

Например, В.Ф. Чистяков [1997, с.5] утверждает, что: «В ходе исследований в широком временном интервале от 100 лет до 2,5 млрд. лет было прослежено влияние физических вариаций Солнца на колебание климата, которое во всех случаях представляется следующим образом: усиление активности и светимости Солнца сопровождается потеплением климата». В его книге приводятся, в частности, два примера в подтверждение этого вывода.

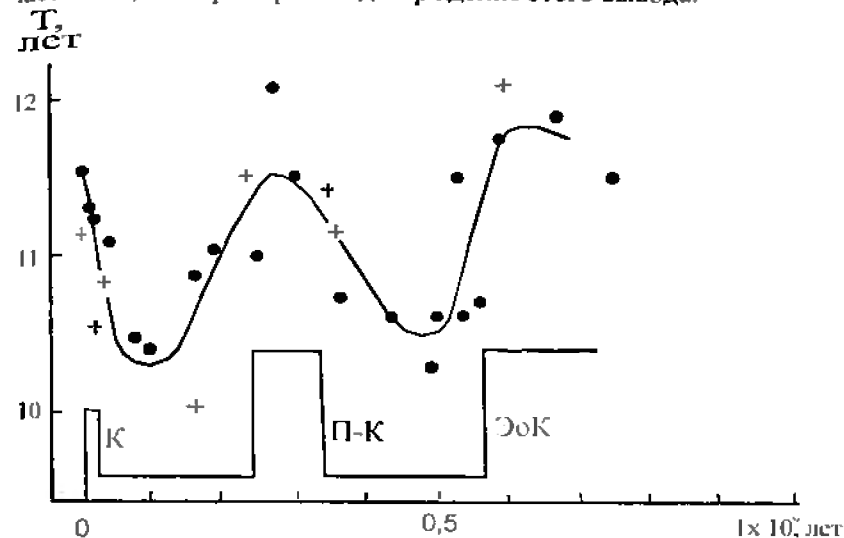


Рис.2. Изменения средней продолжительности циклов ленточных глин, сопоставляемых с солнечными циклами, за последние 750 млн. лет. Точки и крестики – различные типы данных. К – кайнозойское, П-К – пермокарбоновое, ЭоК – докембрийское оледенения. (Рисунок взят из работы [Чистяков, 1997, рис. 10.6.]).

Первый связан с тем, что, согласно инструментальным наблюдениям, как утверждает автор, при повышении солнечной активности [Чистяков, 1997, с. 118] «11-летние циклы становятся короче, а климат на Земле – теплее; при низком уровне солнечной активности длина циклов увеличивается, а климат становится холоднее». Поэтому логично ожидать, что длительные интервалы времени с преобладанием коротких или длинных периодов «11-летних» циклов будут характеризоваться соответственно более теплыми или более холодными условиями климата. На рис.2 приведены заимствованные из книги [Чистяков, 1997, рис. 10.6] дан-

ные по изменению 11-летних циклов за последние 750 млн. лет, которые сопоставлены с ледниковыми и «межледниковыми» эпохами этого периода времени. Ледниковым эпохам «отвечают» длинные циклы:  $T = 11,5-12,0$  года, а межледниковым – короткие:  $T = 10,0-10,5$  года». Однако, хотя автор и выделяет кайнозойскую и пермо-карбонную ледниковую эпохи, в остальном соответствие современным представлениям о хронологии ледниковых эпох за последние 750 млн. лет [Чумаков, 2001] довольно слабое. В частности, на рис. 2 не выделяется ордовикское оледенение. Однако, при условии адекватности выделяемых с такой точностью и для столь удаленных интервалов времени (в книге приводятся данные за последние 2,5 млрд. лет) в осадочных отложениях циклов периодам солнечной активности, эти данные были бы очень полезны для исследователей, занимающихся физикой Солнца.

Второй пример связан с сопоставлением изменений, за последние 140 тыс. лет, концентрации космогенного изотопа бериллия  $^{10}\text{Be}$  и содержания тяжелого изотопа кислорода  $^{18}\text{O}$  в колонке льда, выбуренной на станции «Восток» в Антарктиде. Изменения содержания  $^{18}\text{O}$  в колонке отражают климатические колебания, а изменение содержания  $^{10}\text{Be}$  В.Ф. Чистяков связывает с вариациями солнечной активности: ее увеличение повышает экранирующее воздействие магнитного поля Солнца по отношению к высокоэнергетичным космическим лучам, бомбардирующим Землю и приводящим к образованию  $^{10}\text{Be}$ . Поэтому подобие изменения обоих параметров он трактует как доказательство определяющего влияния солнечной активности на глобальные изменения климата в цикле оледенение-межледниковье. Однако концентрация  $^{10}\text{Be}$  (в атомах на грамм образца) в ледяной колонке на самом деле зависит еще и от величины магнитного поля Земли, интенсивности циркуляции атмосферы и, самое главное, с чем связывают изменения концентрации  $^{10}\text{Be}$  авторы работы [Yiou et al., 1985], на которую ссылается В.Ф. Чистяков, – от скорости нарастания толщи льда, связанной со скоростью выпадения снега. В теплые периоды, вследствие более интенсивного испарения с поверхности океанов, увеличивается и количество выпадающих осадков (снега) и, следовательно, скорость нарастания льда. Вследствие этого концентрация бериллия будет уменьшаться. Соответственно, в периоды оледенений скорость нарастания льда в месте отбора колонки

уменьшается и концентрация  $^{10}\text{Be}$  во льду будет увеличена. Таким образом, утверждение В.Ф. Чистякова [1997] о связи глобальных климатических колебаний в позднем плейстоцене с колебаниями солнечной активности не является обоснованным.

Из перечисленных на стр.18 астрономических гипотез палеоклимата наиболее продуктивной оказалась гипотеза, связанная с орбитально обусловленными вариациями инсоляции. Она получила наибольшее развитие при объяснении глобальных климатических изменений последнего миллиона лет и стала называться астрономической теорией палеоклимата. Однако, поскольку другие астрономические гипотезы не потеряли шансов быть использованными для объяснения существования гляциозер (таких, как ордовикское, пермо-карбонное или кайнозойское оледенения), теорию, связанную с вариациями орбитальных элементов, логичнее называть *орбитальной* теорией палеоклимата. Первым орбитальную гипотезу оледенений высказал в 1842 г. французский математик Ж. Адемар [Adhemar, 1842]. Прежде, чем перейти к обсуждению его теории, рассмотрим сначала, как же вариации элементов земной орбиты могут влиять на климат планеты.

### 1.3 Механизмы климатического влияния вариаций орбитальных элементов Земли.

Еще в XVII веке И. Кеплер установил, что планеты Солнечной системы, в том числе и Земля, вращаются вокруг Солнца по эллиптическим орбитам. Солнце находится в одном из фокусов эллиптической орбиты и поэтому расстояние между Землей и Солнцем меняется в течение годового обращения Земли (рис. 3). Точка земной орбиты, расположенная ближе всего к Солнцу, называется перигелием, тогда как наиболее удаленная точка получила название афелия. Земля также вращается вокруг своей оси, что вызывает смену дня и ночи. Известно, что Земля обогревается Солнцем неодинаково – низкие широты получают больше солнечного тепла, чем высокие. Это связано с тем, что поглощаемая единицей площади поверхности солнечная энергия пропорциональна синусу угла падения солнечных лучей на рассматриваемую поверхность. Поскольку в экваториальных областях солнечные лучи падают наиболее круто, а в полярных – наиболее полого к поверхности Земли, в первых наблюдаются наиболее теплые, а во вторых –

наиболее холодные климатические условия. Если бы ось суточного вращения Земли была перпендикулярна к плоскости обращения Земли вокруг Солнца (плоскости эклиптики), то: 1) инсоляция обоих полюсов Земли была равна нулю в течение всего года; 2) оба полушария Земли обогревались Солнцем одинаково, а приходящая к Земле солнечная радиация, меняясь в течение года обратно пропорционально квадрату расстояния между Землей и Солнцем, достигала своего максимума при прохождении Землей перигелия и минимума – при прохождении афелия.

Однако земная ось наклонена под углом  $23,5^\circ$  к перпендикуляру к плоскости эклиптики, что существенно усиливает контрасты сезонной инсоляции, являясь основной причиной имеющей место в настоящую эпоху смены времен года, противофазной в противоположных полушариях. Обращенное к Солнцу полушарие получает гораздо больше солнечного тепла, чем полушарие, находящееся в «тени». Особенно большие контрасты наблюдаются для высоких широт, что выражается в наличии, в течение летнего полугодия, полярного дня в высоких широтах одного полушария и одновременно полярной ночи в течение зимнего полугодия в полярных широтах другого. Через полгода, вследствие движения Земли по орбите, полушария поменяются местами относительно Солнца. Находящееся в тени полушарие станет получать больше тепла. Это будет означать переход к летнему сезону, тогда как в первом полушарии наступит, соответственно, зима. Астрономическая зима в Северном полушарии начинается тогда, когда Северный полюс наиболее отклонен от Солнца, т.е. когда проекция на плоскость эклиптики вектора, соединяющего центр Земли с Северным полюсом (будем называть его вектором земной оси), лежит на продолжении линии, соединяющей Землю и Солнце, и направлена в противоположную от Солнца сторону. Это происходит 22 декабря (рис. 3), в день, который характеризуется минимальной продолжительностью светлого времени суток и потому называется днем зимнего солнцестояния. Солнце в этот день поднимается наиболее низко над горизонтом и наиболее слабо обогревает Северное полушарие. Соответственно в умеренных и низких широтах Южного полушария, которое обращено к Солнцу, 22 декабря – самый длинный день в году и этот день там носит название дня летнего солнцестояния и знаменует начало астрономического лета.

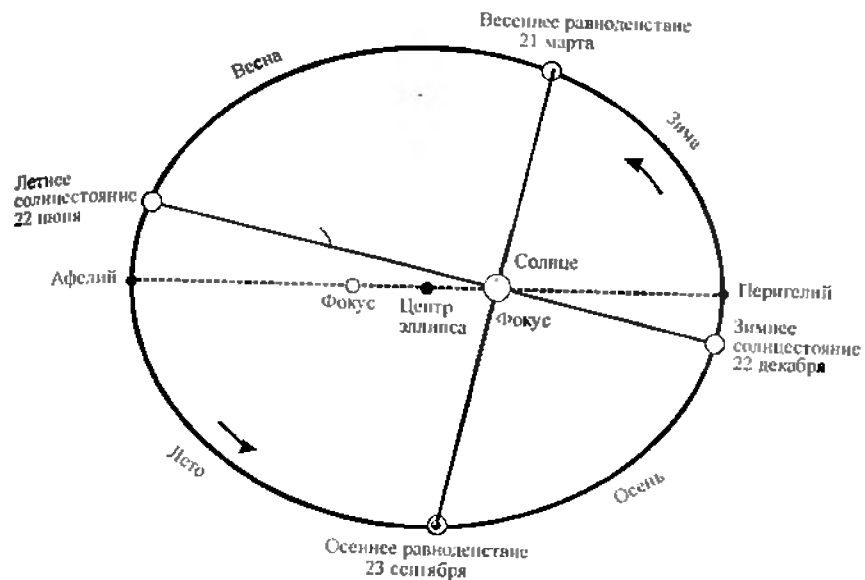


Рис.3. Земная орбита, даты равноденствий и солнцестояний для Северного полушария. Стрелками показано движение Земли (затененные кружки) по орбите, если смотреть со стороны Северного полюса.

Точка земной орбиты, которую Земля проходит 22 декабря, относится к так называемым кардинальным точкам, при прохождении которых начинается новый сезон года. Через полгода, 22 июня, Земля достигнет противоположной кардинальной точки, в которой в Северном полушарии начинается лето, а в Южном – зима. В этом положении проекция вектора земной оси будет направлена прямо на Солнце (см. рис.7) и в Северном полушарии будет самый длинный день. Две другие кардинальные точки, осенняя и весенняя, соответствуют точкам орбиты Земли, в которых вектор земной оси перпендикулярен линии, соединяющей Землю с Солнцем. В этих точках, которые приходятся на 21 марта и 23 сентября, продолжительность дня и ночи в любом месте Земли одинакова и поэтому они получили название равноденствий. В Северном полушарии 21 марта (весеннее равноденствие) знаменует начало астрономической весны, а 23 сентября (осеннее равноденствие) – астрономической осени. На рис. 3 видно, что путь, проходимый Землей по орбите в течение весны и лета, превышает длину орби-

ты, приходящуюся на осень и зиму. Поэтому длительность лета и весны Северного полушария превышает (в настоящее время примерно на 7 суток) длительность осени и зимы (зимнего полугодия).

Однако и форма земной орбиты и ориентировка земной оси в пространстве не остаются неизменными – они меняются в геологических масштабах времени. Открытие изменения направления земной оси в пространстве связывают с именем древнегреческого астронома Гиппарха из Никеи, жившего более двух тысяч лет назад. Много позже, в 18-м веке, французским математиком Ж. Д'Аламбером было показано, что изменение ориентировки земной оси связано с явлением прецессии, которое объясняется гравитационным воздействием Луны и Солнца на неоднородную по своему внутреннему строению и несферичную по форме (как бы растянутую в экваториальной плоскости) Землю. Вследствие этого земная ось, подобно оси останавливающегося волчка, совершает конусообразное движение относительно «неподвижных» звезд. При этом северный конец земной оси делает полный оборот по часовой стрелке, если смотреть со стороны Северного полюса, за 25,7 тыс. лет. В трудах Лагранжа, Лапласа, Лаверье и других было также показано, что гравитационное воздействие на Землю со стороны других планет Солнечной системы приводит к изменению эксцентриситета и направления в пространстве длинной оси эллипса земной орбиты (линии апсид), угла наклона земной оси к плоскости эклиптики, которая, в свою очередь, меняет свое положение в пространстве. Таким образом, в 19-м столетии было уже достаточно хорошо известно (эти данные лишь уточнялись с течением времени) о трех орбитальных элементах, определяющих форму земной орбиты и направление земной оси в пространстве и влияющих на приходящую к Земле солнечную радиацию (инсоляцию): эксцентриситете  $e$ , угле наклона земной оси к перпендикуляру к плоскости эклиптики  $\epsilon$  и прецессии земной оси (рис. 4).

Эксцентриситет  $e$  характеризует степень удлиненности эллиптической орбиты Земли. Он вычисляется по формуле

$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}, \quad \text{где } a \text{ и } b - \text{большая и малая полуоси эллипса. Из}$$

формулы очевидно, что для круговой орбиты, когда  $a = b$ ,  $e = 0$ ; а когда эллипс вырождается в прямую линию, ( $b = 0$ ),  $e = 1$ . В соот-

ветствии с законами небесной механики [Миланкович, 1939], при изменении эксцентриситета длина большой полуоси земной орбиты  $a$  остается в первом приближении постоянной, поэтому, например, увеличение  $e$  обеспечивается уменьшением длины малой полуоси  $b$ . При этом, как видно на рис. 4, при увеличении

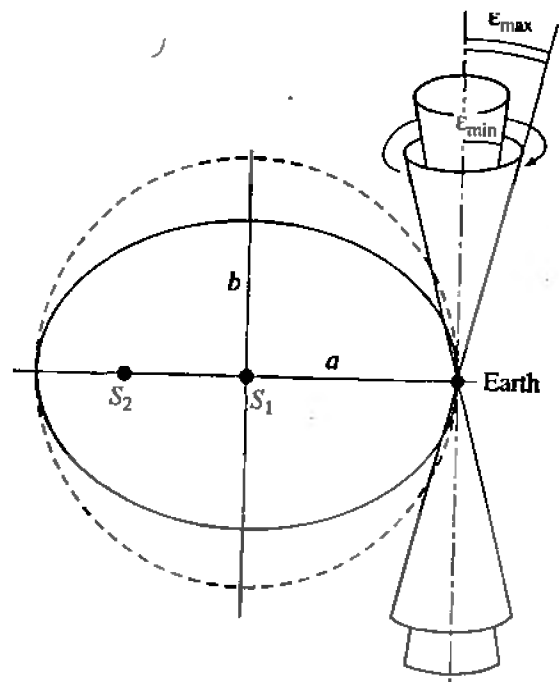


Рис. 4. Орбитальные элементы Земли, характеризующие изменения ее орбиты и направления земной оси в пространстве. Степень вытянутости эллиптической земной орбиты выражает эксцентриситет  $e$ .  $a$  и  $b$  – длина большой и малой полуоси эллипса земной орбиты. Если орбита круговая ( $a=b$ , Солнце ( $S$ ) находится в центре круга),  $e=0$ . Удлинение формы эллипса (и увеличение  $e$ ) происходит за счет уменьшения длины малой полуоси  $b$ ; длина большой полуоси при этом не меняется. В действительности при изменении  $e$  положение Солнца практически не меняется ( $S_1$  и  $S_2$  должны быть совмещены); оно остается в фокусе земной орбиты, которая смещается по отношению к Солнцу. Угол  $\epsilon$  за последний миллион лет менялся в пределах от  $22^\circ$  до  $24,5^\circ$ . Стрелкой показано прецессионное изменение направления земной оси в пространстве (север – вверх). Штрих-пунктирная линия перпендикулярна к плоскости эклиптики.

эксцентриситета земная орбита приближается к Солнцу, уменьшая, таким образом, среднее расстояние между Солнцем и движущейся вокруг него Землей. Следовательно, приходящая к Земле в целом среднегодовая солнечная радиация увеличится, что должно привести к повышению температуры поверхности планеты. Наоборот, уменьшение  $e$  вызовет уменьшение инсоляции и, следовательно, будет способствовать похолоданию на Земле. Еще одним следствием увеличения эксцентриситета является увеличение расстояния между центром эллипса и его фокусами, в одном из которых находится Солнце. (Это расстояние обычно обозначается  $c$ ,

$c = \sqrt{a^2 - b^2}$ , и для круговой орбиты, когда оба фокуса стягиваются в одну точку, представляющую центр окружности, естественно,  $c = 0$ ). Увеличение  $c$  приведет к тому, что расстояние между Солнцем и Землей, при нахождении последней в афелии, также увеличится. В то же время, поскольку длина большой оси орбиты постоянна, соответственно уменьшится расстояние между Солнцем и Землей в перигелии. Следовательно, чем больше эксцентриситет земной орбиты, тем больше количество тепла, получаемое Землей в целом при ее нахождении в перигелии и тем меньше – в афелии. Это изменение инсоляции существенно. Например, даже в настоящее время, когда орбита Земли близка к круговой (величина эксцентриситета около 0,017), отношение приходящей к Земле солнечной энергии при её нахождении соответственно в перигелии и афелии – около 1,07, т.е. изменение инсоляции близко к 7%. Аналогичное отношение инсоляции при максимальном за последний миллион лет  $e$  (около 0,565, рис. 5а) составляет 1,25, т.е. инсоляция Земли в афелии меньше, чем в перигелии, на 25%.

Итак, увеличение эксцентриситета земной орбиты приводит, с одной стороны, к увеличению среднегодовой инсоляции Земли в целом, с другой стороны, к увеличению различий солнечной радиации, получаемой Землей при ее нахождении в афелии и перигелии. Соответственно, при уменьшении эксцентриситета различия, или контрасты, инсоляции в афелии и перигелии уменьшаются, т.к. форма орбиты Земли приближается к круговой и расстояния между Землей и Солнцем в афелии и перигелии отличаются все меньше. В то же время, при уменьшении  $e$ , как уже отмечалось, уменьшается и приходящая к Земле в целом солнечная радиация, что, естественно, должно приводить к охлаждению

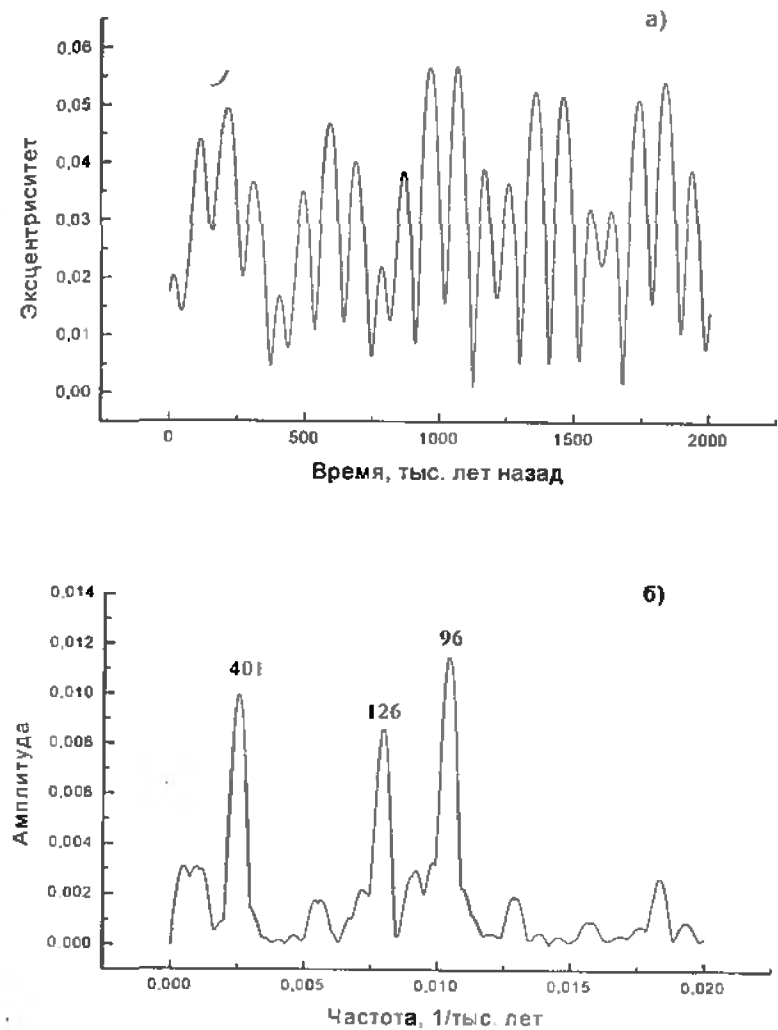


Рис. 5. а) Изменения эксцентриситета за последние 2 млн. лет (по [Berger and Loutre, 1991]) и б) Амплитудно-частотный спектр этих изменений. Цифры у пиков кривой – соответствующие выделенным частотам периоды вариаций эксцентриситета в тысячах лет.

планеты. Изменения эксцентриситета земной орбиты для последних 2 млн. лет показаны на рис. 5а. Они не являются строго периодическими, это циклические колебания во времени. Согласно вычислениям А. Берже и М. Лутр [Berger, Loutre, 1991], основные гармоники указанных колебаний соответствуют периодам около 404, 95 и 124 тыс. лет, что отражено на спектральной диаграмме вариаций эксцентриситета, приведенной на рис. 5б. Небольшие отличия (около 1%) периодов, показанных на рис. 5б, от приведенных цифр связаны со спецификой их выделения с помощью спектрального анализа (методики вычислений, соотношения длины ряда с выделяемыми периодами). Изменение поступающей к Земле в целом *среднегодовой* радиации, связанное с изменением эксцентриситета, невелико. Его легко вычислить, учитывая, что эта

величина пропорциональна  $\frac{1}{\sqrt{1-e^2}}$  [Миланкович, 1939]. Согласно

данным, показанным на рис. 5а, изменение среднегодовой инсоляции за последние 2 миллиона лет не превышало 0, 16%.

Выше уже говорилось о том, что распределение солнечной радиации по поверхности Земли определяется углом падения солнечных лучей. Очевидно, что это распределение будет меняться при изменении угла наклона земной оси. (Как показал Миланкович [1939], солнечная энергия будет равномерно распределена по поверхности Земли при угле наклона земной оси  $\epsilon = 54^\circ$ ). Однако, в отличие от вариаций эксцентриситета, изменение угла наклона земной оси  $\epsilon$ , если считать форму Земли шарообразной, не изменяет поступающей к Земле в целом инсоляции. Это связано с тем, что поглощаемая шарообразной поверхностью солнечная радиация определяется площадью круга, проходящего через центр шара и перпендикулярного солнечным лучам. Очевидно, что эта площадь при любых поворотах шара будет одной и той же. (Учет несферичности Земли приводит к выводу, что максимальное изменение угла  $\epsilon$  от  $22^\circ$  до  $24,5^\circ$  вызовет колебание инсоляции всей Земли, на порядок меньшее, чем изменение, связанное с максимальной вариацией эксцентриситета). Поэтому изменение угла наклона земной оси в основном перераспределяет инсоляцию по широтам: возрастание инсоляции высоких широт (при увеличении угла  $\epsilon$ ) будет компенсироваться ее уменьшением в низких широтах, и

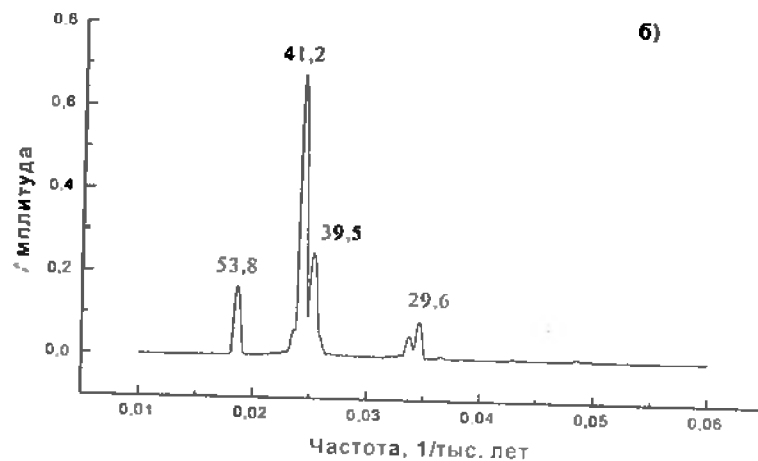
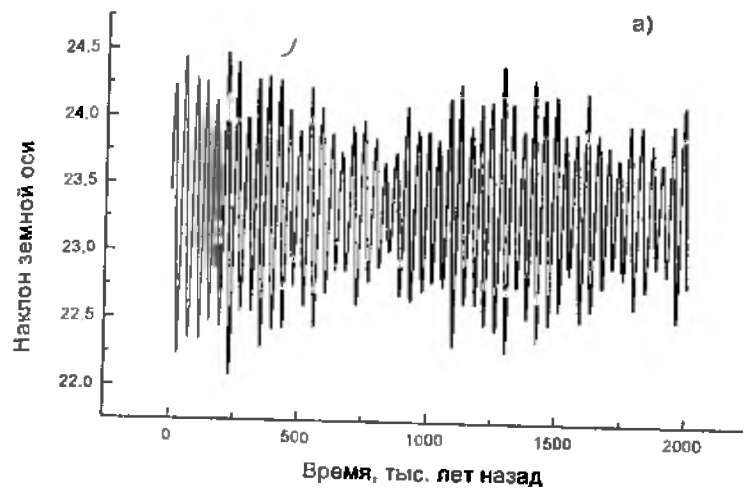


Рис. 6. а) Изменения угла наклона земной оси (в градусах) за последние 2 млн. лет (по [Berger and Loutre, 1991]) и б) Амплитудно-частотный спектр этих изменений. Цифры у пиков кривой — соответствующие выделенным частотам основные периоды вариаций угла  $\epsilon$  в тысячах лет.

наоборот, причем относительное изменение инсоляции в высоких широтах заметно больше, чем в низких.

Уменьшение инсоляции высоких широт (при уменьшении  $\epsilon$ ) приведет к похолоданию и увеличению снежного и ледового покрова в этих широтах. Так как снег и лед обладают большей отражательной способностью (или большим альбедо), чем суша и вода, приходящая в высокие широты солнечная радиация будет в большей степени отражаться назад, в космос, и, соответственно, в меньшей степени превращаться в тепло, что приведет к дальнейшему охлаждению поверхности планеты. Поэтому первоначальное охлаждение высоких широт, вызванное уменьшением инсоляции из-за понижения угла  $\epsilon$ , будет усилено посредством положительной обратной связи, обусловленной изменением альбедо. Следовательно, уменьшение  $\epsilon$  будет приводить к похолоданию на Земле. Есть еще один аспект влияния на климат изменения наклона земной оси. Он заключается в увеличении контрастов инсоляции зимы и лета при увеличении угла  $\epsilon$ . Иными словами, чем больше угол наклона земной оси, тем теплее лето и холоднее зима в каждом из полушарий. Вариации угла  $\epsilon$  характеризуются в основном периодичностью около 41 тыс. лет и произвольно меняющейся амплитудой (рис. 6).

Влияние прецессии земной оси заключается в изменении сезонных контрастов инсоляции в различных полушариях. Если, при нахождении Земли в афелии, северное полушарие обращено к Солнцу (что примерно осуществляется в настоящую эпоху (рис.3)), в данном полушарии будет относительно длительное прохладное лето, поскольку расстояние до Солнца наибольшее и инсоляция уменьшена (рис. 7 А). В то же время в южном полушарии будет холодная длительная зима. Через полгода, при перемещении Земли в перигелий (наиболее близкая к Солнцу точка земной орбиты), в северном полушарии наступит относительно мягкая и короткая зима. В южном будет соответственно жаркое и короткое лето, поскольку в перигелии к Солнцу уже обращено южное полушарие. В этом случае сезонные климатические контрасты южного полушария больше сезонных контрастов северного.

Вследствие прецессии кардинальные точки, знаменующие начало астрономических сезонов года, будут смещаться по орбите с течением времени. Через время, равное четверти периода

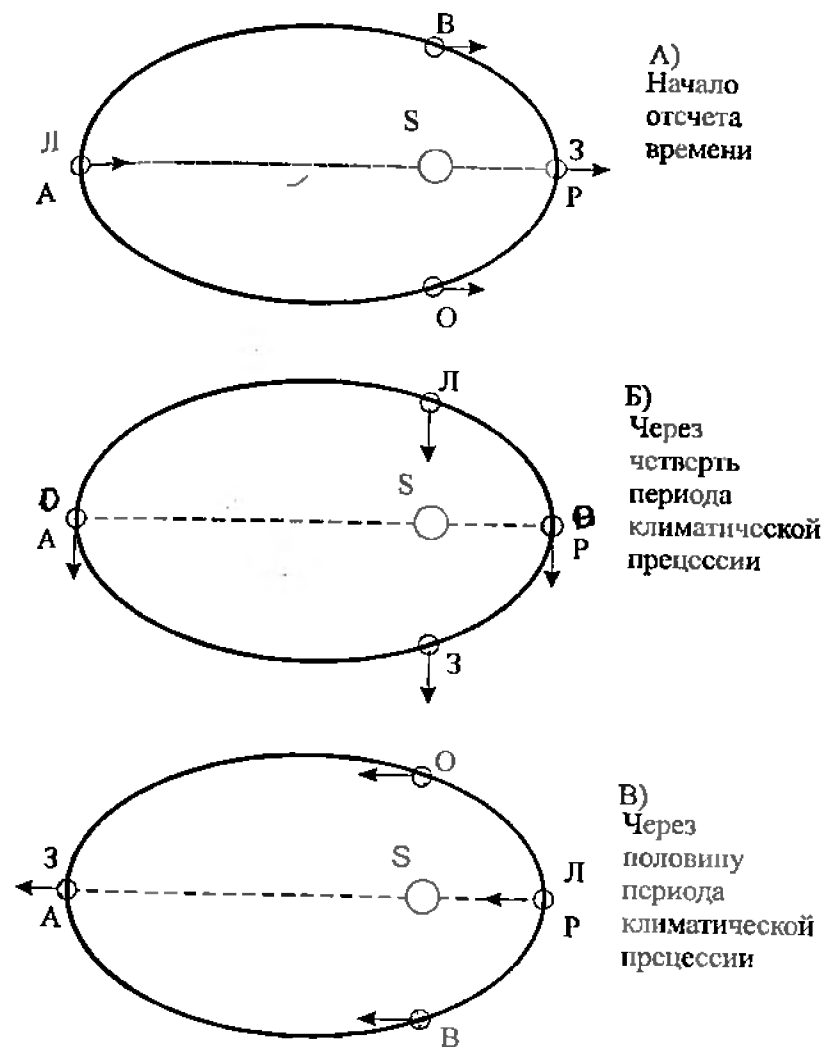


Рис. 7. А), Б), В) – изменение положения кардинальных точек на орбите вследствие прецессии земной оси. А – афелий, Р – перигелий; Л, З, – точки летнего и зимнего солнцестояний; В, О, – точки весеннего и осеннего равноденствий Северного полушария. S – Солнце. Затухёванные кружки на орбите – положения Земли. Стрелки указывают направление проекции северного конца земной оси на плоскость эклиптики в соответствующие периоды времени.

климатической прецессии, т. е. прецессии земной оси относительно линии апсид (примерно через 5 тыс. лет), нахождение Земли в афелии в Северном полушарии будет приходиться на день осеннего равноденствия. Как видно из рис. 7 Б), лето в этом полушарии будет относительно теплым, а зима не очень холодной, т. е. температурные контрасты Северного (а также и Южного) полушария, будут умеренными. Через время, равное полупериоду климатической прецессии – при нахождении Земли в афелии к Солнцу уже будет обращено Южное полушарие (рис. 7 В). Поэтому наибольшие климатические контрасты, т. е. длительная холодная зима и жаркое короткое лето будут в Северном полушарии. Соответственно, в Южном полушарии климатические контрасты будут наименьшими. Таким образом, увеличение климатических контрастов одного полушария будет сопровождаться их уменьшением в другом и наоборот в течение цикла климатической прецессии.

Прецессия не меняет приходящей к Земле в целом годовой инсоляции. Более того, среднегодовое изменение прецессионной инсоляции равно нулю для любой широты, т. е. увеличение летней инсоляции компенсируется уменьшением зимней и наоборот для любой широты. Увеличение эксцентриситета увеличивает разность амплитуд сезонных контрастов инсоляции между разными полушариями, поскольку, как уже отмечалось, при увеличении  $e$  увеличивается разность расстояний между Солнцем и Землей при нахождении последней в афелии и перигелии. Следовательно, максимальная амплитуда сезонных контрастов одного полушария будет увеличиваться, а другого – уменьшаться. Важно отметить, что при нулевом значении эксцентриситета (для круговой орбиты) будет равно нулю лишь связанное с прецессией изменение амплитуды сезонных инсоляционных (климатических) контрастов, поскольку в этом случае расстояние между Землей и Солнцем в течение года не меняется. Сами же сезонные контрасты (их амплитуды) сохраняются на некоем среднем уровне (связанном с углом наклона  $\epsilon$  земной оси), т. е. в каждом из полушарий будут равные по длительности “нормальные” лето и зима.

Количественной мерой климатической прецессии, по М. Миланковичу, является величина  $e \cdot \sin \omega$ , где  $\omega$  – так называемая долгота перигелия относительно точки весеннего равноденствия. В вычислениях Миланковича (а также Berger [1988])  $\omega$  есть угол ме-

жду линиями SO и SP на рис. 7 А)-В); угол отсчитывается от SO по движению Земли вокруг Солнца, т. е. против часовой стрелки, если смотреть со стороны Северного полюса.  $e \cdot \sin \omega$  пропорционален разности продолжительности летнего и зимнего полугодия, или разности расстояний между Солнцем и точками летнего и

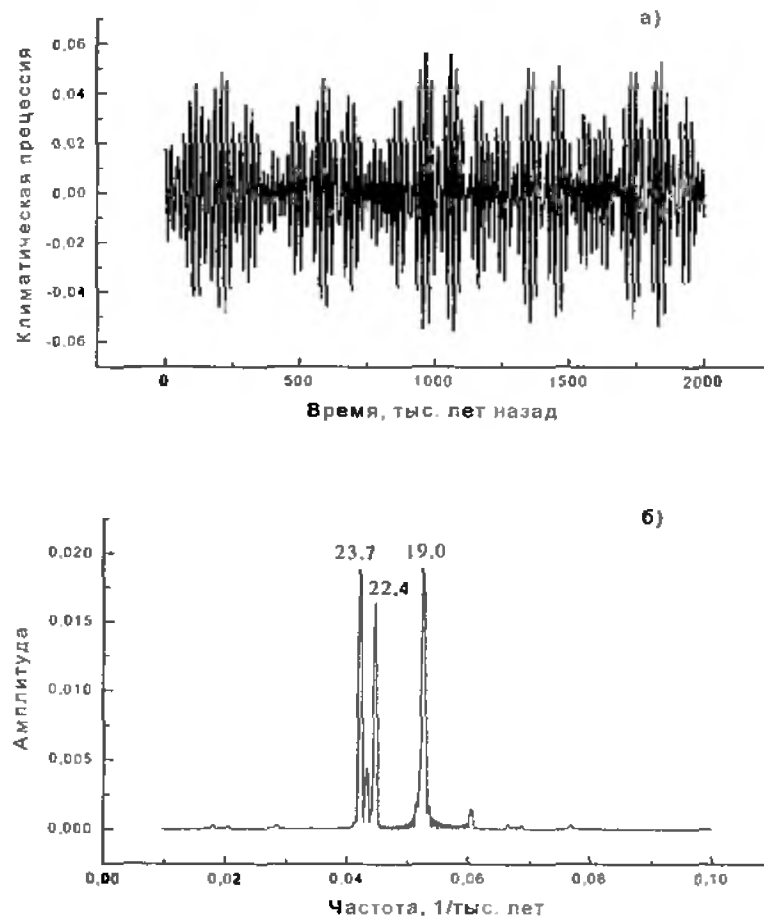


Рис. 8. а) Изменения климатической прецессии  $e \cdot \sin \omega$  за последние 2 млн. лет (по [Berger and Loutre, 1991]) и б) Амплитудно-частотный спектр этих изменений. Цифры у пиков кривой – соответствующие выделенным частотам основные периоды вариаций климатической прецессии в тысячах лет.

зимнего солнцестояний Северного полушария. Поэтому минимальное (отрицательное) значение  $e \cdot \sin \omega$  на рис. 8а соответствует уменьшению расстояния между Землей и Солнцем летом Северного полушария (на рис. 7 В) угол  $OSP = \omega = 270^\circ$  и  $\sin \omega = -1$ ). Следовательно, минимум  $e \cdot \sin \omega$  на рис. 8а соответствует наличию максимальных сезонных контрастов, а максимум  $e \cdot \sin \omega$  – наличию минимальных сезонных контрастов, т.е. длительному прохладному лету и короткой мягкой зиме в Северном полушарии. Как видно из рис. 8б, основные гармоники циклов климатической прецессии – около 19 и 23 тыс. лет – отличаются от периода прецессии земной оси 25,7 тыс. лет, указанного выше. Различие связано с тем, что нами рассматривается *климатическая прецессия*, т.е. изменение направления земной оси относительно большей оси эллипса земной орбиты. Однако сама эта ось (линия апсид), как упоминалось выше, меняет свое направление в пространстве, поворачиваясь навстречу связанному с прецессией движению проекции вектора земной оси на плоскость эклиптики. Поэтому средний период климатической прецессии оказывается меньшим, чем 25,7 тыс. лет.

Механизм *глобального* климатического влияния прецессии наименее ясен, отчасти потому, что, как уже говорилось, среднегодовое прецессионное изменение инсоляции равно нулю для любой широты. Помимо этого, прецессия обуславливает противоположное изменение контрастов инсоляции в разных полушариях. Поэтому были разные мнения о глобальных, долговременных последствиях вариаций прецессионной инсоляции. Например, Кролль [1875] полагал, что к оледенению в данном полушарии приводят климатические условия, характеризующиеся особенно холодными и длительными зимами. Миланкович же, следуя Кеплену [Миланкович, 1939; Имбри, Имбри, 1988], считал, что развитию глобального оледенения, наоборот, будет способствовать наличие особенно длительного прохладного лета в данном полушарии. Поскольку прецессионные вариации модулируются изменениями эксцентриситета (рис. 5а, 8а), очевидно, что и те, и другие экстремальные климатические условия могут осуществляться при наибольших значениях эксцентриситета.

Замечу, что расчетные данные о вариациях отдельных орбитальных элементов появились не одновременно. Вначале появились данные о прецессии земной оси, затем, уже в основном в 19-м

веке, стали вычислять изменения эксцентриситета и угла наклона земной оси. Эти данные, вплоть до настоящего времени, уточнялись по мере расширения знаний о планетах солнечной системы (их количестве, массах, формах орбит и т.д.) и усовершенствования техники вычисления. Также последовательно развивались и представления о механизмах климатического влияния орбитальных элементов. Изложенные выше общие взгляды на эти механизмы отражают современное состояние вопроса.

#### 1.4 Теории оледенений Ж. Адемара и Дж. Кролля.

В 1842 г., через 2 года после выхода в свет известной публикации Л. Агассиса, посвященной доказательству в геологическом прошлом оледенений, была опубликована книга французского математика Ж. Адемара [Adhemar, 1842] «Революция оксана», в которой впервые предлагалось объяснять оледенения Земли изменениями инсоляции, связанными с вариациями орбитальных элементов. В своей теории Адемар учитывал климатическое влияние прецессии земной оси, которая была наиболее хорошо изучена к тому времени. Он полагал, что оледенение будет возникать и развиваться в течение полупериода прецессии в том полушарии, в котором будет более длительная суровая зима. Первоначально возникшие в районе полюса массы льда разрастались в течение длительных холодных зим, подтверждением чего Адемар считал наличие ледникового покрова Антарктиды. Ведь в 19-м веке, как и теперь, зима в Южном полушарии была длиннее лета.

Однако дальнейшее описание природного процесса является следствием увлечения автора идеями катастрофизма и не выдерживает критики. Адемар предполагал, что накопившиеся у полюса массы льда оказывают столь сильное гравитационное притяжение на воды Мирового океана, что соответствующее полушарие окажется затопленным водой, еще больше увеличивая ледовое покрытие полюса. Впоследствии, с приходом более теплых зим, вода начинает растапливать ледяные полярные массы у их основания, образуя из них огромную ледяную шапку. Основание этой шапки становится все тоньше и она рушится в океан, образуя волну чудовищной силы, катастрофическими потоками затопляющую материки и переносящую огромные массы различного материала, в том числе и валунного. Такие катастрофы должны происходить в каж-

дом из полушарий попеременно, через интервалы времени, равные половине периода прецессии.

В заключение краткого описания теории Ж. Адемара приведем любопытную выдержку (к которой мы вернемся в главе 2) из книги [Имбри, Имбри, 1988, с.82] касающуюся критики этой теории: «Если современники Адемара могли просто отмахнуться от этих «революций» океана как от явной фантазии, то им было совсем не просто критиковать астрономическую часть его теории. Первым это смог сделать лишь выдающийся немецкий натуралист и географ Александр Гумбольдт, который в 1852 году указал на ошибочность основополагающей идеи Адемара – что Северное и Южное полушария Земли нагреваются и охлаждаются поочередно. Средняя температура любого из полушарий определяется не числом часов дневного света и темноты, а количеством калорий солнечной энергии, которое оно получает за год. И как уже давно показали расчеты Д'Аламбера, некоторое снижение прихода этой энергии, имеющее место в том сезоне, когда Земля находится на максимальном удалении от Солнца, строго уравновешивается ее усиленным поступлением в другом сезоне, когда Земля, наоборот, сильнее всего приближается к Солнцу. Поэтому суммарное количество тепла, получаемое одним из полушарий за год, равно тому же количеству, поступающему на поверхность другого».

Несмотря на несостоятельность теории Адемара, ее значение, по мнению многих исследователей [Милашкович, 1939; Имбри, Имбри, 1988; Berger, 1988], заключается именно в том, что орбитально обусловленные изменения инсоляции рассматриваются в ней впервые в качестве главной причины возникновения оледенений. Таким образом, именно с Ж. Адемара начинается длительная, продолжающаяся и в настоящее время, история развития величественной теории, связывающей распространение и сокращение огромных ледниковых покровов планеты, оставивших заметные следы на ее поверхности, с известными обычно только астрономам и в основном теоретически вычисленными вариациями орбитальных элементов Земли.

Среди созданных в 19-м веке версий орбитальной теории наиболее известной является «Теория вековых изменений земного климата» английского ученого Дж. Кролля. Несмотря на ее формальное сходство с теорией Адемара (Кролля также считал, что

# CLIMATE AND TIME

IN THREE

## GEOLOGICAL RELATIONS:

A THEORY OF

## SECULAR CHANGES OF THE EARTH'S CLIMATE.

BY

JAMES CROLL, LL. D., F. R. S.,

AUTHOR OF "DISCUSSIONS ON CLIMATE AND COSMOLOGY," "PHILOSOPHY OF STARS,"  
"STELLAR EVOLUTION," ETC.

LONDON:

EDWARD STANFORD,

NO. 27, OCKSPUR STREET, CHANCING CROSS, E. W.

Титульная страница книги Дж. Кролля, напечатанной в 1875 году.

к оледенению в данном полушарии приводят климатические условия, характеризуемые длительными холодными зимами), теория Кролля явилась громадным шагом вперед в обосновании влияния орбитально обусловленных вариаций инсоляции на глобальные

изменения климата. Обращает на себя внимание широкая эрудиция автора и основательный подход к проблеме. Вначале Кролль рассмотрел гипотезы о влиянии на климат Земли ее внутренних резервов тепла, о прохождении Земли в «теплых» и «холодных» частях космического пространства, о вероятном изменении солнечной постоянной, о распределении суши и воды и другие и в общем убедительно показал, что они не могли быть причинами ледниково-межледниковых циклов. Он пришел к выводу, что наиболее вероятной причиной *неоднократных* оледенений следует считать орбитально обусловленные вариации инсоляции.

Кролль начал свою работу примерно на 20 лет позже опубликования книги Адемара, и ко времени опубликования его главного труда, монографии «Климат и время в их геологическом взаимоотношении» [Croll, 1875], наука существенно продвинулась вперед. Леверье в 1843 году рассчитал изменения орбитальных элементов для периода времени от 100 тыс. лет в прошлое начиная от 1800 года, до 100 тыс. лет в будущее после этого времени. Расчеты Леверье, как известно, повлекли за собой открытие планеты Нептун. Дж. Гейки и П.А. Кропоткин пришли к выводу о многократности оледенений. Кролль хорошо знал новые достижения астрономии, физики, метеорологии, геологии. Ему было известно и приведенное выше мнение Гумбольдта о необходимости учета среднегодового количества тепла при анализе глобальных климатических колебаний (кстати, как следует из книги Кролля, высказанное еще в 1830 году астрономом Дж. Гершелем).

Кролль понимал незначительность *прямого* инсоляционного воздействия орбитально обусловленных вариаций инсоляции на глобальный климат, поскольку эксцентриситетные изменения инсоляции очень малы, а среднегодовое изменение инсоляции всей Земли, связанное с вариациями двух других элементов равно нулю (является «скомпенсированным»). Он осознавал и экстравагантность своей новой идеи, которая, тем не менее – он был уверен в этом – объясняла связь между орбитально обусловленными вариациями инсоляции и оледенениями. Это его состояние отражено в следующих словах [Croll, 1875, p.13]: «Есть, однако, один эффект, который не рассматривался как скомпенсированный. Общее количество тепла, получаемого Землей, обратно пропорционально малой полуоси ее орбиты; отсюда следует, что чем больше эксцен-

триситет, тем больше количество тепла, получаемого Землей. По этой причине было заключено, что возрастание  $e$  будет иметь тенденцию до некоторой степени производить более теплый климат. Все эти заключения, к которым я обращаюсь и к которым пришли астрономы, являются совершенно правильными настолько, насколько это касается прямого влияния эксцентриситета, и было совершенно естественным и, в самом деле правильным, заключить, что не было ничего в простом возрастании эксцентриситета, что могло бы произвести оледенения. Как неестественно было заключить, что возрастание количества тепла, получаемого от Солнца, могло понизить температуру и покрыть страну (Великобританию – В.Б.) снегом и льдом! И избыточно холодные зимы, сопровождаемые избыточно теплыми летами не приведут к ледниковой эпохе. Поэтому доказывать, что чисто астрономические причины могут дать такой эффект, было бы просто абсурдно... Важный факт, однако, был упущен: хотя оледенение не может быть *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 может вовлечь в действие физические агенты, которые произведут данный эффект».

Под физическими агентами Кролль подразумевает обратные связи, о которых он пишет так [Croll, 1875, p.74-75]: «Есть одно замечательное обстоятельство, связанное с физическими причинами, которые заслуживают специального упоминания. Все они ведут не только к одному результату, например, накоплению снега и льда, но они воздействуют друг на друга. В физике является достаточно общим, когда следствие действует на причину. (Здесь, видимо, Кролль имеет в виду явление электромагнитной индукции, открытое М. Фарадеем в 1831 году – В.Б.). В электричестве и магнетизме, например, причина и следствие почти в каждом случае действуют и реагируют друг на друга сообща. Но обычно, если не всегда, реакция следствия стремится ослабить причину (так действует *отрицательная* обратная связь – В.Б.). Ослабляющее влияние этой реакции стремится ограничить эффективность причины. Но, странно сказать, по отношению к физическим причинам, касающимся осуществления гляциальных условий климата, причина и эффект обычно взаимодействуют так, что 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. Это является главным достижением его теории, последствия которого не осознаны в достаточной мере до сих пор. Кролль рассматривал в основном два механизма положительных обратных связей: 1) между температурой и площадью снежного покрова и 2) между температурой и смещением океанских течений, причем главное место в развитии оледенения он отводил второму механизму, предварительно показав огромное влияние Гольфстрима на климатические условия Европы.

Суть его теории сводится к следующему. В полушарии, зимнее солнцестояние которого приходится на афелий, понижаются температуры зим, поскольку мощность приходящей солнечной радиации уменьшена, а длительность зимы увеличена. Такое первичное понижение температуры и, соответственно, увеличение снежного покрова, вызывает, посредством обратной связи через альбедо, саморазрастание снежного покрова и дальнейшее понижение температуры полушария. Возросшее количество снега и льда и увеличение альбедо понижает и температуру лета, поэтому среднегодовая температура полушария понижается все больше, прежде всего за счет высоких широт, где снега и льда больше. Это вызывает увеличение температурного градиента между полюсом и экватором, что усиливает меридиональный перенос тепла в атмосфере, и, соответственно, пассатные ветры в холодном полушарии. (Кролль указывает, что северо-восточный и юго-восточный пассаты обязаны своим существованием постоянному потоку воздуха от полюсов к экватору, причиной которого является разница температур между экватором и полюсами).

Поскольку большой градиент температуры будет в холодном полушарии, где высокие и умеренные широты в большей степени покрыты снегом и льдом, чем в противоположном полушарии, в котором снега и льда соответственно меньше, а температура однородней и выше, постольку пассаты холодного полушария будут мощнее, чем пассаты теплого. Поэтому линия конвергенции пассатов будет отклоняться от экватора в сторону более теплого по-

лушария. Следовательно, и огромные теплые океанские экваториальные потоки, приводимые в движение пассатами, будут также отклоняться в теплое полушарие, что приведет к тому, что теплое полушарие будет приобретать дополнительное тепло, а холодное — еще больше охлаждаться. В своей книге Дж. Кролль наглядно показывает, как предложенный им механизм мог влиять на Гольфстрим. Важное значение в его объяснении имеет клиновидный выступ бразильского побережья, расположенный чуть южнее экватора. В наше время, при преобладании юго-восточного пассата (сказывается влияние холодной Антарктиды), более мощная, Гвианская ветвь теплового экваториального течения Атлантики проходит севернее этого выступа и формирует (за счёт Гольфстрима и Антильского течения) Северо-Атлантическое течение, обогревающее Европу. Однако при охлаждении Северного полушария (когда зимнее солнцестояние Северного полушария приходится на афелий) преобладает северо-восточный пассат и смещение средней линии пассатов и, соответственно, экваториального течения к югу от клиновидного выступа приводит, по мнению Кролля, к отклонению теплых течений в Южное полушарие, разрушению Гольфстрима и еще большему охлаждению Северного полушария.

Необходимым условием осуществления предложенного механизма Кролль считал высокое значение эксцентриситета земной орбиты. Он полагал, что только связанные с повышенным значением  $e$  особенно длительные и холодные зимы, сопровождаемые выпадением особенно большого количества снега, будут обеспечивать работу механизма положительной обратной связи, приводящего к дальнейшему понижению температуры. Пользуясь формулами, данными Леверье, Кролль рассчитал изменения эксцентриситета за 3 миллиона лет до 1800 года и на 1 миллион лет после этой даты. Согласно его вычислениям, особенно большие значения эксцентриситета были в периоды времени от 980 до 720 тыс. лет назад и от 240 до 80 тыс. лет назад (рис. 9). Именно с этими периодами времени он связывал возможные оледенения. Следовательно, Дж. Кролль был первым, кто использовал астрономические вычисления (вычисления вариации эксцентриситета) для оценки геологического возраста палеогеографических событий. Согласно Кроллю, последнее оледенение на Земле закончилось около 80 тысяч лет назад.

Таким образом, 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 (время полупериода 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, наоборот, особенно теплые 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 Дж. Кролль отдельно выделил главу, посвященную климатическому влиянию вариаций угла наклона земной оси, которое он не учитывал в первоначальной теории. Отчасти это было связано с тем, что достаточно точные данные об изменении во времени угла  $\epsilon$  были получены позже, чем для прецессии и эксцентриситета, Стоквеллом в 1873 г. и Пильгримом в 1904 г. [Croll, 1875; Imbrie, 1982]. Тем не менее, Кролль осознавал важность учета вариаций данного орбитального элемента. Он пишет в начале 25-й главы своей книги: «Есть еще одна причина, которая, я убежден, должна была в очень значительной степени влиять на климат прошлых геологических эпох. Я имею в виду изменение наклона эклиптики. Эта причина давно привлекала внимание геологов и физиков, и обычно заключение было таким, что она не может давать значительного эффекта. После специального рассмотрения сути дела я пришел к совершенно противоположному заключению. Совершенно верно, как было много раз заявлено, что изменение наклона эклиптики не может заметно влиять на климат умеренных регионов; однако оно будет производить слабое изменение климата тропических широт и очень существенно влиять на климат полярных регионов, особенно на сами полюса».

Рассмотрение климатического влияния вариаций угла наклона земной оси (который он, а потом и Миланкович, называли «наклоном эклиптики») Кролль проводил, пользуясь расчетами Мича (Meech) [Croll, 1875, pp. 399, 400], согласно которым при увеличении угла  $\epsilon$  годовое количество солнечного тепла в высоких широтах возрастает, а в низких уменьшается, причем относительное

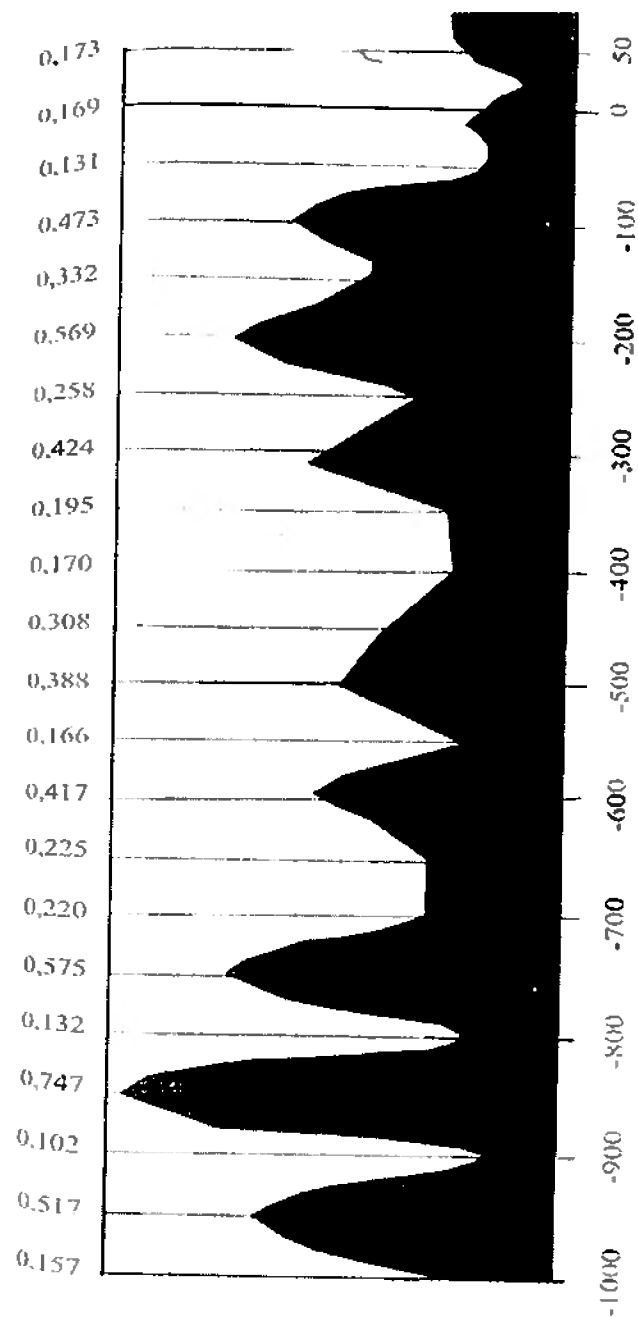


Рис. 9. Вычисленные Кроллем по формулам Лажье изменения эксцентриситета земной орбиты для периода времени от 1 млн. лет до настоящего времени до 80 тыс. в будущее. Цифры в верхней части рисунка — значения эксцентриситета для 50-тысячелетних интервалов времени. (По [Croll, 1875, plate IV].)

изменение тепла в высоких широтах заметно больше, чем в низких. Основываясь на этих расчетах, Кролль показал, что уменьшение наклона земной оси должно способствовать оледенению высоких широт обоих полушарий, поскольку уменьшение  $\epsilon$  вызовет увеличение снежного и ледового покрова и воздействие уже рассмотренных положительных обратных связей, усиливающих первоначальное похолодание. Соответственно, увеличение  $\epsilon$  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 критикует в своей книге, считали, что увеличение угла наклона земной оси приводит, наоборот, к похолоданию в высоких широтах, например, за счет 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, предложенного в теории Кролля. Например, похолодание рассматриваемого полушария будет усиливаться, если нахождение точки зимнего солнцестояния в афелии совпадает по времени с минимальным значением угла  $\epsilon$  и ослабляться, если в это время угол наклона будет вблизи его максимальных значений. Кролль понимал, что это усложняет его теорию, однако не рассмотрел данный вопрос более обстоятельно. Тем не менее, Кролль отметил еще одно явление, связанное с увеличением наклона земной оси — повышение уровня океана вследствие таяния снега и льда в полярных областях. Важно отметить, что для доказательства своих заключений Кролль широко использовал имеющиеся к тому времени разнообразные геологические данные.

Теория Дж. Кролля вызвала большой интерес среди его современников. Ее особенно поддерживал А. Гейки, который отмечал преимущества теории при объяснении имеющихся геологических данных, особенно факты неоднократности оледенений и межледниковий. Однако к концу 19-го столетия были обнаружены существенные противоречия теории Кролля эмпирическим данным. И американские и европейские ученые пришли к выводу, что последнее оледенение завершилось не 80 тыс. лет назад, как следо-

вало из теории, а примерно 10 тысяч лет назад. Это послужило основной причиной отказа от теории Кролля.

Расхождение теории с эмпирическими данными указывает, очевидно, на ее несостоятельность, ошибочность. Какие же ошибки теории Дж. Кролля являются основными? М. Миланкович [1939, с. 129], в своем кратком анализе этой теории, так определяет главные ее недостатки: «Теория Кролля вызвала многочисленные возражения. Самым веским с точки зрения климатологии было то, что суровая зима не только не благоприятствует образованию глетчеров, но, наоборот, служит помехой для возникновения крупных ледников, как это можно наблюдать в материковых областях на севере, имеющих суровые зимы, например, в Сибири. Не суровая зима, а прохладное лето способствует надвиганию ледников. Чрезвычайно существенный недостаток теории Кролля с астрономической точки зрения состоит в том, что из трех астрономических элементов, оказывающих влияние на количество получаемой Землей солнечной теплоты, — долготы перигелия, эксцентриситета земной орбиты и наклона эклиптики — Кролль более или менее точно учел только изменения первых двух».

Определяя главные недостатки теории Кролля с позиций современных данных об оледенениях плейстоцена, можно в общем согласиться с второй частью высказывания Миланковича. Заметим, тем не менее, что точный учет связанного с вариациями всех трех орбитальных элементов количества приходящей на верхнюю границу атмосферы солнечной теплоты, как это делал Миланкович, все же не решает проблему *реального* климатического влияния вариаций этих орбитальных элементов. Основной же недостаток теории Дж. Кролля, на мой взгляд, заключается в ошибочности ее главного положения о том, что оледенения связаны только с обусловленными прецессией сезонными контрастами инсоляции, промодулированными изменениями эксцентриситета. Мое заключение следует из известных теперь фактов, что оледенения плейстоцена происходили практически одновременно в обоих полушариях, что не согласуется с противофазным влиянием прецессии, и приходились на минимальные значения эксцентриситета, т.е. именно в то время, когда прецессионные изменения минимальны, а не максимальны, как требует теория Кролля. Особенно наглядно

демонстрируют сказанное хорошо известные данные о последнем цикле межледниковье-оледенение.

Конечно, такое заключение легко сделать сейчас, с позиций современных научных знаний. А во второй половине 19-го 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 еще недавно была открыта планета Нептун, а до открытия Плутона оставалось более полувека – теория Кролля была огромным шагом вперед 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, вовлеченных в процесс глобальных климатических изменений, и по сути дела определяющих интенсивность и глобальность климатического воздействия орбитально обусловленных вариаций инсоляции, намного опередила свое время. В подтверждение приведу выдержку из книги М. Миланковича [1939, с.130], из которой следует, что даже более чем через 30 лет после опубликования книги Дж. Кролля эта его основная, на мой взгляд, новая идея не была понята и принята во внимание исследователями: «Вытекающие из этих теорий (теорий предшественников М. Миланковича – В. Б.) изменения прихода лучистой энергии были столь незначительны, что Ханн (1908) объявил все астрономические теории ледниковых периодов несостоятельными и пришел к заключению, что с астрономической точки зрения можно скорее сделать вывод об известном постоянстве земных климатов. Это мнение Ханна было, несомненно, слишком поспешно и имело основание лишь постольку, поскольку под астрономическими теориями ледниковых периодов подразумеваются теории, существовавшие в то время». Таким образом, не только Ханн, но и Миланкович не понимали *действительной важности обратных* связей, преобразующих «незначительные изменения прихода лучистой энергии» в грандиозные климатические изменения.

В заключение рассмотрения теории Дж. Кролля, выделим главные, на наш взгляд, итоги его работы.

1. Соглашаясь с тем, что только одни орбитально обусловленные вариации инсоляции не могут привести к глобальным климатическим изменениям, Дж. Кролля сделал заключение, что такие изменения, однако, могут иметь место при дополнительном воздействии «земных физических агентов». Он впервые ввел в рассмотрение факторы положительной обратной связи, усиливающие воздействие вариаций инсоляции при развитии климатических изменений и предложил конкретные механизмы действия этих факторов.

2. Дж. Кролля можно считать основателем метода астрохронометрии, поскольку он первым оценивал возраст оледенений путем сопоставления времени их существования с теоретически рассчитанными интервалами времени максимальных значений эксцентриситета.

3. Им впервые предложены общие механизмы климатического влияния вариаций *всех трех* орбитальных элементов.

4. Одним из первых Дж. Кролля обратил внимание на то, что любая теория ледниковых эпох должна объяснить не только существование оледенений, но и межледниковий, и показал преимущества орбитальной теории при объяснении множественности оледенений.

### 1.5 Основные положения теории М. Миланковича

После Дж. Кролля наиболее заметный вклад в развитие орбитальной теории внес известный сербский ученый М. Миланкович. Влияние его идей оказалось настолько сильным, что даже сейчас, более 70 лет спустя после опубликования в 1930 г. одной из его наиболее известных работ «Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата» (издана на русском языке в 1939 г.), говоря об орбитальной, или астрономической, теории палеоклимата, практически повсеместно подразумевают теорию Миланковича.

Проанализировав работы своих предшественников, среди которых упоминаются имена Адемара, Кролля, Болля, Кельверуэлла, Хэргривса, Экхольма и Пильгрима, Миланкович [1939, с. 130] пришел к следующему заключению (орфография и синтаксис русскоязычных цитат соответствуют оригиналу): «Таким образом все перечисленные здесь теории имеют тот общий недостаток, что ни

одна из них не сумела правильно учесть изменчивость всех трех астрономических элементов, оказывающих влияние на количество лучистой энергии, получаемой Землей. ... Дальше мы увидим, что может дать строго научная математическая теория колебаний климата, опирающаяся на основы небесной механики». Этим была определена задача, которую ставил перед собой Миланкович: математически строго рассчитать связанные с вариациями всех трех орбитальных элементов изменения приходящей на верхнюю границу атмосферы Земли (а также и к другим планетам Солнечной системы) солнечной радиации и, уже на основе этих расчетов, развивать астрономическую теорию колебаний климата.

Таким образом, главной отличительной особенностью теории Миланковича от других версий орбитальной теории, направленных на объяснение существования в геологическом прошлом оледенений, было не то, что он связал глобальные изменения с орбитальными вариациями (причем, как ошибочно считают многие, первым высказал орбитальную гипотезу), а то, как он это сделал. (Возможно, установлению несколько неверного представления о работах его предшественников способствовал и сам Миланкович, поскольку «на основы небесной механики опирались», естественно, и версии орбитальной теории других авторов, например, как мы видели выше, теория Кролля. В теории последнего также использовались количественные характеристики изменений инсоляции, похожие на полученные впоследствии Миланковичем, однако не на такой строгой основе. Как мы помним, причиной тому были и объективные обстоятельства, связанные с более низким уровнем развития науки во времена Кролля).

При проведении своих расчетов Миланкович учитывал зависимость инсоляции от двух основных факторов – расстояния от Солнца и угла падения солнечных лучей на рассматриваемую поверхность Земли. Два этих фактора менялись, естественно, не только при вариациях орбитальных элементов, но и при изменении географической широты места, времени суток и сезонов года, в процессе вращения Земли вокруг своей оси и при ее обращении вокруг Солнца. Это была трудоемкая, но решаемая задача для профессора прикладной математики, каковым являлся М. Миланкович с 1909 года, читая курсы теоретической физики, механики и астрономии в Белградском университете [Имбри, Имбри, 1988].

В начале своей работы Миланкович, имея в виду существование гипотезы о переменной светимости Солнца, специально оговаривает, что он считает мощность излучаемой Солнцем энергии не зависящей от времени, пренебрегая ее незначительными короткопериодными колебаниями. Значение солнечной постоянной (приходящей к единице поверхности Земли в единицу времени солнечной энергии, отнесенной к среднему расстоянию между Землей и Солнцем) он принимает равным 2 калориям на 1 см<sup>2</sup> в 1 минуту.

При вычислении инсоляции отдельных астрономических полугодий Миланкович подтвердил уже известное равенство получасовой за год разными полушариями радиации [Миланкович, 1939, с. 33]: «Любая широта южного полушария получает за свое летнее полугодие столько же радиации, сколько та же широта северного полушария в течение своего летнего полугодия; то же относится и к зимним полугодиям». Однако, поскольку длительность соответствующих полугодий в разных полушариях различна, мощность радиации, поступающей к ним в течение, например, летнего полугодия, будет неодинакова (это связано с разным удалением Земли от Солнца), и они будут нагреваться в разной степени, поскольку температура, при прочих равных условиях, зависит от мощности приходящей энергии.

Так как длительность летнего и зимнего астрономических полугодий меняется с течением времени, Миланкович предложил использовать так называемые *калорические* полугодия. По определению, это «...два равных полугодия, одно из которых охватывает все дни, когда суммы солнечной радиации под данной широтой больше, чем суммы солнечной радиации в любой день в течение всего другого полугодия. ...Полугодие, охватывающее 182,5 дня с наибольшими суммами тепла, мы назовем *калорическим летним полугодием*, другое же – *калорическим зимним полугодием*» [Миланкович, 1939, с.49]. Вычисляя полугодовые изменения инсоляции под отдельными географическими широтами, Миланкович получил, что изменения инсоляции, связанные непосредственно с вариациями эксцентриситета (пропорциональные, как он показал,  $\frac{1}{\sqrt{1-e^2}}$ ), много меньше соответствующих изменений инсоляции, связанных с вариациями двух других орби-

тальных элементов. Поэтому он, как и его предшественники, пренебрег непосредственным «эксцентриситетным» вкладом в общие изменения инсоляции, связанные с орбитальными вариациями, и учитывал эксцентриситет только как фактор, модулирующий прецессионные вариации. Следовательно, в инсоляционных кривых Миланковича отсутствует характеризующая периодами около 100 и 400 тысяч лет непосредственная эксцентриситетная составляющая. Для вычисления вариаций инсоляции (инсоляционных кривых) для летнего,  $\Delta Q_s$ , и зимнего,  $\Delta Q_w$ , калорических полугодий Северного полушария (относительно эпохи 1800 г.) использовались следующие формулы [Миланкович, 1939, с 137]:

$$\Delta Q_s = \Delta W_s \cdot \Delta \epsilon - m \cdot \Delta(e \cdot \sin \omega) \quad /1/$$

$$\Delta Q_w = \Delta W_w \cdot \Delta \epsilon + m \cdot \Delta(e \cdot \sin \omega), \quad /2/$$

где  $\Delta W$  – зависящее от широты изменение солнечной радиации при изменении наклона земной оси  $\Delta \epsilon$  на  $1^\circ$ ,  $m$  – множитель, зависящий от широты,  $\omega$  – долгота перигелия Земли относительно точки весеннего равноденствия. В случае рассмотрения Южного полушария формулы /1/ и /2/ следует поменять местами, поскольку, в отличие от вариаций наклона земной оси, которые определяют однофазное изменение инсоляции в обоих полушариях, прецессионные полугодовые изменения инсоляции противофазны для противоположных полушарий. Из приведенных формул видно, что прецессионные годовые изменения радиации для любой широты (сумма вторых слагаемых в правых частях формул 1 и 2) равны нулю, о чем уже говорилось выше. Величины  $\Delta W_s$ ,  $\Delta W_w$  и  $m$  в формулах /1/ и /2/ вычислены Миланковичем для отдельных широт и приведены в виде таблиц, а для определения изменений угла  $\epsilon$  и индекса климатической прецессии  $e \sin \omega$  он использовал вычисления и формулы астрономов и математиков Леверье, Стоквелла, Пильгрима и Мишковича. В левой части таблицы 1 представлены вычисленные Миланковичем количества солнечной радиации, получаемые каждым квадратным сантиметром земной поверхности, находящейся под определенной географической широтой, в настоящую эпоху в течение года ( $W$ ) и отдельных полугодий. Величины  $W$  даны в канонических единицах, т.е. когда за единицу приходящей энергии принята солнечная постоянная ( $I_0 = 1$ ), а за единицу времени – год, и полученные по соответствующим формулам значения умножены на 100000 (длительность года при-

равнивается 100000 едѣниц). Из таблицы 1 видно, что при изменении угла  $\epsilon$  летняя и зимняя инсоляция высоких широт меняются в противофазе, однако количественное преобладание летней инсоляции определяет итоговое, ненулевое годовое изменение инсоляции высоких широт.

Таблица 1

Получаемые верхней границей атмосферы количества солнечной радиации ( $W$ , в канонических единицах) и их изменения ( $\Delta W$ , в процентах) при изменении угла наклона земной оси на  $1^\circ$ , для различных географических широт, полного года и полугодий

Широта, градусы	$W_s$	$W_w$	$W$	$\Delta W_s$	$\Delta W_w$	$\Delta W$
0	15266	15266	30532	-0.35	-0.35	-0.35
5	15768	14663	30431	-0.20	-0.52	-0.35
10	16156	13956	30112	-0.04	-0.69	-0.34
15	16433	13153	29586	+0.11	-0.87	-0.33
20	16596	12262	28858	+0.26	-1.07	-0.30
25	16649	11292	27941	+0.42	-1.29	-0.27
30	16584	10248	26832	+0.59	-1.54	-0.22
35	16413	9144	25557	+0.76	-1.83	-0.16
40	16134	7988	24122	+0.96	-2.17	-0.08
45	15758	6797	22555	+1.17	-2.60	+0.03
50	15292	5584	20876	+1.41	-3.14	+0.19
55	14764	4383	19147	+1.69	-3.84	+0.42
60	14172	3196	17368	+2.04	-4.78	+0.78
65	13594	2109	15703	+2.51	-5.77	+1.39
70	13186	1278	14464	+3.18	-6.62	+2.49
75	12943	702	13645	+3.57	-6.31	+3.17
80	12788	308	13096			
85	12700	70	12770			
90	12672	0	12672	+4.02		+4.02

Таблица 2

Значения коэффициентов  $m$  в формулах /1/ и /2/ для разных широт

$\varphi^\circ$	15	20	25	30	35	40	45
$m$	19580	19050	18370	17560	16610	15530	14330
$\varphi^\circ$	50	55	60	65	70	75	
$m$	13030	11640	10130	8570	6920	5060	

Ссылаясь на эти табличные данные, Миланкович указывает, что для низких широт преобладающий вклад в изменения суммарной инсоляции дают прецессионные вариации, а для высоких широт – вариации инсоляции, связанные с наклоном земной оси, причем «Для летних сумм радиации граница между этими двумя областями лежит примерно под  $68^\circ$  широты, для зимних – под  $48^\circ$ » [Миланкович, 1939, с. 47].

Очевидно, что кривые изменения инсоляции для отдельных географических широт и калорических полугодий существенно отличаются друг от друга (уравнения 1 и 2, рис. 10). На рисунке 10

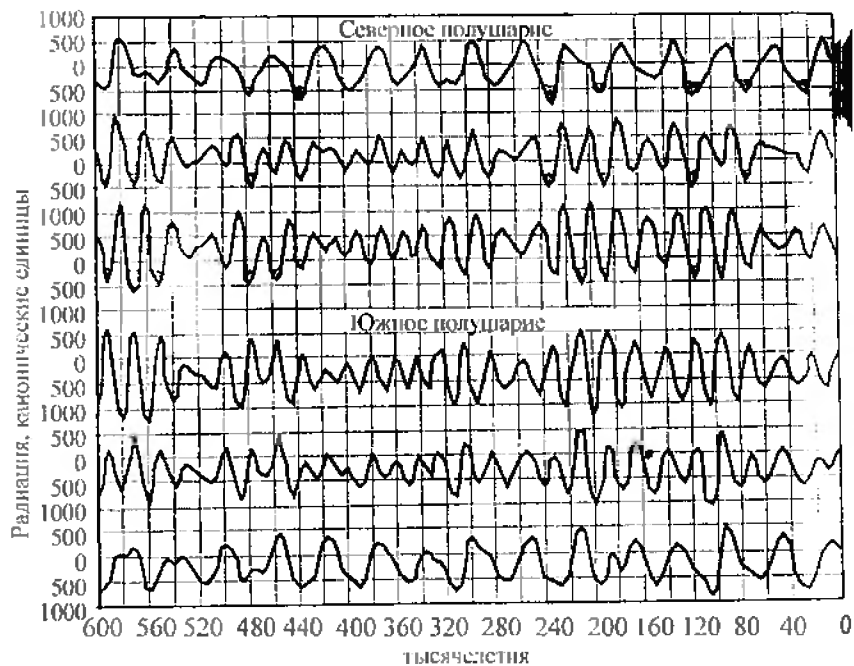


Рис.10. Кривые радиации Миланковича [Milankovitch, 1938] для летних полугодий Северного и Южного полушарий. Сверху вниз соответственно кривые для  $75, 45$  и  $15^\circ$  с.ш. и  $15, 45$  и  $75^\circ$  ю.ш. Затененные участки на кривых с.ш. (наиболее глубокие минимумы инсоляции) соответствуют стадиям оледенений Вюрм, Рисс, Миндель и Гюнц. Отметим, что для кривых разных широт даты стадий оледенений отличаются. (По [Шварцбах, 1955, рис. 69]).

хорошо видно, что изменение инсоляции высоких широт определяется 41-тысячелетней периодичностью вариаций наклона земной оси, а низких – 23-тысячелетними вариациями прецессии. При этом высокоширотные кривые, как и следовало ожидать (см. раздел 1.3.), изменяются в основном в фазе, низкоширотные – в противофазе для разных полушарий. Поэтому для достижения главной цели проделанной Миланковичем работы – определению связи между колебаниями инсоляции и климата – необходимо было придать этим вычислениям палеоклиматическую значимость. В этой части исследований М. Миланкович опирался на мнение известного климатолога В.П. Кеппена. «Если мы захотим теперь приступить к выяснению связи между описанными колебаниями климата и вековым ходом облучения Земли – пишет Миланкович [1939, с. 151] – то для этого, как утверждает Кеппен, необходимо сперва ответить на два предварительных вопроса: 1) какой метеорологический элемент и 2) какое время года имеется главным образом в виду, когда идет речь об оледенении Европы и Северной Америки».

Первый вопрос отражает дискуссию первой половины XX века о причинах покровных оледенений. Одни исследователи считали, что главной причиной оледенений было увеличение количества осадков, которые являются питательной средой для ледников, другие полагали такой причиной понижение температуры поверхности Земли. К последним относился и В.П. Кеппен. Проведенный им анализ современных условий оледенения, особенно в Гренландии и Антарктиде, привел к выводу, что метеорологическим элементом должна быть температура высоких широт Северного полушария. Время года определялось из следующих соображений [Миланкович, 1939, с. 152]: «Оледенению способствует отсутствие летнего тепла, а вовсе не холода наиболее сурового месяца или года. Что холодов самих по себе недостаточно, чтобы вызвать оледенение, яснее всего видно по Сибири, где мы находим наиболее низкие температуры, но не встречаем материкового льда. Часть Сибири, расположенная между  $60$  и  $70^\circ$  широты, лежит на одинаковой широте с Южной Гренландией, покрытой в настоящее время льдом, и имеет среднюю годовую температуру на  $9^\circ$  ниже последней. Несмотря на это, она не имеет ни ледяного покрова, ни даже отдельных ледников. Сибирское лето, однако, в среднем на  $11^\circ$

теплее лета Южной Гренландии. Отсюда видно, что решающую роль для оледенения играет лето. Поэтому в нашем исследовании мы должны обращать внимание главным образом на эпохи с *холодным летом*».

Исходя из этих соображений, а также, надо полагать, из сопоставления кривых инсоляции с имеющимися в то время представлениями о климатических изменениях прошлого, Кеппен использовал для палеоклиматических интерпретаций изменения инсоляции летних калорических полугодий под  $65^\circ$  северной широты (с.ш.), вычисленных Миланковичем для последних 600 тысяч лет.

При этом, конечно, необходимо было перевести изменения инсоляции в изменения температуры земной поверхности, понижение которой считалось главной причиной оледенений. Поскольку Миланкович рассчитал изменения инсоляции на верхней границе атмосферы, необходимо было рассмотреть тепловые свойства как непосредственно поверхности Земли, так и атмосферы, строение и состав которой оказывают существенное влияние на количество поступающей к земной поверхности солнечной радиации. Этому вопросу посвящена вторая часть книги Миланковича, которая называется «Влияние атмосферы на облучение Земли и зависимость между приходящим излучением и температурой. Математический климат Земли». Данная часть работы является одной из первых попыток теоретического описания климата Земли и, конечно, она связана с определенными упрощениями; в частности, поверхность Земли считалась однородной и ровной, а атмосфера — неподвижной. Этими упрощениями Миланкович, как в свое время и Кролль, объяснял различия в широтном распределении солярных температур с реально наблюдаемыми температурами, которые демонстрировали меньшие температурные различия между полюсами и экватором, чем теоретически подсчитанные. (Солярные температуры отражают влияние только одной составляющей, определяющей климат Земли — распределения инсоляции по ее поверхности. Естественно, что, например, воздушные и морские течения будут сглаживать широтные температурные градиенты между полюсами и экватором).

Миланкович рассмотрел влияние состава атмосферы (ее прозрачности, содержания водяного пара) на облучение Земли, процессы распространения температурных колебаний в почве и

зависимость температуры воздуха от высоты, которая определяет, в частности, и высоту снеговой линии. Одним из существенных результатов этой части работы является вывод о том, что годовые экстремумы температуры запаздывают относительно экстремумов инсоляции на время до 26 дней из-за существования теплооборота в атмосфере и в почве. Иными словами, процессы теплообмена определяют тепловую инерцию планеты, которая может достигать по времени почти месяца по отношению к изменению солнечной радиации, связанному с обращением Земли вокруг Солнца.

Подводя итог этой части работы Миланкович [1939, с. 125-126] пишет: «Таким образом, исходя из напряжения солнечной радиации, выраженного числовым значением солнечной постоянной, а также из числовых значений коэффициентов прозрачности и поглощения атмосферы и из коэффициента теплопроводности почвы, и не опираясь на какие-либо другие результаты метеорологических наблюдений, оказалось возможным чисто теоретически наметить картину тех климатов Земли, которые установились бы на ней под влиянием солнечной радиации в том случае, если бы атмосфера была неподвижна. Вычисленная таким образом средняя температура нижнего слоя атмосферы совпадает почти точно с наблюдаемой; точно так же теоретическое вертикальное строение атмосферы очень близко подходит к действительному. Совершенно ясно, что эта, только сейчас создающаяся теория не может и не сможет никогда охватить все детали климата Земли. Тем не менее уравнения математической теории климата, выведенные исключительно на основании законов физики, дают лучшее представление о механизме тепловых явлений в земной атмосфере, чем любой другой способ изложения. Это позволяет нам проследить те колебания климата в прошлом, которые имели причиной колебания облучения Земли».

Основываясь на развитой им «математической теории климата», Миланкович считает возможным перевести вычисленные вариации инсоляции прошлого в соответствующие изменения глобальной температуры. При этом возникает необходимость учета обратной связи, вызванной изменением альбедо земной поверхности при развитии оледенения. Эта проблема довольно упрощенно решается следующим образом [Миланкович, 1939, с. 156]: «...пока дело не доходит до образования материкового льда, вековые коле-

бания температуры пропорциональны колебаниям количества радиации, и мы получаем вековую температурную кривую, умножая помещенные в табл. 15 цифры на фактор пропорциональности, который будет вычислен в следующем параграфе. Таким образом в межледниковые периоды вековая температурная кривая имеет одинаковую форму с кривой облучения, прямо выраженной цифрами табл. 15, т.е. не переведенной в колебания широты. В ледниковые периоды дело обстоит иначе. Для того чтобы сделать это понятным, мы должны разделить рассматриваемые нами области следующим образом: а) на области, которые лежат вне материкового льда, б) на области, составляющие собственно ядро оледенения, и с) на пограничные области, переходные между первыми и вторыми, в которых находятся языки ледников с их конечными моренами. В областях, не покрытых льдом даже и в течение ледникового периода, (учитывая в качестве климатического фактора только облучение), все остается в том же виде, как это было в межледниковом периоде, т.е. здесь вековая температурная кривая идет параллельно кривой облучения. В остальных двух категориях областей форма температурной кривой отличается от формы кривой облучения: минимумы температурной кривой углубляются, а в областях с материковым льдом при этом подъем между двумя соседними минимумами сглаживается или иногда исчезает вовсе. Таким образом, фактически может случиться, что два отдельных интервала времени с холодными летами производят впечатление сплошного ледникового периода».

Итак, по Миланковичу, форма температурной (палеоклиматической) кривой в основном аналогична форме кривой суммарной инсоляции для внеледниковых и пограничных регионов (рис. 10 и 11), и только во внутриледниковых областях палеотемпературная кривая будет отличаться от инсоляционной кривой в периоды оледенений за счет сглаживания температурных максимумов, уменьшающих свою величину. Однако и для этих районов временные положения минимумов, т.е. временных дат оледенений, остаются практически неизменными. Важно отметить, что Миланкович предполагал одинаковое, пропорциональное воздействие обратной связи на вычисленные им инсоляционные сигналы, обусловленные вариациями различных орбитальных элементов.

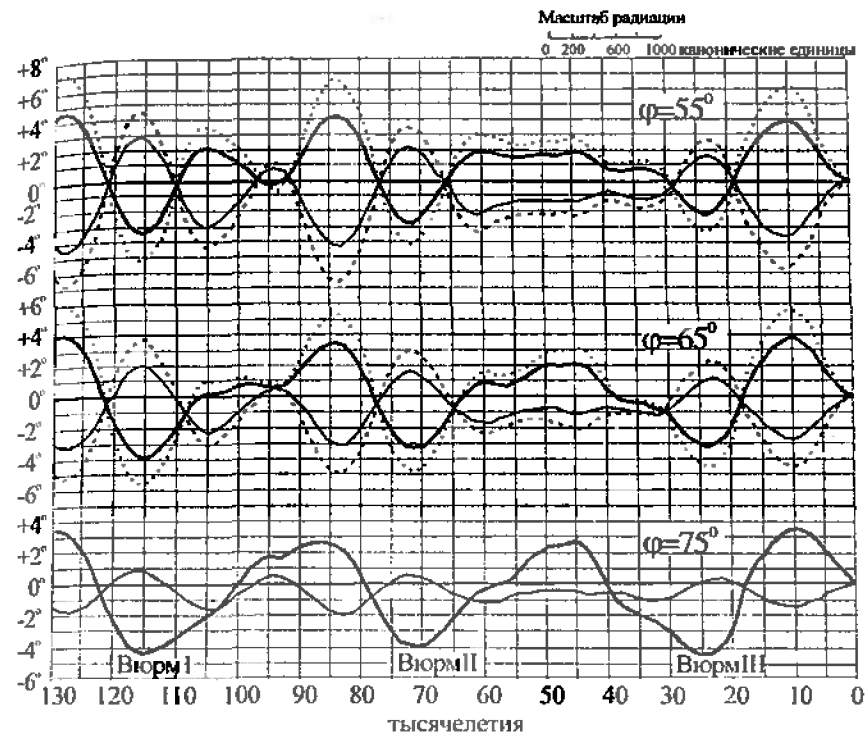


Рис.11 Кривые векового хода радиации и температуры для различных географических широт Северного полушария за последние 130 тысяч лет (относительно эпохи 1800 года). Для перевода температурной кривой в радиационную сверху приведён масштаб. Сплошные утолщенные и тонкие кривые представляют изменения температуры соответственно летнего и зимнего полугодий; точечные кривые – самого теплого месяца, штриховые кривые – самого холодного месяца. (По [Миланкович, 1939, диаграмма 4].

Приведенные соображения явились обоснованием использования для палеоклиматической интерпретации (при изучении оледенений Европы и Северной Америки) вычисленных Миланковичем для последних 600 тыс. лет изменений приходящей на верхнюю границу атмосферы Земли солнечной радиации летних калорических полугодий под 65° с.ш. Иными словами, вычисления проводились по приведенной выше формуле /1/. Очевидно, что уменьшение инсоляции, сопровождаемое уменьшением темпера-

туры, должно приводить к похолоданию. (Отметим, что отрицательные значения  $\Delta Q$ , в формуле 1, отражающие минимальные значения инсоляции, сопоставляемые с оледенениями, соответствуют приведенным в разделе 1.3 общим механизмам климатического влияния орбитальных элементов, а именно: к похолоданию приводит уменьшение угла  $\epsilon$  и увеличение расстояния между Землей и Солнцем летом Северного полушария, пропорционально  $e \sin \omega$ . Поскольку  $\Delta W_2$  и  $m$  – величины положительные, то уменьшение угла  $\epsilon$ , дающее отрицательное  $\Delta \epsilon$ , и увеличение  $e \sin \omega$ , за счет знака «минус», дает отрицательные, соответствующие похолоданиям, значения  $\Delta Q$ , в 1/1).

Вычисленные изменения инсоляции были переведены для наглядности в изменения широты, т.е. вычислялась та «эквивалентная широта», которая в настоящее время получает столько же тепла, как и широта  $65^\circ$  с.ш. в рассматриваемое тысячелетие геологического прошлого. Очевидно, что на этой инсоляционной диаграмме уменьшение инсоляции соответствовало увеличению эквивалентной широты, а увеличение инсоляции – ее уменьшению. Эта знаменитая инсоляционная диаграмма показана на рисунке 12.

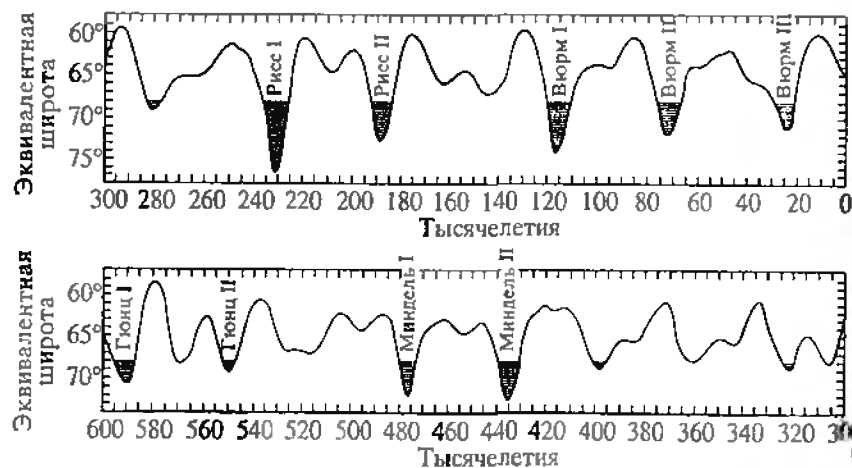


Рис. 12. Вековой ход летних сумм радиации под  $65^\circ$  северной широты (инсоляционная диаграмма Миланковича). Затенёванные участки соответствуют оледенениям. По [Миланкович, 1939].

Наиболее заметные минимумы диаграммы интерпретировались как соответствующие оледенениям. Таких оледенений было выделено за последние 600 тыс. лет четыре, что хорошо соответствовало распространенной тогда альпийской схеме А. Пенка и Э. Брюкнера с оледенениями Вюрм, Рисс, Миндель и Гюнц. Это сходство усиливалось и соответствием оценок длительности ледниково-межледниковых этапов в схеме Пенка и Брюкнера и по инсоляционной диаграмме Миланковича; особое внимание обращалось на увеличенную, по сравнению с другими межледниковыми и ледниковыми периодами, продолжительность (около 200 тысяч лет) миндель-рисского межледниковья, отмечаемую в обеих возрастных схемах. Впоследствии Миланкович довел свои вычисления до 1 млн. лет, чтобы сопоставить их с реконструкцией немецкого геолога Б. Эберля, которому, после проведения дополнительных исследований северных предгорий Альп, удалось расширить схему Пенка и Брюкнера. Сопоставление стратиграфической диаграммы Эберля, в которой промежутки времени между выделенными им геологическими горизонтами условны, с инсоляционной диаграммой Миланковича показано на рис. 13 и демонстрирует их хорошее соответствие.

Сравнение теории с эмпирическими данными, полученными для предгорий, было органично для Миланковича, поскольку он считал, что «...для возникновения оледенения необходимо наличие гор. ...Если бы Земля обладала совершенно ровной поверхностью, то на ней, как и на Марсе, имелись бы полярные шапки, но не ледники, и она не проходила бы через ледниковые периоды...» [Миланкович, 1939, с 175-176]. На стр. 185-186 он так описывает механизм оледенений плейстоцена: «В течение последних 600 тысячелетий, и именно в девять периодов времени, обозначаемых как гюнцская I и II, миндельская I и II, рисская I и II и вюрмская I, II и III фазы, средняя температура летнего полугодия в умеренных и полярных зонах северного полушария, в результате вариаций астрономических элементов и изменений в облучении Земли, понижалась на  $4-5^\circ$ , тогда как средняя температура наиболее теплого месяца была на  $5-7^\circ$  ниже, чем в наше время. В результате такого понижения летней температуры снеговая линия переместилась и находилась в среднем на  $700-800$  м. ниже, чем теперь. Благодаря этому обширные области очутились под



в прошлом на территории Европы было ее большее удаление от Северного полюса. Он полагал «...весьма правдоподобным, что на границе между третичной и четвертичной эпохами началось резкое возрастание географических широт в Европе, благодаря чему эти местности должны были подвергнуться оледенению» [Миланкович, 1939, с. 191].

Вторая версия предполагала влияние на климат изменений большой полуоси земной орбиты, которая в теории Миланковича, в соответствии с положениями небесной механики, считалась в первом приближении постоянной. На самом деле это постоянство имеет место лишь в определенных пределах [Миланкович, 1939, с. 191]: «...строго говоря, полуось земной орбиты  $a$  также изменяема, хотя, вероятно, в весьма слабой степени». Однако механизм климатического влияния таких изменений Миланкович не уточняет. Добавим, что *существенные* изменения величины  $a$  в прошлом, однако, так же проблематичны, как и значительные колебания солнечной постоянной. В пользу этого говорят работы [Шараф, Будникова, 1967, 1969; Berger, 1988; Berger, Loutre, 1991, 1992; Quinn et al, 1991; Laskar et al., 1993], согласно которым изменения большой полуоси эллиптической орбиты Земли были незначительны и не оказывали существенного влияния на вариации орбитальных элементов и, соответственно, на инсоляцию, в течение последних 30 млн. лет.

Теория Миланковича была положительно воспринята в России. Например, А.Х. Хргиан, который пересел цитируемую нами книгу Миланковича, в своем «Добавлении» к этой книге (стр. 195) писал: «Как уже было указано раньше, современная математическая теория колебаний климата, так блестяще проверенная и подтвержденная изучением отложений четвертичного периода, не может помочь проследить с такой же уверенностью климаты более древних периодов. Для этого нам не хватает прежде всего надежной астрономической основы, так как точность формул небесной механики в применении к таким отдаленным временам быстро уменьшается». А заканчивается «Добавление» следующими словами (стр. 206-207): «Не так давно (1932-1933) Миланкович, этот неутомимый исследователь палеоклимата, сделал попытку построить теорию перемещений полюсов, исходя из понятий классической механики. Приняв, что центр тяжести всех материковых

глыб оставался неподвижным (упрощая задачу), Миланкович нашел, что полюс Земли в течение геологических эпох должен был описать кривую примерно от Гавайских о-вов через Аляску к его современному положению, чтобы в будущем сместиться к устью Печоры. В пользу этого вывода говорят геологические данные в такой же мере, как и имя автора; но теория Миланковича вызвала такие ожесточенные нападки ряда исследователей (бросающие, правда, больше всего тень на их авторов), что сейчас еще преждевременно говорить с уверенностью о физических обоснованиях перемещения полюсов». Из этой цитаты следует, что среди современников Миланковича (он скончался в 1958 г.), кроме восторженных почитателей, были и критики. Какие же недостатки палеоклиматической теории Миланковича отмечали его современники?

### 1.6 Эволюция взглядов на теорию Миланковича в середине XX века

Широкое признание теории Миланковича было обусловлено прежде всего ее сопоставимостью с эмпирическими данными и стратиграфическими представлениями геологов того времени о палеогеографических событиях ледникового периода. Однако интерпретация эмпирических данных, как выяснилось впоследствии, оказалась неоднозначной [Имбри, Имбри, 1988]. Например, немецкий геолог И. Шефер выступил против трактовки альпийских галечных террас в качестве ледниковых образований, что было основой схемы Пенка и Брюкнера. Основанием для такого мнения Шефера явились находки раковин теплолюбивых моллюсков в разрезах этих «ледниковых» галечников. Очевидно, данное противоречие ставило под сомнение и теорию Миланковича, справедливость которой подтверждалась хорошей сопоставимостью прежде всего именно с альпийской схемой Пенка и Брюкнера. Кроме этого, многие ученые считали маловероятным, что понижение летних температур во время оледенений, согласно расчетам Миланковича, будет сопровождаться в то же время повышением до 1-2°C (см. рис.11) зимних температур. Существенные критические замечания «по поводу кривых радиации и их геологического истолкования» собраны в книге М. Шварцбаха [1955, с. 239-243]. Обратимся к некоторым из них.

Шварцбах прежде всего обращает внимание на то, что *метод* расчета кривых радиации сильно влияет на их форму и, следовательно, палеоклиматическую (палеогеографическую) интерпретацию. Он показывает это на примере сравнения радиационных кривых Миланковича с кривыми Шпиталера, который практически в это же время разрабатывал свою версию астрономической теории. Астрономические параметры (массы планет Солнечной системы, геометрические элементы их орбит и т.д.) в расчетах обоих авторов были практически одинаковы. Более того, оба они считали, в отличие от Кролля, что оледенению благоприятствует длительное прохладное лето. Однако полученные ими кривые инсоляции были совершенно различны, давали разные главные минимумы и, значит, разную хронологию оледенений. Брукс [1952, с. 88], отмечая, что выводы Шпиталера не соответствуют эмпирическим данным, констатирует: «...Шпиталер относит окончание вюрмского оледенения к 89680 г. до н. э.; между тем как, по геологическим данным, это оледенение закончилось лишь в 18000-20000 гг. до н. э.». Поэтому предпочтение было отдано расчетам инсоляции, проведенным Миланковичем. Чем же отличались расчеты двух авторов? По Шварцбаху, «Расхождение объясняется тем, что Шпиталер делил количество радиации, получаемой данной параллелью, на полуденную дугу, а Миланкович — на полуденную плюс полуночную (так как полуночная плюс полуденная дуги должны приниматься в расчет совместно)». Действительно, под «суточной суммой радиации» Миланкович, подразумевал количество тепла, получаемое в течение дня единицей земной поверхности, специально оговаривая, что величину облучения ночью он приравнивает нулю.

М. Шварцбах справедливо отмечает, что только одними радиационными кривыми нельзя объяснить существование оледенений, указывая, что эти кривые могут быть продолжены, без радикальных изменений их формы, в более ранние геологические периоды, когда оледенений не было. Таким образом, проблема оледенений не исчерпывается только вычислением и интерпретацией инсоляционных кривых. Интересным представляется следующее замечание [Шварцбах, 1955, с. 240]: «Загадочным остается тот факт, что за последние 500 млн. лет только один раз, а именно в четвертичном периоде, обстоятельства сложились благоприятно для проявления кривой радиации. Как известно, пермокарбонис

оледенения солнечной радиацией объяснить нельзя, так как их хронология измеряется величинами совершенно иного порядка».

Кроме этого, Шварцбахом отмечена недостаточно хорошая разработанность четвертичной стратиграфии, что, конечно, не позволяет говорить о надежности сопоставления геологических данных с инсоляционными кривыми и, соответственно, о надежной проверке теории Миланковича. Также, приводя конкретные примеры, Шварцбах указывает на то, что недостаточно обоснована одна из основных «метеорологических гипотез» теории Миланковича, — что холодные лета являются существенной предпосылкой для образования оледенений. Им отмечено и несоответствие по времени, согласно инсоляционным кривым, холодного лета различных полушарий, тогда как оледенения, по крайней мере последнее, были практически одновременными в обоих полушариях.

В результате Шварцбах [1955, с. 243] делает следующее заключение: «Из всего изложенного вытекает, что связь между солнечной радиацией и оледенением значительно сложнее, чем предполагали Кеплен, Вегенер и другие. А если это так, то трудно поверить, чтобы относительно незначительные изменения в интенсивности излучения, отраженные кривой Миланковича, могли бы оказывать столь глубокое влияние на климат. Конечно, усиление «саморазрастаний» (имеется в виду положительная обратная связь за счет альbedo — В.Б.) также играет большую роль, но все же только в том случае, если многие факторы действуют в одинаковом направлении. Но в данном случае этого нет: и увеличение радиации в зимнее время не везде благоприятствует наступлению ледниковых эпох, и зубцы кривой радиации на различных широтах не всегда соответствуют друг другу по величине, а иногда и по значению. Следовательно, мы должны скептически отнестись к климатологическому объяснению кривой радиации. Основания этой «астрономической» гипотезы оказываются довольно ненадежными. ... Только непосредственное подробное сопоставление геологической и астрономической периодизации может дать решающий ответ по этому вопросу. Современные геологические данные для этого недостаточны, и пока что они скорее опровергают указанную гипотезу, чем подтверждают ее».

Как же реагировал на критические замечания М. Миланковича Дж. и К.П. Имбри, [1988, с. 130], характеризуя отношение самого

Миланковича к критике, приводят его собственное высказывание: «В мои обязанности не входит ликвидация чьего-то невежества и я никого не принуждаю признавать мою теорию, к которой до сих пор никто не мог придаться».

В начале 50-х годов XX столетия по теории Миланковича был нанесен еще один чувствительный удар. Он связан с развитием и использованием радиоуглеродного метода абсолютной геохронологии. Этот метод позволяет датировать содержащие органику (древесину, раковины и кости, торф) отложения, возраст которых не превышает 40 тыс. лет. Результаты такого датирования привели к тому, что «...очень скоро вера в теорию Миланковича была поколеблена, чему прежде всего способствовала находка в Фармдейле (Иллинойс) торфяного слоя с возрастом в 25000 лет. Такой торф мог образоваться только в условиях теплого климата» [Имбри, Имбри, 1988, с. 132]. Напомню, что дата в 25 тысяч лет назад близка к соответствующему оледенению Вюрм-3 минимуму инсоляционной диаграммы Миланковича (рис. 11, 12), тогда как предстоящий ему максимум (потепление) приходится на дату около 45 тыс. лет. Это, очевидно, противоречило выводам теории Миланковича, и, в конечном итоге, привело к тому, что к концу 60-х годов астрономическая теория потеряла многих своих сторонников.

Для иллюстрации эволюции взглядов на теорию Миланковича обратимся также к монографии [Марков, Величко, 1967]. К.К. Марков в специальном разделе, посвященном этой теории, анализирует опубликованную в 1938 г. книгу Миланковича, в которой, по сравнению с рассматриваемой нами предыдущей работой 1930 года, Миланкович («...1) распространяет палеоклиматический анализ на оба полушария; 2) исследует не только приход солнечной радиации, но и ее трансформацию в различных условиях подстилающей поверхности (лед, непокрытая льдом поверхность суши, океан); 3) рассматривает миграцию географических полюсов».

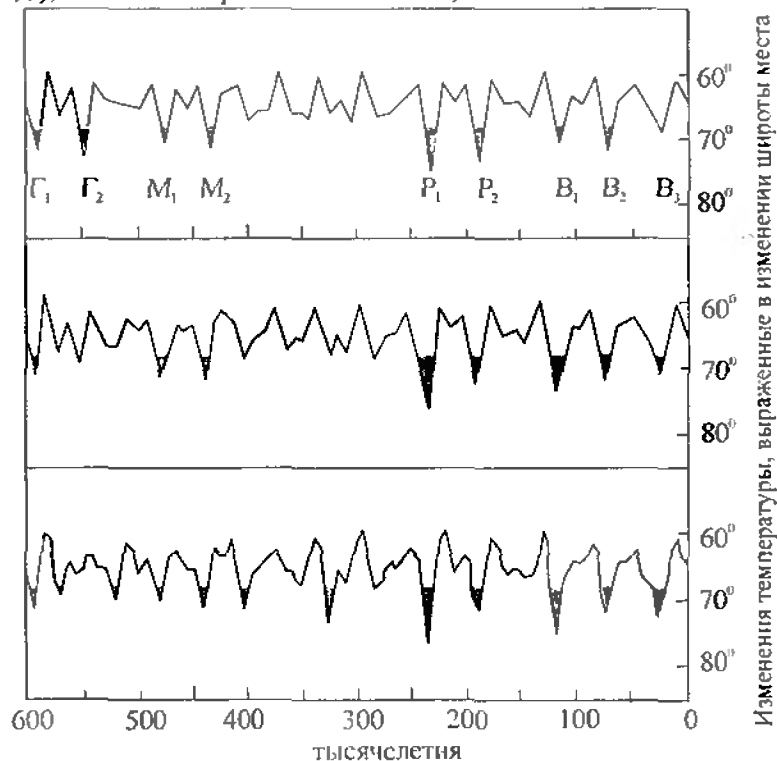
Первые два вопроса частично уже были рассмотрены в более ранней публикации. Например, приводя кривую летнего облучения (температуры) на  $55^\circ$  южной широты, Миланкович [1939, с. 174-175] отмечает различия климатических условий двух полушарий: «Южное полушарие в более высоких широтах еще совсем недавно прошло через чрезвычайно длинный период времени с холодными летами, который, возможно, совершенно закончился

лишь в исторические времена. ...Таким образом период очень холодных лет на южном полушарии продолжался почти 40 тысячелетий, и это обстоятельство должно было во всяком случае повести к обширным оледенениям; современный ледяной покров Антарктиды является остатком этой холодной эпохи». Из приведенных данных также следует, что временное различие минимумов инсоляции и соответствующих похолоданий в Северном и Южном полушариях обычно больше 5 тысяч лет (см. рис. 10). Таким образом, уже исходя из работы 1930 г. (напомню, она была опубликована на русском языке в 1939 году), можно было сделать вывод, к которому пришел Марков, анализируя более позднюю публикацию 1938 г.: «На теорию Миланковича неправильно ссылаются, как на основу для планетарных синхронизаций одновременных процессов, по принципу сходства последних. Истинное же значение теории М. Миланковича заключается в противоположном: планетарные изменения приходящей радиации Солнца в земных условиях получают различное местное выражение: 1) по интенсивности и даже 2) по направлению этих изменений».

Отмечая несоднзначное отношение к теории Миланковича в научной среде, Марков обращается к публикации Шварцбаха [1954], в которой сравниваются кривые инсоляции Миланковича с улучшенными вычислениями А. Вуркома 1953 года (рис. 14). Согласно данным Вуркома, на инсоляционной диаграмме для летних полугодий и  $65^\circ$  с.ш. можно выделить гораздо большее количество оледенений, чем следовало из вычислений Миланковича. Поэтому К.К. Марков заключает следующее [Марков, Величко, 1967, с. 336]: «Сходство между астрономической кривой и геоморфологическими кривыми утрачено. Между тем именно высшее сходство двух кривых служило раньше доказательством реальности связи между ними. Неправильно, конечно, не доверять самому механизму климатических изменений, рассмотренному М. Миланковичем. Но связь астрономической гипотезы с гипотезой оледенений Земли, признанная блестяще доказанной, протупает очень смутно и сегодня убеждает меньше, чем 30 лет тому назад».

Похожий вывод сделал и сам А. Вурком, на вычисления которого ссылались М. Шварцбах и К.К. Марков [Вурком, 1958, с. 178]: «Мы должны прийти к выводу, что изменения инсоляции, вызванные изменениями орбиты и оси вращения Земли, недоста-

точны, чтобы ими можно было объяснить возникновение ледниковых периодов. Тем не менее, такие изменения должны были иметь свои последствия.... Свидетельством таких последствий является периодичность, обнаруженная в ленточных глинах различных геологических возрастов, ...например, эпохи грин-ривер (эоцен – ред.), – помимо периодов 11 и 50 лет, 21000 лет».



**Рис. 14.** Варианты инсоляционных кривых М Миланковича 1920 и 1930 гг. (два верхних графика) и инсоляционная кривая А. Вуркома 1953 года. Кривые вычислены для летних калорических полугодий в 65° с.ш. В, Р, М и Г – оледенения Вюрм, Рисс, Мицдель и Гюнц, выделенные Миланковичем. Следуя способу Миланковича, на кривой Вуркома можно выделить гораздо большее количество оледенений (затусованные участки кривой). Отсюда вытекает, что выделение на инсоляционных кривых Миланковича палеоклиматических событий не абсолютно, а находится в зависимости от точности астрономических данных и вычислений. (По [Марков, Величко, 1967, рис. 104])

Приведем также оценку теоретической климатической части теории Миланковича, связанной с вычислением одного из главных климатических показателей – температуры, данную М.И. Будыко [1977, с.84-85]: “Миланкович считал, что термический режим определяется радиационным теплообменом в каждой отдельной широтной зоне. В его работе не было учтено действие атмосферного парникового эффекта и изменения альбедо с широтой. Миланкович пренебрег также влиянием на термический режим меридионального переноса тепла в атмосфере, теплообмена, обусловленного фазовыми преобразованиями воды, и взаимодействием атмосферы с океаном. Связанные с влиянием этих факторов существенные погрешности в расчете поля температуры были компенсированы путем подбора некоторых параметров модели, в результате чего Миланкович получил распределение средних широтных температур, не очень сильно отличающееся от наблюдаемого. Такое согласование, однако, имело довольно условный характер”. Критика этой части теории Миланковича была дана и в работах [Shaw, Donn, 1968; Kominz, Pias, 1979].

Казалось бы, что после стольких существенных замечаний теория Миланковича (её палеоклиматическая часть) должна быть отвергнута окончательно. Однако будущее опровергло это предположение. Подведем главные, на наш взгляд, итоги работы М. Миланковича.

1) Миланковичем впервые на строгой математической основе рассчитаны количественные изменения приходящей на верхнюю границу атмосферы Земли солнечной радиации, связанные с вариациями трех орбитальных элементов планеты, для последнего миллиона лет. Предложенные им способы вычисления изменения распределения инсоляции использовались и для изучения климатических условий на других планетах Солнечной системы, например, на Марсе [Миланкович, 1939]. Эти исследования получили дальнейшее продолжение [Ward, 1973, 1974, 1982; Pollack, Toon, 1982]. При этом, например, Ward [1974], изучая изменения инсоляции Марса, отметил как один из существенных результатов то, что инсоляция экваториальных и полярных областей становится одинаковой при угле наклона оси вращения Марса 54° – результат, уже полученный Миланковичем на полстолетия раньше.

2) Им разработана одна из первых математических моделей климата, в которой проведен учет как солнечных, так и земных климатических факторов (тепловых свойств атмосферы и земной поверхности, влияния обратной связи при изменении альбедо Земли и т.д.).

3) Предложенная Миланковичем концепция орбитальной теории палеоклимата, объясняющая происходящие в течение последнего миллиона лет оледенения Северного полушария, заключается в основном в следующем. *Климатическая значимость каждого орбитального элемента определяется количественным вкладом этих элементов в суммарную инсоляционную кривую (диаграмму), рассчитанную для изменений инсоляции летних калорических полугодий под 65° с.ш. Оледенения Северного полушария обусловлены наиболее значительными понижениями летней инсоляции высоких широт. Хронология этих оледенений совпадает с временным положением наиболее глубоких минимумов инсоляционной диаграммы.* В принципе такой же подход, с рассмотрением инсоляционных кривых южных широт, как мы видели выше, использовался и для анализа климатических изменений Южного полушария.

4) Большое значение работы М. Миланковича связано с популяризацией идеи орбитальной гипотезы палеоклимата, чему способствовало как признание его теории, так и её критика. Поэтому, несмотря на то, что к концу 60-х годов прошлого века теория Миланковича и в целом орбитальная гипотеза потеряли многих своих сторонников, остались исследователи, которые продолжали верить в связь между орбитально обусловленными вариациями инсоляции и глобальными климатическими колебаниями плейстоцена. Вероятно, по этим же причинам выявление орбитальных периодичностей в климатических записях воспринималось впоследствии именно как доказательство правильности теории М. Миланковича.

## Глава 2. СОПОСТАВЛЕНИЕ ТЕОРИИ М.МИЛАНКОВИЧА С ИЗОТОПНО-КИСЛОРОДНЫМИ ДАННЫМИ ПО ГЛУБОКОВОДНЫМ ОСАДКАМ

### 2.1. Изотопно-кислородный метод изучения палеоклиматических изменений

Выше уже неоднократно говорилось о необходимости получения достоверных и подробных палеоклиматических записей для построения объективной картины глобальных палеогеографических изменений плейстоцена и, на этой основе, создания новых и проверки уже существующих теорий палеоклимата и в первую очередь теории Миланковича. Как известно, геологические разрезы континентальных отложений обладают существенным недостатком – неполнотой геологической летописи. При этом многие геологи полагают, что на стратиграфические перерывы в геологических разрезах, охватывающих значительные интервалы времени, обычно приходится большие интервалы времени, чем на периоды осадконакопления [Боуэн, 1980]. Отсюда понятно желание многих исследователей использовать для изучения геологического прошлого глубоководные осадки океанов. Естественно считать, что обстановка осадконакопления в удаленных от материковых склонов глубоководных равнинных участках океанского дна гораздо более стабильна, чем на континентах. Поэтому после изобретения в 1947 году Б. Кулленбергом поршневого трубки, позволяющей отбирать колонки донных осадков длиной 10-15 метров и выше [Боуэн, 1980; Имбри, Имбри, 1988], исследования глубоководных осадков значительно активизировались.

На это же время приходится развитие нового метода изучения палеоклиматических изменений – изотопно-кислородного, предложенного лауреатом Нобелевской премии Г. Юри в 1947 г. Суть этого метода, который оказался наиболее эффективным при изучении палеоклиматических изменений четвертичного периода, заключается в основном в следующем.

Как известно, кислород имеет три стабильных изотопа,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$ , и  $^{18}\text{O}$ , с соответствующими указанным цифрам атомными весами. В природе, в составе разных веществ, преобладает кислород с атомным весом 16, в 500 раз меньше кислорода  $^{18}\text{O}$  и в 2000 раз –  $^{17}\text{O}$ . Поэтому для практических целей используется отношение более распространенных изотопов  $^{16}\text{O}$  и  $^{18}\text{O}$ , массы которых к тому

же и различаются больше. Изотопно-кислородный (ИК) метод основан на том, что при фазовых переходах (испарении, конденсации, замерзании) воды происходит перераспределение изотопов – изотопно-легкий кислород ( $^{16}\text{O}$ ) переходит более интенсивно в пар при её испарении, а изотопно-тяжелый ( $^{18}\text{O}$ ) – в лед при замерзании или в жидкую фазу при конденсации пара.

Кроме того, отношение  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  содержащего кислород вещества, находящегося в воде и способного обмениваться с ней изотопами, (например, карбоната кальция  $\text{CaCO}_3$ , из которого состоят раковины фораминифер – мельчайших простейших организмов, обитающих в океане), зависит от температуры океанской воды, во многом определяющей и температуру поверхности планеты. Такие процессы изменения изотопного состава могут происходить, пока фораминиферы живы. Когда же они отмирают и захораниваются на дне, образуя осадок, в их известковых панцирях фиксируется то отношение  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ , которое было при жизни. Следовательно, установив экспериментально зависимость этого отношения от температуры, можно определить температуру воды времени захоронения фораминифер и, соответственно, времени формирования того слоя осадка, в котором они находятся. Конечно, последнее справедливо в случае отсутствия перемешивания осадка, например, в процессе его переотложения.

На практике вместо отношения  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  в карбонате определяют относительное отклонение изотопного состава исследуемого образца от международного стандарта, которое обозначают  $\delta^{18}\text{O}_k$  и измеряют в тысячных долях, или промилле (per mil, ‰)

$$\delta^{18}\text{O}_k = \left( \frac{^{18}\text{O}/^{16}\text{O}_{\text{обр}} - ^{18}\text{O}/^{16}\text{O}_{\text{станд}}}{^{18}\text{O}/^{16}\text{O}_{\text{станд}}} \right) \times 1000, \text{‰} \quad /3/$$

В качестве первого международного стандарта (PDV) использовался карбонат кальция из ростра белемнита, отобранного в Верхней Каролине (США) из формации *P-D* отложений верхнего мела [Боуэн, 1969]. Есть несколько полученных экспериментально формул, связывающих температуру воды и  $\delta^{18}\text{O}_k$  образующегося в ней карбоната. Одна из наиболее распространенных – формула Эпштейна – выглядит следующим образом:

$$T^\circ\text{C} = 16,9 - 4,2(\delta^{18}\text{O}_k - \delta^{18}\text{O}_n) + 0,13(\delta^{18}\text{O}_k - \delta^{18}\text{O}_n)^2, \quad /4/$$

где  $\delta^{18}\text{O}_w$  аналогично формуле 3 – разница в изотопном соотношении кислорода воды, в которой происходит образование карбоната, и стандартной средней океанской водой (SMOW) [Боуэн, 1969]. Из уравнения 4 следует, что изотопное отношение карбоната изучаемого образца ( $\delta^{18}\text{O}_k$ ) определяется не только температурой воды, но и ее изотопным составом  $\delta^{18}\text{O}_w$ . При постоянном значении  $\delta^{18}\text{O}_w$  (что считается обычно справедливым для палеоцена, мезозоя) можно вычислить палеотемпературу океанской воды (и, соответственно, планеты), определяя  $\delta^{18}\text{O}_k$ . Согласно /4/, изменение температуры воды на  $1^\circ\text{C}$ , при ее неизменном изотопном составе, приводит к изменению изотопного состава карбоната примерно на  $0,24\text{‰}$ . Современная аппаратура позволяет определять  $\delta^{18}\text{O}_k$  с точностью до  $0,05\text{‰}$ , что равносильно определению изменения температуры воды с точностью до долей градуса.

Одним из первых, кто начал использовать изотопно-кислородный анализ для изучения палеотемператур плейстоцена, был Ч. Эмилиани [Emiliani, 1955]. Им изучено значительное количество колонок, поднятых со дна Атлантического океана и Карибского моря. Полученные по планктонным (обитающим в приповерхностных водах) фораминиферам данные интерпретировались Эмилиани в основном как палеотемпературные. Он допускал, что на изменение  $\delta^{18}\text{O}_k$  карбонатов может влиять не только температура, но и изменение изотопного состава морской воды, связанное с таянием огромных ледниковых покровов в процессе глобальных потеплений. Тем не менее, он считал это влияние незначительным, полагая, что его вклад в общий палеоклиматический сигнал не превышает 25%. Одна из полученных Emiliani [1972] обобщенных палеотемпературных кривых показана на рис. 15.

Временная схема смены теплых и холодных эпох на этой кривой существенно отличается от приведенных выше схем Эберля и Пенка и Брюкнера, которые использовались в свое время для проверки теории Миланковича (рис. 12, 13). Указывая на отличие полученной им картины изменений климата от принятых классических стратиграфических схем четвертичного периода, Эмилиани [1972, с. 270] выделяет несколько главных отличительных особенностей, среди которых отметим две: «(1) Температура колеблется между межледниковыми максимумами и ледниковыми минимумами гораздо более регулярно, чем считалось ранее (средний пе-

риод около 50000 лет)», и «(3) С единственным исключением для стадии 3, температура поднимается до почти одинаковых максимумов в каждом межледниковом пике и опускается до почти идентичного минимума во время каждого оледенения». Таким образом, выявленные повышения и понижения температуры Эмилиани трактовал как межледниковья и оледенения, которые он сопоставлял с пронумерованными им сверху вниз по колонке изотопно-кислородными (ИК) стадиями, причем межледниковьям были присвоены нечетные номера ИК стадий (рис. 15), а оледенениям — четные.



Рис. 15. Обобщенная палеотемпературная кривая Эмилиани (по [Emiliani, 1972])

Однако интерпретация Эмилиани была подвергнута критике. С одной стороны, было показано, что изменения  $\delta^{18}\text{O}_k$  отражают не изменения температуры поверхности океана, а прежде всего изменения глобального объема льда, также представляющие глобальные климатические колебания плейстоцена. Это обусловлено следующими обстоятельствами [Dansgaard, Tauber, 1969]. Выше отмечалось, что при испарении в пар уходит преимущественно легкий изотоп кислорода  $^{16}\text{O}$ , а при конденсации пара осадок, наоборот, обогащается тяжелым изотопом  $^{18}\text{O}$ . Поскольку пар, уходящий с поверхности океана в низких широтах, будет, при его движении в высокие широты, конденсироваться, теряя более тяжелый изотоп, то осадки при каждой последующей конденсации (по мере продвижения пара в более высокие широты и с понижением среднегодовой температуры места) будут все более обогащаться легким изотопом. Это понижение концентрации тяжелого изотопа кислорода в атмосферных осадках по мере повышения широты места зафиксировано инструментально [Dansgaard,

Tauber, 1969; Ферронский, Поляков, 1983]. Следовательно, и образующийся из снега в высоких широтах и при пониженных температурах лед будет иметь также пониженное значение  $\delta^{18}\text{O}$  — около  $-30\text{‰}$  и ниже в ледниках Гренландии, и еще ниже — в ледниках Антарктиды. Как считают Дансгаард и Таубер [1969], аналогичные характеристики должны быть присущи и льдам покровного оледенения. По их расчетам, таяние этого огромного количества изотопно-легкого льда приведет к тому, что запись  $\delta^{18}\text{O}$  в глубоководных осадках будет отражать в основном не изменения температуры океана, а изменения связанного с таянием льдов изотопного состава океанской воды, на долю которого приходится, по их мнению, не менее 70 % измеряемых вариаций  $\delta^{18}\text{O}_k$ .

Такой вывод подкрепляется и заключениями других исследователей. Например, Шеклтон [Shackleton, 1967] определил изменение содержания  $^{18}\text{O}$  по бентосным фораминиферам в колонке А 179-4 Карибского моря, в которой  $\delta^{18}\text{O}$  было определено ранее Эмилиани по планктонным фораминиферам. Бентосные фораминиферы обитают на больших глубинах в придонных слоях воды, температура которых близка к нулю градусов Цельсия и, по мнению Шеклтона, более стабильна, чем температура поверхностных вод. Поэтому, если бы вариации  $\delta^{18}\text{O}$  отражали вариации температуры, то их изменения для бентосных фораминифер были бы существенно меньше, чем для планктонных. Однако амплитуда изменения  $\delta^{18}\text{O}$  и тех, и других видов фораминифер, для одних и тех же глубин отбора образцов по колонке, оказалась одинаковой.

К выводу о том, что ИК кривые глубоководных плейстоценовых осадков отражают в основном не изменения температур, а объема глобального оледенения, пришли независимо Imbrie and Kipp [1971]. Пользуясь созданным ими методом многофакторного палеоклиматического анализа, который учитывал данные об изменениях в численности 25 видов планктонных фораминифер, они показали, что колебания температуры поверхностных вод Карибского моря были примерно в 3 раза меньше, чем это следовало из реконструкций Эмилиани. Это также указывает на то, что в полученные Эмилиани вариации  $\delta^{18}\text{O}$  основной вклад дают не изменения температуры, а колебания изотопного состава воды.

Таким образом, большинство исследователей стали считать, что вариации  $\delta^{18}\text{O}$  отражают в основном, более чем на 70%,

изменения глобального объема льда, а не температуры поверхности океана [Имбри, Имбри, 1988]. Тем не менее, представляется, что количественная оценка влияния того или иного фактора на вариации содержания  $^{18}\text{O}$  в донных осадках не однозначна. Например, в работе [Shackleton, Opdyke, 1973] приведены данные по планктонным и бентосным фораминиферам глубоководной колонки V 28-238, из которых следует, что амплитуда изменений  $\delta^{18}\text{O}$  бентосной кривой (около  $1,5\text{‰}$ ) превышает примерно на  $(0,2-0,4)\text{‰}$  амплитуду планктонной кривой. Однако, с изложенных выше позиций Шеклтона скорее должно быть наоборот, поскольку в ИК кривую по планктонным фораминиферам должно давать дополнительный вклад изменение температуры, так как, по его мнению, оно больше на поверхности, чем в придонных частях океана.

Авторы [Shackleton, Opdyke, 1973] предлагают три возможных, по их мнению, объяснения этого факта, не останавливаясь подробно ни на одном, но оставаясь сторонниками точки зрения, что  $\delta^{18}\text{O}$  отражают колебания глобального объема льда и, соответственно колебания уровня Мирового океана. Однако в последовавшей позже работе [Emiliani, Shackleton, 1974] говорится, что выделение конкретного влияния температуры океана или изотопного состава воды на измеряемый изотопный состав карбонатов фораминифер связано с многими трудно учитываемыми факторами и изотопная кривая все же называется авторами этой статьи палсотемпературной. В дальнейших работах, соавтором которых также являлся один из наиболее авторитетных специалистов по изотопии кислорода Н. Шеклтон [Hays et al., 1976; Imbrie et al., 1984; Shackleton et al., 1984], изотопные данные интерпретировались обычно как отражающие преимущественно глобальный объем льда, однако в недавней публикации [Shackleton, 2000] опять был поднят вопрос о существенном влиянии температуры на изменение  $\delta^{18}\text{O}$  в глубоководных колонках.

Конечно, уточнение интерпретации ИК кривых глубоководных плейстоценовых осадков – важная задача, однако её решение не изменяет основу палеоклиматической интерпретации этих кривых: согласно формуле /4/, и увеличение температуры, и поступление изотопно-легкой талой воды приводят к уменьшению  $\delta^{18}\text{O}_k$  в карбонатах фораминифер, что указывает на потепление, тогда как увеличение  $\delta^{18}\text{O}_k$  говорит о похолодании.

Также критике была подвергнута временная шкала, которую использовал Эмилиани для датировки своих изотопных кривых [Broecker, Ku, 1969; Emiliani, Rona, 1969; Broecker, van Donk, 1970]. В последней из указанных работ рассмотрены возможные ошибки определения абсолютного возраста, использованных Эмилиани для установления временной шкалы, и сделан вывод, что эта шкала должна быть растянута в 1,25 раза. (Заметим, что первоначальная временная шкала [Emiliani, 1955] была ещё менее точна, чем показанная на рис. 15 – основные климатические циклы в ней имели длительность около 40 тыс. лет, что дало повод Эмилиани предположить, что эти циклы связаны с вариациями наклона земной оси). При установлении возрастной шкалы ИК кривых Брокера и Ван Донка привлекали и данные по определению абсолютного возраста коралловых рифов на островах экваториальной зоны Тихого, Атлантического и Индийского океанов [Broecker et al., 1968; Mesolela et al., 1969; Broecker, Donk, 1970; Имбри, Имбри, 1988]. Формирование коралловых террас отражает уровень высокого стояния океана, связанного с таянием покровных ледников, т.е. соответствует глобальным потеплениям. Оказалось, что серии из трех последовательно расположенных террас островов Новая Гвинея и Барбадос имеют датировки около 82, 104 и 125 тыс. лет, что явилось весьма важным для изучения палеоклиматов Земли. (Дальнейшие исследования подтвердили полученные датировки и их интерпретацию [Каплин, Селиванов, 1999]).

Наибольшее повышение уровня океана связывалось с террасой, имеющей возраст около 125 тыс. лет. Это повышение сопоставлялось с наибольшим максимумом стадии 5 (рис. 15), которую впоследствии стали обозначать 5e (или 5.5) и сопоставлять с последним, земским (или микулинским) межледниковьем. Таким образом, длительность последнего климатического цикла межледниковье-оледенение оказалась немного выше 100 тыс. лет. Оценив таким способом скорость седиментации в верхней части исследованной ими колонки V12 –122 из Карибского моря, и считая эту скорость неизменной по всей её длине, Брокер и Ван Донк [1970] получили, что длительность каждого из пяти выделенных ими климатических циклов оказалась в среднем близкой к 100 тыс., а точнее около 90 тысяч лет. Важно отметить, что аналогичная оценка длительности циклов оледенение-межледниковье была сде-

сделана Дж. Куклой при изучении лессово-почвенных разрезов Чехословакии (с использованием палеомагнитных данных для оценки возраста), Р. Фэйрбриджем при исследовании изменений уровня океана, а также при изучении европейских речных террас, изменений направления течения Гольфстрима в плейстоцене [Kukla, 1970; Fairbridge, 1972; Боуэн, 1980; Имбри, Имбри, 1988].

Таким образом, результаты исследований этих *разносторонних* проявлений изменения палеоклимата привели в начале семидесятых годов прошлого столетия к выводу, что основные климатические колебания плейстоцена характеризуются периодом около 100 тысяч лет. Однако данный период, который всеми связывался с вариациями эксцентриситета, отсутствует в инсоляционных кривых Миланковича.

Помимо этого, промежутки времени между формированием упомянутых выше коралловых террас были близки к другому орбитальному периоду – прецессионному, средняя продолжительность которого около 21 тыс. лет. И хотя на инсоляционной диаграмме Миланковича для 65° с. ш. хорошо видны максимумы инсоляции только около 83 и 125 тыс. лет (рис. 11 и 12), Брокер и Ван Донк указали, что на инсоляционной кривой для 45° с. ш. (прецессионный вклад в которую является более заметным, как видно из рис. 10) хорошо отражены все три уровня высокого стояния, сопоставленные с максимумами инсоляции для времени около 83, 105 и 125 тыс. лет. Эти данные привели к оживлению интереса к орбитальной гипотезе палеоклимата и, соответственно, к теории Миланковича.

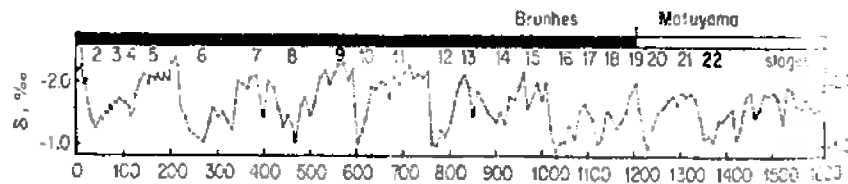


Рис. 16. Изотопно-кислородная запись и палеомагнитные данные по глубоководной колонке V28-238. Сверху – граница между хронами Брунес (черная полоса) и Матуяма (белая полоса). Цифры сверху – номера ИК стадий, внизу – глубина отбора образцов по колонке в см. (По [Shackleton, Opdyke, 1973])

Важной вехой в изучении палеоклиматов плейстоцена было проведенное Шеклтоном и Опдайком изучение колонки V28 – 238, отобранной в экваториальной части Тихого океана на плато Соломона [Shackleton, Opdyke, 1973, 1976]. Дело в том, что для этой колонки, наряду с ИК данными с неплохим разрешением (скорость седиментации в колонке – около 1,5 см в тысячу лет), был впервые зафиксирован и важный хроностратиграфический уровень – инверсия палеомагнитных эпох Матуяма-Брунес (М-Б), возраст которой считался надежно определенным и равным 700 тысячам лет (рис. 16). Наличие этого возрастного репера позволило более уверенно (при допущении постоянства скорости седиментации) датировать основные климатические циклы плейстоцена, отраженные в изотопно-кислородной записи этой колонки.

Таблица 3  
Глубины и оцененные возрасты границ ИК стадий для колонки V28-238 (по [Shackleton, Opdyke, 1973])

Границы стадий	Глубины (см.)	Возраст, тыс. лет
1-2	22	13
2-3	55	32
3-4	110	64
4-5	128	75
5-6	220	128
6-7	335	195
7-8	430	251
8-9	510	297
9-10	595	347
10-11	630	367
11-12	755	440
12-13	810	472
13-14	860	502
14-15	930	542
15-16	1015	592
16-17	1075	627
17-18	1110	647
18-19	1180	688
19-20	1210	706
20-21	1250	729
21-22	1340	782

Также, по сравнению с интерпретацией Эмилиани, были зафиксированы и пронумерованы 5 дополнительных ИК стадий – от 18-й до 22-й включительно. Поскольку инверсия М-Б обнаружена внутри межледниковой ИК стадии 19, в течение хрона Брюнес имело место 8 оледенений и 9 межледниковий, включая современное и соответствующее стадии 19 (рис. 16). Здесь необходимо обратить внимание на то, что ИК стадии 2 и 4, которые Эмилиани принимал за отдельные оледенения (несмотря на то, что, как отмечал он сам, промежуточная стадия 3 была выражена недостаточно хорошо), являются стадиями *одного*, Вюрмского (Валдайского, или Висконсинского) оледенения, как это было ясно показано в работе [Broeker, van Donk, 1970]. Шеклтон и Опдайк также отметили, что таяние льда в течение «теплой» ИК стадии 3 не было полным, т.е. она не является типичной межледниковой стадией. Изучение ИК записи в колонке V28-238 дало возможность установить хронологию ИК стадий с первой по двадцать вторую. Предложенные Шеклтоном и Опдайком оценки возраста границ ИК стадий, на основе предположения о постоянстве скорости седиментации по колонке, равной 1,71 см. в тыс. лет (исходя из возраста инверсии М-Б 700 тыс. лет), приведены в таблице 3. Эти данные впервые наиболее значимо показали, что длительность главных климатических колебаний плейстоцена – циклов межледниковье-оледенение – была близка к 100 тысячам лет.

## 2.2 Спектральный анализ изотопно-кислородных (ИК) данных и разработка ИК климатохроостратиграфической шкалы

Итак, в начале 70-х годов XX столетия, в результате анализа разнообразных палеогеографических данных, полученных как по континентальным, так и по глубоководным отложениям, стало ясно, что главные климатические колебания плейстоцена, по крайней мере в пределах хрона Брюнес, характеризуются периодичностью, близкой к 100-тысячелетнему циклу вариаций эксцентриситета земной орбиты. В то же время появились данные о периодах времени высокого стояния уровня океана за последние 150 тысяч лет, которые позволяли предполагать проявление прецессионного цикла в глобальных климатических колебаниях. В некоторых публикациях также допускалось наличие в палеоклиматических изменениях 40-тысячелетней периодичности, связанной с вариациями

наклона земной оси, однако временная шкала этих изменений не была достаточно надежной [Hays et al., 1976]. К тому же упомянутые данные были практически единичны, что не давало возможности утверждать, что предполагаемое влияние вариаций угла наклона земной оси и прецессии, которые являются основными факторами, управляющими климатическими изменениями в теории Миланковича, было определяющим в процессе глобальных климатических колебаний плейстоцена.

Для решения этой проблемы нужны были непрерывные и длительные палеоклиматические записи с большим разрешением, поскольку, например, отбор образцов в колонке V28-238, осуществленный с интервалом в среднем около 8 см., или через 5 тысяч лет, оказался недостаточным для надежного выявления прецессионных периодов с помощью спектрального анализа – метода, который уже использовался для выявления временных характеристик в изменчивости глубоководных осадков [Pisias et al., 1973]. Как известно, результаты спектрального анализа тем точнее, чем длиннее исследуемый ряд данных и чем больше частота имеющихся в этом ряду анализируемых величин (точек). (Например, обычно считается, что для уверенного выделения определенного временного периода изменений какого-либо параметра необходимо проанализировать ряд данных, длительность которого не менее, чем в 4 раза превышает величину этого периода).

### 2.2.1 Исследование Дж. Хейса, Дж. Имбри и Н. Шеклтона.

Итак, для проведения спектрального анализа необходимо было найти колонку, с одной стороны, охватывающую интервал времени не менее 400 тыс. лет (имея в виду выделение 100-тысячелетней периодичности), с другой стороны, имеющей достаточно большую скорость осадконакопления, чтобы надежно выявить климатические флуктуации с периодом около 20 тысяч лет. (Дело в том, что верхняя часть осадка обычно перемешивается живущими на дне океана организмами, и поэтому практически нет смысла отбирать образцы для анализа чаще, чем примерно через 5 см.). Поиск такой колонки оказался непростой задачей – из нескольких сотен (!) колонок смогли найти две, совместно удовлетворяющие указанным выше требованиям [Hays et al., 1976]. Эти колонки отобраны в Индийском океане с глубин 3135 м. и 3256 м., координаты отбора: колонка RC11-120 – 43°31' ю.ш. и 79°52' в.д.;

колонка E49-18 – 46°03' ю.ш. и 90°09' в.д. Для колонок: 1) проведены измерения  $\delta^{18}\text{O}$  по планктонным фораминиферам, 2) с помощью статистического анализа ансамблей видов радиолярий оценена температура поверхности океана  $T_s$ , и 3) определено содержание вида радиолярий *Cycladophora davisiana*, не использовавшихся при оценке  $T_s$ . Измерения этих трех параметров, соответственно, «...отражают изменения в трех частях климатической системы: покровного оледенения Северного полушария, температуры поверхности приантарктической части Индийского океана и структуры антарктической поверхностной воды» [Haas et al., 1976, p. 1122]. Образцы отбирались с интервалом 10 см., что позволяло, при скорости осадконакопления 3 см./тыс. лет, получать данные с равномерным временным шагом 3 тысячи лет. Полученные палеоклиматические кривые для обеих колонок показаны на рис. 17.

Поскольку в колонке E49-18 представлена запись  $\delta^{18}\text{O}$  от 12-й до начала 5-й стадии, для проведения спектрального анализа использовалась составная запись из двух колонок. При этом принималось во внимание то обстоятельство, что записи ИК стадии 7 и конца стадии ИК 5 в обеих колонках хорошо сопоставимы. Шкала времени для палеоклиматических записей устанавливалась с помощью временных реперов, которыми являлись: начало отсчета (возраст 0); определенный с помощью радиоуглеродного анализа возраст осадков 9,4 тыс. лет на глубине 39 см. в колонке RC11-120; датированная различными способами граница ИК стадий 6 и 5 – 127 тыс. лет, а также определенный исходя из условия постоянства скорости седиментации в колонке V28-238 возраст границ между стадиями 9 и 8, и 12 и 11 по [Shackleton, Opdyke, 1973] – соответственно 251 и 440 тыс. лет. Временные даты для палеоклиматических записей внутри этих реперов определялись, исходя из постоянства скорости седиментации в соответствующих интервалах колонок. Полученные на основе такой временной шкалы данные спектрального анализа изотопно-кислородных кривых показаны на рис. 18. Похожие спектры были получены и для двух других исследованных климатических показателей –  $T_s$  и % *C. Davisiana*.

Наибольшие амплитуды спектров, соответствующие 50-процентному вкладу в исследуемые палеоклиматические кривые, связываются со 100-тысячелетним периодом (реально зафиксированы периоды соответственно 106, 94 и 122 тыс. лет); затем идет

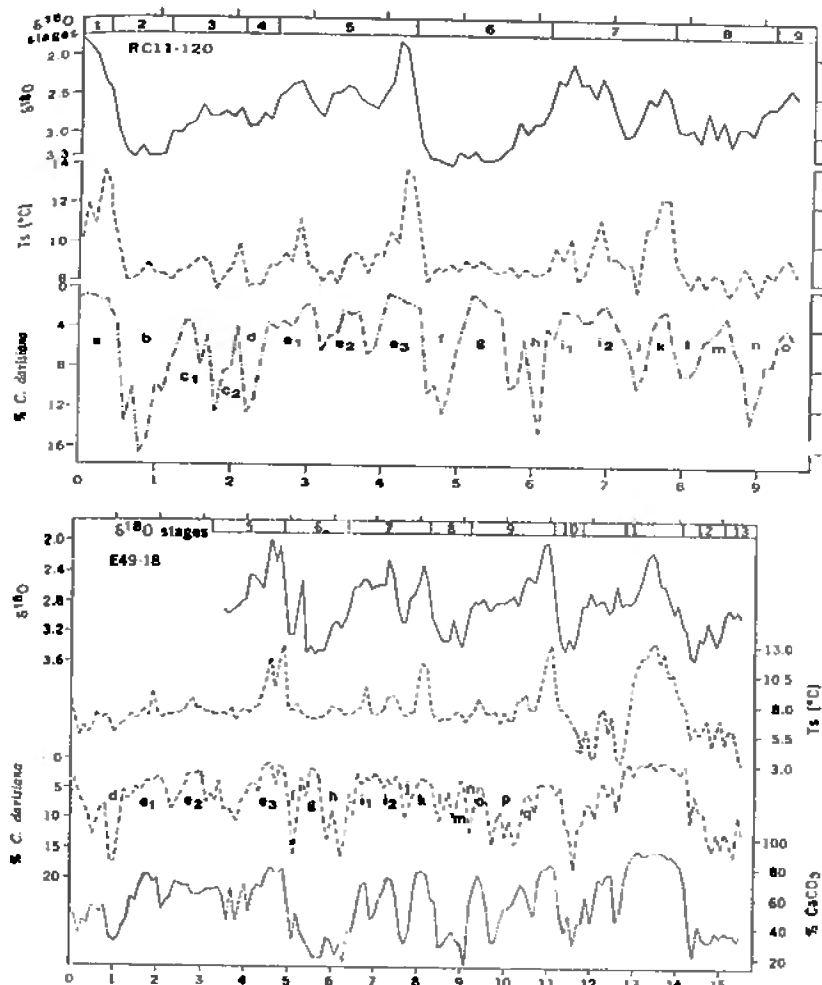


Рис. 17. Палеоклиматические кривые, полученные для колонок RC11-120 и E49-18. Для каждой из колонок сверху вниз: изотопно-кислородная, палеотемпературная и кривая % *C. Davisiana*. Для колонки E49-18 представлена также запись процентного содержания в осадках карбоната кальция. Цифрыверху каждого набора кривых представляют номера ИК стадий, внизу – глубину отбора образцов по колонкам в метрах. Буквы у кривых % *C. Davisiana* обозначают выделенные визуально циклы, сопоставление которых для обеих колонок показывает, что в E49-18 отсутствуют осадки, представленные в верхних 1,5 м. колонки RC11-120.

41-тысячелетний период (25% климатической изменчивости, периоды 43, 40 и 43 тыс. лет), и наименьший вклад в климатические изменения, около 10%, связан с вариациями, характеризующимися 23-тысячелетним периодом (периоды соответственно 24, 23 и 23 тыс. лет).

Таким образом, полученные по трем палеоклиматическим показателям периоды основных климатических изменений

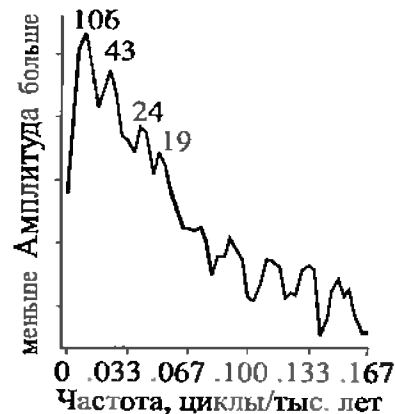


Рис. 18. Спектр составной изотопно-кислородной кривой по колонкам RC11-120 и E49-18. Цифры у кривой – соответствующие наиболее значимым выделенным частотным пикам периоды, в тысячах лет. (По [Hays et al., 1976]).

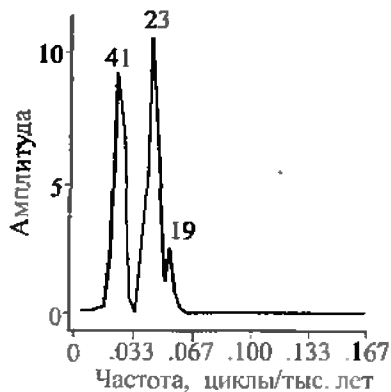


Рис. 19. Спектр кривой летней инсоляции над 60° с.ш. (для последних 468 тыс. лет). Цифры у кривой – соответствующие наиболее значимым выделенным частотным пикам периоды, в тысячах лет. (По [Hays et al., 1976]).

последнего полумиллиона лет практически совпадают с периодами изменений орбитальных элементов. При этом на спектре изотопно-кислородной кривой видно два прецессионных пика, 23 и 19 тыс. лет, которые есть и на спектре кривой летней инсоляции для 60° с.ш., рассчитанной Vernekar [1972], рис. 19. Следовательно

но, данные Дж. Хейса, Дж. Имбри и Н. Шеклтона с большой степенью вероятности указывают на связь между вариациями орбитальных элементов и климатическими изменениями, т.е. подтверждают орбитальную гипотезу палеоклимата.

Далее авторы [Hays et al., 1976] выделили непосредственно в палеоклиматических записях компоненты с периодами 41 и 23 тыс. лет, которые являются основными в инсоляционных кривых Миланковича (рис. 19). При этом они исходили из предположения, что «...радиационно-климатическая система независима от времени и линейна». В частности, это означает, что любая частотная компонента входного (инсоляционного) сигнала будет проявляться на той же частоте, но с некоторым сдвигом по фазе, в виде выходного (палеоклиматического) сигнала. Очевидно, что фазовый сдвиг между теоретически вычисленной кривой вариаций орбитального элемента и выделенной из эмпирических данных палеоклиматической компонентой соответствующей частоты должен быть постоянным во времени. Выделенные с помощью процедуры фильтрации 40- и 23-тысячелетние компоненты климатических колебаний по всем трем изученным в работе [Hays et al., 1976] показателям в целом отставали по фазе от соответствующих кривых изменения угла наклона земной оси и прецессии. Наибольшее отставание ( $9 \pm 3$  тыс. лет) было зафиксировано для 40-тысячелетней компоненты записи  $\delta^{18}\text{O}$  и наименьшее – для % *C. Davisiana*.

Важно отметить, что сравнение вариаций орбитальных элементов с выделенными климатическими кривыми соответствующих периодов показало, что уменьшение угла наклона  $\epsilon$  соответствовало увеличению  $\delta^{18}\text{O}$ , понижению температуры и повышению % *C. Davisiana*. Следовательно, был подтвержден общепринятый механизм климатического влияния вариаций угла  $\epsilon$ , предложенный еще Кроллем: уменьшение  $\epsilon$  приводит к охлаждению высоких широт, а при учете изменений альбедо и к распространению похолодания на всю планету. Аналогичные изменения климатических параметров отмечались и для увеличения прецессионного индекса, соответствующего увеличению расстояния между Солнцем и Землей в июне.

Полученное соотношение изменений  $\delta^{18}\text{O}$ , отражающих колебания глобального объема льда, с кривой прецессии в общем объясняется принятым Миланковичем механизмом климатическо-

го влияния прецессии, согласно которому увеличение расстояния между Солнцем и Землей в июне способствует оледенению Северного полушария: ведь изменения объема льда Северного полушария определяют, в основном, глобальные изменения объема льда в цикле межледниковье-оледенение. Однако, если рассматривать два других палеоклиматических параметра,  $T_s$  и % *C. Davisiana*, которые авторы считают отражающими климатические изменения приантарктической части Южного полушария, то такое простое объяснение не проходит. Мы помним, что прецессионные компоненты инсоляции Северного и Южного полушария *противофазны*. Этим и объясняется данная Миланковичем (см. [Миланкович, 1939, с.174, 175] и раздел 1.6) иная трактовка палеоклиматических изменений Южного полушария, по сравнению с Северным, для последних 130 тысяч лет. Поэтому, если результаты математической обработки палеоклиматических данных, полученные авторами [Hays et al., 1976], верны (а эти результаты критиковались в некоторых работах [Evans, Freeland, 1977; Kominz, Pisias, 1979]), то они противоречат представлениям Миланковича.

Сравнение орбитальных кривых и компонент палеоклиматических записей, выделенных с помощью использования фильтров с базовыми периодами 40 и 23 тыс. лет, показало, что на некоторых временных интервалах (в основном для возраста больше 300 тысяч лет) климатические компоненты опережали по фазе соответствующие орбитальные кривые. Очевидно, так быть не должно, поскольку получается, что климатический отклик опережает вызывающий этот отклик входной (инсоляционный) сигнал (иными словами, следствие опережает причину). Поэтому временная шкала глубоководной записи в соответствующей части колонки сдвигалась таким образом, чтобы обеспечить лучшее фазовое соответствие между палеоклиматической записью и орбитальными кривыми. Естественно, такой метод «орбитальной регулировки» (orbital tuning) приводил и к изменению хронологии изотопно-кислородной шкалы. В результате в работе [Hays et al., 1976] была установлена, в пределах 13 ИК стадий, обновленная ИК шкала, показанная в таблице 4.

Еще один важный результат, полученный в работе [Hays et al., 1976] – совпадение времени оледенений с временными интервалами низких значений эксцентриситета (рис. 20), что в пределах

Таблица 4

Временные границы изотопных стадий, основанные на методе орбитальной регулировки (TUNE-UP chronology), по [Hays et al., 1976]

Границы ИК стадий	2-1	3-2	4-3	5-4	6-5	7-6	8-7	9-8	10-9	11-10	12-11	13-12
Возраст, тыс. лет	10	29	61	73	127	190	247	276	336	356	≈ 425	≡ 457

десяти ИК стадий было отмечено еще в работе [Broeker, van Donk, 1970]. Этот факт, вместе с преобладающей выраженностью 100-тысячелетнего периода в климатических колебаниях плейстоцена, говорит об определяющем влиянии непосредственных, прямых вариаций эксцентриситетной инсоляции на процесс глобальных изменений последнего миллиона лет.

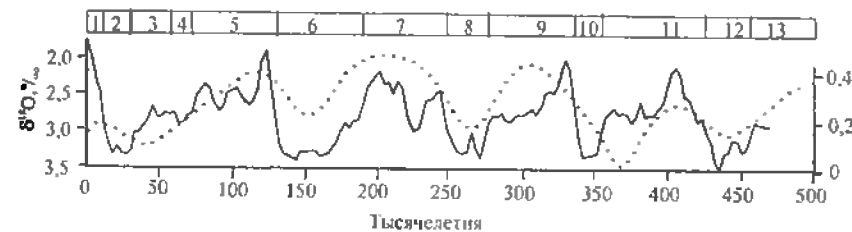


Рис. 20. Составная кривая  $\delta^{18}O$  (сплошная линия) и изменения эксцентриситета (точечная линия, шкала справа) за последние 500 тысяч лет. Цифры вверху – номера ИК стадий. (По [Hays et al., 1976]).

Однако такое заключение противоречит теории М. Миланковича, в которой эксцентриситетным вариациям отводится второстепенная роль – они рассматриваются только как фактор, модулирующий прецессионные колебания. Поэтому, принимая согласующийся с теорией Миланковича линейный механизм трансформации (усиления) инсоляционных сигналов, связанных с прецессией и наклоном земной оси, авторы [Hays et al., 1976, p. 1130] предлагают довольно расплывчатый «нелинейный» механизм, приводящий к проявлению 100-тысячелетнего эксцентриситетного

цикла: «В такой нелинейной системе есть много способов, посредством которых модулирующее влияние эксцентриситета на прецессию может генерировать компоненты 100-тысячелетней изменчивости в геологических записях».

К нелинейному механизму мы еще вернемся ниже, а сейчас отметим, что метод орбитальной регулировки продолжал применяться и далее для уточнения изотопно-кислородной климатохроностратиграфической шкалы. Очевидно, применимость этого метода основывается не только на постулате о проявлении орбитальных периодов в климатических записях, но и на представительности записей, что и показали дальнейшие исследования. Трудности для использования метода в прецессионной полосе частот представляет и наличие двух прецессионных периодов, 23 и 19 тыс. лет, что не учитывалось в работе [Hays et al., 1976] и было принято во внимание Морли и Хейсом [Morley, Hays, 1981] при создании ими нового варианта ИК шкалы.

#### 2.2.2 Создание ИК шкалы SPECMAP.

Большую известность приобрела ИК шкала SPECMAP, разработанная в рамках исследований по одноименному международному проекту [Imbrie et al., 1984]. Значимость и цель работы, результаты которой изложены в публикации, ее авторы обозначают во введении следующими словами [Imbrie et al., 1984, p. 270]: «Ещё с пионерских работ Джеймса Кролля (1864-1875) и Милутина Миланковича (1920-1941) центральной геологической проблемой проверки астрономической теории плейстоценовых оледенений была трудность получения хронологии климатических событий, которая оказалась бы достаточно точной, чтобы служить этой цели, но и достаточно независимой от самой теории, чтобы сделать проверку заслуживающей доверия» (курсив мой – В.Б.).

Поставленная задача решалась следующим образом. Для проведения статистического анализа ИК данных, полученных по планктонным фораминиферам, было отобрано 5 колонок, описание которых дано в таблице 5. В трех наиболее длинных колонках зафиксировано положение инверсии Матуяма-Брюнес (М-Б), которая расположена в 19-й ИК стадии. Авторы указывают, что при выборе мест отбора колонок и анализа полученных по ним ИК записей они исходили из того, что на ИК запись, помимо определяющего влияния изменений глобального объема льда,

Таблица 5

#### Расположение и описание колонок

Названия колонок	Широта	Долгота	Глубина отбора колонки в метрах	Длина колонки (см.)	Средняя скорость седиментации, см/тыс.лет	Средний интервал отбора образцов (тыс.лет)
RC11-120	43°31' S	79°52' E	3193	954	3,3	1,5
V22-174	10°04' S	12°49' W	2630	1566	1,9	4,8
V30-40	00°12' S	23°09' W	3706	755	2,8	1,1
V28-238	01°01' N	160°29' E	3120	1609	1,6	5,0
DSIP502b	11°30' N	79°23' W	3051	3584	2,2	4,7

воздействовали следующие факторы: (1) изменение окружающей температуры воды; (2) изменение соотношения «испарение-выпадение осадков» в месте формирования изучаемых водных масс; (3) влияние жизненно важных экологических изменений среды обитания различных видов фораминифер; (4) избирательное растворение карбонатных панцирей фораминифер; (5) переотложение; (6) биотурбация; (7) стратиграфические нарушения.

ИК записи трех колонок показаны на рис. 21 (записи двух других представлены на рис. 16 и 17). На этих записях выделялись (для дальнейшего сопоставления) наиболее заметные и статистически значимые минимумы и максимумы. Несоответствия ИК записей устранялись путем сравнения с другими колонками так, чтобы запись в отмеченном месте рассматриваемой колонки становилась наиболее, по мнению авторов [Imbrie et al., 1984], достоверной. Так, например, они считают более достоверной запись стадии 5 для колонки V30-40 (три максимума ИК кривой, или минимума  $\delta^{18}O$ ), по сравнению с колонкой DSDP502b (один минимум  $\delta^{18}O$ ) или с колонкой V28-238 (рис. 16 и 21). Была подвергнута ревизии и запись стадии 11 колонки V28-238, которая отличается от записи той же стадии в колонках V22-174 и DSDP502b. Во всех этих случаях описаны и искажения седиментологической записи, связанные в основном с процессом отбора керна, о которых, однако, не было сказано, например, в работе [Shackleton, Opdyke, 1973], где даны первичные сведения о колонке V28-238. Очевидно, мнения авторов относительно типизации ИК записей небезосновательны, однако нельзя не отметить и возможность необъективного отбора ИК записей при таком несколько неопределенном подходе.

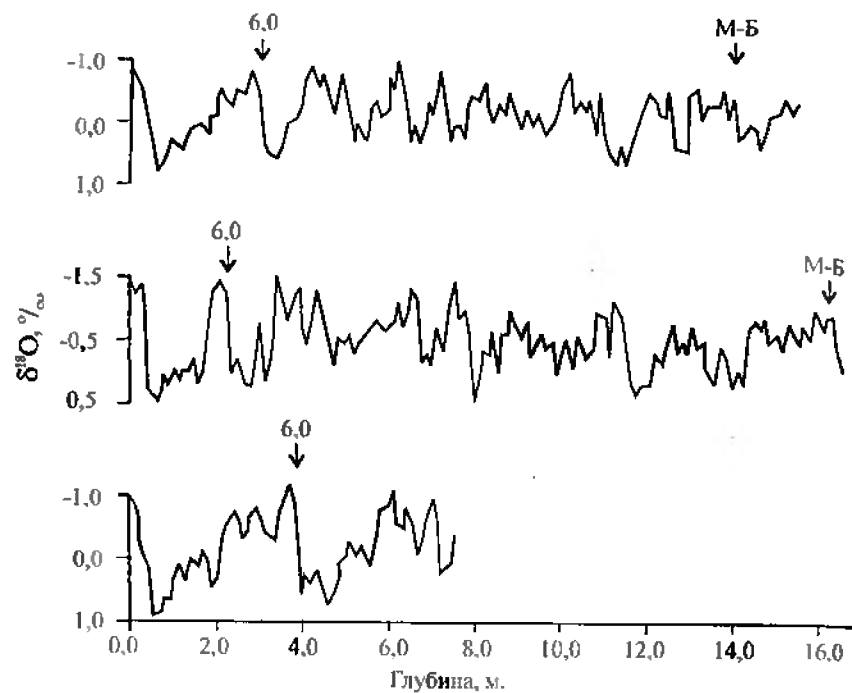


Рис. 21. Изотопно-кислородные кривые колонок (сверху вниз): V22-174, DSDP502b, V30-40. Стрелками показаны: положение инверсии Матуяма-Брюнес (М-Б) и границы ИК стадий 6 и 5 (стадия 6,0). (По [Imbrie et al., 1984])

Далее проводилась процедура обработки данных, похожая на использованную в работе [Hays et al., 1976]. Выделялись временные реперы для создания временной шкалы. Такими реперами были граница ИК стадий 6 и 5 с возрастом 127 тыс. лет и инверсия М-Б, возраст которой, согласно новым абсолютным датировкам [Mankinen, Dalrymple, 1979], принимался равным 730 тыс. лет. Затем с помощью фильтров с периодами 22 и 41 тыс. лет из ИК записи выделялись прецессионная и связанная с наклоном земной оси климатические составляющие. Метод орбитальной регулировки осуществлялся путем подгонки выделенных в ИК записях составляющих под теоретически вычисленные кривые прецессии и угла наклона земной оси. Подгонка проводилась с помощью последовательных приближений, или итераций, когда каждое после-

дующее сравнение выделенных с помощью фильтрации ИК составляющих с орбитальными кривыми проводилось при «улучшенной», т.е. более приближенной к орбитальным кривым, хронологии ИК кривых. Такое улучшение осуществлялось путем сдвига первоначально выделенных на ИК кривой соответствующих максимумов и минимумов до тех пор, пока не достигалось наилучшее соответствие ИК составляющих и орбитальных кривых.

Количество итераций доходило до 120, причем примерно «В середине этого процесса радиометрические временные рамки, соответствующие стадиям 6,0 (граница ИК стадий 6 и 5 – В.Б.) и инверсии Матуяма-Брюнес были удалены» [Imbrie et al., 1984, p. 286]. Таким путем последовательных итераций для каждой ИК записи создавалась своя временная шкала SPECMAP. (Очевидно, такое построение временной шкалы, направленное на проверку астрономической теории, трудно назвать независимым от самой теории, что декларировалось авторами во введении. Правильнее сказать, что эта шкала строилась как наиболее точный временной шаблон для последовательности палеоклиматических событий последних 800 тысяч лет именно на основе уже показанного ранее в работе [Hays et al., 1976] определяющего влияния вариаций орбитальных элементов на климатические изменения последних 450 тысяч лет, а также на основе имеющихся абсолютных временных дат). После того, как все ИК записи, приведенные к новой временной шкале, были нормированы, путем их усреднения и сглаживания была получена составная ИК кривая SPECMAP, показанная на рис.22.

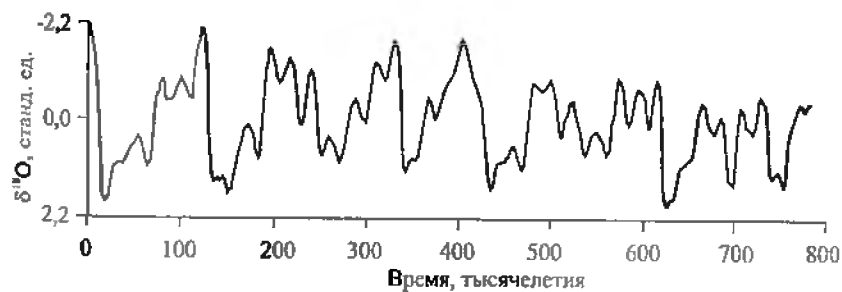


Рис. 22. Изотопно-кислородная кривая SPECMAP, по оси ординат стандартные единицы отклонения от среднего (по [Imbrie et al., 1984]).

Затем проводился сравнительный спектральный анализ кривой SPECMAP и сконструированной авторами кривой ETP, которая представляла собой сумму нормированных изменений всех трех орбитальных элементов (Eccentricity, Tilt, Precession) за последние 800 тысяч лет, причем «прецессионный индекс был взят с обратным знаком так, чтобы положительные отклонения этой кривой имели те же самые климатические следствия в Северном полушарии, что и положительные отклонения изменений эксцентриситета и угла наклона земной оси». Специально отмечу, что кривой ETP не придавалась палеоклиматическая значимость, её построение и использование было вызвано соображениями удобства [Imbrie et al., 1984, p.297]: «Наше намерение выполнить сравнительный спектральный анализ (cross-spectral analysis) относительно кривой ETP, а не относительно отдельных орбитальных кривых, сделано просто для удобства, чтобы получить компактную сводку орбитально-изотопных соотношений по всему наблюдаемому спектру в одной диаграмме. Внутри каждой рассматриваемой полосы частот результаты использования ETP могут быть продублированы непосредственно путем вычисления сравнительных спектров относительно соответствующей орбитальной кривой». Исходя из способа построения ИК кривой SPECMAP, естественно ожидать положительных результатов и сравнительного спектрального анализа, и других тестов, подтверждающих связь ИК записей с вариациями орбитальных элементов.

Несмотря на довольно очевидную, на мой взгляд, зависимость построенной временной шкалы SPECMAP от использования орбитальной (астрономической) гипотезы, авторы [Imbrie et al., 1984, p.301] пишут: «Имея разработанную временную шкалу, точность которой, по нашему мнению, не превышает 5 тыс. лет, мы теперь способны проверить астрономическую теорию эмпирически». Результаты такой проверки, отраженные в выводах, также противоречивы. Например, вывод 1 сформулирован так: «Осцилляции пяти записей  $\delta^{18}\text{O}$ , полученных по пелагическим фораминиферам для мест отбора в открытом океане в низких и средних широтах, хорошо коррелируются для последних 780 тысяч лет. Мы заключаем, что изменение глобального объема оледенений является главным фактором, влияющим на эти осцилляции». С одной стороны, опять же, при использованном способе орбиталь-

ной регулировки трудно ожидать отсутствия корреляции в ИК записях различных колонок. С другой стороны, непонятно, из чего в данной работе следует, что именно объем льда, а не температура, которая также отражает глобальные вариации климата «в местах отбора в открытом океане», будет оказывать определяющее влияние на ИК записи различных колонок. Ведь и изменения объема льда, и изменения температуры, как уже говорилось в разделе 2.1, приводят к качественно одинаковым изменениям  $\delta^{18}\text{O}$  в раковинах фораминифер. А специальные исследования в этом направлении в работе [Imbrie et al., 1984] не проводились.

В выводе 4 заключается, что «В узких частотных полосах, центры которых приходятся на эти четыре частоты (соответствующие периодам 19, 23, 41 и 100 тысяч лет – В.Б.), не менее 85 процентов наблюдаемых изотопных изменений линейны по отношению к орбитальному воздействию». Данное заключение противоречит как выводу работы [Hays et al., 1976], где механизм воздействий вариаций эксцентриситета назван «нелинейным», так и заключению, сделанному в рассматриваемой публикации [Imbrie et al., 1984, p.274] ранее: «...существует широкое согласие относительно общей (если не детализировать) природы физических механизмов, посредством которых климатическая система отвечает на изменения инсоляции, управляемые вариациями наклона земной оси (с периодами около 41 тыс. лет) и прецессии (около 23 и 19 тыс. лет). Наоборот, согласия мало о природе физического механизма, ответственного за климатические осцилляции около 100 тысяч лет, которые доминируют в климатической записи».

В свою очередь, эти высказывания противоречат еще одному утверждению, сделанному на стр. 301 анализируемой статьи: «В среднем механизм Миланковича способен объяснить не менее 77 процентов амплитуды отклонений  $\delta^{18}\text{O}$ , наблюдаемых в изученных здесь записях». Непонятно, о каком «механизме Миланковича» здесь идёт речь, если главные изменения  $\delta^{18}\text{O}$  связаны с 100-тысячелетним циклом, который, как уже упоминалось выше, и как неявно признается авторами, отсутствует в теории Миланковича.

Последний, пятый вывод работы [Imbrie et al., 1984] практически повторяет основное заключение, сделанное в работе [Hays et al., 1976] о том, что «вариации геометрии земной орбиты» являются главной причиной плейстоценовых оледенений.

Тем не менее, ИК шкала SPECMAP получила широкое распространение. Возрасты границ ИК стадий в этой шкале приведены в таблице 6. Возраст инверсии Матуяма-Брюнес, оцененный

Таблица 6

Возрасты границ ИК стадий по шкале SPECMAP

Границы стадий	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11
Возраст, тыс. лет	12	24	59	71	128	186	245	303	339	362
Границы стадий	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	
Возраст, тыс. лет	423	478	524	565	620	659	689	726	736	

авторами [Imbrie et al., 1984] по методике орбитальной регуляции, равен  $734 \pm 5$  тыс. лет. При этом ими отмечается, что оценка возраста инверсии Р. Джонсоном [Johnson, 1982] удревнена на 50 тыс. лет. Однако, как оказалось впоследствии, эта оценка (790 тыс. лет) является более правильной, чем дата, полученная в ходе создания широко разрекламированной шкалы SPECMAP. Работа Джонсона, который, на мой взгляд, проявил и независимость мышления, и творческий подход к делу, стоит того, чтобы остановиться на ней отдельно.

### 2.2.3 Определение нового возраста палеомагнитной инверсии Матуяма-Брюнес.

Анализируя недостатки использованного для определения возраста инверсии М-Б калий-аргонового метода абсолютного датирования, среди которых упоминается точность определения констант радиоактивного распада, степень сохранности дочерних продуктов распада в изверженных породах с течением времени, атмосферные загрязнения, автор предлагает использовать для датировки выделенные в глубоководных записях орбитальные циклы, и прежде всего прецессионный. Он считает, что положение инверсии в осадке может быть определено с точностью до долей 22-тысячелетнего прецессионного периода. Также Johnson [1982, p. 136] справедливо замечает: «Однако, прецессионные вариации не всегда рельефны или ясно видны, и, взятые отдельно, иногда приводят к сомнительным корреляциям на длительных временных интервалах. Более многообещающий метод, использованный в настоящей работе, заключается в идентификации длиннопериодных

ледниковых экстремумов с помощью специфических интервалов низкой инсоляции». Далее, на стр. 138, Джонсон уточняет сказанное: «Наиболее глубокие минимумы изотопных соотношений (имеется в виду наибольшее увеличение содержания тяжелого изотопа кислорода, соответствующее оледенениям – В.Б.) приходятся на периоды низкого эксцентриситета, обычно около окончания такого интервала и в связи с низкой летней инсоляцией для всех широт Северного полушария».

Предложение использовать совместно эксцентриситетный и прецессионный циклы для датировки ИК стадий есть *первая принципиальная отличительная особенность* методики Джонсона от способа хронометрирования, использованного Имбри с коллегами [1984]. Это предложение ставит его в ряд с наиболее видными специалистами по прикладному использованию орбитальной гипотезы палеоклимата. Во всяком случае, из его методики прямо вытекает связываемый часто с именем Хилгена [Hilgen, Langereis, 1989; Hilgen, 1991] и восходящий к Кроллиу так называемый метод астрохроностратиграфии, применяемый для установления хронологии циклически построенных толщ кайнозоя и мезозоя. Метод основан (см. Гл. 4) на использовании модуляции вызываемых прецессией климатических изменений вариациями эксцентриситета.

Уже одно предложение использовать совпадение минимумов эксцентриситета с максимальными значениями  $\delta^{18}\text{O}$  (которым соответствуют минимумы ИК кривых, поскольку последние изображаются обычно так, что по оси ординат «у» вверх откладываются уменьшающиеся величины  $\delta^{18}\text{O}$  – см. рис. 16, 17, 21, 22) приводит к оценке возраста инверсии М-Б, близкой к 790 тысячам лет. Такая оценка получается из следующих простых соображений. Инверсия М-Б в колонках V28-238 и V28-239, с которыми работал Джонсон, приходится на начало ИК стадии 19 [Johnson, 1982]. Восьмой от современности минимум эксцентриситета, приходящийся на холодную стадию 20, соответствует времени 814 тыс. лет, а следующий за ним максимум эксцентриситета, который логично сопоставить с теплой 19-й ИК стадией, имеет возраст 782 тыс. лет, согласно расчетам [Berger, Loutre, 1991]. Поэтому граница между 20-й и 19-й стадиями оценивается временем около 798 тысяч лет (не учитывая времени задержки климатического отклика на орбитальный инсоляционный сигнал), и инверсия М-Б, следо-

вательно, будет иметь возраст около 790 тысяч лет. Конечно, такая корреляция возможна только при условии выполнения сделанного Джонсоном предположения, что закономерности, полученные Хейсом с соавторами [1976] для последних 450 тыс. лет (в частности, совпадение оледенений с интервалами минимальных значений эксцентриситета), сохраняются в течение всего хрона Брюнес.

Однако, из полученной оценки возраста инверсии М-Б (и, следовательно, возраста 19-й ИК стадии) следует существенная неоднородность осадконакопления в колонке V28-238, использование которой во многом определяло ИК хронологию в работах [Hays et al., 1976; Imbrie et al., 1984]. Здесь мы приходим к второй отличительной особенности методики Джонсона от методики Имбри с коллегами, которая заключается в *практическом* учете обычно только декларируемой возможности неравномерной скорости седиментации и искажений палеоклиматической (изотопно-кислородной) записи.

Джонсон использовал диаграмму Шоу [Shaw, 1964], в которой сопоставлялись глубины хорошо выделяемых и сопоставимых особенностей (наиболее характерных экстремумов ИК записи, или каких-либо стратиграфических, биостратиграфических уровней) двух исследуемых колонок, в том числе и положение инверсии М-Б. Глубины выделенных в каждой из колонок особенностей отмечались соответственно по осям «х» и «у». В своей работе Джонсон анализировал две близкорасположенные колонки V28-238 и V28-239 (рис. 16, 45) с неодинаковыми скоростями седиментации, положение инверсии М-Б в которых было зафиксировано соответственно на глубинах 12 м. и 7 м. Если режим осадкообразования в обеих колонках был однообразным (т.е. расстояние между последовательно отмечаемыми сопоставимыми особенностями в обеих колонках менялось пропорционально), диаграмма Шоу представляла собою прямую линию, что наблюдалось в пределах 10 верхних ИК стадий для обеих колонок. Однако ниже в колонках были выявлены неоднородности режима осадкообразования. Наиболее существенные отклонения диаграммы от линейности проявились для стадий 15-19. Было показано, что неоднородности связаны с колонкой V28-238. (Во всех случаях отклонений от однородности Джонсон приводит дополнительные данные, указывающие на вероятные причины отклонений – изменения интен-

сивности растворения карбонатов, механические нарушения при отборе керн, другие причины). Поэтому для возрастных оценок ИК записи в пределах первых 11 стадий Джонсон использовал колонку V28-238, в которой скорость седиментации, и, следовательно, информативность данных были выше, а для ИК стадий 12-20 – колонку V28-239.

Возрастные оценки проводились по уже упомянутой выше методике. ИК запись сравнивалась визуально с кривыми инсоляции, рассчитанными для летних калорических полугодий двух широт, 70° с.ш. и 35° с.ш. Очевидно, преобладающий вклад в первую кривую определяется вариациями угла наклона земной оси (период 41 тыс. лет), во вторую – прецессией (период около 21 тыс. лет, см. рис. 10). При сравнении особое внимание уделялось интервалам минимальных значений эксцентриситета, поскольку возраст фаз максимального похолодания на ИК кривой сопоставлялся с промежутками времени, соответствующими наиболее низким значениям инсоляции, обнаруженным вблизи минимумов эксцентриситета, для обеих инсоляционных кривых. Такая оценка возраста ИК стадий проводилась последовательно, наращивая возраст, от начала колонки до инверсии М-Б и ИК стадии 20.

В методе Джонсона есть недостатки. Например, минимумы инсоляции, сопоставляемые им с наиболее сильными похолоданиями (увеличениями объема льда), являются часто менее глубокими, чем некоторые минимумы инсоляции, приходящиеся на межледниковые стадии, что, конечно, нелогично. Не всегда однозначно можно сопоставить экстремумы ИК и инсоляционных кривых (из-за чего, возможно, Джонсон и не стал представлять ИК шкалу для всего хрона Брюнес). Однако указанные выше положительные особенности его подхода, перекрывают эти недостатки.

Почему Имбри с коллегами [1984] не учли результаты работы Джонсона, остаётся неясным. Скорее всего, это может быть связано с тремя причинами:

- 1) с некритичным отношением Имбри и др. к методу калий-аргонового датирования; 2) с использованием Джонсоном 100-тысячелетних эксцентриситетных циклов, отсутствующих в теории Миланковича, и применяемых как бы «незаконно»; 3) с обнаружением Джонсоном существенных седиментационных нарушений в колонке V28-238, которая была одной из наиболее продол-

жительных колоннок, использованных Imbrie et al. (1984) для создания шкалы SPECMAP.

Лишь через 8 лет после опубликования статьи [Johnson, 1982] сделанная в ней оценка возраста палеомагнитной инверсии Матуяма-Брюнес была подтверждена в работе [Shackleton et al., 1990] и затем принята повсеместно. Новая оценка была получена при анализе значительно более подробной ИК записи колонки 677, скорость осадконакопления в которой была около 4 см./тыс. лет, т.е. более, чем в 4 раза выше, чем в колонке V28-239 [Shackleton, Opdyke, 1976]. Возраст инверсии М-Б, которую авторы [Shackleton et al., 1990, p.257], не имея палеомагнитных данных по колонке, совмещают с основанием стадии 19, оценивается величиной 0,78 млн. лет. Увеличение возраста связывается ими с обнаружением «дополнительного цикла наклона земной оси в нижней части хрона Брюнес», «дополнительного» по сравнению с орбитальными циклами, выделенными исследователями, оценивающими возраст инверсии в глубоководных осадках величиной 0,73 млн. лет. Новая оценка возраста инверсии М-Б, полученная с помощью метода орбитальной регулировки, была подтверждена новыми радиометрическими датами, полученными на основе аргон-аргонового метода датирования [Spell, McDougal, 1992; Tauхе et al., 1996].

Отмечу ИК шкалу, разработанную Бассино с соавторами [Bassinot et al., 1994] при изучении колонки MD900-963, поднятой в Индийском океане. ИК запись в этой колонке, на мой взгляд, является наиболее представительной и качественной, что обусловлено: а) наличием для колонки палеомагнитных данных и, в отличие от колонки 677, непосредственным определением положения инверсии М-Б; б) достаточно высокой скоростью седиментации – более 4 см./тыс. лет; в) небольшими седиментационными нарушениями по длине колонки до 41 м. (по 22-ю ИК стадию включительно), за исключением интервала, соответствующего стадии 14 (об этом еще будет сказано в главе 5). Возрасты границ ИК стадий согласно ИК шкале Бассино и др., приведены в таблице 7, а возраст инверсии Матуяма-Брюнес определен величиной  $775 \pm 10$  тыс. лет, что связывалось с обнаружением двух дополнительных, по сравнению со шкалой SPECMAP, прецессионных циклов.

Таким образом, выявление орбитальных периодов в изотопно-кислородных записях глубоководных осадков, впервые

Таблица 7

Возрасты границ ИК стадий по шкале [Bassinot et al., 1994]

Границы стадий	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11
Возраст тыс. лет	11	24	57	71	127	186	242	301	334	364
Границы стадий	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	21-22
Возраст тыс. лет	427	474	528	568	621	659	712	760	787	865

наиболее убедительно проведенное в работе [Hays et al., 1976], не только подтвердило орбитальную гипотезу палеоклимата, но и послужило основанием для создания ИК климатохроностратиграфической шкалы плейстоцена [Hays et al., 1976; Morley, Hays, 1981; Johnson, 1982; Imbrie et al., 1984; Ruddiman et al., 1986; Shackleton et al., 1990; Bassinot et al., 1994]. В то же время, метод орбитальной регулировки, при использовании только 23- и 41-тысячелетних орбитальных периодов, как мы видели на примере создания шкалы SPECMAP, бессилён в установлении хронологии ИК записей при наличии дефектов в этих записях, например, связанных с седиментационными нарушениями. Поэтому использование абсолютных дат (радиометрических или соотносимых с возрастными палеомагнитных инверсий) при создании хронологических шкал, конечно, необходимо. Правда, как показывает опыт определения возраста инверсии М-Б, абсолютные даты тоже нельзя абсолютизировать.

Отмеченный нами ряд противоречий в теоретической интерпретации ИК данных указывает на недостатки интерпретации. На мой взгляд, они прежде всего связаны с тем, что при сопоставлении теории и эмпирики не были недвусмысленно определены противоречия теории Миланковича эмпирическим данным, рассмотрение которых будет проведено в следующем разделе.

### 2.3. Основные противоречия теории М. Миланковича эмпирическим данным

Анализ палеоклиматических, и в первую очередь изотопно-кислородных, данных, подтвердивший орбитальную гипотезу палеоклимата, в то же время выявил и существенные противоречия теории Миланковича эмпирическим данным. Большинство проти-

воречий, указанных ниже, было отмечено в качестве отдельных несогласованностей многими исследователями [Имбри, Имбри, 1988; Hays et al., 1976; Berger, 1978, 1980, 1988; Imbrie, 1982, Imbrie et al., 1984, 1992, 1993; Broecker, Denton, 1989 и многие другие]. При этом неявно как бы предполагалось, что отдельные несогласованности будут устранены при модернизации теории. Поэтому, видимо, и попытки обобщения несоответствий между теорией и эмпирическими данными были сделаны довольно поздно, только в работах [Большаков, 1998-2001; Большаков, Большаков, 1999; Elkibbi, Rial, 2001]. Мною отмечаются следующие основные противоречия теории Миланковича эмпирическим данным, полученным для последних 2-х миллионов лет.

(1). Климатическая цикличность хрона Брунес определяется в первую очередь 100-тысячелетней периодичностью, связываемой с вариациями эксцентриситета, непосредственное влияние которых не учитывается в теории Миланковича. Сказанное наглядно иллюстрируется сравнением рис. 18 и 19, из которых очевидно отсутствие 100-тысячелетнего цикла в спектре инсоляционной кривой и его преобладание в спектре палеоклиматических ИК изменений. Напомню, что преобладание 100-тысячелетнего цикла для последнего миллиона лет проявляется не только в палеоклиматических данных для донных осадков, но и для континентальных отложений. Следующие два противоречия связаны с первым, которое получило название «Проблема 100-тысячелетнего периода» (100-kyr problem), однако они имеют свою смысловую значимость.

(2). Количество оледенений и их датировки расходятся в целом с аналогичными характеристиками оледенений, выделяемых Миланковичем при использовании инсоляционной диаграммы, рассчитанной им для изменений инсоляции летних полугодий под 65° с.ш. Это не исключает того, что некоторые даты могут быть близки, однако в целом соответствия нет (см. рис. 12, 13, 22, 36, табл. 7). Здесь уместно напомнить, что от теории Кролля отказались прежде всего потому, что предсказанная им дата последнего оледенения (около 80 тысяч лет) оказалась неверной.

(3). Оледенения, согласно эмпирическим данным (см. рис. 20), приходятся на минимальные значения эксцентриситета, тогда как в теории Миланковича они в основном соответствуют максимальными его значениям. Как мы помним, оледенения в теории Ми-

ланковича определяются наименьшими значениями инсоляции на его инсоляционной диаграмме. Поскольку основной вклад в суммарную инсоляцию дают вариации, связанные с прецессией и наклоном земной оси, то минимумы суммарной кривой будут наиболее глубокими при совпадении минимумов инсоляции обеих составляющих. Из двух составляющих только прецессионная зависит от величины эксцентриситета, причем так, что и минимальные и максимальные её значения приходится на максимальные величины эксцентриситета (см. уравнение 1, рис. 5 и 8). Чем больше величина  $e$ , тем ниже будут и минимумы, и выше максимумы прецессионной инсоляции. Поэтому самые глубокие минимумы суммарной инсоляции на диаграммах Миланковича наиболее вероятны при максимальных значениях эксцентриситета. Сказанное подтверждается рисунком 23, на котором сопоставлены даты оледенений по Миланковичу и использованная им кривая изменений эксцентриситета, приведенная в работе [Berger, 1988]. Мне не известны работы, где бы отмечалось указанное противоречие. Тем не менее, его осознание важно для понимания механизма оледенений.

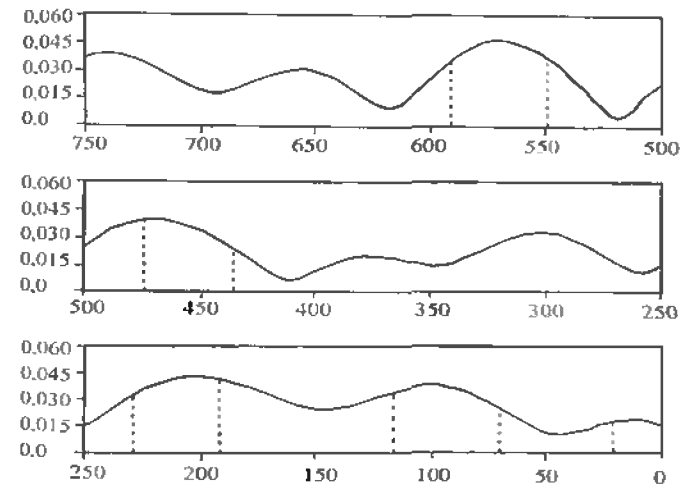


Рис. 23 Положение определенных М. Миланковичем дат оледенений (штриховые линии) относительно использованных в его вычислениях изменений эксцентриситета (сплошная линия). По осям абсцисс – время, в тысячах лет до современности, по осям ординат – величины эксцентриситета. График эксцентриситета взят из работы [Berger, 1988, Fig. 9].

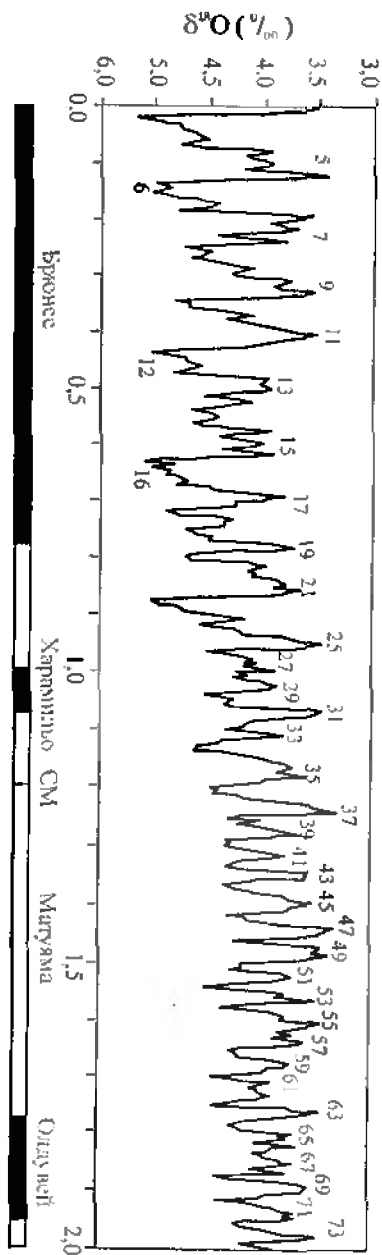


Рис. 24 Изотопно-кислородная кривая Шеклтона и палеомагнитная шкала в пределах двух миллионов лет (по [Shackleton, 1995]). Цифры у кривой - ИК стадии, в интерпретации Шеклтона. По оси абсцисс - время, в млн. лет до современности. SM - палеомагнитный эпизод Кофс-Маунтин. Черные и белые участки на палеомагнитной шкале - соответственно прямая полярность хрона Брюнес и субхрон Харпаллио и Олдувей и обратная полярность хрона Матуйама

(4). Глобальные климатические изменения, по мнению большинства исследователей [Шварцбах 1955; Боуэн, 1980; Брокер, Дентон, 1990; Broecker, Denton, 1989], синхронны в обоих полушариях (по крайней мере, для максимума последнего оледенения и оптимума голоцена), а рассчитанные Миланковичем инсоляционные кривые для  $65^\circ$  южной и северной широты дают расхождения не менее 5 тысяч лет для времени минимума и максимума инсоляции (соответственно, около 30 и 24, и 5 и 11 тыс. лет назад), соотносимых с названными климатическими событиями. Как мы видели выше (см. цитату на стр. 66-67), Миланкович подходил к интерпретации и анализу ледниковых событий противоположных полушарий именно с позиций рассчитанных им инсоляционных кривых, разных для отдельных полушарий. И именно так его понимали и другие исследователи (см. 67). Следовательно, отмеченное противоречие не формальное, оно отражает действительное понимание Миланковичем *разновременности* климатического воздействия рассчитанных им вариаций инсоляции, в различных полушариях. А используемое часто «простое» объяснение синхронности тем, что оледенения Северного полушария определяют *глобальные* климатические колебания, поскольку именно с этим полушарием связано в основном изменение глобального объема льда в цикле оледенение-межледниковье, не снимает самого противоречия. Такое объяснение, наоборот, показывает, что в теории Миланковича не учитывались важные чисто земные факторы, что признавал и он сам.

(5). Около миллиона лет назад произошла смена основного периода климатической цикличности от 41 тыс. лет к 100 тыс. лет [Ruddiman et al., 1986; Shackleton et al., 1990], тогда как по ТМ это быть не должно, поскольку периоды вариаций орбитальных элементов не менялись существенно в указанное время [Шараф, Будникова, 1967, 1969; Berger, 19786, Berger, Loutre, 1991; Laskar et al., 1993]. Данное противоречие было впервые отмечено в работе [Ruddiman et al. 1986]. Для иллюстрации смены климатической ритмики на рубеже одного миллиона лет назад на рис. 24 показана часть составной ИК кривой, приведенной в работе [Shackleton, 1995] для последних 6 млн. лет.

(6). Есть еще одно несоответствие теории и эмпирики, которое обычно не отмечается, но которое является важным для понима-

ния механизма воздействия вариаций инсоляции на климат. Климатическое воздействие прецессионного и связанного с наклоном земной оси сигналов, дающих вклад в инсоляционную диаграмму Миланковича, определяется амплитудой соответствующих инсоляционных сигналов (см. рис. 19), которые почти одинаковы, с небольшим преобладанием прецессионной компоненты (как отмечалось выше, эти сигналы, по Миланковичу, равны на более высокой широте  $68^\circ$ ).

Однако практически для всех палеоклиматических записей последнего миллиона лет [Hays et al., 1976; Imbrie et al., 1984, 1992, 1993; Hagelberg et al., 1991; Bassinot et al., 1994, Berger, 1999 и другие] спектральный анализ показывает, что амплитуда климатических изменений, характеризуемых периодом 41 тыс. лет, выше, и часто существенно, амплитуды 23-тысячелетних изменений (рис. 18). А в интервале времени 2-1 млн. лет назад, как известно, климатические изменения связываются в основном с периодом 41 тысяча лет. Данное несоответствие, которое следует также отнести к разряду противоречий, не согласуется с концепцией «клинейного усиления» орбитальных сигналов, поддержанной последователями М. Миланковича [Hays et al., 1976; Imbrie et al., 1984, 1992, 1993 и многие другие].

В работе [Elkibbi, Rial, 2001, p.161] обсуждаются «пять главных проблем», которые астрономическая «теория должна разрешить, чтобы продолжать существовать». Помимо двух противоречий, отмеченных нами в пунктах (1) и (5), авторы выделяют еще три: «3) отсутствие заметного спектрального пика, соответствующего периоду 413 тыс. лет для записей последних 1,2 млн. лет; 4) изменение продолжительности циклов оледенений в последние 800 тыс. лет и 5) присутствие неорбитальных спектральных пиков в климатической записи».

Строго говоря, проблемы 3) и 4) не относятся к теории Миланковича, поскольку в ней отсутствует эксцентриситетный вклад в инсоляционную кривую (413 тыс. лет – «большой» эксцентриситетный период, приведенный в публикации А. Берже 1977 года [Berger, 1977], однако позже [Berger, Loutre, 1991] его стали оценивать величиной 404 тыс. лет). Тем не менее, адекватная теория палеоклимата, конечно, должна эти проблемы решить. (Правда, на мой взгляд, проблема 4) решается довольно просто. Дело в

том, что словосочетание «100-тысячелетний период» является условным названием «малого» эксцентриситетного периода, главными гармониками которого являются периоды около 95 и 125 тысяч лет (рис. 56). Поскольку изменения  $e$  не проявляют строгой периодичности во времени, расстояния между минимумами эксцентриситета (рис. 5а) менялись за последний миллион лет от 64 до 113 тыс. лет. Последнее обстоятельство и явилось причиной изменения продолжительности циклов оледенений, поскольку эти циклы связываются обычно с влиянием эксцентриситета (или прямым, или косвенным, через модуляцию прецессии).

Пятая проблема, отмеченная в статье [Elkibbi, Rial, 2001], может быть отнесена не к разряду противоречий теории Миланковича, а, скорее, к разряду несоответствий, которые как раз можно устранять путем разработки новой, улучшенной версии орбитальной теории.

Перечисленные выше противоречия достаточно серьезны, чтобы сделать аксиоматический вывод: «Теория, которая противоречит эксперименту – неверна». Однако, наоборот, теорию Миланковича стали возвышать. Дж. Кукла [Kukla, 1976], узнавший о результатах работы [Hays et al., 1976] еще до её опубликования, откликнулся статьей «Возрождение Миланковича», а А. Берже [Berger, 1988] назвал 70-е годы XX столетия «Эпохой Возрождения Миланковича» (“Milankovitch Renaissance”). Более того, в 1993 году Секцией океана и атмосферы Европейского Геофизического Союза (EGS) была учреждена Медаль Милутина Миланковича, которая должна вручаться за выдающиеся исследования в области длиннопериодных климатических изменений и моделирования. В статьях, касающихся палеоклиматов плейстоцена и более древних периодов, стали широко использоваться словосочетания типа “Milankovitch mechanism” (механизм Миланковича), “Milankovitch forcing” (воздействие Миланковича), “Milankovitch frequencies” (миланковичские частоты, или периоды) и т.д.

Все цитированные словосочетания должны бы отражать основное содержание орбитальной гипотезы палеоклимата – связь между орбитальными вариациями и глобальными климатическими изменениями, оледенениями и межледниковьями. Однако о каком «механизме Миланковича» может идти речь, если основные, 100-тысячелетние колебания климата плейстоцена, как раз и представ-

ляющие оледенения и межледниковья, не были предсказаны теорией Миланковича? Что же касается механизма «нелинейного» усиления прецессионного и связанного с наклоном земной оси инсоляционных сигналов, заложенного в теории Миланковича, то этот механизм, как было показано, также не соответствует эмпирическим данным. (Мнение о «нелинейном» механизме усиления *всех* орбитальных сигналов было недавно высказано в работе [Elkibbi, Rial, 2001]).

Почему орбитальные периоды климатических изменений называют «миланковичскими», если вариации орбитальных элементов вычислялись специалистами по небесной механике и астрономами (Д'Аламбером, Лапласом, Лагранжем, Леверье, Стоквеллом, Пильгримом, Мишковичем) [Миланкович, 1939; Имбри, Имбри, 1988], а климатическая значимость вариациям всех орбитальных элементов придавалась Кроллем еще до рождения Миланковича? Более того, среди этих периодов опять же есть 100-тысячелетний период вариаций эксцентриситета, непосредственным влиянием которого Миланкович в своей теории пренебрег. Термин «воздействие Миланковича» также используется обычно некорректно. Очевидно, он должен обозначать инсоляционный сигнал, рассматриваемый теорией Миланковича, т.е., строго говоря, изменение инсоляции на верхней границе атмосферы, относящееся к определённой широте (65° с. ш.) и летнему калорическому полугодью. Однако с конца семидесятых годов в качестве инсоляционного сигнала обычно используется предложенная Берже среднемесячная, а не полугодовая инсоляция, либо, например, и зимняя, и летняя инсоляция [Kutzbach, Street-Perrot, 1985].

На мой взгляд, такие не имеющие реальной основы словосочетания, подобно модным слоганам в современной рекламной кампании, могут только ввести (и вводят) в заблуждение, вызывая дальнейшие ошибки и уводя в сторону от решения реальных задач развития орбитальной теории палеоклимата.

Было бы полезно выяснить природу таких неадекватных высказываний. Конечно, сказалась эйфория, вызванная доказательством связи между вариациями орбитальных элементов Земли и глобальными изменениями климата. А поскольку теория Миланковича была ещё на слуху и заключала в себе элементы математического анализа (что, конечно, необходимо для полноценной те-

рии, однако не должен быть забыт и физический смысл математических выкладок), то её и выбрали в качестве знамени, под которыми объединились сторонники возрождающейся орбитальной теории палеоклимата. Здесь уместно отметить один факт, подтверждающий такое мнение. В первых, основополагающих работах Дж. Хейса и Дж. Имбри с коллегами [Hays et al., 1976; Imbrie et al., 1984] выделение в ИК записях орбитальных циклов проводилось с помощью сопоставления этих записей с *вариациями орбитальных элементов*, вычисленных А. Вернекарром и А. Берже, а не с *вариациями инсоляции*, вычисленными М. Миланковичем, или по его алгоритму, теми же Вернекарром и Берже. Иными словами, теория Миланковича на деле оказалась здесь как бы ни при чем.

Другая очевидная причина – незнание, или *неосознание* многими авторами и *пользователями* приведенных выше словосочетаний ни истории развития орбитальной теории, ни её основ, в том числе и основ теории Миланковича. Высказанное замечание относится и к отечественным, и к зарубежным исследователям. Правда, в России анализом теории Миланковича практически не занимался никто. (В работах Ш.Г. Шараф и Н.А. Будниковой [1967, 1969] были проведены новые, более точные вычисления вариаций орбитальных элементов, которые использовались для расчёта инсоляционных кривых по методу Миланковича, а К.К. Марков [Марков, Величко, 1967] и М.И. Будыко [1977] отзывались о теории критически. В остальных известных мне работах только пользовались выводами теории, не подвергая её анализу. Например, А.С. Монин и Ю.А. Шишков [1979, с. 25], приводя спектры инсоляционной и ИК кривых, показанные нами на рис. 18 и 19, несмотря на их очевидные различия, делают вывод о «торжестве астрономической теории Миланковича»).

Однако и за рубежом, где этой теории было уделено несравненно больше внимания, также широко распространено подобное непонимание. Например, в статье К. Кови [1984, с. 26], опубликованной в журнале «В мире науки» (русский перевод журнала «Scientific American») говорится, что теория, объясняющая причины ледниковых эпох, «...носит название теории Миланковича – по имени югославского астронома Милутина Миланковича, который разработал её в первой половине XX в. В ней предполагается, что вариации орбиты влияют на климат, изменяя инсоляцию

(количество солнечной энергии, поступающей на Землю) и ее распределение по сезонам и широтам». Тем не менее, как мы помним, и Дж. Кролль еще в XIX веке, до рождения М. Миланковича, утверждал то же самое.

Приведенный пример демонстрирует типичное заблуждение, когда довольно общую (и оказавшуюся правильной!) орбитальную гипотезу, выдвинутую задолго до рождения М. Миланковича, отождествляют с его теорией. Орбитальная гипотеза — это основа *всех версий* орбитальной теории, имеющих, однако, свои отличительные особенности, обычно связанные с определением индивидуального механизма, способа представления, или пути трансформации орбитально обусловленных вариаций инсоляции в глобальные климатические изменения. Такой отличительной особенностью, или концепцией, теории Миланковича является его утверждение, что климатическая значимость вариаций орбитальных элементов определяется количественным вкладом каждого элемента в суммарную инсоляционную диаграмму и что даты оледенений Северного полушария в течение последнего миллиона лет определяются наиболее глубокими минимумами его инсоляционной диаграммы. Одновременно, изменения температуры поверхности Земли для отдельных широт подобны изменениям инсоляции под этими широтами (рис. 11, 12). Следовательно, именно эти конкретные положения теории Миланковича должны анализироваться при её сопоставлении с эмпирическими данными.

Тем не менее, подобные вышеприведенным высказывания встречаются и в статьях специалистов, которые должны знать и теорию Миланковича, и историю её становления [Hays et al., 1976; Imbrie et al., 1984, 1992, 1993; Berger, 1982, 1988]. Например, в предисловии к сборнику трудов Международной конференции «Миланкович и климат» [Milankovitch and climate, 1984, p. ix], подписанном редакторами сборника A. Berger, J. Imbrie, J. Hays, G. Kukla, B. Saltzman, теория Миланковича, который назван «одним из великих творческих ученых нашего времени», 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 пред-

сказуемые изменения гравитационного поля, воздействующие на Землю» — как будто и не было других учёных, развивавших астрономическую теорию до М. Миланковича. Всё это плохо согласуется с предъявляемыми наукой требованиями использования в научных исследованиях точных и конкретных определений и понятий, их соответствия действительности.

С другой стороны, наряду со славословиями в адрес Миланковича и его теории можно заметить и отход от её положений, который часто называют «модернизацией» теории. Примерами модернизации теории являются использование кривых инсоляции для других (вместо 65° с.ш.) географических широт при интерпретации и объяснении глобальных палеоклиматических данных и явлений [Broecker et al., 1968; Broecker, van Donk, 1970; Calder, 1974; Johnson, 1982]; выбор в качестве ключевого сезона, вместо лета у Миланковича, зимы или осени [Имбри, Имбри, 1988, Kukla, Kukla, 1972; Kukla, 1975]; объяснение с помощью кривых инсоляции не оледенений, т.е. смены межледниковий оледенениями, что было логичным у Миланковича, поскольку в кайнозойе наблюдается направленный тренд в сторону похолодания, а, наоборот, объяснение перехода от оледенений к межледниковьям, так называемых «терминаций» [Broecker, van Donk, 1970; Broecker, Denton, 1989; Ridgwell et al., 1999 и др.].

Интересно отметить, что эта модернизация иногда не принимает во внимание высказанных ещё М. Шварцбахом [1955] недостатков теории М. Миланковича (см. стр. 64, 65), таких как использование имеющих разную форму кривых инсоляции разных широт для глобальных палеоклиматических реконструкций, или недостаточно хорошо обоснованный механизм глобального влияния сезонной прецессионной инсоляции. В книге [Имбри, Имбри, 1988, с. 182] приводится характерное высказывание Куклы: «Когда мы доживем до решения этой проблемы (проблемы 100000-летнего периода — В.Б.) и поймем истинную палеоклиматическую роль зимы, нам станет ясно, что представление о главной роли летних сезонов — это самая серьезная ошибка, допущенная геологами-четвертичниками за все последние годы». Как мы видим, в ошибке упрекаются геологи, а не Кёппен или тем более Миланкович, который, как мы помним, как раз признавание главенствующей роли зимы считал одним из основных недостатков теории Кролля.

Таким образом, теория Миланковича, де-юре признанная правильной, де-факто часто оказывается отвергнутой. Это подтвердила и беседа с А. Берже в 1999 г. в г. Бирмингеме, на 22-й конференции IAGA. На моё замечание, что теория Миланковича неверна, он ответил, что у него уже своя теория. (Кстати, недавно я прочитал [ESF Communication, 2002], что профессор А. Берже получил премию Европейского научного фонда (ESF) за 2001 год, которая называется "European Latsis Prize", «за выдающийся вклад в понимание климатического цикла ледникового периода»).

Показанное неоднозначное, двусмысленное восприятие и интерпретация теории М. Миланковича, конечно, не способствуют развитию корректной орбитальной теории палеоклимата, разрешению показанных выше противоречий. Такая неопределенность, в свою очередь, приводит к противоречивым результатам и неоднозначным заключениям и при развитии «модернизированной» теории, уже отчасти показанным нами на ряде примеров, в частности, для работы [Imbrie et al., 1984]. Судя по цитате, приведенной из публикации [Elkibbi, Rial, 2001] на стр. 104, главные противоречия к 2001 году не были решены. Тем не менее, рассмотрим некоторые попытки их решения и модернизации теории Миланковича.

#### 2.4 Попытки устранения противоречий теории Миланковича и её модернизации

Попытки устранения отмеченных выше противоречий, и прежде всего проблемы 100-тысячелетнего периода, проводились как в рамках усовершенствования теории Миланковича путем введения дополнительных факторов, не учтенных Миланковичем, в том числе и по объективным причинам, связанным с уровнем развития науки в первой половине XX столетия, так и путем развития новых гипотез.

Как следует из книги [Имбри, Имбри, с. 181-183], обнаружение преобладания 100-тысячелетнего цикла в палеоклиматических записях последнего миллиона лет вызвало растерянность у сторонников этой теории: «...к немалому своему смущению, сторонники идей Миланковича убедились, что основная периодичность изменений климата не следовала из сути его теории. И только после того, как все факты были выяснены и их сопоставления закончены, Месолелла и Кукла смогли указать тот способ модификации

теории Миланковича, который позволял объяснить эту периодичность». Помимо нижеследующего объяснения 100-тысячелетнего цикла, описанного в книге страницей раньше приведенной мною цитаты, другого «способа модификации теории» мне найти не удалось: «И тем не менее два исследователя, Кеннет Месолелла из Брауновского университета и Джордж Кукла из Чехословакии, все же сумели использовать теорию Миланковича для объяснения 100-тысячелетних циклов. Они с самого начала *верили*, что между климатическими циклами такой длительности и изменениями эксцентриситета орбиты существует причинно-следственная связь, хотя, может быть, и не прямая, а лишь опосредованная. Не случайно же основные колебания климата и формы орбиты имели одну и ту же цикличность. Кукла и Месолелла выдвинули, по существу, те же доводы, что и Джеймс Кролль на столетие раньше: мы знаем, говорили они, что интенсивность инсоляции в любой конкретный сезон почти целиком определяется циклом прцессии, но ведь последняя-то по своей амплитуде строго пропорциональна эксцентриситету орбиты! Они подчеркивали, что раз на периоды наибольшего удлинения орбиты приходятся этапы максимальных межсезонных контрастов, то есть этапы, когда температуры зим ниже, а температуры летних сезонов выше средних, и что раз *главной причиной разрастания или сокращения ледниковых покровов служат температуры одного из сезонов*, то 100000-летние циклы изменений эксцентриситета орбиты должны неизбежно отражаться на истории климата» (курсив мой – В.Б.).

Из процитированного можно сделать заключение, что «модификация» теории Миланковича включает в себя два основных аспекта: 1) привлечение в теорию символа веры в то, что «100000-летние циклы изменений эксцентриситета орбиты должны неизбежно отражаться на истории климата» и, 2) возвращение к некоторым положениям, высказанным 100 лет назад Дж. Кроллем.

Можно отметить и некоторую непоследовательность авторов книги [Имбри, Имбри, 1988]. Обсуждая недостатки теории Ж. Адемара, они, ссылаясь на А. Гумбольдта (см. раздел 1.4), подчеркивали необходимость учета солнечной энергии, получаемой за весь год, а не за полугодия (и тем более не за сезоны), при определении средней годовой (а не полугодовой) температуры каждого из полушарий. В приведенной же только что цитате определяющее

значение сезонной инсоляции, и, соответственно, сезонных температур, при интерпретации циклов межледниковье-оледенение по-дается как нечто, само собой разумеющееся.

Были и более основательные предложения объяснения проблемы 100000-летнего периода и других проблем орбитальной теории, многие из которых рассмотрены в публикациях [Imbrie et al., 1993; Elkiбbi, Rial, 2001].

Прежде всего необходимо сказать о большом количестве моделей, рассматривающих колебательные режимы состояния системы гидросфера-криосфера-атмосфера-литосфера. Одним из первых создателей таких моделей были В.Я. и С.Я. Сергины [1968, 1969]. По их мнению, главным условием возможности длиннопериодных глобальных колебаний является существование двух «самых крупных инерционностей» – Мирового океана и материкового оледенения, а также наличия положительных и отрицательных обратных связей в климатической системе. При составлении схемы глобальных климатических колебаний ими принимались во внимание изменения объема и площади оледенения и снегового покрова, вариации температуры, облачности, циркуляции атмосферы и её влагосодержания. В результате расчета взаимодействий в такой системе оказалось, что «систем присущи незатухающие периодические колебания, которые возникают при отсутствии внешних возмущений (так называемые автоколебания)» [Сергин, Сергин, 1969, с. 13]. Период колебаний в такой системе варьирует от 60 до 120 тыс. лет, что соответствует имеющимся эмпирическим данным и не противоречит теоретическим расчетам [Weertman, 1966], согласно которым время роста больших ледниковых щитов может изменяться от 15 до 30 тысяч лет.

Колебания климата, связываемые в основном с колебаниями глобального объема льда в Северном полушарии, в модели Сергиных упрощенно описываются следующим образом [Сергин, 1968; Сергин, Сергин, 1969]. В течение фазы наибольшего потепления в областях с холодным континентальным климатом усиливается циклоническая деятельность, вызывающая повышение облачности и снегопады. В результате увеличивается снежный и ледовый покров в высоких широтах, увеличивается альbedo и понижается температура. Поскольку температура наиболее сильно понижается в высоких широтах, происходит увеличение термических градиен-

тов, усиление атмосферной циркуляции и испарения и, в свою очередь, дальнейшее разрастание ледового и снежного покрова и понижение температуры – прежде всего на материках. Понижение температуры океана из-за его огромной теплоемкости отстает по времени от температуры суши. Большое количество осадков и пониженная температура приводят к наибольшему развитию материкового оледенения и появлению морских льдов. Последующее понижение температуры океана вызывает уменьшение испарения, вследствие чего ухудшается питание осадками ледниковых покровов. Ледники начинают сокращаться в размерах и отступать, включается опять обратная связь за счет альbedo, которая теперь уже способствует ускоренному таянию ледников, и система возвращается в первоначальное состояние. (Однако что вызывает именно отступление ледников, вместо сохранения их объема на достигнутом уровне, авторы не указывают).

Было предложено много моделей, описывающих изменения глобального объема льда и температуры как в виде свободных колебаний с произвольной фазой, так и подверженных воздействию полугодовых или среднемесячных вариаций инсоляции, которые упорядочивают эти колебания [Weertman, 1976; Pollard, 1978, 1982; Imbrie, Imbrie, 1980; Oerlemans, 1980, 1982; Le Treut, Ghil, 1983; Pisias, Shackleton, 1984; Saltzman, Maash, 1991 и другие]. Анализируя многие работы, Imbrie et al. [1993, p. 730], указывают, что «...простое миланковичское происхождение этого (100000-летнего – В.Б.) цикла исключено, поскольку управляемый эксцентриситетом цикл радиации слишком мал и его фаза слишком запаздывает, чтобы управлять соответствующим климатическим циклом непосредственно». (Отмечу – здесь «миланковичским» названо то, чем Миланкович пренебрёг). Авторы предлагают обобщающую концептуальную модель, в которой «...массивные ледниковые щиты Северного полушария идентифицируются как наибольший источник инерции, который, устанавливая взаимодействие с атмосферой, океаном и литосферой, производит внутреннее термическое воздействие, которое управляет 100000-летним циклом оледенения... В этой модели всякий раз, как комбинация 41 и 23-тысячелетних циклов, воздействуя на ледниковые щиты, уводит их далеко от равновесия, щиты сами управляют и устанавливают механизмы в атмосфере, которые передают клима-

тическую энергию в полосу частот 100000-летнего периода. Изменяя альbedo, управляя ветрами и изменяя свойства воздушных масс во взаимодействии с океаном и сушей, рост и уменьшение ледниковых щитов вызывает изменения океанской циркуляции. Эти изменения усиливают начальные небольшие отклики на внешние воздействия путем транспортировки тепла в северные широты и изменения концентрации атмосферного CO<sub>2</sub>. Как конкретно происходит передача энергии из полосы частот 23- и 41-тысячелетнего периодов в 100000-летнюю полосу, не уточняется.

Таким образом, механизм возникновения 100000-летнего цикла остаётся невыясненным, что, например, отмечено и В. Бергером, несмотря на то, что он получил модельные кривые изменения глобального объема льда, хорошо совпадающие с ИК записью для колонки 806 из экваториальной части Тихого океана [Berger, 1999, p.312]: «Этот цикл определяет запись оледенения в глубоководных осадках позднего плейстоцена, но его причина все еще неясна, после более чем двух десятков лет изучения и дебатов». Похожее мнение высказано и в обзорной статье [Elkibbi, Rial, 2001].

Часто «нелинейный» механизм проявления в климатических записях 100000-летнего эксцентриситетного цикла связывают с отмеченной в работах [Berger, 1988; Berger, Loutre, 1992] взаимосвязью между частотами (обратными периодами) главных гармоник климатической прецессии и эксцентриситета. Например, имеют место такие соотношения (где в левой стороне каждого равенства представлены обратные периоды наиболее важных гармоник в спектре вариаций эксцентриситета, в правой – прецессии):

$$\frac{1}{404178} = \frac{1}{22394} - \frac{1}{23708} ; \dots \frac{1}{94782} = \frac{1}{18964} - \frac{1}{23708} ;$$

$$\frac{1}{123818} = \frac{1}{18964} - \frac{1}{22394} ; \dots \frac{1}{98715} = \frac{1}{19116} - \frac{1}{23708} ;$$

$$\frac{1}{130615} = \frac{1}{19116} - \frac{1}{22394} .$$

Основой использования приведённых соотношений для объяснения того, что гораздо более слабый (в интерпретации Миланковича и его последователей) инсоляционный эксцентриситетный сигнал может проявляться на фоне более (почти на два порядка!) сильных сигналов двух других орбитальных элементов, являются

математические соотношения, приведенные в работе [Wigley, 1976]. В ней предполагается, что климатическая система Земли может действовать и как линейный, и как нелинейный усилитель входного (инсоляционного) сигнала. Предположим, что на входной сигнал  $X(t)$ , представляющий суперпозицию двух гармонических колебаний, характеризуемых частотами  $w_1$  и  $w_2$ :

$$X(t) = \sin w_1 t + \alpha \sin w_2 t , \quad 15/$$

воздействует нелинейная функция ответа климатической системы, приводящая к появлению выходного сигнала  $Y(t)$ :

$$Y(t) = [X(t)]^2 + a[X(t)] , \quad 16/$$

в котором есть и линейная ( $a[X(t)]$ ), и нелинейная части. Подставляя 15/ в 16/, получаем:

$$Y(t) = a \sin w_1 t + a\alpha \sin w_2 t - \frac{1}{2} \cos 2w_1 t - \frac{\alpha^2}{2} \cos 2w_2 t + \alpha \cos(w_1 - w_2)t - \alpha \cos(w_1 + w_2)t + \frac{1 + \alpha^2}{2} \quad 17/$$

Мы видим, что в выходном сигнале присутствуют не только частоты входных сигналов  $w_1$  и  $w_2$ , но и составные частоты  $w_1 - w_2$  и  $w_1 + w_2$ , первая из которых вполне может быть одной из эксцентриситетных частот, связанных, согласно приведенным выше соотношениям [Berger, Loutre, 1992], с соответствующими прецессионными частотами. Используя подобный подход, можно получить дополнительные периоды и для промодулированного синусоидального сигнала, т.е. произведения двух синусоидальных функций с различными частотами (похожего на эксцентриситетную модуляцию прецессии, показанную на рис. 8). Wigley [1976] представляет амплитудно-модулированный сигнал в виде:

$$F(t) = (1 + \beta \sin w_3 t) \sin w_4 t , \quad 18/$$

где  $w_3$  – частота амплитудной модуляции, а  $w_4$  – частота основного сигнала. Есть и другие формы представления модуляции орбитальных сигналов [Rial, 1999], которые позволяют получать множество различных субгармоник орбитальных частот (периодов).

Однако такое чисто математическое объяснение, судя по всему, опять же не проясняет физику явления. Какой физический процесс в климатической системе Земли эквивалентен математической операции возведения в квадрат, перемножения синусов и т.д., приводящих к появлению многочисленных субгармоник ос-

нового периода? Как объяснить соотношение амплитуд сильного климатического отклика в полосе частот, соответствующих 100000-летнему периоду, и слабых откликов в прецессионной полосе частот, если последние формируют, согласно формулам /5-7/, первый, а не наоборот? Возникают и другие возражения такой трактовки возникновения климатических периодов.

Процесс преобразования инсоляционных сигналов в климатические включает множество взаимодействий, и вряд ли его можно сопоставлять с наложением музыкальных тонов или преобразованием в электронных схемах, как это делается некоторыми авторами, чтобы оправдать применение предложенных [Wigley, 1976; Rial, 1999] соотношений для решения проблемы 100000-летнего периода. Даже если предположить, что такой математический подход возможен, необходимо объяснить, почему главный эксцентриситетный период, 404-тысячелетний, который, согласно приведенным выше соотношениям, связан с проявляющимися в ИК записях *главными* прецессионными гармониками 22,4 и 23,7 тысяч лет, отсутствует в ИК записях, охватывающих 2 млн. лет.

Тем не менее, такой математический метод (в разных вариантах) получил распространение и для объяснения обнаруженных неорбитальных периодов, и для объяснения отсутствия некоторых орбитальных частот в палеоклиматических записях [Монин, 1982; Pias, Ria, 1988; Mix et al., 1995; Rial, 1999; Elkibbi, Rial, 2001]. Также делаются попытки объяснить такими способами наличие климатических периодов, которые *изначально* уже присутствуют в вариациях не только эксцентриситета, например, периода около 125 тыс. лет, но и периода около 29 тыс. лет в вариациях угла наклона земной оси (рис. 6). Однако для объяснения *орбитальных гармоник* палеоклиматических записей, очевидно, логично было бы вначале попытаться найти *прямой механизм* усиления соответствующих инсоляционных сигналов.

Отличное от мнения большинства исследователей заключение получено в работе [Hagelberg et al., 1991]. Её авторы, выполнившие *тщательный* статистический анализ ИК записей колонок 607 и 677, в частности с использованием техники двойного спектрального (bispectral) анализа, пришли к следующим выводам. «Наблюдение ... в течение этого временного периода (1 млн. лет – В.Б.) показывает, что большая часть климатического отклика на

орбитальное воздействие линейна, включая отклик 100000-летнего периода. 100000-летний пик в спектре  $\delta^{18}\text{O}$ , показанный здесь, согласуется с линейным, резонансным ответом климатической системы на прямое эксцентриситетное воздействие». Однако приведенные важные выводы не были должным образом восприняты *девятнадцатью* известными авторами цитируемой выше публикации [Imbrie et al., 1993].

Наличие противоречий теории Миланковича явилось причиной появления альтернативных теорий. Одна из них предложена в работах [Muller, MacDonald, 1995, 1997 а,б]. Авторы начинают с того, что дают неверное толкование теории Миланковича [Muller, MacDonald, 1995, p. 107]: «Согласно теории Миланковича, 100000-летний цикл оледенения определяется изменениями инсоляции (солнечного нагрева), вызываемыми вариациями эксцентриситета орбиты Земли». Как мы помним, ничего подобного в теории Миланковича нет. Однако, с другой стороны, авторы верно указывают на существенные противоречия этой теории, такие как проблема 11-й ИК стадии, запаздывание повышений инсоляции относительно соответствующих терминаций на ИК кривых, отмеченное в некоторых работах. (Напомню, что введенное в работе [Broecker, van Donk, 1970] понятие «терминация» обозначает довольно резкий переход от оледенения к межледниковью, отмечаемый на ИК кривых, по сравнению с обратным, более медленным переходом к оледенению. «Проблема 11-й ИК стадии» [Imbrie, Imbrie, 1980; Imbrie et al., 1993] заключается в том, что один из *самых больших* межледниковых изотопных пиков (рис. 16, 17, 22), её представляющий, соотносится с одним из *наименьших* максимумов инсоляционной кривой. Малая величина инсоляционного максимума связана с тем, что на интервал времени около 400 тысяч лет, куда попадает 11-я стадия, приходится минимум большого, 400-тысячелетнего эксцентриситетного периода (см. рис.5). Поэтому и прецессионный инсоляционный сигнал, дающий основной вклад в кривую инсоляции, в данный период времени особенно мал).

Также авторы замечают, что «Наиболее сильный цикл, предсказываемый многими инсоляционными моделями, имеет период 23 тыс. лет. Тем не менее, этот цикл слабо проявляется во всех записях, которые мы изучили» [Muller, MacDonald, 1997,б, p.218]. Главное же противоречие заключается в том, что, исходя из

полученных ими данных спектрального анализа палеоклиматических записей ряда глубоководных колонок, в эксцентриситетной полосе периодов проявляется только один – 100000-летний период, тогда как, по их мнению, в случае эксцентриситетного влияния должны проявляться отдельные главные периоды около 404, 125 и 95 тыс. лет. Поэтому Muller and MacDonald и предлагают альтернативное объяснение преобладания 100000-летних климатических циклов.

Циклы оледенения связываются ими с вариациями наклона плоскости земной орбиты по отношению к инвариантной плоскости Солнечной системы, которые характеризуются преобладающим, практически единственным, периодом 100000 лет. (Эти вариации вызваны гравитационным воздействием на Землю со стороны планет Солнечной системы, вызывающим также и так называемую прецессию земной орбиты, период которой около 70000 лет [Muller, MacDonald, 1995]). Изменения положения плоскости эклиптики в пространстве приводят, по мнению авторов, к тому, что Земля периодически попадает в потоки космической пыли большей или меньшей плотности, что изменяет инсоляцию. График изменения наклона эклиптики в целом неплохо соответствует ИК кривым, при условии 33-тысячелетнего запаздывания климатического отклика на предлагаемый новый астрономический сигнал. Тем не менее, можно выдвинуть несколько возражений против такой интерпретации.

1) Единственность периода вариаций наклона плоскости эклиптики предполагает и одинаковую длительность ледниковых циклов. Однако, как мы знаем, интервалы времени между оледенениями различны и огибающая ИК кривой практически повторяет изменения эксцентриситета (рис. 20, 36), причем его уменьшения совпадают по времени с оледенениями, что соответствует общему механизму климатического влияния вариаций эксцентриситета.

2) Противоречива и трактовка авторами новой гипотезы влияния космической пыли на климат. С одной стороны, среднеплейстоценовый переход они связывают, ссылаясь на [Farley, 1995], с резким увеличением наносов (accretion) космической пыли, происшедшим около 1 млн. лет назад. Таким образом, увеличение плотности пыли должно приводить к похолоданию. С другой стороны, они сообщают, что, согласно [Farley, Patterson, 1995] «...времена высо-

кой аккреции примерно совпадают с межледниковьями» [Muller, MacDonald, 1997b, p.218].

3) Запаздывание климатического отклика (33 тыс. лет), превышающее длительность прецессионного цикла и близкое к циклу наклона земной оси, обычно хорошо проявляющегося в палеоклиматических записях, представляется слишком большим.

4) Отсутствие раздвоения широкого 100000-летнего спектрального максимума на пики около 125 и 95 тыс. лет, вероятно, связано с недостатками палеоклиматических записей, которые обусловлены неоднородностью осадконакопления, вызывающей искажения этих записей и влияющей на точность временной шкалы, а также недостаточной подробностью и длительностью палеоклиматических рядов. Реальное влияние *нескольких* (не одного) эксцентриситетных периодов проявляется, в частности, в неодинаковой длительности ледниковых циклов. Как показано ниже, выявление отдельных периодов, близких к 100000-летнему, возможно при устранении указанных выше недостатков палеоклиматической записи. Кроме того, как следует из работы [Rial, 1999], отсутствие дополнительных спектральных пиков у Muller and MacDonald связано, скорее всего, с недостаточной длительностью временного окна, использованного ими при проведении спектрального анализа.

Сделанные замечания указывают на малую вероятность осуществления механизма 100000-летнего цикла, предложенного Muller and MacDonald. Однако нельзя исключить полностью возможность влияния этого механизма на изменения климата, о чем писал В. Бергер [Berger, 1999].

Обратим внимание на ещё одну работу, критикующую альтернативный подход Muller, MacDonald [1995, 1997 a,b] к объяснению проблемы 100000-летнего периода и в то же время приспособливающую теорию Миланковича для интерпретации новых эмпирических данных. Она называется «Соответствует ли спектральная запись 100-тысячелетнего ледникового цикла миланковичскому началу?» (Is the spectral signature of the 100 kyr glacial cycle consistent with a Milankovitch origin?). Авторы [Ridgwell et al., 1999 p. 437] опровергают альтернативный подход следующим: «Здесь мы показываем, что спектр записей  $\delta^{18}\text{O}$  полностью соответствует механизму Миланковича, в котором межледниковья происходят каждый четвертый или пятый прецессионный цикл.

Такие механизмы могут включать создание «избыточного» льда благодаря низкой летней инсоляции, предваряющей прецессионный «максимум». Сказанное проиллюстрировано в работе рисунком, приведенным ниже (рис. 25).

На этом рисунке проводится сопоставление ИК кривой СПЕСМАР с изменениями инсоляции для 21 июня под  $65^\circ$  с.ш., вычисленными Ласкаром и др. [Laskar et al., 1993]. Видно, что максимумы инсоляции, следующие за относительно неглубокими специально выделенными максимумами (указанными стрелкой), соответствуют примерно серединам терминаций. В качестве основы такого соотнесения указывается работа М. Раймо [Raumo, 1997], в которой сделан вывод о «тенденции терминаций случаться после предыдущего максимума инсоляции, который был необычно низок в средних широтах Северного полушария» [Ridgwell et al., 1999, p. 438]. Сопоставление двух последних цитат, в которых определяются условия наступления межледниковий (и терминаций), приводит, однако, к заключению, что главным обоснованием установления указанных условий является просто визуальное соотнесение инсоляционной и ИК кривых. Наше заключение подтверждается также и тем, что в своей работе 1997 г. Раймо использовала сопоставление ИК кривой для тихоокеанской колонки 849 с кривой инсоляции для 21 июля, которая отличается от июньской. Поэтому и терминации соответствовали разным участкам (даже минимумам) инсоляционной кривой. Следовательно, такое соотнесение довольно условно. Для дальнейшего опровержения альтернативного варианта Muller and McDonald [1995, 1997] в работе [Ridgwell et al., 1999] был сконструирован схематический пилообразный сигнал изменения объёма льда (рис. 25с), продолжительность циклов которого соответствовала четырём или пяти прецессионным циклам. Спектральный анализ такого сигнала дал главный период около 100 тысяч лет. По мнению авторов, этот результат указывает на необоснованность критики теории Миланковича Мюллером и Макдональдом.

Остаётся непонятным, какое же отношение к теории Миланковича имеет такое выделение 100000-летних ледниковых периодов. Поскольку в кривые суточной инсоляции, использованные в работах [Raumo, 1997; Ridgwell et al., 1999], определяющий (даже больший, чем в кривые среднемесячной инсоляции – см. рис.

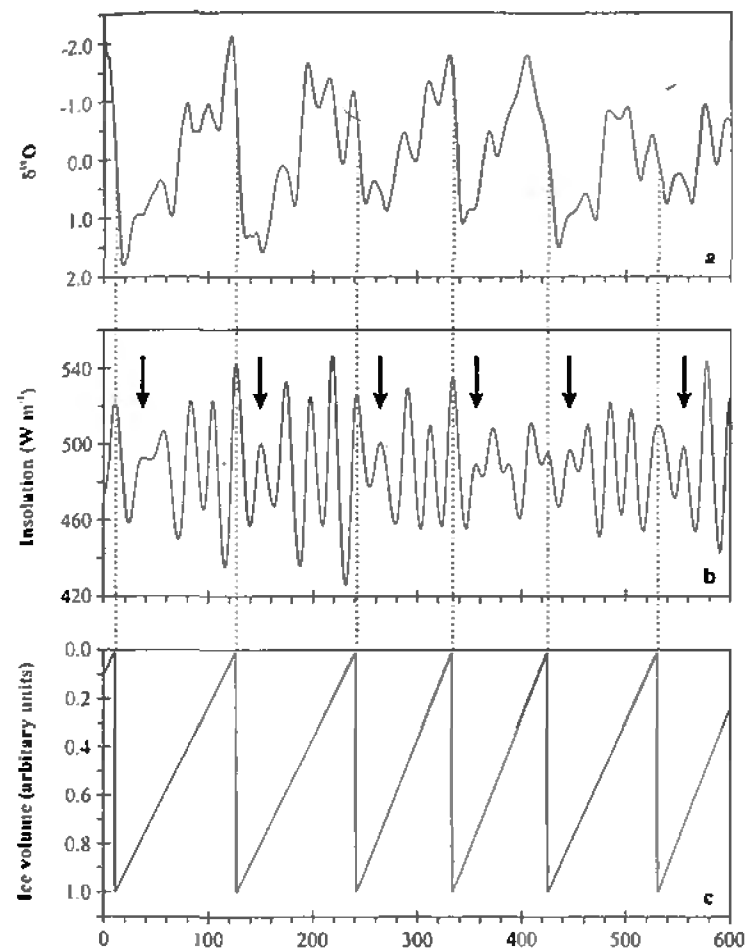


Рис. 25. а) ИК кривая СПЕСМАР; б) кривая инсоляции для  $65^\circ$  с.ш. и 21 июня, в ( $\text{Вт м}^{-2}$ ); стрелками показаны «необычно низкие максимумы инсоляции, предваряющие на один прецессионный цикл ледниково-межледниковые терминации»; в) схематический пилообразный сигнал изменения объёма льда (в условных ед.). По оси абсцисс – время, в тысячах лет до современности. Рисунок из работы [Ridgwell et al., 1999, Fig. 1

26) вклад дает прецессионная инсоляция, авторы для выделения ледниковых циклов с таким же успехом могли воспользоваться

просто изменениями прецессионного индекса, а не изменениями инсоляции, расчёт которых (причём полугодových) является главной особенностью теории Миланковича. Также, в отличие от Миланковича, авторы, вслед за Broecker and van Donk [1970] и другими, объясняют не оледенения, а межледниковья, не уделяя никакого внимания наиболее глубоким минимумам инсоляции, которым такое большое значение придавал М. Миланкович.

Отметим работу А.А. Косова [2003], в которой предлагается дополнительный механизм климатического усиления вариаций эксцентриситета. Автор, основываясь на данных других исследователей, предполагает, что изменения эксцентриситета могли влиять на вулканическую активность, приводящую к изменению содержания в атмосфере углекислого газа. Особо отмечается, что увеличение вулканической активности и, следовательно, повышение содержания  $\text{CO}_2$ , соответствует увеличению эксцентриситета и, поэтому, находится в фазе с климатическим влиянием «эксцентриситетного» изменения инсоляции. Однако наличие эксцентриситетных (400- и 100-тысячелетнего) периодов в изменениях вулканической активности и глобальности их проявления требует проверки.

Поскольку, как мы видели, не было получено корректного решения проблемы 100000-летнего периода, постольку трудно ожидать и строгого решения проблемы «среднеплейстоценового перехода». Эта проблема рассматривалась многими исследователями [Imbrie et al., 1993; Mudelsee, Schulz, 1997; Clark, Pollard, 1998; Paillard, 1998; Berger, 1999; Berger et al., 1999; Clark et al., 1999]. Все они тем или иным способом связывают переход главных климатических колебаний плейстоцена от 41000-летней к 100000-летней периодичности с увеличением объёма льда вследствие глобального похолодания кайнозоя, продолжавшегося и в плейстоцене (на похолодание и увеличение объёма льда указывает, например, смещение ИК кривой на рис. 24).

Кайнозойское похолодание Раддимиен и Куцбах [1991] объясняют процессами усилившейся тектонической активности и горообразования, которые привели и к уменьшению концентрации углекислого газа в атмосфере при переходе  $\text{CO}_2$  в карбонаты. Berger et al. [1999] предполагают, что уменьшение концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере было линейным в течение последних трёх миллионов лет

и соответственно увеличивался объём льда на планете. Clark and Pollard [1998] связывают увеличение льда с изменением ледникового ложа при его углублении за счёт ледниковой эрозии осадочных отложений и обнажения скальных пород. Увеличение глобального объёма льда, естественно, приводило к возрастанию постоянной времени ледниковых осцилляций. Однако получение конкретных характеристик 100000-летнего цикла ИК кривых последнего миллиона лет было в основном на уровне визуальных сопоставлений рассмотренной нами работы [Ridgwell et al., 1999].

В заключение кратко рассмотрим усовершенствования, внесенные в теорию Миланковича А. Берже. Как написано во введении к его статье «Теория Миланковича и климат» [Berger, 1988, p.623] Д. Лалом (D. Lal), «Профессор Берже по образованию метеоролог. Он руководитель Института астрономии и геофизики католического университета Лувен-ля-Нев в Бельгии».

Прежде всего, вслед за Шараф и Будниковой [1967, 1969] и Vernekar [1972], Берже произвел перерасчет вариаций орбитальных элементов, учитывая более точные приближения для параметров орбит и масс планет [Berger, 1977, 1978; Berger, Loutre, 1991, 1992; Berger et al., 1992]. Несоответствие рассчитанных им по методу Миланковича вариаций инсоляции летних калорических полугодий для разных широт, и, в частности, для  $65^\circ$  с.ш., ИК данным привело его к выводу, что: «Характеристика реальных палеоклиматов по кривым солнечной радиации Миланковича только на основании идентификации соответствующих максимумов и минимумов иллюзорна, т.к. она всегда приводит к видимому согласию» [Berger, 1978a, с.8]. (Цитируется мною по переводу, сделанному и находящемуся в ВИНИГИ, и ссылки на номера страниц соответствуют переводу). Поэтому, в частности, Берже предлагает вместо вариаций полугодовой инсоляции использовать для палеоклиматических интерпретаций среднемесячные и даже суточные вариации инсоляции: «Несовершенство этой теории (теории Миланковича – В.Б.), осложняющее её применение в реконструкции климата геологического прошлого, и результаты последних исследований, пытающиеся показать, что теория нуждается в расширении, привели нас к выводу о том, что классическая тепловая солнечная радиация меняется во времени через долговременные изменения её ежедневных и ежемесячных величин» [Berger, 1978a, с.1].

Основанием для такого вывода (который, кстати, очень контрастирует с последующим высказыванием 1988 г. об «Эпохе Возрождения Миланковича») было то, что: «Миланковичские калорические полугодия маскируют внутригодовую изменчивость и её вариации...» и поэтому «...моделирование прошлого климата требует знания дневной или месячной инсоляции вместо, или в дополнение к, миланковичской сезонной инсоляции» [Berger, 1980, p.116]. С этим предложением можно согласиться, хотя внутригодовую изменчивость, которая связана в данном случае с прецессией, можно было бы учитывать, используя уже подсчитанные Миланковичем и летнюю, и зимнюю инсоляцию, прецессионный вклад в которые, как известно, противофазный. Логика сделанного Берже предложения учитывать «внутригодовую изменчивость» требует использования для палеоклиматических интерпретаций вариаций среднемесячной инсоляции разных (всех) месяцев. Однако Берже, как и большинство других исследователей [Berger, 1980, 1988; Berger et al., 1998, 1999; Imbrie, Imbrie, 1980; Imbrie et al., 1992, 1993; Berger, 1999; Loutre, Berger, 2000 и многие др.], использовали для различных интерпретаций и создания палеоклиматических моделей вариации обычно только июньской, или июльской, инсоляции под  $65^\circ$  с.ш. Кривая среднемесячной инсоляции отличается от кривой полугодовой инсоляции прежде всего увеличенным вкладом прецессионной составляющей (по сравнению с вкладом за счет вариаций наклона земной оси), что хорошо видно на рис. 26 и 19. Таким образом, введение среднемесячной инсоляции подобно использованию полугодовой инсоляции для более низких, чем  $65^\circ$ , широт (рис. 10). Следовательно, данное нововведение Берже вряд ли способствует разрешению противоречий теории Миланковича.

Для решения проблемы несоответствия между синхронностью оледенений Северного и Южного полушарий и различий инсоляционных кривых южных и северных широт, Берже призывает использовать «новые факты», одним из которых он считает данные о сезонном изменении мощности льда в полярных морях [Berger, 1978a, с.14]. Из того факта, что современный покров льда в Арктике сокращается летом до  $8,4 \times 10^6$  км<sup>2</sup>, а зимой распространяется на  $15 \times 10^6$  км<sup>2</sup>, тогда как в океанах, омывающих Антарктиду, покрытие льда зимой достигает  $20 \times 10^6$  км<sup>2</sup>, а летом —  $2,5 \times 10^6$  км<sup>2</sup>,

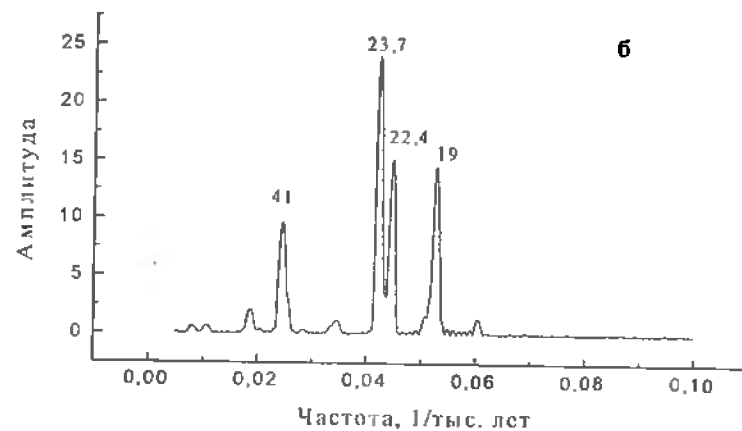
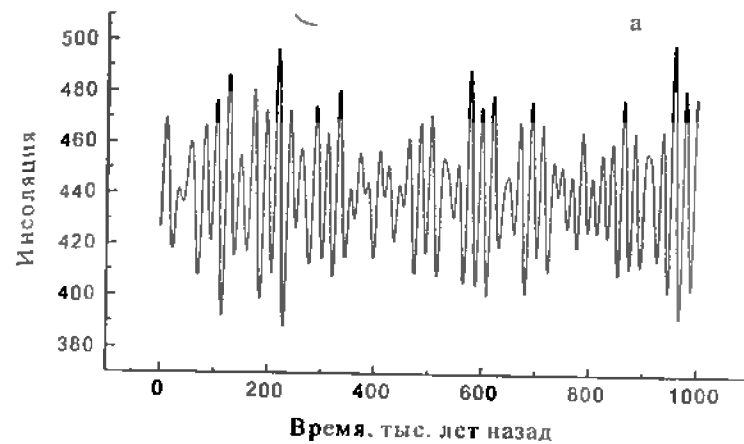


Рис. 26 а) Изменения июльской инсоляции для  $65^\circ$  с.ш. (по [Berger, Loutre, 1991]) Единицы инсоляции — Вт/м<sup>2</sup> и б) Амплитудно-частотный спектр этих изменений. Цифры у кривой — значения соответствующих периодов в тыс. лет

он делает следующее заключение: «Эти наблюдения ясно показывают, что в Северном Ледовитом океане в течение лета не успевает растаять 60% льда и что в океанах Антарктиды большая часть льда

образуется зимой. Это прекрасно согласуется с гипотезой Миланковича, т.к. «прохладное» лето (с точки зрения количества солнечной радиации) Северного полушария и холодная зима южного полушария очевидно синхронны». Однако, по-видимому, и без «новых фактов» можно сделать вывод о том, что в океанах (не в центре материка) Антарктиды «большая часть льда образуется зимой», а не летом. А из приведённых им данных, без привлечения теории Миланковича, следует даже более информативный и объективный вывод: *меньшие колебания* размеров ледяных полей океанов (меньше образуется зимой и меньше тает летом) имеют место в Северном полушарии, а большие колебания – в Южном – вследствие различий их географического положения и климатических условий.

Кстати, если говорить о прохладном лете Северного полушария, не позволяющем растаять ледникам, то, чтобы отразить внутригодовую изменчивость инсоляции, за что ратовал сам Берже, логично, по-видимому, упомянуть и о мягкой зиме, которая может ослаблять образование льда (например, за счёт того, что вместо снега будет идти дождь, как считал англичанин Кроль [1875]). Тем не менее, даже оставляя указанные замечания в стороне, необходимо отметить, что заключение Берже неверно, поскольку его интерпретация не согласуется, а противоречит гипотезе Миланковича. Дело в том, что кривые инсоляции строились Миланковичем исходя из того, что оледенению соответствует длительное прохладное лето в *данном* полушарии, и поэтому знак прецессионного индекса в уравнениях /1/ и /2/ (стр. 50) менялся при переходе от одного полушария к другому и полученные *разные* кривые инсоляции использовались Миланковичем для обоснования и интерпретации неодинаковых изменений климата в различных полушариях.

В публикации 1980 года Берже более объективно рассматривает влияние различных географических условий (прежде всего полярного положения Антарктиды и различного соотношения площади океана и суши) Северного и Южного полушарий на формирование оледенений. Однако и здесь он не видит противоречий с теорией Миланковича и в более поздних работах к этому вопросу не возвращается. Тем не менее, проблема синхронности оледенений подвергалась серьёзному изучению в ряде работ [Брокер, Ден-

тон, 1990; Broecker, Denton, 1989; Imbrie et al., 1992, 1993], именно в связи с противофазностью прецессионного вклада в инсоляционные кривые Миланковича для разных полушарий. Были предложены сложные механизмы взаимодействия различных климатических факторов, включающие изменения объёма льда Северного полушария, глобальные колебания уровня океана, изменения циркуляции атмосферы и гидросферы и концентрации CO<sub>2</sub>, ведущие, по мнению названных авторов, к практически синхронным изменениям климата в обоих полушариях.

Еще один существенный противоречивый момент связан с рассмотрением проблемы 100000-летнего периода, который, по мнению Берже [1978а, с.15, 16], может быть объяснен двояко: «...как результат нелинейного взаимодействия между собственными «частотами» (о чём говорилось выше – В.Б.) и как результат прямой связи с эксцентриситетом». Далее, отмечая факты хорошей корреляции между палеоклиматическими изменениями и вариациями эксцентриситета, он характеризует их как *противоречащие теории Миланковича* и заключает: «Если эта положительная корреляция подтвердится, воздействие на климат непосредственно фактора *e* должно быть значительным. Это приведет к необходимости рассматривать изменение *всей* (курсив мой – В.Б.) солнечной радиации, приходящей на Землю, т. к. она действительно является функцией  $(1 - e^2)^{-1/2}$ : даже если изменение этого параметра невелико, он проявляется в явном виде».

Однако процитированное заключение осталось только декларацией, хотя некоторое время в последующих работах [Berger, 1980, 1988] ещё отмечалась возможность двоякого объяснения существования 100000-летнего цикла. В более поздних работах, связанных с моделированием палеоклимата [Galee et al., 1991; Berger et al., 1998, 1999; Loutre, Berger, 2000a], рассматриваемый вопрос не поднимался. Более того, судя по перечисленным работам, Берже остановился на нелинейном «частотном» механизме объяснения 100000-летнего цикла. Однако как можно создавать модели палеоклимата, не выяснив физических механизмов главных климатических колебаний?

Тем не менее, на основе этих моделей, рассматривающих, в частности влияние изменения концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере, был сделан вывод [Loutre, Berger, 2000b] о возможном наступлении

эпохи длительного межледникового в течение предстоящих 50 тысяч лет.

В целом же складывается ощущение, что отношение А. Берже к теории М. Миланковича, так же как и отношение к ней другого известного учёного, Дж. Имбри, имеет некий оттенок покровительства, как бы несумственным ни казалось такое отношение к теории «одного из великих творческих учёных нашего времени» [Milankovitch and climate, 1984, p. xiii]. Например, в известной публикации «Теория Миланковича и климат» [Berger, 1988] не заостряется внимание на главных противоречиях теории и эмпирики, связанных с проблемами 100000-летнего периода или среднеплейстоценового перехода, а менее существенные, такие как одновременность оледенений в разных полушариях, объясняются влиянием земных факторов, как обсуждалось выше.

Берже осознаёт, что теория Миланковича – лишь «отдельная версия астрономической теории» [Berger, 1988, p.647]. Тем не менее, все полезные следствия развития *астрономической гипотезы* (высказанной ещё Адемаром), например, возможность оценки возраста палеогеографических событий плейстоцена и даже «лучшее понимание цикла CO<sub>2</sub>» или «предсказание климатической изменчивости на геологической шкале времени для следующих 100000 лет» [Berger, 1988, p.652], он связывает почему-то с теорией Миланковича. То же касается и определения периодов (частот) вариаций орбитальных элементов, которым Миланкович не занимался, однако Берже [1988, p.636] пишет: «В 1976 г. Хейс, Имбри и Шеклтон продемонстрировали, что астрономические частоты, которые я вычислил независимо [Berger, 1977], были существенно представлены в палеоклиматических данных... Именно геологическое наблюдение двусторонности прецессионного пика (выделение двух периодов, 23 и 19 тыс. лет – В.Б.), подтверждённое астрономическими вычислениями, было одним из первых наиболее деликатных и выразительных тестов теории Миланковича».

Мы уже не раз говорили о том, что методы расчёта вариаций орбитальных элементов и сами расчёты проводились не Миланковичем, а другими исследователями, данными которых он пользовался и на которых ссылался [Миланкович, 1939]. Так что приведённая нами цитата из [Berger, 1988] была бы более логичной, если в её конце вместо слов «теории Миланковича» поставить

«теории Берже», ведь именно Берже, как следует из той же цитаты, вычислял частоты вариаций орбитальных элементов. А рассмотренные примеры можно рассматривать как ещё одно подтверждение загадочного стремления приписать М. Миланковичу то, чего он не делал. А ведь он и без этих приписок сделал очень много.

Заключивая краткое рассмотрение попыток объяснения противоречий теории М. Миланковича и её усовершенствования, можно отметить следующее. Десятилетия работы по усовершенствованию теории Миланковича и, соответственно, развитию орбитальной гипотезы, привели к ряду существенных достижений. Получено огромное количество уникальных эмпирических данных, составляющих основу исследований в этом направлении. Убедительно показана связь орбитально обусловленных вариаций инсоляции с глобальными изменениями палеоклимата. Разработана новая, изотопно-кислородная климатохроностратиграфическая шкала плейстоцена, определен новый возраст палеомагнитной инверсии Матуяма-Брюнес и т.д.

Тем не менее, как и следовало ожидать, попытки усовершенствования противоречащей эмпирическим данным теории оказались также противоречивыми и малоубедительными. Более того, эти попытки на деле являются не усовершенствованием старой, а развитием новой, однако довольно неопределённой и опять же противоречивой теории. Именно так можно рассматривать использование инсоляционных кривых, рассчитанных для различных широт и сезонов года, а также для отдельных месяцев, в качестве шаблона для интерпретаций глобальных изменений климата; попытки объяснения перехода не к оледенениям, а к межледниковьям; использование для объяснения преобладающего в плейстоцене 100-тысячелетнего климатического цикла физически малообоснованных для данного случая математических соотношений между различными гармониками прецессионных вариаций. Выход из этого положения, уводящего в сторону от решения реальных конкретных задач развития теории палеоклимата плейстоцена, необходимой для корректного прогнозирования будущих глобальных климатических изменений, видится только один: анализ самой теории Миланковича, выявление её недостатков и учет их при дальнейшем развитии орбитальной гипотезы (теории).

### Глава 3. НЕДОСТАТКИ ТЕОРИИ М. МИЛАНКОВИЧА И ИНТЕРПРЕТАЦИЙ ЕГО ПОСЛЕДОВАТЕЛЕЙ

Изложенная в монографии М. Миланковича [1939] теория состоит из трёх основных частей. В первой части излагаются способы и описываются результаты вычисления изменений поступающей на верхнюю границу атмосферы солнечной радиации в зависимости от времени суток, года и геологического времени, а также в зависимости от географической широты. Во второй даются основы «математической климатологии», в интерпретации Миланковича. Проведя рассмотрение некоторых физических свойств атмосферы и суши, он даёт распределение «солярной», т.е. зависящей только от геометрии Земли, температуры земной поверхности. При этом он не учитывает многие земные климатические факторы, такие как циркуляция атмосферы, распределение океана и суши, взаимодействие атмосферы и гидросферы и т.д. Эти неизбежные на начальном этапе развития теории упрощения Миланкович хорошо осознавал и неоднократно их оговаривал. В третьей, заключительной части книги, полученные данные используются для решения главной задачи, поставленной М. Миланковичем — создания теории палеоклимата, т.е. объяснения механизма возникновения неоднократных оледенений плейстоцена.

Говоря о недостатках теории, я буду иметь в виду прежде всего основную, палеоклиматическую её часть, полагая первую часть верной, а применительно ко второй принимая во внимание как процитированное в разделе 1.6. замечание М.И. Будыко, так и характер упрощений, отмеченных самим М. Миланковичем.

#### 3.1 Основные недостатки теории М. Миланковича

##### 3.1.1 Отсутствие учёта качественных различий инсоляционных сигналов, связанных с вариациями различных орбитальных элементов.

Как мы помним, Миланкович считал изменения температуры на отдельных широтах земной поверхности в течение последнего миллиона лет подобными вычисленным им вариациям полугодовой инсоляции над этими широтами. Иными словами, он придавал непосредственную палеоклиматическую значимость математически строго рассчитанным им инсоляционным кривым.

Согласно его вычислениям, основной вклад в вариации инсоляции, а, значит, и в колебания палеоклимата, был связан с прецессией и изменениями наклона земной оси, тогда как прямой вклад в инсоляцию за счёт вариаций эксцентриситета оказался пренебрежимо малым. Однако, определяя палеоклиматическую значимость связанных с вариациями различных орбитальных элементов колебаний инсоляции, вычисленных количественно (что и является главным достижением его теории), Миланкович не учитывал качественных различий этих колебаний. Здесь имеется в виду то, что вариации эксцентриситета определяют изменения среднегодового количества или, точнее, мощности поступающей к Земле в целом солнечной энергии. В то же время вариации наклона земной оси и прецессия практически не изменяют поступающую к Земле в целом годовую инсоляцию, вызывая лишь её широтное и сезонное перераспределение. Уже одно это обстоятельство (отсутствие учёта существенных качественных отличий инсоляционных сигналов) не позволяет считать вычисленные Миланковичем количественные показатели изменения инсоляции реальной мерой глобального климатического воздействия вариаций соответствующих орбитальных элементов.

##### 3.1.2 Придание палеоклиматической значимости рассматриваемым индивидуально вариациями инсоляции, вычисленным для отдельных географических широт и полугодий.

Не выдерживает критики и сам способ количественной оценки палеоклиматической значимости вариаций приходящей на верхнюю границу атмосферы инсоляции, основанный на их вычислении для отдельных калорических полугодий и географических широт. Ведь нельзя считать, что полгода инсоляция действует на глобальный климат, а полгода нет, так же как нельзя полагать, что инсоляция только одной широты определяет глобальные климатические изменения в единой, взаимосвязанной и имеющей огромную инерционность климатической системе Земли. (Здесь имеется в виду определение Миланковичем дат оледенений по кривой инсоляции летнего калорического полугодия для  $65^\circ$  с.ш.). Этот способ тем более неприменим, поскольку, как мы уже знаем, полугодовые прецессионные вариации инсоляции, так же как и связанные с изменением угла  $\epsilon$  вариации инсоляции высоких и низких широт, противофазны.

Таким образом, для представления *реальной* картины событий необходим полный учёт инсоляции. Однако, если просто вычислять непрерывные во времени, т.е. годовые, и в пространстве, т.е. для всех широт Земли, изменения инсоляции, то вклад в эти изменения за счет вариаций угла наклона земной оси и прецессии окажется равным нулю, поскольку вариации этих орбитальных элементов не меняют приходящую к Земле в целом годовую инсоляцию. В этом случае, очевидно, нет оснований для создания теории, связывающей глобальные климатические колебания только с изменениями инсоляции, обусловленными вариациями угла наклона земной оси и прецессии, поскольку эти изменения равны нулю. Не исключено, что именно поэтому Миланкович использовал для палеоклиматических интерпретаций *полугодовые* изменения инсоляции под *отдельными широтами*. Тем не менее, учет непрерывных во времени и пространстве изменений инсоляции необходим для корректного построения теории.

### 3.1.3 Недостаточно строгая обоснованность общих механизмов климатического влияния вариаций орбитальных элементов

Отправной точкой создания ОТП и даже обоснования первоначальной гипотезы о влиянии орбитально обусловленных вариаций инсоляции на глобальные климатические изменения является разработка физического механизма климатического влияния вариаций орбитальных элементов. Миланкович, называя свою теорию "...строгой научной математической теорией колебаний климата", тем не менее, в палеоклиматической ее части пользовался не строго математическими, а качественными положениями. Это касается и установления механизма климатического влияния вариаций угла  $\varepsilon$  и уж тем более механизма климатического влияния прецессии. Палеоклиматически значимыми Миланкович считал изменения инсоляции для  $65^\circ$  с.ш., однако математически строгого обоснования выбора именно этой широты сделано не было. А ведь вклад в вариации инсоляции различных орбитальных элементов зависит от широты, что существенно изменяет вид инсоляционной кривой и, следовательно, выделяемые на ней палеоклиматические события (рис.10). Незавершенность этого вопроса, как известно, привела к тому, что различные авторы впоследствии использовали для подтверждения своих интерпретаций инсоляционные кривые разных широт.

При установлении механизма климатического влияния прецессии Миланкович опирался на мнение Кёппена (см. стр. 53-54), согласно которому к оледенению в данном полушарии должны приводить климатические условия, характеризующиеся длительным прохладным летом (и мягкой короткой зимой), то есть малыми сезонными контрастами инсоляции. При обосновании своего механизма Кёппен сравнивал климатические условия расположенных примерно в одном широтном поясе городов Гренландии (Готхоб) и Восточной Сибири (Верхоянск и Якутск), [Миланкович, 1939; Шварцбах, 1955]. Наличие ледников в Гренландии, для которой характерны мягкая зима и прохладное лето, и отсутствие ледников в Сибири, отличающейся суровыми зимами, принималось как обоснование принятого Миланковичем механизма климатического влияния прецессионных вариаций инсоляции.

Однако это обоснование некорректно, поскольку наличие и ледников, и мягкой зимы и прохладного лета в находящейся в высоких широтах Гренландии связано не столько с режимом инсоляции, сколько с непосредственной близостью Атлантики, являющейся как поставщиком пара и снега, питающего ледники, так и фактором, уменьшающим сезонные колебания температуры. Такого фактора в Восточной Сибири нет. Тем не менее, несмотря на эту неубедительность обоснования *определяющего* влияния на развитие оледенений наличия сезонов с длительным прохладным летом, такая точка зрения поддерживается и сейчас [Кови, 1984; Berger et al., 1999; Ridgwell et. al, 1999; Loutre, Berger 2000a; Prokopenko et. al, 2001]. И все же логика качественного объяснения климатического влияния прецессии, связанная обычно с тем, что важное значение имеет не количество льда, образовавшегося в холодную зиму, а его количество, *сохранившееся* в течение прохладного лета, не очень убедительна. Попытаемся показать это на примере статьи Кови [1984]. Обратимся к таблице 8. Здесь в левой части цитата из статьи [Кови, 1984, с.31] (вариант 1), а в правой – автоматическая переделка этой цитаты в ее смысловую противоположность (вариант 2), из которой следует, что оледенению, наоборот, соответствуют климатические условия с длительными холодными зимами. Приведенное качественное обоснование условий, способствующих накоплению льда в периоды длительных холодных зим, особенно учитывая современное состояние климата (межледнико-

вье), может показаться даже более убедительным, чем обоснование, приведенное К. Кови. Однако и в том, и в другом случае очевидны недостатки, связанные с неконкретным, качественным рассмотрением климатических условий формирования ледников.

Таблица 8

Вариант 1	Вариант 2
«Летняя инсоляция играет более важную роль, чем зимняя, потому что в высоких широтах накопление снега происходит даже в мягкие зимы. Таким образом, наиболее существенно не то, сколько снега накопится зимой, а то, сколько его сможет сохраниться в течение лета. Если высокие широты в летнее время будут получать меньше солнечной энергии, то снег с большей вероятностью сохранится до новой зимы. И если подобные условия продлятся много лет, то по мере уплотнения под собственной тяжестью снег будет превращаться в лед, формируя материковые ледниковые покровы, и на Земле наступит ледниковая эпоха. С другой стороны, при возрастании летней инсоляции льда успеет растаять больше, чем могут возместить зимние снегонады, и на Земле установится климат, близкий к современному».	Зимняя инсоляция играет более важную роль, чем летняя, потому что в высоких широтах таяние снега происходит даже в прохладные лета. Таким образом, наиболее существенно не то, сколько снега стает летом, а то, сколько его сможет накопиться зимой. Если высокие широты в зимнее время будут получать меньше солнечной энергии, то большее количество снега с большей вероятностью сохранится до новой зимы из-за увеличения альбедо высоких широт. И если подобные условия продлятся много лет, то по мере уплотнения под собственной тяжестью снег будет превращаться в лед, формируя материковые ледниковые покровы, и на Земле наступит ледниковая эпоха. С другой стороны, при возрастании зимней инсоляции льда успеет накопиться меньше, что приведет к более интенсивному его таянию летом, и на Земле установится климат, близкий к современному. Подтверждением последнего может являться и то, что сейчас, в межледниковье, режим инсоляции Северного полушария соответствует именно более длительному и прохладному лету.

Очевидно, что необходимо рассматривать не отдельное лето или зиму, а комплекс – *длительная* холодная зима и жаркое *короткое* лето, или *длительное* прохладное лето и мягкая *короткая* зима. (В этом смысле введение Миланковичем *одинаковых по продолжительности* калорических полугодий можно рассматривать как недостаток). Например, сочетание длительной холодной зимы и жаркого лета вполне может привести к увеличению образования льда в *конкретных* климатических условиях Антарктиды (см. раздел 4.1), что прежде всего имел в виду Кролль более столетия на-

зад. Вполне возможно также, что сочетание мягкой зимы и прохладного лета, которое ассоциируется с неконтрастным, мягким морским климатом, может способствовать образованию ледников в высоких широтах Северного полушария. Однако утверждать, что такой всё же довольно неконкретный и опосредованный механизм формирования льда является *определяющим* при развитии оледенений, на мой взгляд, оснований нет.

Далее, в строгой математической теории, каковой считал свою теорию Миланкович, нельзя не учитывать изменений зимней инсоляции, принимая во внимание только летнюю. Поскольку его теория отличалась именно количественным подходом, надо было прежде *количественно* показать, *насколько* летняя инсоляция важнее зимней, почему зимней инсоляцией можно пренебречь? В противном случае вклад зимней инсоляции существенно изменит вид инсоляционной кривой и, следовательно, последовательность выделяемых на ней палеоклиматических событий. Заметим здесь, что похожий упрек нельзя сделать Кроллю, поскольку он главной причиной климатических колебаний считал не столько количественные изменения инсоляции, сколько положительные обратные связи, точный расчёт которых является проблематичным и сейчас.

Таким образом, механизм климатического влияния прецессии на глобальные колебания климата, которое, очевидно, имеет место, требует существенного уточнения. А декларируемое практически повсюду и переходящее из одной публикации в другую «*определяющее* влияние изменений сезонной инсоляции высоких широт на глобальные климатические колебания» нельзя признать соответствующим действительности еще и потому, что прецессионные изменения наименее выражены в палеоклиматических кривых плейстоцена. Здесь необходимо отметить, что колебания наклона земной оси тоже изменяют сезонную инсоляцию, однако это изменение существенно отличается от прецессионного.

Во-первых, в отличие от связанных с прецессией противофазных изменений, сезонные контрасты при изменении наклона земной оси *однофазно* меняются в *обоих полушариях*: при увеличении угла  $\epsilon$  они увеличиваются, а при уменьшении угла наклона уменьшаются (в пределе, при  $\epsilon = 0$ , понятия «зимы» и «лета» практически потеряли бы своё значение). Во-вторых, и это наиболее важное обстоятельство, *колебания наклона земной оси изменяют*

среднегодовую инсоляцию на рассматриваемой широте, тогда как связанное с прецессией среднегодовое изменение инсоляции любой широты равно нулю. Как мы знаем, связанное с прецессией, например, увеличение летней инсоляции компенсируется таким же уменьшением зимней, однако вызванное возрастанием угла  $\epsilon$  увеличение летней инсоляции на данной (высокой) широте останется нескомпенсированным, так как оно превышает по абсолютной величине уменьшение зимней инсоляции (см. таблицу 1). Именно перераспределение широтной среднегодовой, а не сезонной инсоляции определяет в первую очередь глобальное климатическое влияние вариаций наклона земной оси. Поэтому необходимо помнить, что уменьшение угла  $\epsilon$  приводит к глобальному похолоданию не потому, что при этом уменьшаются и сезонные контрасты инсоляции, а прежде всего вследствие того, что в высокие широты, за счёт снижения *среднегодовой* инсоляции, поступает меньше тепла. Этот механизм *прямого* воздействия инсоляции на климат, очевидно, гораздо более эффективен, чем опосредованный и недостаточно чётко определённый механизм прецессионных изменений сезонных контрастов инсоляции.

#### 3.1.4. Формальный учёт обратных связей

Ещё одним недостатком является гораздо менее обстоятельный и строгий математически, по сравнению с вычисленным вариаций инсоляции, учёт Миланковичем разнообразных земных обратных связей, чему он придал гораздо меньшее значение, чем за 50 лет до него Кролль. Сейчас необходимость существования обратных связей для трансформации слабого инсоляционного сигнала в глобальные климатические изменения практически общепризнанна. Более того, некоторые авторы [Сергин, Сергин, 1969; Weertman, 1976; Pollard, 1978; Oerlemans, 1980 и др.] считают возможным существование не управляемых инсоляцией, а самостоятельных, *автоколебательных* глобальных климатических процессов, обусловленных влиянием обратных связей при взаимодействии в системе океан-суша-атмосфера-криосфера. Важность учета влияния обратных связей продемонстрируем на конкретном примере. Обосновывая механизм климатического влияния вариаций угла наклона земной оси (уменьшение  $\epsilon$ , вызывающее уменьшение инсоляции высоких широт, приводит к похолоданию), Миланкович использовал механизм положительной обратной связи, обу-

словленный изменением альbedo за счет изменения площади ледового и снежного покрова высоких широт. Однако, поскольку при вариациях  $\epsilon$  изменения инсоляции высоких и низких широт противофазны, то решение вопроса об определении климатического влияния вариаций угла  $\epsilon$  было бы весьма затруднено в случае существования положительной обратной связи для вариаций инсоляции низких широт, сравнимой с рассматриваемой Миланковичем "альбедной" связью для высоких.

Этот пример показывает, что учёт специфики обратных связей способен помочь в решении проблемы связанных с наклоном земной оси (и с прецессией) нулевых среднегодовых вариаций инсоляции для Земли в целом, а также в определении глобальной климатической значимости этих вариаций. Как известно, существуют различные земные обратные связи, причем не только положительные, обусловленные изменением альbedo за счет изменения объема снега и льда и растительного покрова планеты, или изменением количества парниковых газов в атмосфере, но и отрицательные, например, связанные с усилением циркуляции атмосферы и гидросферы, направленным на снижение широтных градиентов температуры, увеличивающихся во время оледенения.

С достаточным основанием можно полагать, что они по-разному воздействуют на орбитальные сигналы, обусловленные вариациями отдельных орбитальных элементов. Например, положительная обратная связь, обусловленная изменением альbedo в основном высоких широт Земли, вероятно, в наибольшей степени усиливает связанный с вариациями угла наклона земной оси инсоляционный сигнал, наибольшие относительные изменения которого также происходят в высоких широтах. Обратная связь, вызванная колебаниями концентрации парниковых газов в атмосфере, скорее всего в основном воздействует на непосредственный (не связанный с модуляцией прецессии) эксцентриситетный сигнал, изменяющий среднегодовую инсоляцию всей Земли. Менее ясный механизм климатического влияния прецессии, связываемый, в частности, с палеомуссонами, [Rossignol-Strick, 1983; Barron et al., 1985; Prell, Kutzbach 1987; Clemens, Prell, 1991], может иметь в большой степени региональное значение, и, следовательно, свою специфику воздействия земных обратных связей на прецессионный сигнал.

Таким образом, одинаковое, линейное усиление инсоляционных сигналов, которое предполагалось теорией Миланковича, не является достаточно обоснованным. Данное заключение подтверждает и вынужденное принятие последователями Миланковича, для согласования с эмпирическими данными, механизма "нелинейного усиления" эксцентриситетного инсоляционного сигнала [Hays et al., 1976; Imbrie et al., 1984, 1993; Berger, 1988 и многие другие]. Учет обратных связей, по-разному воздействующих на инсоляционные сигналы, соотносимые с вариациями различных орбитальных элементов, и существенно влияющих на реальную климатическую значимость этих элементов, может значительно изменить вид палеоклиматической кривой, каковой считал свою инсоляционную диаграмму М. Миланкович. Следовательно, строгий учет различных обратных связей является одним из главных условий создания корректной палеоклиматической кривой и, соответственно, орбитальной теории палеоклимата. *Именно учет специфики обратных связей во времени и пространстве может разрешить проблему нулевых среднегодовых изменений инсоляции всего земного шара, связанных с вариациями угла наклона земной оси и прецессией.* Также необходимо разработать реальный и точный механизм климатического воздействия вариаций различных орбитальных элементов, прежде всего прецессии.

Итак, недостатки теории Миланковича состоят в основном в следующем. Определяя меру воздействия инсоляции на климатическую систему строго количественно, Миланкович не учитывал качественных различий отдельных инсоляционных сигналов. Данное обстоятельство, в свою очередь, привело к тому, что указанные сигналы учитывались лишь частично, не отражая полностью реального воздействия инсоляции. Поэтому инсоляционная диаграмма Миланковича, рассчитанная для летнего калорического полугодия и  $65^\circ$  с.ш., не имеет глобальной палеоклиматической значимости и, взятая в отдельности, не может быть использована для палеоклиматических реконструкций и моделирования. Она представляет собой лишь изменения полугодовой летней инсоляции под  $65^\circ$  с.ш. в течение 600 тыс. лет (рис. 12). Чтобы получить полную картину изменений реально воздействующей на планету инсоляции, надо учесть и вариации зимней инсоляции и, конечно, вариации инсоляции в других широтных поясах.

Отсутствие учёта качественных различий инсоляционных сигналов явилось также причиной неверного утверждения, берущего начало ещё в работах Ж. Адемара и Дж. Кролля, что обусловленные прецессией сезонные контрасты инсоляции являются главной причиной оледенений. Более того, даже механизм глобального климатического влияния прецессии в работе Миланковича не только не обоснован строго теоретически, но и качественное его обоснование не является достаточно полным. Поэтому неудивительно, что эмпирические данные не подтверждают главенствующей роли прецессии в глобальных климатических колебаниях плейстоцена, демонстрируя наиболее слабый климатический отклик на частотах, соответствующих прецессионным периодам.

Последний выделенный нами недостаток теории Миланковича – формальный учёт обратных связей, которым он придавал второстепенное, по сравнению с вариациями инсоляции, значение. Однако обратные связи, как было показано выше, могут иметь решающее значение при трансформации инсоляционных сигналов в климатические изменения: отсутствие обратных связей может привести и к отсутствию заметного, т.е. выраженного в палеоклиматических записях, влияния вариаций орбитальных элементов на климат.

### 3.2 Отражение недостатков теории Миланковича в работах его последователей

Теперь, зная недостатки теории Миланковича, полезно снова вернуться к некоторым из работ его последователей, направленных на устранение противоречий этой теории. Главными из этих противоречий являются проблемы 100000-летнего периода и «среднеплейстоценового» перехода.

Как мы помним, первым шагом в решении проблемы 100000-летнего периода явилось заключение ряда авторов [Hays et al., 1976; Imbrie et al., 1984, 1992, 1993] о нелинейном механизме усиления эксцентриситетного сигнала и линейном механизме усиления орбитальных сигналов, связанных с вариациями двух других орбитальных элементов. Это заключение до недавнего времени являлось общепризнанным. Под линейным механизмом обычно понимают зависимость типа:

$$y = kx,$$

191

где  $k$  – константа (коэффициент усиления). В нашем случае  $x$  – входной (инсоляционный) сигнал,  $y$  – выходной (палеоклиматический) сигнал. Однако, как уже отмечалось, такой линейный механизм для усиления прецессионного и обусловленного вариациями наклона земной оси инсоляционных сигналов не соответствует имеющимся данным. Дело в том, что амплитуда прецессионного инсоляционного сигнала больше амплитуды сигнала угла  $\epsilon$  для полугодовой, и тем более для среднемесячной, инсоляции (рис. 19, 26). В этом случае, согласно /9/, и климатический отклик на прецессионный сигнал должен быть пропорционально больше. Однако в большинстве случаев в палеоклиматических записях плейстоцена амплитуда изменений, соответствующих периоду 41 тыс. лет, существенно превышает амплитуду изменений палеоклиматических показателей, характеризующихся прецессионными периодами. Таким образом, преобразование инсоляционных сигналов в климатические изменения, по-видимому, нельзя считать линейным ни для всех трех орбитальных элементов, как это предполагалось Миланковичем, ни для вариаций наклона земной оси и прецессии, как заключили его последователи.

С другой стороны, если учесть различия качественной структуры этих сигналов, можно даже получить вывод, обратный тому, который сделан в упомянутых работах. Наиболее надёжным показателем палеоклиматических изменений являются вариации изотопного состава кислорода в глубоководных осадках. Они отражают глобальные климатические изменения – колебания объёма льда на планете. Однако общепланетарное ненулевое изменение среднегодовой инсоляции связано только с одним орбитальным элементом – эксцентриситетом. Изменение среднегодовой инсоляции всей Земли, обусловленное вариациями двух других орбитальных элементов, как мы помним, равно нулю. Поэтому и связанный с этими орбитальными элементами глобальный входной инсоляционный сигнал равен нулю. Тогда, при линейном механизме усиления, согласно /9/, и выходной сигнал также должен быть нулевым. Однако, как известно, соответствующие вариациям наклона земной оси и прецессии палеоклиматические сигналы имеют место, т.е. они не равны нулю. Следовательно, в данном случае нельзя говорить о линейном механизме усиления. В случае же эксцентриситетного сигнала линейный механизм уместен.

только коэффициент усиления  $k$  слабого входного сигнала  $x$  будет очень большим. Однако и с усилением эксцентриситетного сигнала всё не так просто, если вспомнить о «среднеплейстоценовом» переходе: в период времени, предшествовавший 1 млн. лет назад, климатический сигнал, характеризующийся периодом около 100000 лет, был гораздо слабее, чем в течение последнего миллиона лет.

Вследствие всего сказанного, очевидно, логичнее говорить не о «линейном» или «нелинейном», а об индивидуальном климатическом отклике на соответствующий орбитальный сигнал. Одним из свойств такого индивидуального отклика является его изменчивость во времени. Очевидно, отличительные особенности индивидуального усиления соответствующих инсоляционных сигналов логично связать с уже упоминавшейся спецификой обратных связей, действующих в климатической системе Земли. Например, учитывая структуру инсоляционного сигнала вариаций угла наклона земной оси – наиболее сильные изменения в *высоких широтах* и *противофазные вариации инсоляции высоких и низких широт* – можно предположить, что на этот сигнал избирательно (наиболее эффективно) воздействуют следующие обратные связи. Прежде всего, положительная обратная связь, обусловленная вариациями альбедо в *высоких широтах* Земли, при изменении площади распространения снега и льда в этих широтах. Далее, отрицательная обратная связь, обусловленная усилением атмосферной циркуляции (меридионального переноса тепла) при похолодании в *высоких широтах*, когда угол  $\epsilon$  уменьшается. Уменьшение наклона земной оси приводит к понижению инсоляции высоких и повышению инсоляции низких широт, увеличению снежного и ледового покрова в *высоких широтах* и, таким образом, к росту термических контрастов, который и сдерживается увеличением циркуляции, противодействующим, следовательно, и глобальному похолоданию. Также можно отметить обратную связь, определяемую изменением концентрации пыли в атмосфере, вызванную колебаниями интенсивности атмосферной циркуляции и степени сухости земного климата, которые повышаются во время оледенений. Эти обратные связи влияют и на другие инсоляционные сигналы, однако, вследствие указанных причин, наиболее эффективно они будут воздействовать на сигнал, связанный с вариациями угла наклона земной оси.

Положительная обратная связь, обусловленная вариациями концентрации  $\text{CO}_2$ , очевидно, наиболее эффективно воздействует на прямой эксцентриситетный инсоляционный сигнал, однородно изменяющийся по всей поверхности Земли, что соответствует и относительно однородному (вследствие перемешивания в атмосфере планеты) изменению концентрации  $\text{CO}_2$ . В то же время можно полагать, что вариации  $\text{CO}_2$  не будут так же эффективно влиять на непосредственный инсоляционный сигнал наклона земной оси, изменение которого противофазно в высоких и низких широтах. Однако, поскольку вариации  $\text{CO}_2$  откликаются на колебания глобальной температуры и усиливают их (при понижении температуры концентрация  $\text{CO}_2$  уменьшается, например, за счёт увеличения растворимости в более холодной морской воде, и наоборот), то изменения концентрации  $\text{CO}_2$ , тем не менее, должны опосредованно усиливать и инсоляционный сигнал, связанный с вариациями наклона земной оси.

Таким образом, конкретизация специфических механизмов обратных связей, воздействующих на отдельные инсоляционные сигналы, необходима для правильного понимания работы климатической системы Земли. Наибольшие сложности в определении таких механизмов трансформации инсоляционных сигналов в глобальные климатические изменения возникают, как уже говорилось, при рассмотрении прецессионного сигнала. Это связано с необходимостью рассмотрения внутригодовой, сезонной изменчивости прецессионной инсоляции, среднегодовое изменение которой равно нулю для любой широты. Однако в большинстве работ по палеоклиматическому моделированию специфика воздействия обратных связей на различные инсоляционные сигналы, обусловленная структурными различиями этих сигналов, обычно не рассматривается.

В публикации [Berger et al., 1999] сделана попытка моделирования изменений объёма ледников Северного полушария за последние 3 миллиона лет. Моделирование проводилось с помощью модели LLN 2-D, развитой в работах Gallee et al., [1991, 1992]. «LLN 2-D – это зависящая от времени широтно-высотная модель, в которой учитывается взаимосвязь между атмосферой, верхними слоями океана, морским льдом, ледниковыми щитами и континентами Северного полушария». В каждом широтном поясе

проведено разделение на «максимум семь океанских или континентальных поверхностных типов, взаимодействующих отдельно с подповерхностными слоями и атмосферой». Атмосферная динамика представлена «зонально-усреднённой квази-геострофной моделью, которая явно включает детальный радиационный обмен». Также в модели учитываются изменения облачности, вертикального профиля температуры в верхних слоях океана, изменения альбедо поверхности Земли. Внешними факторами воздействия, определяющими динамику оледенения за 3 млн. лет, в работе [Berger et al., 1999] принимаются изменения июльской инсоляции под  $65^\circ$  с.ш. и изменения содержания углекислого газа в атмосфере.

Как оказалось в результате моделирования, содержание  $\text{CO}_2$  в атмосфере существенно влияет на формирование ледников Северного полушария. Так, при постоянной концентрации  $\text{CO}_2$

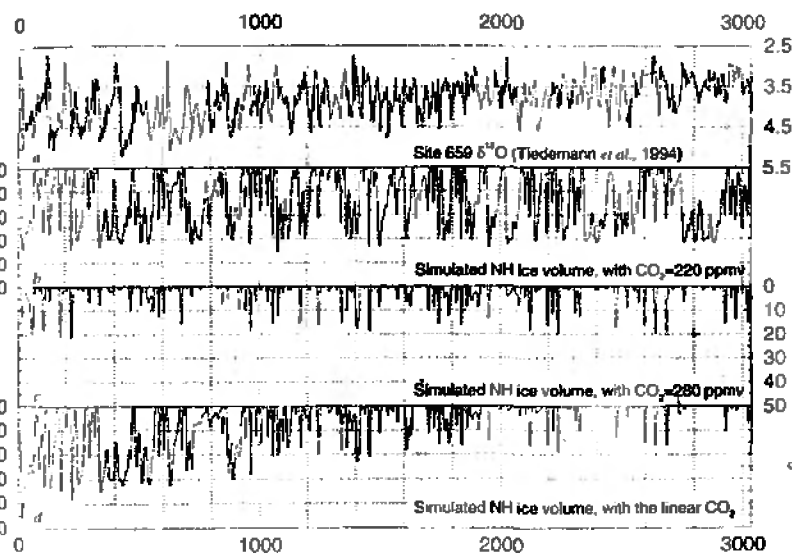


Рис. 27 (а) – изотопно-кислородная кривая (в промилле,  $\delta_{18\text{O}}$ ), по [Tiedemann et al., 1994]; (b) – моделирование объёма льда Северного полушария, в  $10^6 \text{ км}^3$ , при постоянной концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере, равной 220 ppmv (миллионных долей по объёму); (с) – то же, при концентрации  $\text{CO}_2$  280 ppmv; (d) – то же, при линейном уменьшении концентрации  $\text{CO}_2$  от 320 ppmv 3 миллиона лет назад до 200 ppmv в настоящее время. По оси абсцисс – время, в тысячах лет до современности. Рисунок из работы [Berger et al., 1999, Fig. 1].

равной 220 ppmv, происходит образование крупных ледниковых щитов, для которых характерны большие, «эксцентриситетные», периоды времени осцилляции (100 и более тысяч лет), хотя отмечены и периоды, соответствующие вариациям угла наклона земной оси и прецессии. Если же концентрация CO<sub>2</sub> равна 280 ppmv, объём образующихся ледниковых щитов гораздо меньше (рис. 27), а периоды их осцилляций распределены более-менее равномерно во временных пределах от 10 тысяч до 400 тысяч лет. И только при линейно уменьшающемся содержании CO<sub>2</sub> от 320 до 200 ppmv за время от 3 млн. лет назад до настоящего времени, авторами получен модельный результат, неплохо сопоставимый с ИК записями. Объём ледниковых щитов и главный период его колебаний увели-

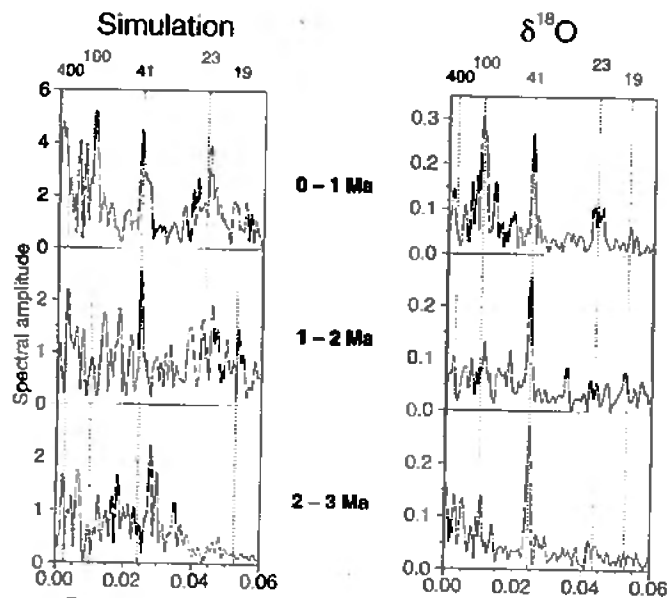


Рис. 28 Сравнение амплитудно-частотных спектров модельных изменений объёма льда Северного полушария (слева) и  $\delta^{18}\text{O}$  записи колонки 659, показанных на рис. 27d и 27a, для интервалов времени 0-1, 1-2 и 2-3 млн. лет назад. По осям абсцисс – частоты, в циклах/тыс. лет, по осям ординат – спектральные амплитуды; цифры вверху графиков – соответствующие значения орбитальных периодов, в тыс. лет. Рисунок из работы [Berger et al., 1999, Fig. 3].

чиваются, причём наиболее существенные изменения происходят на рубеже 1 млн. лет, что хорошо сопоставимо с перестройкой ледниковой ритмики, связываемой со среднеплейстоценовым переходом (рис. 27, 28). Из сравнения представленных на рис. 28 спектров изменения объёма льда в модели и ИК кривой, полученной по колонке 659 [Tiedemann et al., 1994], очевидно хорошее подобие эмпирических и модельных данных в интервале времени (1-0) млн. лет. Во временном интервале от 2-х до 1-го млн. лет подобие гораздо более слабое, но всё же в обоих спектрах выделяется преобладание периода 41 тысяча лет; в интервале (3-2) млн. лет «...больше нет астрономических периодичностей в изменении общего объёма льда в модели» [Berger et al., 1999, p.5]. Для понимания общего хода климатического процесса полезно проследить динамику изменения объёма льда в эти промежутки времени. Соответствующие графики, взятые из работы [Berger et al., 1999], показаны на рис. 29, 30.

Интервал времени 3 – 2 млн. лет назад. Авторы считают, что в начале этого интервала (численное моделирование началось с момента времени 3,035 млн. лет назад) ледники в Северном полушарии отсутствовали. Их возникновение связывается с уменьшением содержания CO<sub>2</sub> и наиболее глубокими минимумами инсоляции, которые, так же как и сё наибольшие максимумы, приходятся на максимальные значения эксцентриситета: «...в свободном ото льда тёплом мире...ледниковые щиты могут развиваться только во времена очень низкой летней инсоляции и они недолговечны так как тают в течение максимальных фаз, характеризующихся очень высокой летней инсоляцией» [Berger et al., 1999, p. 8]. Поэтому, как и в теории М. Миланковича, безлёдные периоды приходятся на интервалы времени, соответствующие низким значениям эксцентриситета – около 2,0; 2,4 и 2,8 млн. лет назад (рис. 29). Интервалы времени между этими минимумами, очевидно, представляют собой большой 400000-летний эксцентриситетный цикл, что могло бы быть основанием для проявления этого цикла в палеоклиматических записях. Поскольку вклад в изменения инсоляции, помимо прецессии, даёт и вариация угла  $\epsilon$  (рис. 26), то совпадение минимумов этих двух компонент может усилить суммарные минимумы кривой инсоляции. Помимо этого, поскольку период вариаций угла  $\epsilon$  примерно вдвое больше прецессионного периода, возможно

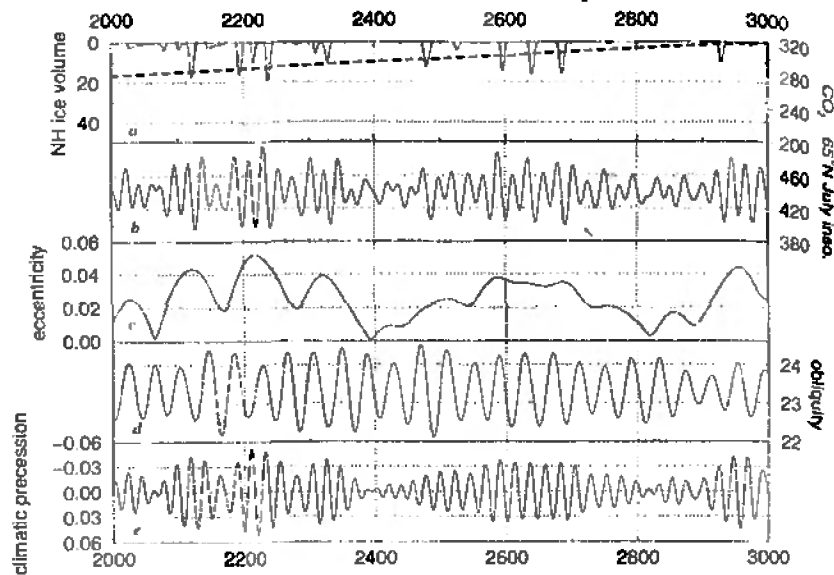


Рис. 29 (а) – изменения объёма льда в модели (в  $10^6$  км<sup>3</sup>), при условии линейного уменьшения содержания в атмосфере  $\text{CO}_2$  (в ppmv, штриховая линия), для интервала времени 3-2 млн. лет назад; вариации: (b) – июльской инсоляции над  $65^\circ$  с.ш., в  $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ ; (c) – эксцентриситета, (d) – угла наклона земной оси, в градусах, и (e) – климатической прецессии. По оси абсцисс – время, в тысячелетиях. Рисунок взят из работы [Berger et al., 1999, Fig 6c]

проявление 40-тысячелетней климатической цикличности. Именно таким совпадением авторы объясняют появление трёх пиков объёма льда в интервале времени примерно от 2,7 до 2,6 млн. лет (рис. 29). Существование трёх указанных пиков, по их мнению, подтверждает правильность, реальность модели. Во-первых, они близки по времени с отмеченным в работе [Maslin et al., 1995] возникновением ледниковых щитов Северного полушария, что «...означает, что позднелиценевая интенсификация оледенения была связана с изменением орбитальных параметров Земли, когда было достигнуто некое пороговое значение  $\text{CO}_2$ » [Berger et al., 1999, p. 4]. Во вторых, «Это объясняет, почему 41-тысячелетний период преобладает между 3 и 2 млн. лет до настоящего времени» [Berger et al., 1999, p. 8]. Иллюзорность второго утверждения – от-

носительно возможности «объяснения» – особенно очевидна, поскольку на графике изменения объёма льда (в промежутке времени 2,26 – 2,20 млн. лет) имеются три практически таких же пика, отстоящих друг от друга на прецессионные интервалы времени (рис. 29). С другой стороны, отсутствие орбитальных периодов в модели для промежутка времени 3-2 млн. лет отмечено самими же авторами (см. рис. 28).

Интервал времени 2-1 млн. лет назад. Здесь ещё сохраняется в общем механизм Миланковича, согласно которому оледенения связываются с минимальными значениями инсоляции. Однако, из-за охлаждения климата в связи с понижением концентрации  $\text{CO}_2$ , эти оледенения происходят гораздо чаще из-за повышения минимального уровня инсоляции, ниже которого они осуществляются. Авторы отмечают, что «...почти все минимумы инсоляции со значениями ниже  $420 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$  ведут к оледенению» [Berger et al., 1999, p.8]. При этих условиях оледенения могут развиваться и при высоких и при низких значениях эксцентриситета (рис. 30). Казалось бы, в данных условиях должна обязательно проявляться доминирующая цикличность управляющего инсоляционного сигнала – прецессионная (см. рис. 26). Тем не менее: «Цикл угла наклона земной оси опять доминирует в модели» [Berger et al., 1999, p.8].

Интервал времени 1-0 млн. лет назад. Авторы считают, что, в связи с дальнейшим понижением концентрации  $\text{CO}_2$ , оледенения начинают длиться дольше, чем межледниковья. «В этом ледниковом мире распространение 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  $65^\circ$  с.ш. превышает  $460 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ , что также относится к временам высокого эксцентриситета» [Berger et al., 1999, p.8]. В этом образном изложении логично представлен переход от миланковичского, объясняющего оледенения, к немиланковичскому, объясняющему межледниковья, пониманию климатических колебаний четвертичного периода. Также дано довольно логичное

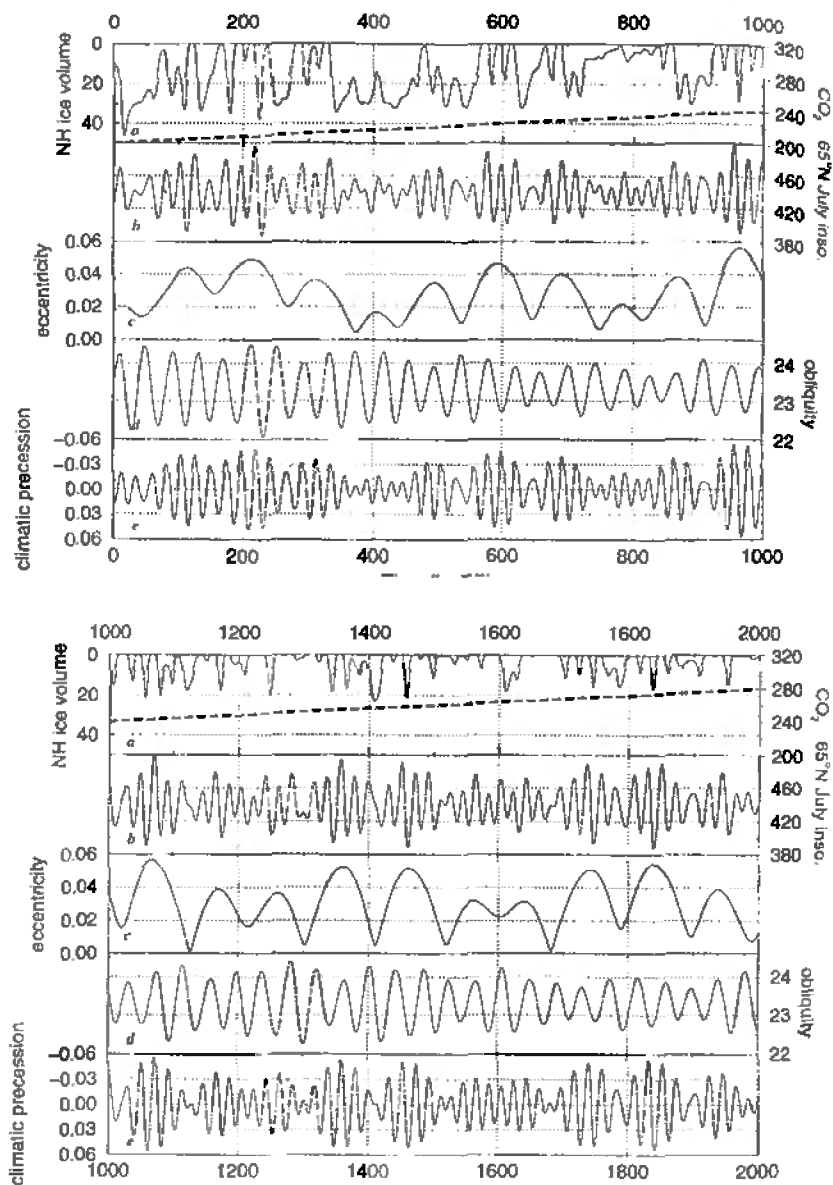


Рис. 30 Изменения палеоклиматических и орбитальных параметров, указанных в подписи к рис. 29, для интервалов времени 2-1 млн лет – внизу, и 1-0 млн лет назад –верху. (По [Berger et al., 1999, Fig. 6a,b]).

и понятное объяснение причин среднеплейстоценового перехода и преобладания 100000-летней эксцентриситетной периодичности климатических колебаний последнего миллиона лет. На мой взгляд, это простое объяснение делает ненужной довольно неочевидную, однако упомянутую авторами в качестве работающей, «...идею о том, что появление 100-тысячелетних циклов связано с существованием больших ледниковых щитов, и цикл оледенения, временная шкала которого позволяет это, будет генерироваться путём биения между двумя главными спектральными компонентами прецессии (23 и 19 тыс. лет)» [Berger et al., 1999, p.4].

Не являясь специалистом в области моделирования, я не могу судить о деталях предложенной А. Берге и др. [1999] модели. Однако соображения общего порядка, касающиеся как некоторых характеристик (параметров) модели, так и полученных результатов, считаю необходимым обсудить, особенно с позиций отмеченных выше недостатков теории М. Милянковича.

Прежде всего, несмотря на общее сходство модельного графика изменений объёма льда и ИК записи (рис. 27, а, d), имеются и заметные различия. Например, для последнего миллиона лет (рис. 30, 27) видны несоответствия модельной кривой с записью ИК стадий 6 (≅ 130-180 тыс. лет), 11 (около 400 тыс. лет), 19-21 (≅ 730-860 тыс. лет). В интервалах времени от 2-х до 1-го и от 3-х до 2-х млн. лет такие несоответствия очевидны прежде всего из сопоставления спектров модели и ИК кривой (рис. 28). Авторы полагают, что эти и другие, отмеченные ими, недостатки могут быть устранены путём дальнейшего усложнения модели при учёте дополнительных факторов, влияющих на климат. Тем не менее, по-моему, есть и другие причины несоответствий между теоретической моделью и эмпирическими данными.

Для ранних интервалов времени, особенно для интервала 3-2 млн. лет, стремление авторов [Berger et al., 1999] сравнивать модель с ИК кривой может оказаться необоснованным. ИК кривая отражает изменения глобального объёма льда и температуры, т.е. в её изменения дают вклад и колебания ледникового покрова Южного полушария, в первую очередь ледников Антарктиды. Поэтому для последнего миллиона лет сравнение модели оледенений Северного полушария, которые в основном и определяли глобальные изменения объёма льда в этот период времени, с ИК кривой

оправдано. Однако для более ранних периодов времени, когда оледенения Северного полушария были меньше, относительный вклад в вариации изотопного состава глубоководных осадков, обусловленный осцилляциями антарктического ледникового щита, должен увеличиться – ведь оледенение Антарктиды, как известно, началось гораздо раньше оледенения Северного полушария. Поэтому не исключено, что для периода времени 2-1 млн. лет и особенно 3-2 млн. лет назад ИК кривые глубоководных осадков в значительной степени отражают колебания именно Антарктического ледникового покрова.

Остаётся неясным, с чем связано преобладание в модели 41000-летнего периода ледниковых колебаний, о котором пишут авторы, если в инсоляционном воздействии значительно преобладает прецессионная 23000-летняя компонента (рис. 26, 29, 30). Почему эта преобладающая компонента инсоляционного сигнала практически не проявляется ни в климатических, ни в модельных изменениях в интервале времени 3-1 млн. лет назад, и очень слабо проявляется в течение последнего миллиона лет? Эта новая проблема, возникшая в связи с введением А. Берже в качестве входного сигнала среднемесячной инсоляции (вместо полугодовой у М. Миланковича), не обсуждается в анализируемой публикации. Тем не менее, учитывая огромное внимание, которое уделяется объяснению существования основного, 100000-летнего климатического цикла последнего миллиона лет, представляется логичным уделить не меньшее внимание практическому отсутствию, в течение всего исследуемого периода времени длительностью 3 миллиона лет, климатического проявления преобладающей, прецессионной гармоникой входного инсоляционного сигнала.

Далее, рассматриваемая модель названа, в частности, «широтной», однако в качестве внешнего воздействия рассматривается инсоляция только одной широты, 65° с.ш. Логично ожидать, что, особенно на ранних стадиях зарождения и развития оледенения Северного полушария, более важное значение могла иметь инсоляция более высоких широт. Этот вопрос также не рассмотрен авторами анализируемой статьи, хотя учёт данного обстоятельства органично объясняет преобладание 41-тысячелетнего цикла.

Используя для определения динамики оледенений довольно сложную численную модель, включающую в рассмотрение раз-

личные объекты и параметры климатической системы планеты, авторы должны быть особенно строги в определении факторов внешнего к этой системе воздействия. Не будем останавливаться на закономерности изменения во времени концентрации углекислого газа в атмосфере – очень маловероятно, что она менялась именно по принятому в работе закону, но как она менялась в действительности – неизвестно. Поэтому допущение, принятое авторами [Berger et al., 1999], в какой-то степени оправдано.

Однако совершенно неоправданным, с позиций выявленных недостатков теории Миланковича, является использование в качестве управляющего входного сигнала среднемесячной инсоляции под отдельной широтой. Мы помним, что введение среднемесячной инсоляции А. Берже оправдывал разумными доводами необходимости учёта её внутригодовой изменчивости. Однако, вместо того, чтобы использовать таким образом инсоляцию каждого месяца, он принимает во внимание только инсоляцию одного – июня или июля. Иными словами, он ещё больше усугубляет ошибку М. Миланковича, не учитывая изменений инсоляции в течение остальных 11 месяцев, и его орбитальный сигнал в ещё большей степени искажает реально воздействующую на климатическую систему Земли солнечную радиацию. Смысл создания палеоклиматической модели заключается, очевидно, в том, чтобы определить и описать механизм преобразования входного (инсоляционного) сигнала в выходной (эмпирический) палеоклиматический сигнал. Однако, если входной сигнал не отражает полностью реального внешнего воздействия, то любая модель, какой бы сложной она ни была, и как бы хорошо она ни соответствовала эмпирическим данным, не даст реального представления о работе климатической системы Земли.

Поэтому, поскольку использованный авторами [Berger et al., 1999] входной инсоляционный сигнал не отражает полностью реально воздействующей на Землю инсоляции, да и изменения CO<sub>2</sub> вряд ли соответствуют действительности, следует заключить, что к выводам их публикации следует отнестись с осторожностью.

Обратимся к ещё одной модели палеоклиматических изменений, предложенной В. Бергером [Berger, 1999]. Эта модель более проста и формальна, чем использованная в работе [Berger et al., 1999]. Главная цель статьи [Berger, 1999] – показать, в противовес

мнению Muller and MacDonald [1995, 1997a,b], что в рамках теории Миланковича может осуществляться усиление 95-тысячного климатического цикла и подавление климатического проявления двух других эксцентриситетных циклов – 125- и 400-тысячелетних. В публикации [Berger, 1999, p.307] теория Миланковича трактуется более правильно, чем в цитируемых выше статьях [Кови, 1984; Ridgwell et al., 1999 и др.]: «Теория Миланковича утверждает, что летняя инсоляция высоких северных широт является решающим фактором, определяющим нарастание ледниковых щитов или вызывающим их удаление. Всякий раз, когда в течение северного лета солнце стоит достаточно высоко над горизонтом (за счёт высокого угла наклона земной оси), или оказывается довольно большим (за счёт близости Земли к Солнцу), или в обоих этих случаях, лёд тает; в противном случае, он нарастает». Однако здесь, как и в других рассмотренных нами работах, поставлена задача объяснения не оледенений, как у Миланковича, а межледниковий: «...мы переводим теорию Миланковича в простой алгоритм, который предписывает, что лёд нарастает до тех пор, пока он не тает» [Berger, 1999, p.308].

Для того, чтобы изменения объёма льда не копировали полностью изменений инсоляции, в модели, предложенной в работах [Berger et al., 1994, 1995; Berger, 1999], введено условие, что, помимо высокой летней инсоляции, таяние будет осуществляться только при накоплении достаточно большого количества льда. Чтобы избежать таких конечных состояний, как полное таяние льда или покрытие льдом всей планеты, масса льда (ice) вводится в уравнение изменения объёма льда как отрицательная обратная связь в составе слагаемого, обеспечивающего таяние:

$$d(\text{ice})/dt = \text{«рост»} - \text{«таяние»}, \quad /10/$$

где «рост» приравнивается константе, а таяние является функцией инсоляции и объёма (массы) льда. Константа роста определяется из условия, что изменение массы льда от состояния «межледниковье» к состоянию «оледенение», приравниваемое к единице, происходит за 30-40 тысяч лет. Поэтому автор [Berger, 1999] принимает константу равной 0,03/тыс. лет. Инсоляция,  $\text{ins}(t)$ , являющаяся фактором внешнего воздействия, входит в уравнение 10 как линейное преобразование июльской инсоляции под  $65^\circ$  с.ш., вычисленной Berger and Loutre, [1991]. Изменения инсоляции, которая

входит в уравнение в четвертой степени, также ограничиваются интервалом значений от 0 до 1. Объём льда (ice), обеспечивающий отрицательную обратную связь и, значит, возвращение системы в исходное состояние, входит в уравнение тоже в четвертой степени. Поэтому уравнение 10 записывается далее следующим образом:

$$d(\text{ice})/dt = 0,03 - [\text{ins}(t)]^4 \times [\text{ice}(t)]^4. \quad /11/$$

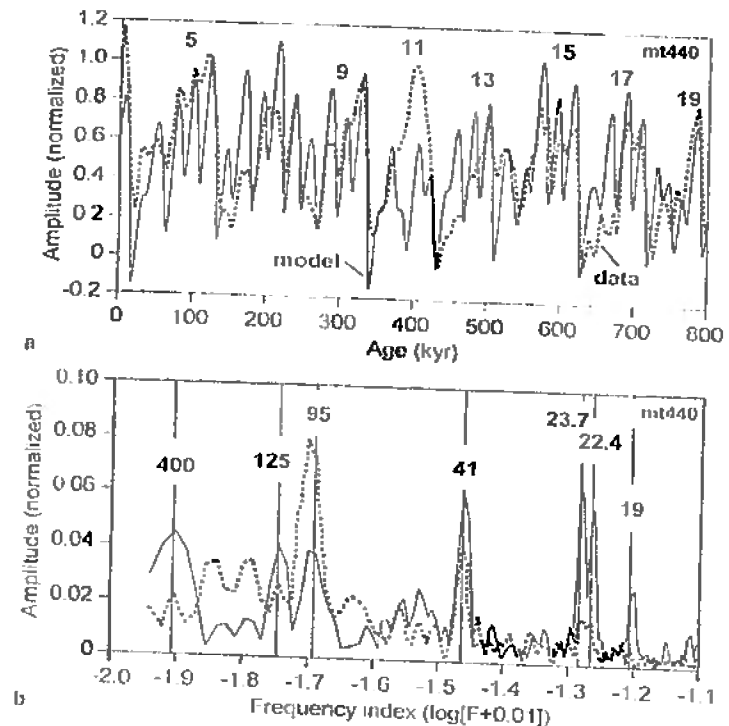


Рис. 31 (а). Сравнение изотопно-кислородной кривой  $\text{OIs}\alpha\text{x}96$  (штриховая линия) с кривой изменений объёма льда (переведённой в обычно используемые изменения уровня океана, сплошная линия) в модели, соответствующей уравнению 11. По оси абсцисс – возраст, в тыс. лет до современности, по оси ординат – нормированные величины соответствующих изменений. Нечётные цифры у кривых – номера ИК стадий. (б). Амплитудно-частотный спектр кривых, изображенных на рис. 31а. По оси абсцисс – частотный индекс,  $\log[F+0,01]$ , где  $F$  – частота, по оси ординат – нормированные амплитуды спектров. Цифры у максимумов кривых – соответствующие периоды в тысячах лет. (По [Berger, 1999, Fig.3]).

Отмечу, что величина константы и показатели степени подбирались так, чтобы кривая объёма льда, полученная интегрированием ур. /11/, наиболее близко соответствовала эмпирической ИК кривой *OJsox96*, составленной в работе [Berger et al., 1996]. Как подчёркивает Бергер [1999, р.309], второе слагаемое («таяние») в правой части уравнения 11 «...имеет форму логической установки: существенное таяние может происходить только, и если только и летняя инсоляция, и масса льда необычно велики».

Сопоставление ИК кривой *OJsox96* с вычисленными согласно /11/ изменениями объёма льда, переведёнными в изменения уровня океана, показаны на рис.31. Из рисунка видно, что в теоретическую кривую дают вклад все наиболее важные орбитальные периоды. Это обстоятельство, и особенно повышенный вклад прецессионной компоненты, приводит к несоответствию теоретической и эмпирической кривых, что особенно проявляется в наличии «проблемы 11-й стадии» (см. рис. 31а). Автор связывает данное несоответствие с тем, что в модели не отражена огромная инерционность, которую имеет реальная климатическая система. Поэтому он вводит в обратную связь (в слагаемое «таяние» уравнения 10) новый множитель – «память» ( $mem(t)$ ), который представляет «среднюю массу льда за последние 57 тысяч лет». Этот множитель, взятый в четвёртой степени, сглаживает теоретическую кривую изменений объёма льда. Одновременно множитель ( $ice$ ) берётся в первой степени, а константа роста льда принимается равной 0,025/тыс. лет, что означает, что время принятого в модели «независимого» постоянного накопления льда в условных пределах от 0 до 1 равно 40 тыс. лет. Поэтому новая формула изменения объёма льда, учитывающая инерционность климатической системы, принимает вид:

$$d(ice)/dt = 0,025 - [ins(t)]^4 \times [ice(t)] \times [mem(t)]^4. \quad /12/$$

Соответствующая этой формуле кривая изменений объёма льда, выраженная через изменения уровня океана и обозначенная  $mt414/40/57$  (что означает:  $mt$  – Milankovitch template; 4, 1, 4, – показатели степени соответственно у  $ins(t)$ ,  $ice(t)$  и  $mem(t)$ , 40 – полное время роста льда – 40 тыс. лет и 57 – интервал осреднения объёма льда – 57 тыс. лет), показана на рис. 32а сплошной линией. Теперь очевидно гораздо большее сходство теоретической и эмпирической кривых. По сравнению с кривой  $mt440$  (рис. 31), в спек-

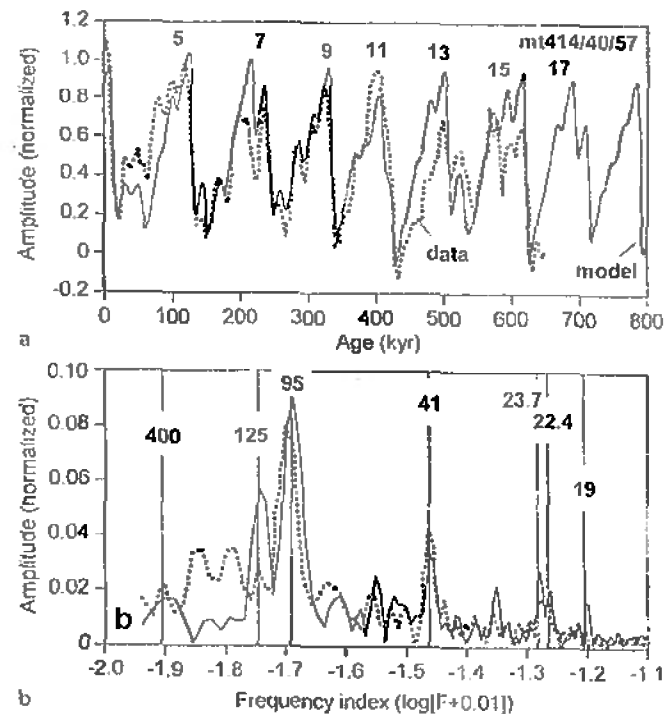


Рис. 32 Сравнение временных (а) и спектральных (б) характеристик изотопно-кислородной кривой *OJsox96* (штриховая линия) с кривой изменений объёма льда (переведённой в обычно используемые изменения уровня океана, сплошная линия) в модели, соответствующей уравнению /12/. Остальные обозначения см. в подписи к рис.31. (По [Berger, 1999, Fig.5]).

тре исчез период 400 тыс. лет (соответственно «исчезла» и «проблема 11-й стадии») и увеличилась амплитуда периода 95 тыс. лет. Однако о «подавлении» периода 125 тыс. лет», как утверждает Бергер [1999, р. 310], говорить, очевидно, нельзя, т.к. его амплитуда больше амплитуд спектральных максимумов, отражающих вариации наклона земной оси и прецессии (41, 23 и 19 тыс. лет, рис. 32б), заметно выраженных в ИК записи. Скорее, можно говорить о подавлении амплитуды прецессионных пиков в модели  $mt414/40/57$ , по сравнению с моделью  $mt440$ .

Основной вывод публикации В. Бергера [1999] заключается в том, что в теории М. Миланковича заложено проявление 95-тысячелетнего и возможность подавления двух других эксцентрических циклов. Однако проведённый нами выше анализ теории Миланковича показывает, что это не так: то, что положено Бергером в основу модели – не теория Миланковича. Как мы помним, суть теории последнего заключается в практическом подобии изменений глобальной температуры рассчитанным теоретически вариациям инсоляции летних калорических полугодий под 65° с.ш. Указанное подобие связано с принятым Миланковичем предположением о линейном усилении инсоляционных сигналов. Однако Бергер использует нелинейное, очень сложное преобразование инсоляционного сигнала, не подкреплённое какими-либо строгими доказательствами возможности его осуществления.

Далее, используемый Бергером сигнал – не полугодовая инсоляция, как у Миланковича, а среднемесячная, как у Берже, что приводит к большей выраженности прецессионной компоненты в сигнале. Также в модели предполагается постоянный, не зависящий от инсоляции, «фоновый» рост массы льда. Это важное предположение (так же как и предположение Берже и др. [1999] о линейном убывании концентрации CO<sub>2</sub>), отсутствующее в теории Миланковича, в работе не обосновано: не показано, наблюдается ли эмпирически такое увеличение объёма льда и если да, то чем оно вызвано; почему при достижении определенного объёма лёд начинает таять – ведь увеличивающиеся положительные обратные связи за счёт повышения альбедо будут, наоборот, способствовать накоплению льда.

Иными словами, модель Бергера не только не соответствует теории Миланковича. Она является к тому же и довольно формальной, чего не скрывает и он сам, при обсуждении состояния астрономической теории палеоклимата отмечая, что «... совокупность физических механизмов усиления остаётся неизвестной, физика была (и всё ещё остаётся), за пределами общего ожидания физического правдоподобия, слабо применимой при одобрении или отрицании теории» [Berger, 1999, p. 307].

Таким образом, этот пример ещё раз демонстрирует, что хорошее соответствие теории и эмпирических данных не обязательно является доказательством правильности, реальности моде-

ли. Необходимы прежде всего ясные, физически корректные механизмы трансформации инсоляционных сигналов в климатические изменения, которые бы и составили основу реальной модели. Тем не менее, и такое формальное моделирование является, очевидно, полезным, поскольку оно послужило основой важного вывода В. Бергера: из главных составляющих климатической системы не атмосфера или даже океан, а лёд является основным фактором, обеспечивающим длительные, столетиевые климатические колебания плейстоцена.

### 3.3 Некоторые итоги развития астрономической (орбитальной) теории палеоклимата.

В 2002 году минуло 160 лет со времени опубликования книги Ж. Адемара [Adhemar, 1842], в которой впервые высказана гипотеза об обусловленности оледенений геологического прошлого изменениями инсоляции, связанными с вариациями орбитальных элементов Земли. С этой гипотезы началась длительная и кропотливая работа многих поколений учёных по созданию величественной теории, получившей впоследствии название астрономической (или орбитальной) теории палеоклимата. Столь длительное время разработки этой теории, создание которой не завершено до настоящего времени, очевидно, обусловлено тем, что теория мультидисциплинарна и включает в себя такие различные отрасли естествознания, как астрономия, геология, физика, палеогеография, климатология, геофизика и другие и, конечно, математику. Наиболее заметный вклад в развитие теории внесли Дж. Кролль и М. Миланкович, с именами которых связаны определяющие, рубежные этапы её развития. Так, Кролль ввёл очень важное понятие положительных обратных связей, за счёт которых слабые орбитальные инсоляционные сигналы, даже имеющие нулевое для планеты в целом, или нулевое среднегодовое для любой широты, значение, могли трансформироваться в глобальные климатические колебания. А длительные, кропотливые вычисления Миланковича позволили, опираясь на строгие математические выкладки, представить изменения инсоляции в удобном для анализа, точном числовом выражении. С его работ началась новая эра создания численных моделей палеоклимата.

История развития теории полна драматизма, поскольку выдвигаемые варианты астрономической теории впоследствии отвергались из-за выявленных несоответствий с эмпирическими данными. Этого не избежал и М. Миланкович, который отверг версии своих предшественников из-за того, что «...ни одна из них не сумела правильно учесть изменчивость всех трёх астрономических элементов, оказывающих влияние на количество лучистой энергии, получаемой Землёй». Однако в своей теории, несмотря на математически строгие вычисления, он также не смог учесть правильно глобальное климатическое влияние изменений инсоляции, связанных с вариациями орбитальных элементов. Тем не менее, поражает и восхищает вера, с которой каждое новое поколение учёных принималось за возрождение теории. Так, несмотря на отказ от теории Миланковича в середине прошлого века большинством исследователей, в орбитальную гипотезу, которую отождествляли с теорией Миланковича, продолжали верить и искали доказательства, её подтверждающие, отдельные учёные, среди которых были С. Emiliani, W. Broecker, G. Kukla, E. Mesolella, R. Fairbridge, J. Hays, J. Imbrie, N. Shackleton.

В чём же сила орбитальной гипотезы, привлекающей к себе, несмотря ни на что, внимание многих исследователей? Думается, причиной этого являются два обстоятельства. С одной стороны, она включает в себя такой важный фактор жизни на Земле, как Солнце, определяющий и её климатические условия. Ведь, как известно, этимология слова «климат» восходит к греческому «clima», что означает наклон земной поверхности к солнечным лучам. С другой стороны, орбитальная гипотеза позволяет достаточно просто объяснить климатическую цикличность, *колебания* климата, поскольку включает в себя также *колебания* инсоляции, связанные с вариациями орбитальных элементов. Также весьма выигрышным является то обстоятельство, что вариации орбитальных элементов, а вместе с ними и колебания инсоляции, могут быть рассчитаны теоретически, и, таким образом, сопоставлены с эмпирическими (геологическими) данными, как показали Дж. Кролль и, наиболее ярко, М. Миланкович.

В течение длительного развития астрономической теории можно отметить, однако, и длительные заблуждения. Одно из них, которое началось с Адемара и продолжается у последователей

Миланковича – переоценка роли прецессии в процессе глобальных изменений плейстоцена. Вероятно, это обусловлено тем, что с прецессией связаны наиболее заметные изменения как одного из орбитальных элементов – положения земной оси, так и инсоляции. Ведь полный прецессионный оборот, на  $360^\circ$ , конца вектора земной оси в пространстве совершается в среднем за 21 тысячу лет, тогда как примерно за это же время наклон земной оси к плоскости эклиптики изменяется всего лишь на  $2,5^\circ$ . А максимальные изменения связанной с прецессией летней инсоляции одного из полушарий за последний миллион лет превышали 20% в периоды высоких значений эксцентриситета.

То обстоятельство, что прецессионные изменения инсоляции одного полугодия полностью компенсируются противоположными изменениями другого, Кролль попытался преодолеть введением обратных связей, усиливающих вариации зимней инсоляции. Однако его рассуждения были качественными, не было строго показано, что климатические последствия уменьшения зимней инсоляции не будут сведены на нет последующим увеличением летней инсоляции. Ещё более удивительно то, что и в «строгой научной математической теории колебаний климата» Миланковича климатическое влияние прецессионных вариаций инсоляции рассмотрено также на качественном уровне, о чём говорилось в разделах 1.5 и 3.1. Миланкович решил преодолеть проблему взаимной компенсации полугодовых прецессионных изменений инсоляции просто рассмотрением вариаций инсоляции только одного, летнего полугодия, игнорируя зимнее. Как было показано, это неверное решение, тем более для теории, претендующей на математическую строгость.

Здесь необходимо отметить существование широкого спектра мнений относительно направленности изменения инсоляции, приводящего к оледенениям, о котором писал ещё М. Шварцбах [1955]. Наиболее естественной причиной оледенения обычно считается *уменьшение* инсоляции. Оно может быть связано с уменьшением солнечной постоянной, попаданием Земли в потоки космической пыли, или уменьшением прозрачности атмосферы вследствие вулканических извержений. В механизмах, принятых Кроллем и Миланковичем (см. табл. 8), определяющая роль отводится не изменениям полной годовой инсоляции, а изменениям

контрастов полугодовой инсоляции: по Кроллю, к оледенению в данном полушарии приводят климатические условия с наибольшими контрастами летней и зимней инсоляции, по Миланковичу, наоборот, с наименьшими контрастами. Существует и ещё один механизм, связываемый с именем Симпсона [Simpson, 1938], согласно которому небольшое повышение инсоляции будет приводить к оледенению, а два полных колебания инсоляции могут объяснить 4 оледенения альпийской схемы Пенка и Брюкнера.

Механизма Симпсона придерживались и другие исследователи, в частности, в публикации [Шепли, 1958, с. 24-25] «условия, сопутствующие новому оледенению», описываются так: «Во-первых, необходимо, чтобы Солнце стало теплее и чтобы оно излучало больше энергии в атмосферу Земли и особенно в водные массы на её поверхности, чем в настоящее время. Достаточно повышения температуры на несколько градусов. Усиление испарения и циркуляции атмосферы приведёт к увеличению осадков и накоплению снега в высоких широтах, что в свою очередь приведёт к росту температурных контрастов на поверхности Земли. Одновременно с увеличением количества снега, выпадающего зимой, должна увеличиваться облачность и понижаться температура лета, так что снег не будет успевать таять полностью. Пусть события развиваются таким путём в течение столетия или двух. Ледники начнут возникать в благоприятных для этого местах в близких к полярным областям зонах умеренных широт, и поверхность земного шара охладится. ... Поведение одного из участников ледяной драмы должно быть строго регламентировано: в период формирования ледниковой эпохи интенсивность солнечной радиации не должна сильно превышать среднего значения, так как в этом случае летние месяцы не окажутся достаточно холодными, чтобы сохранить снег, накапливающийся зимой». Я не видел в литературе опровержения такого сценария, во всяком случае предложенный Симсоном механизм отрицательной обратной связи: «увеличение инсоляции → повышение температуры → увеличение испарения → увеличение льда → увеличение альбедо → похолодание» используется в моделях климата, в частности в модели автоколебаний В.Я и С.Я. Сергинных [1978].

Такие разные и даже в некоторых отношениях взаимоисключающие точки зрения требуют, несомненно, выяснения и уст-

ранения причин разногласий, чтобы установить однозначный механизм климатического влияния инсоляции и рамки его осуществления. Попытки создания климатических моделей без установления такого механизма не являются убедительными.

Улучшение качества эмпирических данных, которое было связано прежде всего с возможностью отбора колонок глубоко-водных отложений и разработкой и применением изотопно-кислородного метода, привело во второй половине XX столетия к очень важному открытию: было показано [Hays et al., 1976], что периоды главных климатических колебаний последнего миллиона лет практически совпадают с основными периодами вариаций орбитальных элементов. Более того, было обнаружено и фазовое соответствие этих колебаний (например, уменьшение угла  $\epsilon$  соотносилось с похолоданием, отражённым в выделенной соответствующей компоненте климатических колебаний, а увеличение  $\epsilon$  – с потеплением), что практически не оставляло сомнений в существовании связи основных климатических колебаний плейстоцена с орбитально обусловленными вариациями инсоляции. Таким образом, орбитальная гипотеза была, наконец, подтверждена.

Подтверждение орбитальной гипотезы имело многие важные последствия и вылилось в замечательные научные достижения. Они выразились в установлении более точного возраста палеомагнитной инверсии Матуяма-Брюнес [Johnson, 1982; Shackleton et al., 1990], в разработке изотопно-кислородной климатохроностратиграфической шкалы плейстоцена [Hays et al., 1976; Imbrie et al., 1984; Shackleton et al., 1990; Bassinot et al., 1994] и, соответственно, в лучшем понимании причин и последовательности климатических событий четвертичного периода.

В то же время полученные эмпирические данные выявили существенные противоречия с теорией М. Миланковича. Однако, как ни парадоксально, признание новых противоречий не привело к заключению о том, что теория Миланковича неверна. Это тем более удивительно, что новые данные подтвердили и обоснованность претензий, предъявленных к теории Миланковича ранее, – претензий, из-за которых большинство учёных были вынуждены отказаться от этой теории. (Напомню, что среди отмеченных ранее недостатков были плохая сопоставимость рассчитанных более точно инсоляционных кривых с эмпирическими данными; несоот-

ветствие одновременности палеоклиматических событий в разных полушариях с различиями кривых инсоляции для этих полушарий. Также отмечалось, что характер изменения инсоляции был примерно одинаковым в течение длительных геологических интервалов времени, тогда как климатические условия существенно изменялись, и т.д. [Шварцбах, 1955; Уиллет, 1958; Марков, Величко, 1967; Имбри, Имбри, 1988]).

Это игнорирование высказанных ранее недостатков и выявленных новых противоречий теории Миланковича представляется некоей самомистификацией знакомых с фактами исследователей, которая, к сожалению, вводит в заблуждение идущих следом естествоиспытателей, часто принимающих на веру сделанные старшими коллегами выводы. Так формируется общественное научное мнение, которое иногда путают со знанием. А это мнение временами приводит к тому, что учёных, критиковавших, или критикующих теорию Миланковича, упрекают (обычно необоснованно – ведь мнение сложилось) в «недооценке» этой теории. Так, например, А.Е. Додонов [2002, с. 31] упрекает в этом К.К. Маркова, приведя часть цитаты из книги [Марков, Величко, 1967], более полно представленную мною на стр. 67. Однако обращение к содержанию книги [Додонов, 2002, с. 31] показывает, что К.К. Марков гораздо лучше разбирался в астрономической теории, чем пожуривший его А.Е. Додонов. Так, последний, ссылаясь на А. Берже, пишет: «Согласно астрономическим расчётам, в средних широтах (?) существуют циклы солнечной радиации, соответствующие временным интервалам в 400, 100, 41, 23-19 тыс. лет. ...все эти циклы прослеживаются в течение последних 5 млн. лет, однако их значение (?) находится в функциональной зависимости от времени». В этой цитате курсив и знаки вопроса – мои, потому что циклы солнечной радиации (что представляется очевидным) действуют на всю Землю, и, следовательно, «существуют» во всех, а не только в средних широтах; какое же «значение» и в какой функциональной зависимости от времени находится, в книге не объяснено. Думаю, что автору цитаты это сделать трудно, поскольку вариации орбитальных элементов, показанные на рис. 3 его книги, он называет «изменениями инсоляции». Особенно же удивляет то, что, вопреки широко известным фактам (и мнению того же А. Берже – см. раздел 2.4) А.Е. Додонов так трактует ре-

зультаты сопоставления новых эмпирических данных по глубоководным осадкам с теорией: «Было установлено большое сходство кривой инсоляции и изотопно-кислородной кривой».

Очевидно, что канонизация теории Миланковича, её не-объективное и неоправданное отождествление с астрономической (орбитальной) теорией палеоклимата, тогда как она является лишь одной из версий последней, имело свои отрицательные последствия. Они заключаются в том, что ошибки Миланковича были повторены его последователями. Поэтому дальнейшее развитие теории существенно усложнилось, идя в ряде случаев по ложному пути, несмотря на принуждающее идти в правильном направлении воздействие эмпирических фактов.

Одной из главных ошибок теории Миланковича является отсутствие учёта качественных различий между инсоляционными сигналами, связанными с отдельными орбитальными элементами. Данная ошибка, в частности, привела к тезису о «линейном» и «нелинейном» усилении орбитальных сигналов при объяснении его последователями «проблемы 100000-летнего периода», само существование которой является, по сути, следствием той же ошибки Миланковича. В свою очередь, далее последовало привлечение для решения указанной проблемы физически малореального, на мой взгляд, механизма «биения прецессионных гармоник». В то же время, как показано выше, «линейный» механизм прецессионного и связанного с вариацией наклона земной оси инсоляционных сигналов не соответствует эмпирическим данным.

Однако совсем иные перспективы открываются при учёте качественных различий инсоляционных сигналов. Рассмотрение особенностей отдельных орбитальных сигналов приводит к выводу о существовании различных, индивидуальных механизмов их усиления (раздел 3.2). В этом выводе подчёркивается и определяющая роль обратных связей в климатическом проявлении изменений инсоляции, обусловленных вариациями различных орбитальных элементов. Разрешение проблемы 100000-летнего периода и определения специфики проявления обусловленного наклоном земной оси и прецессией орбитальных сигналов напрямую связаны с проблемой «среднеплейстоценового» перехода. Конкретного решения этих проблем всё ещё нет, а вот от разделения климати-

ческих механизмов на «линейный» и «нелинейный» начинают уже отказываться [Elkibby, Rial, 2001].

Ещё одним недостатком теории Миланковича является использование для глобальных палеоклиматических интерпретаций отдельно взятой инсоляционной кривой, рассчитанной для изменений инсоляции одного полугодия под одной широтой. Этот недостаток был усилен А. Берже введением в рассмотрение в качестве входного сигнала среднемесячной инсоляции. Использование инсоляции только одного месяца не позволяет учитывать полные, реально воздействующие на климатическую систему Земли, изменения инсоляции, происходящие в течение года. Вообще говоря, учёт *внутригодовых изменений инсоляции по всей поверхности Земли* является нормой при моделировании современных изменений климата [Раддимиен, Куцбах, 1991]. Однако, для палеоклиматических интерпретаций и создания палеоклиматических моделей (т.е. при рассмотрении длительных, порядка сотни тысяч лет и более, климатических изменений прошлого), такой способ задания неполного входного сигнала (иногда даже суточной инсоляции под  $65^\circ$  с.ш.) стал широко использоваться разными исследователями [Broecker, van Donk, 1970; Будыко, 1974, Calder, 1974; Weertman, 1976; Birchfield, Weertman, 1978, 1982; Pollard, 1978, 1982; Imbrie, Imbrie, 1980; Oerlemans, 1980; Le Treut, Ghil, 1983; Pias, Shackleton, 1984; Berger, 1988; Saltzman, Maasch, 1991; Short et al., 1991; Imbrie et al., 1993; Mudelsee, Shulz, 1997; Raymo, 1997; Berger et al., 1998, 1999; Clark, Pollard, 1998; Paillard, 1998; Berger, 1999; Ridgwell et al., 1999; Loutre, Berger, 2000a,b и др.]. Ясно, что в таком случае трудно ожидать соответствия этих интерпретаций и моделей реальным механизмам климатических изменений, даже если в них, в отличие от теории Миланковича, учитываются разнообразные земные факторы и многочисленные обратные связи.

Необходимо отдельно остановиться на отношении к данному вопросу Дж. Имбри и А. Берже, которое, как и по ряду других вопросов развития орбитальной теории, представляется мне противоречивым. Например, в публикации [Imbrie, 1982, p.413] написано: «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 вытекающая из этого двусмысленность много сделала, чтобы подорвать доверие к обоснованности временных предсказаний. Начиная с 1976 г., с приходом численных моделей, учитывающих влияние инсоляции для всех широт и сезонов, эта ситуация была значительно улучшена».

Приведённое высказывание можно было бы воспринять как признание ошибочности использования для палеоклиматического моделирования в работе [Imbrie, Imbrie, 1980] в качестве входного сигнала июньской инсоляции под  $65^\circ$  с.ш. Однако нет – в последующей работе [Imbrie et al., 1993, p.703] опять используется та же инсоляционная кривая для июня под  $65^\circ$  с.ш., на которую ссылаются как на «...сигнал, часто используемый в качестве управляющего в миланковичских теориях (in Milankovitch theories)».

Примерно такая же двусмысленная ситуация и с А. Берже, о чём мы уже говорили, анализируя его работы 1980 и 1988 гг. Учитывая принципиальную важность вопроса, добавим к этому, что в публикации [Berger et al., 1998, p.616] говорится, что «...в зависящих от времени климатических моделях необходимо учитывать воздействие астрономических вариаций инсоляции для каждой широты и дня...». Однако далее на стр. 617 замечается, что «Июньская инсоляция для  $65^\circ$  с.ш. часто используется как генеральная линия (guideline) для анализа климатических изменений и, в частности, изменения объёма льда». В соответствии с последним замечанием далее авторы [Berger et al., 1998] проводят интерпретацию и сопоставление полученных ими модельных результатов с июньской кривой инсоляции под  $65^\circ$  с.ш. Как мы видели выше, в опубликованной позже работе [Berger et al., 1999], посвящённой моделированию климатических изменений за последние 3 млн. лет, в качестве входного сигнала рассматривается уже июльская инсоляция для  $65^\circ$  с.ш.. Возможно, одна из причин такой непоследовательности Дж. Имбри и А. Берже связана с трудностью учёта в палеоклиматических моделях плейстоцена инсоляции для каждой широты и месяца, а тем более, дня.

Использование в качестве входного сигнала среднемесячной инсоляции (вместо полугодовой у Миланковича) привело к возникновению нового противоречия теории с эмпирическими данными. Оно заключается в том, что преобладающий вклад в изменение среднемесячной инсоляции вносит прецессионная компонента (рис. 26), тогда как имеющие период около 20 тысяч лет климатические изменения обычно наименее выражены в палеоклиматических записях. Например, из приведённых в работе [Imbrie et al., 1992] амплитудно-частотных спектров 15 палеоклиматических записей, полученных по разным регионам планеты, только в двух амплитуда 23-тысячелетнего пика превышает (или равна) амплитуду 41-тысячелетнего пика, причём в большинстве остальных случаев амплитуда 23-тысячелетнего пика существенно меньше амплитуды 41-тысячелетнего. Похожий результат был получен и Muller and MacDonald [1995, 1997, a,b] при анализе ИК записей глубоководных осадков. Очевидно, что эта новая проблема не менее важна для развития теории, чем проблема 100000-летнего периода, которая, как мы помним, заключается в обратном соотношении входного и выходного сигнала: практическому отсутствию входного сигнала на частоте около 0,01/тыс. лет (период около 100 тысяч лет) соответствует выходной сигнал самой большой амплитуды.

Многие исследователи, декларирующие приверженность теории Миланковича, объясняют с помощью орбитальной гипотезы не возникновение оледенений, а межледниковий [Broecker, van Donk, 1970; Raymo, 1997; Ridgwell et al., 1999; Berger, 1999; Berger et al., 1999; Loutre, Berger, 2000a]. Наиболее ясно идея такого объяснения изложена в работе [Berger et al., 1999] (см. стр. 150). В ней авторы исходят из того, что последний миллион лет – это время «ледникового мира» и только повышение инсоляции может привести к межледниковью. Есть два замечания к такой трактовке климатических изменений. Первое заключается в том, что понятие «ледниковый мир», в котором преобладает состояние оледенения, вряд ли подходит к плейстоцену, хотя его и называют «ледниковый период». Однако при этом подразумевается более широкое, чем ранее, распространение оледенений, но не их преобладание. Этого преобладания не может быть хотя бы потому, что три четверти планеты занимает Океан, тогда как ледники располагаются в

основном на континентах, покрывая, даже при их максимальном распространении, меньшую их часть.

Поэтому оледенения и межледниковья правильнее, видимо, рассматривать как колебания относительно некоего среднего положения равновесия, причём исходным, основным состоянием логичнее считать именно межледниковье, учитывая как общий тренд кайнозойского похолодания, так и отмечаемый обычно гораздо более резкий переход от оледенения к межледниковью («терминации»), чем от межледниковья к оледенению. (Относительно определения «основного состояния» климатической системы в плейстоцене, подвергнутой слабым внешним воздействиям инсоляции, возможно, уместна такая аналогия. Представим наклонную плоскость, по которой наверх с помощью небольшого силового воздействия медленно катят к вершине шар. После вершины следует обрыв. Ясно, что положение шара внизу энергетически более выгодно, более устойчиво. Поэтому, после достижения вершины, шар с гораздо большей скоростью, по аналогии с терминацией, может вернуться в своё более устойчивое, основное состояние, чем при его качении наверх).

Второе замечание состоит в следующем. Высокие значения инсоляции, как отмечают сами авторы [Berger et al., 1999], приходится на интервалы повышенных значений эксцентриситета (см. рис. 30). Однако этим же интервалам соответствуют и наиболее низкие значения инсоляции, которые, следуя логике, должны приводить к оледенениям. Тогда в указанные интервалы времени оледенения должны отстоять друг от друга в среднем на 21 тысячу лет, возможности чего авторы этой и других публикаций [Raymo, 1997; Berger, 1999; Ridgwell et al., 1999] не рассматривают.

Решение обозначенных выше важных проблем развития орбитальной (астрономической) теории палеоклимата видится прежде всего в устранении недостатков как в теории Миланковича, так и в интерпретации этой теории его последователями. В этом отношении новые перспективы открываются при учёте индивидуальных особенностей каждого из трёх орбитальных сигналов, что вызывает и необходимость тщательного учёта и рассмотрения специфики разнообразных климатических обратных связей, которые могут меняться и в пространстве и с течением времени. Также очевидна необходимость использования непрерывных во времени,

полных, представляющих не только вековые, но и внутригодовые изменения, вариаций инсоляции. Аналогично, при постановке задачи изучения глобальных изменений, необходимо учитывать вариации инсоляции в пространстве, т.е. и для высоких, и для низких широт обоих полушарий.

Очевидно, что предложенный путь решения существующих проблем, при физически корректном и математически строгом подходе к его осуществлению, весьма сложен и находится в компетенции специалистов по палеоклиматическому моделированию. Насколько мне известно, пока нет моделей палеоклимата плейстоцена, строго учитывающих хотя бы основные факторы, влияющие на глобальные климатические изменения. Поэтому, на предварительном этапе, был предложен упрощенный, во многом качественный способ устранения выявленных недостатков теории Миланковича [Большаков, 1998, 2000; Большаков, Большаков, 1999]. Прежде всего предполагалось, учитывая высказанные выше соображения и исходя из новых общих предпосылок, построить палеоклиматическую кривую, подобно инсоляционной диаграмме Миланковича, отражающую палеоклиматические события последнего миллиона лет. Способ построения этой кривой и результаты её сопоставления с эмпирическими данными — тема следующей главы.

## Глава 4. ПОСТРОЕНИЕ ОРБИТАЛЬНО-КЛИМАТИЧЕСКОЙ ДИАГРАММЫ И НОВАЯ КОНЦЕПЦИЯ ОРБИТАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ПАЛЕОКЛИМАТА

### 4.1. Некоторые общие предпосылки создания орбитально-климатической диаграммы (ОКД).

Основной целью «астрономической теории колебаний климата» М. Миланковича было объяснение причин оледенений четвертичного периода. Поэтому главным результатом его работы явилось создание инсоляционной диаграммы, которая использовалась для интерпретации палеоклиматических (палеогеографических) событий и установления хроностратиграфической шкалы плейстоцена. Хорошее соответствие этой шкалы альпийской схеме Пенка и Брюкнера, а также схеме Эберля (рис. 12, 13) было воспринято как подтверждение правильности теории и явилось основой её широкого признания. Наоборот, выявленное впоследствии несоответствие инсоляционной диаграммы новым эмпирическим данным (см. раздел 1.6.) привело многих исследователей к отказу от этой теории. Таким образом, построение палеоклиматической кривой (а именно так можно трактовать инсоляционную диаграмму Миланковича) является важным этапом развития теории палеоклимата. Выше было показано, что вычисление «орбитальной» палеоклиматической кривой на строгой математической основе требует точного учёта очень многих факторов, что является чрезвычайно сложной задачей. Поэтому был предложен упрощенный способ построения такой кривой [Большаков, Большаков, 1999]. Поскольку в качестве первичного фактора, управляющего климатическими колебаниями плейстоцена, рассматриваются вариации орбитальных элементов, кривая была названа орбитально-климатической диаграммой (ОКД) [Большаков, 2000в].

Совершенно очевидно, что исходные позиции для построения палеоклиматической кривой сейчас гораздо более основательны, чем во времена Миланковича, прежде всего из-за наличия новых, гораздо более качественных и разнообразных эмпирических данных о климатических условиях плейстоцена, в целом неплохо согласующихся между собой. К этим данным относятся полученные с использованием различных палеоиндикаторов результаты изучения донных колонок океанов, кернов льда Гренландии и Антарктиды, уникальной колонки осадков озера Байкал, разрезов

лёссовой формации [Emiliani, 1955; Kukla, 1970; Shackleton, Opdyke, 1973, 1976; Hays et al., 1976; Heller, Liu, 1982, 1984; Kukla et al., 1988; Imbrie et al., 1984, 1992, 1993; Dansgaard et al., 1993; Bassinot et al., 1994; Petit et al., 1999; Котляков, Лориус, 2000; Величко, 2002, Кузьмин и др. 2002 и многие другие]. Полученные данные оказались противоречащими теории Миланковича, что привело к обнаружению её недостатков, которые необходимо учесть при построении ОКД и дальнейшем развитии орбитальной теории [Большаков, 2000а, б, в, 2001; Большаков, Большаков, 1999; Bol'shakov, 2003].

Прежде всего, по нашему мнению, эмпирические данные указывают на то, что необходимо учитывать *непосредственное* влияние вариаций *всех трёх* орбитальных элементов, включая и эксцентриситет  $e$ . Прямое воздействие вариаций эксцентриситета очень хорошо проявляется в ИК кривых, причём не только в периоде их основных изменений, но и в фазе. Последнее выражается в том, что минимумам  $e$ , приводящим к уменьшению инсоляции, соответствуют чётные, холодные стадии ИК кривой (рис. 20, 36). Как это самое значительное за последний миллион лет проявление орбитальной (эксцентриситетной 100000-летней) цикличности в климатических изменениях можно согласовать с самыми слабыми, по Миланковичу, вариациями инсоляции? Мы объясняем это, во-первых, тем, что Миланкович не учитывал качественных различий в колебаниях инсоляции, связанных с отдельными орбитальными элементами. Ведь только вариации эксцентриситета приводят к отличиям от нуля изменениям среднегодовой инсоляции всей Земли. Во-вторых, степень климатического проявления вариаций орбитальных элементов обуславливается воздействием обратных связей, которые усиливают инсоляционные сигналы отдельных орбитальных элементов. Это усиление является неодинаковым, индивидуальным, из-за различной структуры инсоляционных сигналов отдельных орбитальных элементов, что опять же не учитывалось Миланковичем.

Также был сделан вывод о необходимости учёта непрерывных во времени, т.е. действующих в течение всего года, и пространстве, т.е. для всей Земли, вариаций инсоляции. Это требование удовлетворяется следующим образом. При построении ОКД диаграммы рассматриваются самые общие, качественные пред-

ставления о глобальном климатическом воздействии вариаций орбитальных элементов (раздел 1.3). При этом мы исходим из того, что уменьшение инсоляции приводит к похолоданию и увеличению объёма льда, а увеличение инсоляции приводит к потеплению и таянию льда. Из изложенного в разделе 1.3. вытекают следующие результаты (механизмы) глобального климатического воздействия вариаций орбитальных элементов в плейстоцене.

1. Уменьшение (или увеличение) эксцентриситета приводит к соответствующему глобальному похолоданию (или потеплению).
2. Уменьшение (или увеличение) угла наклона земной оси  $\epsilon$  ведёт к похолоданию (или потеплению) в обоих полушариях Земли. Противофазное изменение инсоляции высоких и низких широт при колебаниях угла  $\epsilon$  в данном случае преодолевается воздействием положительной обратной связи, обусловленной изменением альbedo при изменении площади ледового и снежного покрова *высоких широт*. Поэтому изменение инсоляции высоких широт в основном определяет глобальное воздействие вариаций наклона земной оси. Одним из следствий такого механизма климатического влияния вариаций наклона земной оси будет увеличение широтного градиента температуры при уменьшении угла  $\epsilon$  и уменьшение этого градиента при увеличении угла наклона. Как мы помним, при уменьшении  $\epsilon$  уменьшается инсоляция высоких широт и увеличивается инсоляция в низких широтах, т.е. увеличивается широтный градиент инсоляции и, следовательно, широтный градиент температуры. Этот градиент будет ещё больше усиливаться из-за дополнительного охлаждения высоких широт, связанного с увеличением альbedo, вызванного расширением площади ледового и снежного покрова при уменьшении угла  $\epsilon$ . В свою очередь, увеличение широтного градиента температуры приведёт к усилению меридионального переноса тепла, направленного на сглаживание температурных различий и осуществляемого прежде всего посредством усиления циркуляции атмосферы. Подтверждением предложенного механизма глобального климатического влияния вариаций угла  $\epsilon$  может служить обнаруженное в ледовом керне станции «Восток» в Антарктиде [Jouzel et al., 1993; Petit et al., 1999] увеличение количества атмосферной пыли (связываемое, в частности, с усилением циркуляции атмосферы) в моменты времени, соответствующие минимальным значениям  $\epsilon$ .

3. Как уже отмечалось, наиболее сложен вопрос *глобального* климатического влияния прецессии, поскольку среднегодовое изменение прецессионной инсоляции равно нулю для любой широты, а связанные с прецессией контрасты инсоляции противофазно меняются в разных полушариях. (В теоретических работах [Suarez, Held, 1976, 1979], в которых влияние вариаций орбитальных параметров рассматривалось в рамках модели энергетического равновесия (*energy balance climate model*), для Северного полушария был получен результат, согласующийся с механизмом, принятым Миланковичем. Однако в этой модели климатическое влияние эксцентриситета оказалось в 2,5 раза меньше влияния прецессии и в 5 раз меньше влияния угла наклона земной оси, что противоречит эмпирике. Поэтому, а также вследствие некоторой неопределённости результатов палеоклиматического моделирования, показанных выше, мы будем стремиться прежде всего выяснить качественно понятный и реальный механизм глобального климатического влияния прецессии).

Напомню, что было высказано две противоположных точки зрения о механизме климатического влияния прецессии. Кролль [Croll, 1875], критикуя Марфи (Murphy), считал, что к оледенению в данном полушарии приводят климатические условия, характеризующиеся особенно длительной холодной зимой (и жарким коротким летом). Точка зрения Марфи, а затем Шпиталера, Кёппена и Миланковича, заключалась в том, что оледенению способствует длительное прохладное лето (и короткая мягкая зима). Как мы знаем, эти климатические условия в каждом из полушарий наступают попеременно, и если в одном имеет место длительная холодная зима, то в это время в другом – длительное прохладное лето, а через время полупериода прецессии полушария как бы поменяются местами. Таким образом, согласно каждому из этих механизмов «прецессионное» похолодание одного полушария будет сопровождаться одновременным потеплением в другом. Однако это противоречит эмпирическим данным, поскольку, как известно [Боуэн, 1980; Брокер, Дентон, 1990; Imbrie et al., 1993; GRIP Members, 1993], оледенения в обоих полушариях наступали практически одновременно. В такой ситуации можно было бы предположить, что прецессия не оказывает влияния на колебания глобального объёма льда в плейстоцене, а выделение прецессионных периодов в изо-

топно-кислородных кривых глубоководных осадков либо артефакт, связанный с применением орбитальной регулировки при хронометрировании этих кривых, либо может быть связано региональному влиянию на ИК запись изменений интенсивности палеомуссонов, которые связываются с воздействием прецессии [Rossignol-Strick, 1983; Barron et al., 1985; Prell, Kutzbach, 1991]. Однако датировки коралловых террас приэкваториальных островов различных океанов [Broecker et al., 1968; Mesolella et al., 1969], пожалуй, наиболее убедительно указывают на реальность глобального климатического влияния прецессии.

Можно предложить два объяснения этой ситуации. Первое, наиболее распространённое, состоит в следующем [Berger, 1988; Broecker, Denton, 1989; Imbrie et al., 1993]. Действует только один механизм (Миланковича) и воздействие прецессионной инсоляции на Северное полушарие оказывается гораздо более сильным, чем её противофазное влияние на другое полушарие, что связывается с более широким распространением покровного оледенения в Северном полушарии. Поэтому более значительные климатические изменения этого полушария ведут за собой, посредством передающих «климатический импульс» земных агентов, например, океанских течений, изменения климата Южного полушария. Такой механизм, естественно, подразумевает некоторое *отставание* климатических изменений Южного полушария от изменений Северного полушария. Однако результаты Blunier et al. [1998], полученные при исследовании ледовых кернов Гренландии и Антарктиды, указывают на то, что записи палеоклиматических событий последних 50 тысяч лет в Антарктиде *опережают* записи соответствующих событий в Гренландии на 1-2,5 тыс. лет. Следовательно, если интерпретация палеоклиматических записей, проведённая в работе [Blunier et al., 1998] верна, это противоречит широко распространённому мнению об упреждающей роли Северного полушария в глобальных изменениях климата плейстоцена. Также, принимая во внимание определённую самостоятельность Южного полушария, и прежде всего отделённого циркумполярным течением и имеющего свои устойчивые климатические особенности, покрытого мощным слоем льда материка Антарктида, можно ожидать и его самостоятельный отклик на инсоляцию именно южных широт. (Поэтому представляется нелогичной интерпретация па-

леоклиматических данных по керну станции «Восток», расположенной почти на  $80^\circ$  южной широты, основанная на их сравнении с кривой июньской инсоляции для  $65^\circ$  северной широты [Petit et al., 1999; Shackleton, 2000]).

Второе объяснение, о котором, в частности, говорилось в работе [Berger, 1980], предполагает возможность одновременного воздействия обоих механизмов (и Кролля, и Миланковича). Это выполнимо в том случае, если действие одного механизма реализуется в одном полушарии, а одновременное действие другого – в противоположном. Например, как было уже упомянуто в разделе 3.1.3, климатические условия, характеризующиеся длительным прохладным летом и короткой мягкой зимой (механизм Миланковича), способствуют оледенению в Северном полушарии, а условия с длинной холодной зимой и жарким коротким летом (механизм Кролля) – в Южном полушарии.

Добавим здесь несколько слов о Южном полушарии, изменения объёма льда которого связаны в основном с Антарктидой. Можно предположить, что в условиях холодной зимы и жаркого лета *среднегодовой* объём льда Антарктиды должен быть выше, чем в условиях прохладное лето – мягкая зима. Представляется очевидным, что объём льда (включая и морской лёд) окружённой океаном Антарктиды, образовавшийся в течение холодной зимы будет больше, чем в течение мягкой зимы. В жаркое лето, конечно, лёд будет сильнее таять, чем в прохладное. Однако в жаркое лето будет сильнее и испарение окружающего Антарктиду океана, и поставка влаги для питания её ледников увеличится. (Подтверждением сказанного могут быть обсуждённые в главе 1 данные [Yiou et al., 1985; Lorius et al., 1985], согласно которым в тёплые периоды скорость образования льда в Антарктиде нарастает). Поэтому и среднегодовой баланс объёма льда должен сместиться в сторону его увеличения в течение усиленных контрастов инсоляции, т.е. при осуществлении механизма Кролля.

Следовательно, если рассмотренные *разные* механизмы будут работать в *разных* полушариях (в связи с природными различиями полушарий), это приведёт к синхронному изменению объёма льда в обоих полушариях, поскольку прохладное лето одного соответствует по времени холодной зиме другого.

Таким образом, в рассмотренных нами двух вариантах климатического влияния прецессионной инсоляции показана возможность практически одновременных и однонаправленных колебаний климата (объёма льда) в обоих полушариях. Согласно рассмотренным механизмам, *глобальному* оледенению будут способствовать климатические условия с длительным прохладным летом в Северном полушарии и длительной холодной зимой в Южном, что осуществляется при нахождении Земли в афелии летом Северного полушария. Учитывая определённую гипотетичность рассмотренных прецессионных механизмов, опосредованное влияние на изменения глобального объёма льда вариаций прецессионной инсоляции, логично ожидать существенно более слабого воздействия на глобальный климат этих вариаций, по сравнению с прямым воздействием изменений солнечной радиации, связанных с колебаниями наклона земной оси.

Рассмотренные нами общие механизмы глобального климатического влияния вариаций орбитальных элементов являются основой построения палеоклиматической кривой – орбитально-климатической диаграммы. Другой важный фактор её создания – теоретические расчёты вариаций орбитальных элементов для последнего миллиона лет. Нами использовались данные, приведённые в работе [Berger, Loutre, 1991]. Третье, на что мы опирались при построении ОКД – эмпирические данные о палеоклиматических (палеогеографических) изменениях плейстоцена.

#### 4.2. Упрощённый способ построения ОКД и её сравнение с ИК данными по глубоководным осадкам

Палеоклиматическая кривая (ОКД) строилась нами не для всего плейстоцена, а для последнего миллиона лет по двум причинам. Во-первых, это время преобладания 100000-летнего климатического цикла, включение же более длительного интервала времени существенно усложнило бы задачу из-за наличия «среднеплейстоценового» перехода. Во-вторых, данный интервал времени наиболее обеспечен эмпирическими данными.

Согласно рассмотренным выше качественным механизмам климатического влияния вариаций различных орбитальных элементов, к похолоданию на планете приводит: а) уменьшение эксцентриситета земной орбиты  $e$ , б) уменьшение угла наклона зем-

ной оси  $\epsilon$  и в) увеличение относительного расстояния между Землей и Солнцем летом северного полушария, отраженное величиной  $e \sin \omega$ . Чтобы добиться однообразия в представлении этих результатов, графики изменения за последний миллион лет всех трех орбитальных элементов строились так, чтобы их минимумы соответствовали похолоданиям. Для этого прецессионную кривую,  $e \sin \omega$ , в соответствии с уравнением /1/, надо взять со знаком "минус" (см. также раздел 1.3.). Соответствующие кривые показаны на рис. 33.

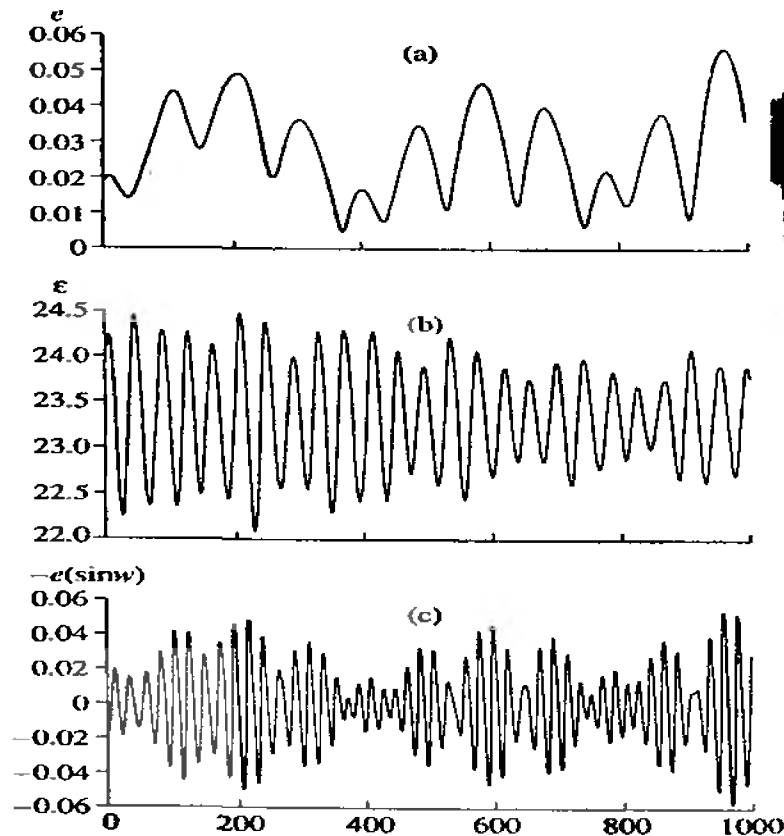


Рис. 33 Изменение за последний миллион лет: эксцентриситета, (а); угла наклона земной оси  $\epsilon$ , в градусах, (б); и климатической прецессии, взятой со знаком «минус»,  $-e(\sin \omega)$ , (с)

Логично предположить, что временные интервалы наименьших совокупных значений вариаций всех трех орбитальных элементов и будут приходиться на оледенения. Однако прежде чем складывать все три графика на рис. 33 для нахождения этих совокупных минимальных значений, кривые должны быть нормированы, так как они имеют различные амплитуды изменений. Мы делали это наиболее простым способом. Вначале рассчитывали изменения орбитальных элементов относительно их среднего арифметического значения за последний миллион лет, которое приравняли нулю. Величины, большие среднего, оказывались при этом положительными, меньшие среднего – отрицательными. Затем эти величины делились на их максимальное (по абсолютной величине) значение. В результате каждая из нормированных кривых вариаций орбитальных параметров будет заключена в пределах  $\pm 1$  по оси ординат, причем отрицательные значения, согласно принятому нами вначале условию, соответствуют похолоданиям (рис. 34).

Далее, прежде чем получить совокупное изменение орбитальных элементов путём сложения всех трёх графиков, имеющих теперь одинаковый масштаб, необходимо учесть, что разные орбитальные элементы имеют разную палеоклиматическую значимость. Это следует из эмпирических данных, согласно которым различным периодам климатических изменений соответствуют и разные амплитуды (интенсивность) этих изменений, а также согласуется с нашими представлениями о влиянии структуры отдельных орбитальных сигналов на их климатические проявления. Поэтому нормированным изменениям каждого орбитального элемента придавался различный вес, или коэффициент климатической значимости.

Наиболее заметные климатические изменения последнего миллиона лет характеризуются периодичностью около 100 тыс. лет, что связывается с вариациями эксцентриситета. Поэтому для эксцентриситетной кривой был принят наибольший коэффициент климатической значимости, равный единице. Коэффициенты климатической значимости двух других орбитальных элементов находились путем подбора так, чтобы полученная совокупная суммарная кривая в наибольшей степени соответствовала имеющимся надежным и с достаточной степенью разрешения изотопнокислородным кривым, которые в настоящее время являются

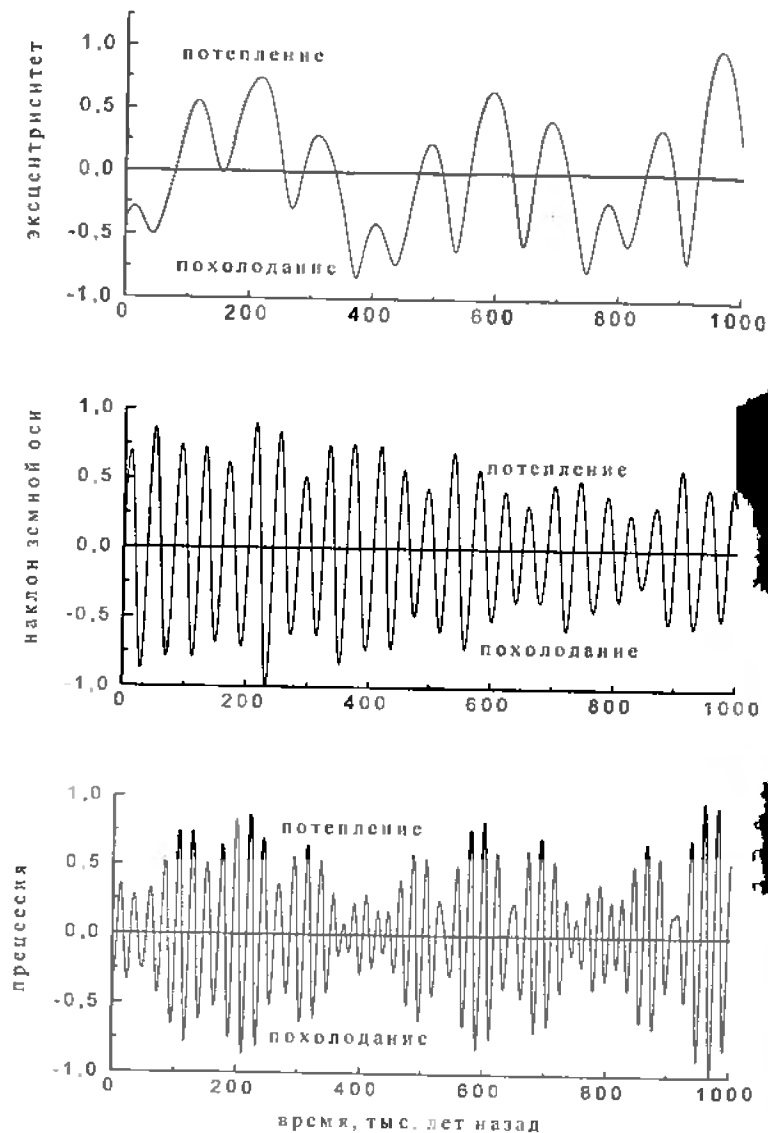


Рис. 34 Нормированные относительно среднего за последний миллион лет изменения орбитальных элементов, показанные на рис. 33. Положительные значения элементов соответствуют потеплениям, отрицательные — похолоданиям.

наиболее достоверными записями глобальных климатических изменений. Эти коэффициенты оказались равными 0,7 для  $e$  и 0,4 — 0,55 для  $(-e \times \sin w)$ . Полученная таким способом совокупная кривая (рис. 35а), названная орбитально-климатической (ОК) диаграммой [Большаков, 2000в; 2001а,б], представляет собой ожидаемое климатическое воздействие вариаций инсоляции, связанных со всеми тремя орбитальными элементами, или, иными словами, представляет условную относительную вероятность  $\Delta P$  осуществления похолоданий (для отрицательных  $\Delta P$ ) и потеплений (для положительных  $\Delta P$ ). Самые глубокие минимумы  $\Delta P$  трактуются нами как соответствующие наиболее вероятным оледенениям. Наибольшее соответствие оледенений ИК кривой и ОК диаграммы получается при условии  $\Delta P \leq -0,5$  (рис. 35, 36). Подчеркну, что ОКД является в целом теоретически построенной диаграммой, поскольку ее создание основано на общих теоретических представлениях о механизмах глобального климатического влияния вариаций орбитальных элементов, теоретических расчетах этих вариаций [Berger, Loutre, 1991] и теоретически обоснованной возможности иного, чем в теории Миланковича, соотношения климатической значимости вариаций отдельных орбитальных элементов.

Похожая на ОК диаграмму кривая была построена ранее [Imbrie et al., 1984] (см. раздел 2.2.). Она была названа *ETP*, поскольку представляла собой сумму нормированных изменений эксцентриситета (*E*), наклона земной оси (*T*) и прецессии (*P*). Таким образом, формально ОК диаграмма отличается от *ETP* только использованием введенных нами коэффициентов климатической значимости. Однако это формальное отличие связано с существенной, принципиальной разницей в интерпретации этих двух кривых. *ETP*, в отличие от ОК диаграммы, не могла использоваться (и не использовалась — см. раздел 2.2.) как палеоклиматическая кривая, поскольку, согласно теории Миланковича, непосредственное климатическое влияние вариаций эксцентриситета пренебрежимо мало по сравнению с влиянием вариаций двух других орбитальных элементов. Поэтому в вычисленных Миланковичем количественных изменениях летней инсоляции под  $65^\circ$  с.ш., которые он считал палеоклиматически значимыми, отсутствует связанный непосредственно с вариациями эксцентриситета инсоляционный вклад, который является определяющим в ОК диаграмме.

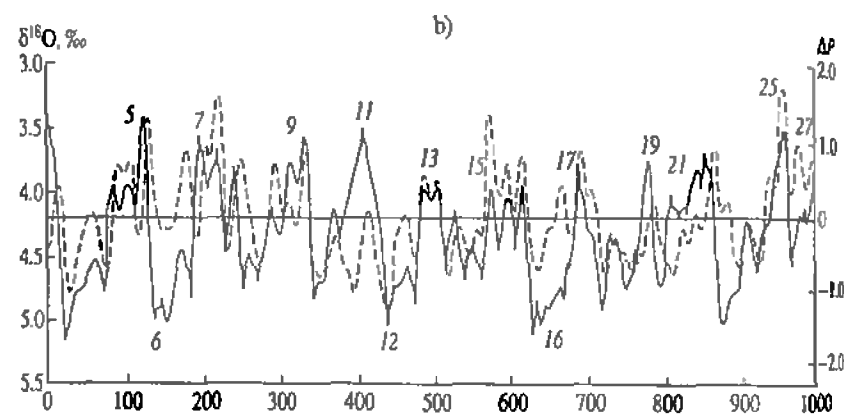
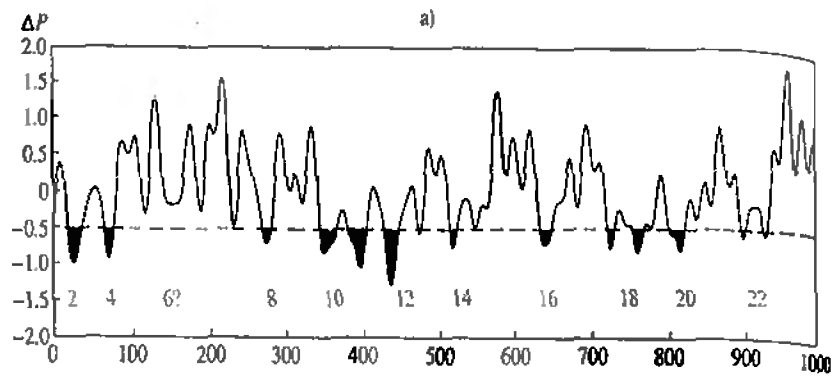


Рис. 35 а) Орбитально-климатическая (ОК) диаграмма, построенная для коэффициентов климатической значимости 1: 0,7 : 0,55. Условные единицы  $\Delta P$  представляют относительную вероятность похолоданий (для отрицательных значений) и потеплений (для положительных значений). Затененные площади с  $\Delta P < -0,5$  интерпретируются как периоды наиболее вероятных оледенений. Цифры около них означают соответствующие изотопно-кислородным холодные стадии. б) Сравнение ОК диаграммы (штриховая линия) с изотопно-кислородной (ИК) кривой Шеклтона [Shackleton, 1995]. Цифры у ИК кривой представляют номера ИК стадий, четные цифры соответствуют оледенениям, нечетные – межледниковьям. По оси абсцисс – время в тысячах лет до современности.  $\delta^{18}O$  – изменение содержания тяжелого изотопа кислорода в океанской воде.

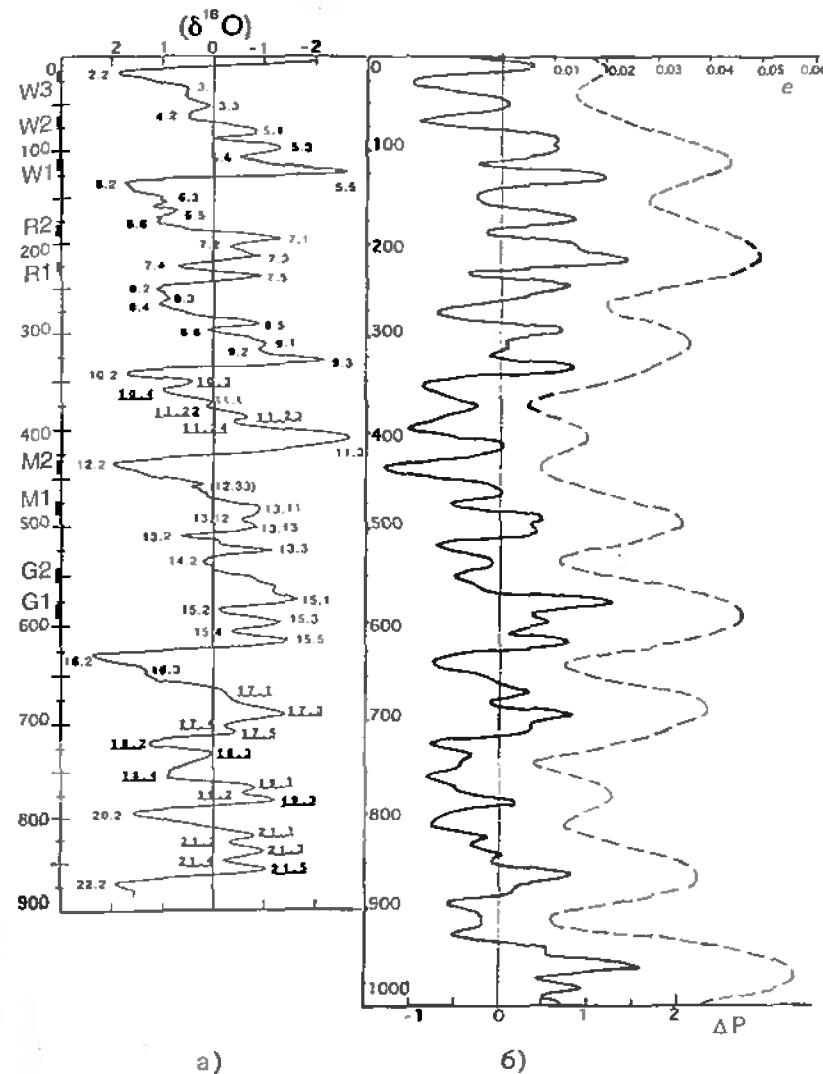


Рис. 36 Сравнение ОК диаграммы с ИК кривой [Bassinot et al., 1994]. а) Изотопно-кислородная кривая. Цифры у кривой – ИК стадии и подстадии. Затененные прямоугольники слева, обозначенные W1.2.3, R1.2, M1.2, G1.2 – оледенения Вюрм, Рисс, Миндель, Гюнц, согласно инсоляционной диаграмме Миланковича. б) ОК диаграмма (сплошная линия) и изменения эксцентриситета (штриховая линия). По оси ординат – время, в тысячах лет до современности.

Помимо этого, выше было показано, что соответствующие различным орбитальным элементам инсоляционные сигналы имеют различную структуру и, следовательно, различные, специфические для каждого элемента механизмы климатического влияния, осуществляемые посредством разнообразных земных обратных связей. В конечном итоге именно эти факторы, а не изменение летней инсоляции под  $65^\circ$  с.ш., определяют их глобальную климатическую значимость. Следовательно, ОК диаграмма, которая подразумевает влияние рассмотренных реальных факторов, может считаться палеоклиматической кривой, тогда как *ETP* – нет.

Сравнение ОК диаграммы и ИК кривых показывает довольно высокую степень их подобия, особенно для ИК стадий 1-5, 7, 12-15, 17 (рис.35, 36). Отдельно обратим внимание на визуальное сходство ОКД с записью ИК стадий 1 – 5, глубокий минимум в начале стадии 7, отмечаемый на многих ИК кривых, три пика стадии 15. Особо отметим, что соответствующий 19-й ИК стадии максимум диаграммы приходится на интервал времени 770-790 тыс. лет, что согласуется с новой оценкой возраста [Spell, McDougal, 1992] палеомагнитной инверсии Матуяма-Брюнес, которая проходит внутри 19-й ИК стадии [deMenocal et al., 1991; Schneider et al., 1992; Bassinot et al., 1994, Tauxe et al., 1996; Большаков, 1999]. Можно выделить все, кроме одного, соответствующего ИК стадии 6, оледенения за последний миллион лет. На рисунке 36 видно, что оледенения ОК диаграммы приходятся на интервалы пониженных значений эксцентриситета, которым в то же время соответствуют чётные, холодные стадии ИК кривой.

Исходя из способа построения ОКД очевидно также, что она содержит периоды вариаций всех трёх орбитальных элементов, включая 100000-летний. Наиболее важным отличием ОК диаграммы от инсоляционных диаграмм Миланковича (и его последователей), вычисленных для отдельных широт, является ее практически глобальный характер [Большаков, 2000, 2001]. Это обусловлено, в частности тем, что при построении ОКД рассматривалось не изменение инсоляции под отдельными широтами, а изменение общего климатического влияния вариаций орбитальных элементов. Также принималась во внимание реальная возможность однофазного климатического воздействия, за счёт разных механизмов, вариаций прецессионной инсоляции в разных полушариях. Кроме

этого, коэффициент климатической значимости прецессии, даже если считать её влияние противофазным в различных полушариях, наименьший среди всех трех орбитальных элементов. Таким образом, большинство отмеченных выше противоречий теории Миланковича с эмпирическими данными устраняются.

Естественно предположить запаздывание климатического отклика на управляющий орбитальный сигнал, обусловленное огромной инерционностью климатической системы планеты. Такое запаздывание логично определять по наиболее хорошо датированным глобальным климатическим событиям – оптимуму голоцена (5-6 тыс. лет назад) [Arslanov et al., 1999] и максимуму последнего оледенения (21-22 тыс. лет назад) [Imbrie et al., 1993]. Из сравнения указанных дат с соответствующими максимумом (11 тыс. лет) и минимумом (27 тыс. лет назад) ОК диаграммы следует, что запаздывание климатического отклика составляло 5-6 тыс. лет [Большаков, 2000а, 2001б]. Сказанное позволяет полагать, что в случае фиксирования в глубоководных колонках инверсии Матуяма-Брюнес может быть проведено хронометрирование изучаемых колонок просто путем соотнесения наиболее характерных максимумов и минимумов ИК кривой данной колонки с таковыми на ОК диаграмме [Большаков, 2001а, б], без проведения трудоемкой процедуры выделения и подстройки (tuning) ИК климатических циклов под вариации угла  $\epsilon$  и прецессии, как это делается обычно [Hays et al., 1976; Imbrie et al., 1984; Shackleton et al., 1990; Bassinot et al., 1994].

Хорошее в целом подобие ОК диаграммы и ИК кривых впервые непосредственно и наиболее полно подтверждает определяющее влияние орбитально обусловленных вариаций инсоляции на ритм и направленность глобальных климатических колебаний прошедшего миллиона лет. Отметим также, что ОКД похожа на модельные кривые изменения объема льда, полученные в работах [Imbrie, Imbrie, 1980; Berger, 1999] (см. рис. 31) при использовании данных о среднемесячной инсоляции под  $65^\circ$  с.ш. и других дополнительных предположений о ходе климатического процесса. Однако, в отличие от этих модельных кривых, ОК диаграмма получена на основе самых общих и очевидных механизмов климатического влияния вариаций орбитальных элементов и без использования данных об инсоляции.

#### 4.3. Некоторые несоответствия ОК диаграммы ИК данным и проблема среднеплейстоценового перехода

Очевидно, есть и расхождения теоретически построенной ОК диаграммы с ИК кривыми. Наиболее заметные из них (рис. 35, 36) – несоответствия глубины минимума ОКД в интервале 190–140 тыс. лет оледенению ИК стадии 6 и малой величины максимума ОКД около 410 тыс. лет высокому пику ИК кривой, выделенному как 11-я ИК стадия («проблема 11-й стадии»). Эти несоответствия мы связываем с несколькими факторами.

(а). Довольно общий, во многом качественный характер предположений, использованных при получении ОК диаграммы. С одной стороны, этого трудно избежать на начальном этапе исследований. С другой стороны, в этом обобщенном подходе есть свои плюсы, такие как простота и ясность интерпретации. Репрезентативность построенной нами ОК диаграммы, конечно, предполагает достаточную степень точности расчета вариаций орбитальных элементов. Касаясь этой проблемы, можем лишь отметить, что на ОКД диаграмме, полученной нами на основе данных Шараф и Будниковой [1967, 1969], максимум  $\Delta P$ , соответствующий 11-й ИК стадии (подстадия 11.3), выделяется лучше, чем на ОКД, построенной по данным Берже и Лутр [1991]. Обе диаграммы проявляют сходство в интервале 0–800 тыс. лет, однако мы использовали данные Берже и Лутр, поскольку они считаются более точными. (Помимо этого, изменения орбитальных параметров у Шараф и Будниковой подсчитаны с интервалом 5 тыс. лет, а у Берже и Лутр – более подробно, с интервалом 1 тысяча лет). Тем не менее, различия в расчетах орбитальных параметров, проведенных разными авторами, есть, и они увеличиваются для более древних эпох [Quinn et al., 1991; Berger, Loutre, 1992; Laskar et al., 1993].

(б). Недостатки интерпретации и получения ИК данных, связанные с различными причинами, о которых говорилось в разделе 2. Например, максимум на ИК кривой на рис. 36, обозначенный как подстадия 13.3, скорее всего является следствием несовершенства процесса осадконакопления, так как на этом же интервале колонки обнаружена и палеомагнитная аномалия [Bassinot et al., 1994] (см. рис. 43). Есть и другие случаи несоответствия ИК записей в различных колонках глубоководных осадков.

(в). Изменение солнечной постоянной  $S_0$ . Имеющиеся данные позволяют считать, что версия о возможности изменения солнечной постоянной и его влиянии на климат имеет право на существование. Трудность строгого обоснования такого вывода для геологических масштабов времени заключается в практической невозможности сейчас определить временную зависимость  $S_0$ .

(г). Влияние чисто земных факторов на климат, связанных с изменением состава атмосферы, альбедо земной поверхности, соотношения площади океана и суши, тектоническими процессами, спецификой взаимодействия гидросферы, атмосферы, литосферы и криосферы, на котором остановимся подробнее.

Воздействие земных факторов, особенно положительных обратных связей, как мы видели выше, просто необходимо для климатического проявления вариаций орбитальных элементов. Наглядным примером такого воздействия является процесс среднеплейстоценового перехода, когда изменение периодов основных климатических осцилляций происходит на фоне не меняющих своего характера вариаций орбитальных элементов (рис. 5, 6, 8, 24). Сравнение кривых, отражающих изменение  $\delta^{18}O$  и  $e$  (рис. 36), указывает на хорошую выраженность в ИК данных стотысячелетнего цикла эксцентриситета и отсутствие проявления в палеоклиматической записи более длиннопериодного, 404-тысячелетнего эксцентриситетного цикла, заметно проявляющегося в ОКД. Последнее является причиной не только уже отмеченных несоответствий ОК диаграммы с ИК записями 6-й и 11-й стадий, но и менее выраженных ее несоответствий с записью стадий 19 и 1, приходящихся на минимумы 404-тысячелетнего цикла  $e$  (рис. 36).

Создается впечатление, что в природе существует механизм, не учитываемый и нами при построении ОК диаграммы, поддерживающий и усиливающий амплитуду колебаний прежде всего эксцентриситетного 100-тысячелетнего, а не 400-тысячелетнего периода в последний миллион лет. Возможно, это механизм автоколебаний, который рассматривался во многих работах, упомянутых нами в разделе 2.4. Однако, учитывая хорошую в целом корреляцию ОКД с ИК записями и, в частности, оледенений и межледниковий с минимумами и максимумами эксцентриситета, реальные климатические колебания являются, видимо, не свободными, а вынужденными, управляемыми, поскольку они существенно

контролируются орбитально обусловленными изменениями инсоляции. Тем не менее, постановка вопроса о проявлении элементов свободных колебаний, обеспечивающих поддержку климатических вариаций с орбитальными частотами, конечно, обоснована.

Свободные колебания в климатических изменениях плейстоцена, как уже говорилось, могут быть обусловлены инерционностью климатической системы планеты и наличием положительных и отрицательных обратных связей, увеличивающих эту инерционность. Как известно, амплитуда колебаний будет тем больше, чем больше первоначальное отклонение от равновесного (среднего) состояния. Данное положение можно использовать для частичного объяснения "проблемы 11-й стадии". 11-й стадии предшествует холодный период, характеризуемый, согласно ОК диаграмме (рис.35, 36), большой продолжительностью (около 50 тыс. лет) и самым глубоким минимумом  $\Delta P$ . Эти два фактора определяют отклонение от состояния равновесия, которое можно считать одним из наибольших за последний миллион лет. Тогда, в случае осуществления механизма свободных колебаний, должно последовать существенное отклонение климатической системы и в другую сторону, т.е. значительное потепление, в соответствии с ИК кривыми на рис.35 и 36. Значительное потепление может осуществляться как за счёт увеличения скорости потепления, так и, возможно, за счёт некоторого расширения интервала времени потепления, по сравнению с интервалом времени, отраженным на ОК диаграмме (от 435 тыс. лет до 414 тыс. лет назад). Указанные интенсификация и "инерция" процесса потепления (как и похолодания) будут поддерживаться различными положительными обратными связями, такими как изменение состава атмосферы, изменение альбедо.

Похожий механизм, включающий вклад процессов, подобных автоколебательным, в динамику смены климатических условий от похолоданий к потеплениям, может быть предложен и как вариант объяснения относящегося к шестой ИК стадии несоответствия ОК и ИК графиков. (Предложенный здесь механизм перехода от оледенения к межледниковью и обратно, включающий в себя некую «инерционность» автоколебательного климатического процесса, имеет аналогии с рассмотренной выше моделью Бергера [Berger, 1999]. Введённый им сомножитель «память» ( $mem(t)$ ) как раз соответствует этой инерционности, поскольку учитывает при

рассмотрении перехода к межледниковью, объём образовавшегося ранее льда. Как мы помним, это и позволяет ему решить, в частности, проблему «11-й стадии» – см. рис. 31, 32).

Таким образом, механизм «управляемых» автоколебаний должен обеспечивать климатические осцилляции с периодом около 100 тысяч лет, что согласуется с выводами ряда авторов [Сергин, Сергин, 1969, 1978; Weertman, 1976; Oerlemans, 1980, 1982; Pollard, 1982; Saltzman, Maasch, 1991]. Напомним, что возможны и другие, указанные нами выше, причины выявленных несоответствий. Очевидно, этот вопрос требует специального изучения.

Поскольку наиболее значительные изменения  $\delta^{18}O$ , наблюдаемые в последний миллион лет, имеют место именно за счет более значительных похолоданий (увеличений объема льда), как следует из смещения ИК записи (рис. 24), многие исследователи связывают это изменение ритмики и амплитуды климатических вариаций с увеличением объема ледников вследствие глобального понижения температуры, которое началось еще в эоцене. Не исключено, что на рубеже 1 млн. лет масса ледников достигла некоего критического значения, необходимого для возникновения обсуждённых нами автоколебательных процессов с периодом около 100 тыс. лет в системе океан-атмосфера-криосфера-литосфера.

Возможностью существования таких управляемых автоколебаний предлагается [Большаков, 2000а,б] объяснять и переход, примерно миллион лет назад, от преобладающей 41-тысячелетней климатической цикличности к 100-тысячелетней [Ruddiman et al., 1986; Imbrie et al., 1993; Shackleton, 1995]. По-видимому, в данном случае мог осуществляться механизм, подобный механизму параметрического резонанса, когда изменение внешних условий изменяет параметры системы и ее резонансные частоты. Под изменением внешних условий я подразумеваю направленное похолодание в интервале времени от двух до одного млн. лет назад, начавшееся еще в эоцене. Это должно было привести к изменению объема ледников высоких широт и, следовательно, к изменению их инерционности. Возможный механизм смены ритмики климатических колебаний на рубеже 1 млн. лет может быть представлен в этом случае следующим образом.

В период времени, предстоящий одному миллиону лет назад, объем ледников был недостаточно велик, а температура по-

верхности планеты недостаточно низка, чтобы обеспечить разрастание ледников до размеров, сравнимых с размерами покровных оледенений плейстоцена. Поэтому изменение объема ледников, сосредоточенных в высоких широтах, подчинялось относительно короткопериодному воздействию вариаций наклона земной оси, в соответствии с обнаруженной эмпирически периодичностью этого изменения около 41 тыс. лет. Длиннопериодное воздействие вариаций эксцентриситета и связанные с ним глобальные колебания температуры планеты оказывались слишком слабыми, чтобы вызвать распространение покровных оледенений. Поэтому вариации соответствующего 100-тысячелетнего периода не были существенно выражены в климатических записях этого временного интервала.

С течением времени, по мере дальнейшего глобального охлаждения планеты, увеличивалась и масса ледников. Можно предположить, что на рубеже 1 млн. лет назад температура поверхности планеты и масса ледников в высоких широтах стали критическими по отношению к влиянию изменений инсоляции, связанных с вариациями эксцентриситета, а также к изменению альbedo и других факторов (например, концентрации  $\text{CO}_2$ ) положительной обратной связи. В этом случае "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 альbedo и других факторов, которые, в свою очередь, усиливали распространение оледенения, а также повысилась, естественно, и постоянная времени разрастания и распада ледников. На наш взгляд, совокупное действие этих трех факторов и определило новую ритмику оледенений последнего миллиона лет.

Таким образом, динамика развития глобальных оледенений в последний миллион лет определяется в основном совместным воздействием вариаций эксцентриситета и наклона эклиптики, усиленных влиянием положительных обратных связей, на фоне глобального понижения температуры. (Похожие механизмы «среднеплейстоцевого перехода», в которых одним из главных факторов является увеличение глобального объема льда, предлагались и другими исследователями [Imbrie et al., 1993; Berger, 1999;

Clark et al., 1999; Berger et al., 1999]. Однако в этих механизмах не говорится столь же определенно об управляющей роли непосредственно эксцентриситетного и связанного с вариациями наклона земной оси инсоляционных сигналов).

Из предложенного объяснения логично сделать следующее заключение. Если глобальное охлаждение планеты, начавшееся в эоцене, будет продолжаться и далее, то дальнейшее увеличение объема ледников приведет не только к увеличению площади их распространения, но и к увеличению периода ледниковых осцилляций. Поэтому при разрастании современного оледенения следует ожидать климатического проявления более длительного эксцентриситетного цикла, 400-тысячелетнего, который не проявлялся в течение последних 1,2 млн лет [Imbrie et al., 1993]. Подтверждением последнего заключения можно считать данные работ, согласно которым в течение максимальной фазы пермо-карбонového оледенения проявлялась 400-тысячелетняя климатическая цикличность, выражавшаяся в колебаниях уровня океана [Heckel, 1986; Veevers and Powell, 1987]. Как известно, пермо-карбонového оледенение Гондваны отличалось большими, по сравнению с плейстоценовым, размерами – граница его распространения доходила до 30° южной широты [Veevers and Powell, 1987]. Следовательно, эти данные можно считать подтверждающими предложенный механизм связи между колебаниями инсоляции, обусловленными вариациями угла наклона земной оси и эксцентриситета, изменениями объема ледниковых щитов и ритмики их разрастания и убывания.

Необходимо заметить, что в предложенном механизме глобальных колебаний климата в периоды гляциозр фактически принимается во внимание влияние вариаций только эксцентриситета и угла наклона земной оси. Иными словами, глобальное климатическое влияние прецессии в эти периоды времени имеет подчиненное значение. Данное заключение противоречит основам теории Миланковича и сложившимся представлениям его последователей, но подтверждается эмпирическими данными по крайней мере для последних 2-х млн. лет. Согласно этим данным, глобальное климатическое проявление прецессионных вариаций наименее выражено в ИК записях глубоководных осадков. Отметим также, что главным фактором обратной связи в периоды гляциозр – усиливающим совокупный орбитальный инсоляционный сигнал, является изме-

ление альbedo земной поверхности, обусловленное в основном колебаниями объема и площади ледового и снежного покрова высоких и умеренных широт. Отсюда вытекает, что в периоды термозы, при практическом отсутствии ледников, будут осуществляться иные механизмы климатических колебаний. Данный вопрос более подробно будет обсужден ниже.

#### 4.4. Новая концепция орбитальной теории палеоклимата.

Исходя из нашей, приведённой выше, интерпретации известных к настоящему времени палеоклиматических данных, можно предложить новую концепцию орбитальной теории палеоклимата. Новая концепция существенно дополняет и конкретизирует довольно общую первоначальную гипотезу о связи глобальных колебаний климата с вариациями орбитальных элементов и, конечно, отличается от концепций ОТП других авторов, например, Дж. Кролля [Croll, 1875] и М. Миланковича [1939]. Она сформулирована следующим образом [Большаков 2001б]:

1. Степень и характер климатического воздействия вариаций орбитальных элементов зависят от глобального палеоклиматического состояния Земли (от термозы до гляциоэры), определяемого скорее всего как земными, так и космическими причинами.
2. Определение климатической значимости вариаций каждого из трех орбитальных элементов требует учета специфики непрерывных во времени и пространстве изменений инсоляции, а также одновременного учета и более точной разработки механизмов земных климатических обратных связей, с помощью которых орбитальные сигналы трансформируются в глобальные климатические изменения.

Можно видеть, что новая концепция сосредоточена на выявлении главных факторов, определяющих климатическую значимость вариаций орбитальных элементов. Подчеркнем основные отличия новой концепции от других многочисленных интерпретаций эмпирических данных.

а) В новой концепции утверждается, что климатическое влияние орбитально обусловленных вариаций инсоляции определяется, во-первых, способами трансформации инсоляционного сигнала в глобальные климатические изменения (механизмами земных обратных связей), само наличие которых зависит от глобального клима-

тического состояния Земли, т.е. меняется во времени; во-вторых, спецификой непрерывных во времени и пространстве (а не дискретных) вариаций инсоляции. Отсюда следует важный вывод, противоречащий общепринятому мнению об определяющем влиянии связанной с прецессией летней инсоляции на изменения глобального климата плейстоцена. Он заключается в том, что климатическое влияние прецессионной инсоляции минимально и что использование кривых среднемесячной или суточной инсоляции, в которых преобладает прецессионная компонента, для палеоклиматических реконструкций плейстоцена некорректно.

б) Новая концепция ОТП позволяет впервые с единых позиций предложить непротиворечивую картину климатических колебаний (с периодами от первых десятков тысяч до нескольких сотен тысяч лет) не только четвертичного, но и более древних геологических периодов фанерозоя.

в) Представления, развитые новой концепцией, дают возможность существенно более простого объяснения синхронности глобальных климатических колебаний, чем это делается, например, в работах [Broecker, Denton, 1989; Imbrie et al., 1993].

г) Необходимо отметить простоту и очевидность основных положений, используемых при основанном на новой концепции построении ОК диаграммы, которое не требует количественного вычисления изменений инсоляции, а опирается только на общие механизмы климатического влияния и расчёты вариаций отдельных орбитальных элементов. Правда, выбор конкретных коэффициентов климатической значимости вариаций отдельных орбитальных элементов делается с учетом эмпирических данных. Однако такой учет является пока основой практически всех теоретических моделей палеоклимата. Нами же, более того, впервые дается логичное и реальное обоснование различий климатической значимости вариаций отдельных орбитальных элементов, зависящих как от структуры связанных с ними инсоляционных сигналов и региональных особенностей их воздействия, так и от общей глобальной климатической обстановки рассматриваемого периода времени.

Новая концепция явилась той идеологической основой, опираясь на которую мы уже получили ряд новых, сделанных выше выводов, касающихся изучения палеоклиматов. Это позволяет по-новому подходить к решению исследуемых проблем. Рассмотр-

рим конкретный пример. Сейчас практически все понимают необходимость учета обратных связей, трансформирующих орбитально обусловленные вариации инсоляции в глобальные климатические изменения. Например, в работе [Флон, 1980, с. 332] говорится об этом так: «...численные эксперименты по моделям, включающим климатические эффекты изменений элементов земной орбиты Земли (следуя Миланковичу), без учёта положительной обратной связи изменения альбедо являются неполными». Казалось бы, что ничего нового нет в том, что в нашей концепции также говорится об этом. Тем не менее, имеется как минимум два отличия в понимании отмеченного факта с позиций новой концепции от его традиционного понимания.

Во-первых, *реальное* осознание важности отмеченного обстоятельства сразу приводит к серьезным сомнениям в правильности основ теории Миланковича, о чем не говорят сторонники традиционных представлений. Дело в том, что, по нашему мнению, влияние обратных связей является столь существенным, что может определять соотношение климатической значимости отдельных орбитальных элементов, приводя к преобладанию, либо даже к практическому отсутствию климатических проявлений вариаций соответствующих элементов. Это утверждение не согласуется с теорией Миланковича, согласно которой характеристики глобальных климатических изменений определяются в основном рассчитанными им *вариациями инсоляции*. Наша точка зрения наиболее убедительно подтверждается явлением среднеплейстоценового перехода.

Во-вторых, сомнение в правильности теории Миланковича приводит к выявлению её недостатков, главный из которых – неполный учёт воздействующих на климатическую систему вариаций инсоляции. Поэтому в новой концепции иной объект приложения обратных связей – *непрерывные во времени и пространстве* вариации инсоляции, обусловленные изменениями *всех трёх* орбитальных элементов. Здесь мы не имеем в виду обязательный учёт *ежедневных* вариаций инсоляции под *каждой* широтой – вначале необходимо представить пространственную и временную изменчивость хотя бы *противофазных* изменений зимней и летней инсоляции при учёте прецессии и вариаций инсоляции высоких и низких широт при учёте колебаний наклона земной оси.

При этом, как уже говорилось, решение проблемы нулевых среднегодовых и для Земли в целом вариаций инсоляции, обусловленных, соответственно, прецессией и колебаниями наклона земной оси, видится нами в разработке и учёте соответствующих механизмов обратной связи, преобразующих рассматриваемые инсоляционные сигналы в климатические изменения. Важно помнить, что включение в рассмотрение обратных связей влечёт за собой значительное запаздывание (как мы видели выше, в несколько тысяч лет) климатического отклика на управляющий инсоляционный сигнал. Такое запаздывание связано с медленной, имеющей огромную инерционность перестройкой климатической системы, например, с изменением глобального объёма льда. (Как известно, для превращения снега в лёд требуются десятилетия. Естественно, что получившийся лёд будет обладать и иными свойствами, например, альбедо, или гораздо большей сопротивляемостью к воздействию солнечной радиации при таянии, чем снег).

Изменение глобального объёма льда происходит в реальной обстановке под воздействием *совокупных* изменений инсоляции, как летней, так и зимней. Поэтому использование инсоляции какого-либо месяца, или зимы, лета, по отдельности, для расчёта изменений соответствующих месячных, летних или зимних температур за сотни тысяч лет (как это делали Миланкович, или, например Short et al. [1991]), представляется неверным. Ведь изменение объёма льда, определяющее степень воздействия обратной связи, которая, в свою очередь, в большой степени определяет амплитуду температурных вариаций, будет, очевидно, разным при совокупном, полном воздействии инсоляции, и при учёте инсоляции, например, отдельного полугодия. Следовательно, в палеоклиматических моделях должно рассматриваться длительное, многотысячелетнее взаимодействие с климатической системой *совокупных* (как бы накопленных, учитывая задержку климатического отклика) изменений инсоляции, отражающих её внутrigодовую изменчивость. В противном случае неизбежны ошибки, как было с противоречащим эмпирике [Ruddiman, McIntyre, 1981] заключением Миланковича о повышении зимних температур в периоды оледенений (рис. 11).

Один из важных выводов, сделанных нами при разработке новой концепции, заключается в предположении о резонансном

усилении вариаций эксцентриситетной инсоляции в последний миллион лет, что согласуется с заключением, сделанным ранее [Hagelberg et al., 1991]. Поэтому при построении глобальных палеоклиматических моделей необходимо учитывать данный фактор и, соответственно, разработать строгий механизм такого резонансного усиления. На наш взгляд, резонанс – более реальный физически процесс, чем уже не раз упомянутая и принятая многими авторами «перекачка энергии из прецессионного уровня частот в эксцентриситетный». Как следует из вышесказанного, поставленные на основе новой концепции задачи гораздо более сложны, но они и более логичны. Рекомендации по учёту резонансных явлений и рассмотрению воздействия обратных связей на совместные противофазные изменения инсоляции, насколько можно судить по известным мне публикациям, пока не учитываются при разработке численных палеоклиматических моделей [Будыко, Васищева, 1971; Suarez, Held, 1976, 1979; Saltzman, Maash, 1991; Short et al., 1991; Gallee et al., 1992; Berger et al., 1998, 1999; Berger, 1999 и др].

На качественном уровне модель глобальных климатических колебаний последнего миллиона лет, учитывая хорошую сопоставимость ОКД с ИК кривыми и принятый общий механизм климатического воздействия орбитальных вариаций, может быть представлена следующим образом. Орбитальные изменения определяют вариации инсоляции, которые вызывают начальные изменения температуры в основном высоких широт, приводящих с помощью положительной обратной связи за счет альбеда, обусловленного вариациями объема и площади льда и снега в указанных широтах, к более значительным и распространяющимся шире колебаниям температуры. В свою очередь, эти колебания более существенно воздействуют на изменения температуры Мирового океана и связанной с температурой концентрацией парниковых газов в атмосфере, после чего действие всех факторов определяет результирующие глобальные колебания объема льда и температуры (климатические колебания).

Отсюда следует, что не вариации содержания парниковых газов в атмосфере, в частности  $\text{CO}_2$ , а, скорее, вариации инсоляции, вызывающие изменения температуры и затем глобального объема льда, являются первичными причинами глобальных климатических изменений четвертичного периода. Из представленной

картины также следует, что, поскольку земные факторы взаимосвязаны и воздействуют друг на друга (вариации температуры вызывают колебания объема льда и концентрации углекислого газа в атмосфере, которые, в свою очередь, изменяют температуру), разделение их по времени в эмпирических записях – непростая задача. Тем не менее, в ряде работ говорится об опережении изменений объема льда вариациями  $\text{CO}_2$  [Pisias, Shackleton, 1984; Saltzman, Verbitsky, 1994; Berger et al., 1998; Li et al., 1998; Petit et al., 1999; Shackleton, 2000].

Например, реконструированные в работе [Li et al., 1998] для последних 600 тыс. лет колебания  $\text{CO}_2$  (с использованием данных по станции «Восток» в Антарктиде) опережают изменения  $\delta^{18}\text{O}$  кривой SPECMAP на 4,5 тыс. лет. Полученные данные используются для моделирования изменений глобального объема льда, причём вариации  $\text{CO}_2$  рассматриваются как внешнее воздействие ( $\text{CO}_2$  forcing), управляющее этими изменениями. Даже сделан вывод, что «Межледниковый уровень  $\text{CO}_2$  необходим для объяснения как межледниковья изотопно-кислородной стадии 11, так и нашего современного межледниковья» [Li et al., 1998, p.537]. Однако с наших позиций представление о том, что изменение содержания  $\text{CO}_2$  опережает изменения глобального объема льда и управляет этими изменениями, является неверным. Также неточным представляется утверждение [Pisias, Shackleton, 1984, p.757], что «... изменения в атмосфере концентрации двуокиси углерода ... сами вызваны орбитальными параметрами». Никто пока не предложил механизм непосредственного воздействия вариаций орбитальных элементов, приводящий к изменениям концентрации  $\text{CO}_2$ , амплитудно-временной спектр которых подобен спектру климатических вариаций (такой спектр получен авторами [Pisias, Shackleton, 1984] с использованием эмпирических данных).

Представляется более корректным считать, что изменения  $\text{CO}_2$  являются следствием глобальных колебаний температуры (которые вызваны орбитально обусловленными вариациями инсоляции, усиленными колебаниями объема льда) и, в свою очередь, усиливают температурные колебания. В противном случае, авторам [Pisias, Shackleton, 1984] необходимо самим представить конкретные соображения по поводу непосредственного воздействия орбитально обусловленных вариаций инсоляции на содержание

углекислого газа в атмосфере. Добавлю, что наша точка зрения подтверждается данными по станции «Восток». В работе [Petit et al., 1999, p.433] указано, что «Уменьшение  $\text{CO}_2$  отстаёт от уменьшения температуры на несколько тысяч лет». А поскольку температурная кривая в этой работе сопоставляется напрямую с изотопно-кислородной, которая считается представляющей изменения объёма льда, из этого следует, что и изменения объёма льда опережают изменения концентрации  $\text{CO}_2$ .

Однако при рассмотрении непосредственно переходов от оледенений к межледниковьям авторы [Petit et al., 1999, p.435] далее заключают: «Эти исследования предполагают, что во время каждой терминации осуществляется одна и та же последовательность климатического воздействия: орбитальное воздействие (с возможным вкладом локальных изменений инсоляции), сопровождаемое двумя сильными усилителями, среди которых первым действуют парниковые газы, затем дегляциация и обратная связь за счёт альbedo льда». Нетрудно видеть, что процитированное заключение противоречит сделанному теми же авторами выводу, представленному нами выше, о том, что вариации  $\text{CO}_2$  следуют за изменениями температуры. В противном случае, авторы должны отказаться от хронометрирования своей дейтериевой температурной кривой посредством прямого временного сопоставления её палеоклиматических особенностей с аналогичными особенностями глубоководной ИК кривой, которая, как они считают, представляет колебания объёма льда на планете.

Очевидно, что выявление временной последовательности изменений температуры, объёма льда и  $\text{CO}_2$  важно как для теории, так и для практики. В случае предложенного здесь варианта, который представляется мне логичным и обоснованным, получается, что вариации  $\text{CO}_2$  являются следствием изменения инсоляции и температуры. Следовательно, вообще говоря, вариации  $\text{CO}_2$  могут просто сопровождать климатические изменения, практически не влияя на них (что, кстати, утверждается некоторыми авторами [Сорохтин, 2001]). На возможность их климатического влияния указывает только известный факт, что углекислый газ задерживает низкочастотное инфракрасное тепловое излучение Земли. Однако точная оценка влияния этого парникового эффекта, как уже говорилось выше, задача непростая [Кондратьев, 1992]. Поэтому кон-

кретные оценки влияния вариаций концентрации  $\text{CO}_2$  на глобальную температуру или объём льда настораживают, особенно когда не указывается, как, например, учитывается одновременное влияние других обратных связей, таких как альбедная, связанная с концентрацией пыли в атмосфере и др. С этих позиций представляются малоубедительными результаты оценки влияния  $\text{CO}_2$  и его содержания в атмосфере, необходимого для формирования ледников Северного полушария, представленные в работах [Saltzman, Verbitsky, 1994; Berger et al., 1998, 1999].

Таким образом, новая концепция приводит к иному, по сравнению с принятым ранее, пониманию конкретного механизма глобальных изменений палеоклимата. При этом, исходя из тех же эмпирических данных, которые анализировались другими авторами, могут быть получены выводы, существенно отличающиеся от выводов этих авторов. Ниже будут рассмотрены примеры использования новых представлений для объяснения особенностей характеризующих орбитальными периодами циклических климатических изменений во время термоэр, т.е. в периоды практического отсутствия ледовых покровов на планете.

#### 4.5. Климатические циклы в периоды термоэр с позиций новой концепции ОТП

Как проявлялось климатически воздействие орбитально обусловленных вариаций инсоляции в течение термоэр, когда ледниковый покров в высоких широтах отсутствовал? Имело ли место заметное прямое климатическое влияние вариаций эксцентриситета и угла наклона земной оси при отсутствии усиления инсоляционных сигналов посредством положительной обратной связи, вызванной изменением объёма и площади ледового и снежного покрова? Или вариации  $e$  и угла  $\epsilon$  только модулировали прецессионные циклы?

Из вышесказанного очевидна исключительная роль объёма ледникового покрова в проявлении орбитальных периодов климатических циклов. Следовательно, отсутствие льда приведет к существенно иным механизмам климатических осцилляций. Основываясь на рассмотренных нами механизмах климатического влияния орбитальных элементов (разделы 1.3 и 4.1), можно предположить, в отличие от мнения других исследователей, что клима-

тические циклы, связанные непосредственно с вариациями эксцентриситета и угла наклона земной оси, в периоды термоэра будут практически отсутствовать. Это предположение подтверждается в целом эмпирическими данными [Жемчужников, 1963; Dean et al., 1981; Arthur et al., 1984; Barron et al., 1985; Herbert, Fisher, 1986; Olsen, 1986; Kent et al., 1995]. Так, в мезозое, эоцене и миоцене имеют место в основном 23-тысячелетние (прецессионные) климатические колебания, промодулированные вариациями эксцентриситета. Самостоятельное проявление других орбитальных циклов не наблюдается.

Однако рассмотрим некоторые работы подробнее. Логичным представляется механизм *регионального* климатического влияния прецессионных вариаций инсоляции, предложенный рядом авторов [Rossignol-Strick, 1983; Barron et al., 1985; Prell, Kutzbach, 1987]. В частности, авторы работы [Barron et al., 1985, p. 336-337] полагают, что "климат отдельных регионов в низких и средних широтах чувствителен к амплитуде сезонного цикла (инсоляции – В.Б.)", которая "может сильно воздействовать на температурный контраст между океаном и сушей из-за различий их тепловой инерции." Они заключили, что "вариации термических контрастов земля-море должны быть связаны с вариациями интенсивности выпадения осадков". Иными словами, прецессионные вариации влияют на региональные изменения интенсивности выпадения атмосферных осадков, причем *увеличение сезонных контрастов инсоляции, т.е. состояние «жаркое лето – холодная зима», приводит к увеличению количества осадков* [Barron et al., 1985; Prell, Kutzbach, 1987; Rossignol-Strick, 1983]. Таким образом, влияние прецессионных изменений инсоляции должно в наибольшей степени проявляться в области низких и умеренных широт, характеризующих муссонным типом климата. Вариации инсоляции вызывают изменения интенсивности выпадения водных осадков, что будет приводить к колебаниям уровня озер и изменению условий осадконакопления в бассейнах внутри- и эпиконтинентальных морей. Последнее связывается с колебаниями количества поступающей в такие бассейны пресной воды, приносимой реками и атмосферными осадками. Увеличение количества пресной воды приводит к усилению соленостной стратификации морской воды, что препятствует нормальной термохалинной циркуляции и поступле-

нию кислорода в придонные воды. В результате в придонном слое формируются застойные безокисные условия, приводящие в конечном итоге к образованию на дне водоема сапропелей [Williams et al., 1978; Rossignol-Strick et al., 1982]. Поэтому связанные с влиянием прецессии изменения условий осадконакопления выражаются в циклических изменениях содержания органики и карбонатов в осадке, его цвета, литологических особенностей и т. д.

Проявление эксцентриситетной модуляции прецессионных изменений, отраженных в последовательности седиментационных циклов, стало основой предложенного в ряде работ [Hilgen, Langereis, 1989; Hilgen, 1991; Van Vugt et al., 1998; Steenbrink et al., 2000] метода "астрохроностратиграфии". Метод основывается на сопоставлении регистрируемых седиментационных циклов с рассчитанными теоретически циклическими изменениями во времени прецессии, промодулированной вариациями эксцентриситета, или даже изменениями среднемесячной инсоляции, прецессионный вклад в которые является определяющим (рис. 8, 26). Существование эксцентриситетной модуляции прецессионных климатических циклов является решающим условием применения метода, поскольку позволяет, по мнению его сторонников, однозначно сопоставлять палеогеографическую запись с теоретически рассчитанными изменениями эксцентриситета и прецессии (рис. 37). Максимальным значениям  $e$  соответствуют наиболее хорошо выраженные и легко выделяемые седиментационные циклы, минимальным значениям – практическое отсутствие "орбитальной" цикличности в седиментационной записи. Это отсутствие отражает реальную, как уже отмечалось выше, неизменность, "осредненность", условий осадконакопления в зависимости от прецессионного изменения положения земной оси, когда величина эксцентриситета близка к нулю (рис. 8, 37). Хилген [1991] связывает цикличность формирования сапропелей в средиземноморских отложениях с прецессионными климатическими изменениями, которые определяют интенсивность стока вод Нила. Он постулирует, что "калибровка циклических последовательностей сапропелей позднеплиоценового-раннеплейстоценового возраста к новым астрономическим вычислениям прецессии и эксцентриситета" может быть использована для датировки этих сапропелей "с точностью 1 тыс. лет" [Hilgen, 1991, p. 242]. Однако установление конкретного

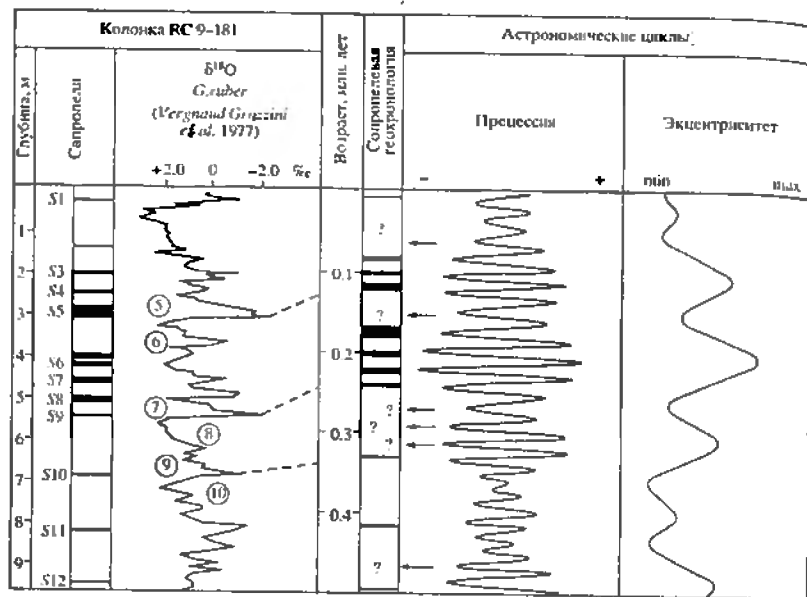


Рис. 37 Определение фазовых соотношений между циклами сапропелей и орбитальными циклами прецессии и эксцентриситета, основанное на приведении позднплейстоценового разреза сапропелей стандартной колонки RC 9-181 в Восточном Средиземноморье к астрономическим данным (по [Hilgen, Fig. 3]). Стрелки и знаки вопроса указывают на отсутствующие в седиментационной записи сапропелевые слои, которые, в соответствии с представлениями Хилгена, должны бы иметь место.

соотношения между формированием позднплейстоценовых сапропелей и орбитальными циклами (рис. 37), которое является основой для проверки предложенного метода астрохроностратиграфии и точного датирования, нельзя признать убедительным.

По мнению Хилгена, образование сапропелей соотносится с прецессионными минимумами; отсюда же следует, что чем больше глубина минимума, тем мощнее должен быть слой сапропеля. (Похожий механизм связи вариаций прецессионной инсоляции с образованием сапропелей для той же колонки RC 9 – 181 был предложен ранее в работе [Rossignol-Strick, 1983]). Это не противоречит теоретическим представлениям. Уменьшение прецессионного индекса *eximiv* (рис. 7, 8) означает уменьшение расстояния между Землей и Солнцем летом Северного полушария и,

таким образом, увеличение сезонных контрастов инсоляции в данном полушарии, в котором находится основная площадь водосбора реки Нил. А именно увеличение сезонных климатических контрастов приводит к увеличению количества водных осадков и образованию сапропелей для рассматриваемого региона.

Однако из рис. 37 следует, что полная корреляция между не только мощностью и глубиной минимумов, но даже между наличием сапропелевых слоев и глубиной минимумов прецессионной кривой отсутствует для относительно недавнего, наиболее хорошо изученного временного интервала 0 – 450 тыс. лет. Как же тогда можно говорить об однозначной корреляции, да еще с точностью 1 тыс. лет, для слоев сапропелей на порядок большего возраста? И это не учитывая неполноты геологической летописи в изучаемых разрезах. Иными словами, фактически получается способ стратиграфической корреляции путем "отчета сверху", со всеми его недостатками, критикуемый и отвергнутый многими исследователями [Боуэн, 1981]. Необходимо помнить также, что использование палеомагнитных данных для корреляции имеет свои проблемы, особенно когда речь идет об определении точного положения палеомагнитной инверсии [Channel et al., 1982; Van Hoof, Langereis, 1992; Большаков, 1996, 1999].

Анализируя показанные на рис. 37 данные, необходимо отметить еще одно важное обстоятельство, касающееся механизма образования сапропелей и, следовательно, обоснования самого метода астрохроностратиграфии. Как отмечалось еще Rossignol-Strick [1983], образование сапропелей связывается с теплыми межледниковыми периодами, за исключением слоев S6 и S8, образовавшихся соответственно в начале ледниковой изотопно-кислородной стадии 6 и в течение холодного стадияла 7d внутри межледниковой ИК стадии 7 (рис. 37). На слои S6 и S8 приходятся пики с относительно максимальным содержанием  $\delta^{18}\text{O}$  в колонке. Однако образование сапропелей связывается с увеличением содержания в водоеме пресной воды, которая обогащена легким изотопом кислорода  $^{16}\text{O}$ , что должно быть отражено в ИК записи уменьшением величины  $\delta^{18}\text{O}$ .

Таким образом, обоснование возможности использования астрохроностратиграфии для корреляции и определения возраста циклически построенных осадочных толщ нельзя признать полно-

стью удовлетворительным. В еще большей степени это заключение относится к утверждению Hilgen [1991] о возможности датирования отложений с точностью 1 тыс. лет. Даже в тщательно проведенных недавних исследованиях [Steenbrink et al., 2000; Van Vugt et al., 1998], несмотря на утверждение их авторов о хорошей хроностратиграфической согласованности изученных ими разрезов плиоцена, имеют место случаи неоднозначного коррелирования разрезов как по количеству, так и по качеству выявленных прецессионных циклов, промодулированных изменениями эксцентриситета. Особенно трудно проводить корреляцию осадочных циклов с прецессионными для периодов наименьших значений эксцентриситета, когда прецессионные, а, следовательно, и связанные с ними климатические, изменения минимальны.

Хорошая запись циклов среднеловых отложений Тетиса приведена в работе [Herbert, Fisher, 1986], рис. 38. Отложения представляют собой чередование более известковистых, относительно окисленных красно-белых фораминиферо-кокколитовых слоев с более восстановленными коричнево-черными слоями мергелей и глинистых сланцев. Авторы считают, что в этой записи отражены климатические ритмы с периодами 23, 100 и 400 тыс. лет. 100-тысячелетние периоды обозначены буквами *a – q*. В свою очередь, они модулируются более длительными 400-тысячелетними эксцентриситетными периодами (точечная линия на рис. 38). Таким образом, согласно интерпретации авторов, эта запись отражает самостоятельное климатическое влияние столетних вариаций эксцентриситета. Это очень существенный результат. Как пишут сами авторы [Herbert, Fisher, 1986, p.640]: “Преобладание 100-тысячелетних и 400-тысячелетних циклических компонент в ледниковую эру поднимает вопрос о *настоящем* (курсив мой – В. Б.) понимании климатических изменений”. На основании этого, в частности, получено важное заключение, что “Вариации содержания карбоната в измеренных интервалах сравнимы с ледниково-межледниковыми флуктуациями, наблюдаемыми в плейстоценовых глубоководных колонках”.

В работе [Herbert, Fisher, 1986, p. 742] сделан и новый вывод о том, что механизм формирования черных сланцев (black shale), происходящего в восстановительных условиях, является

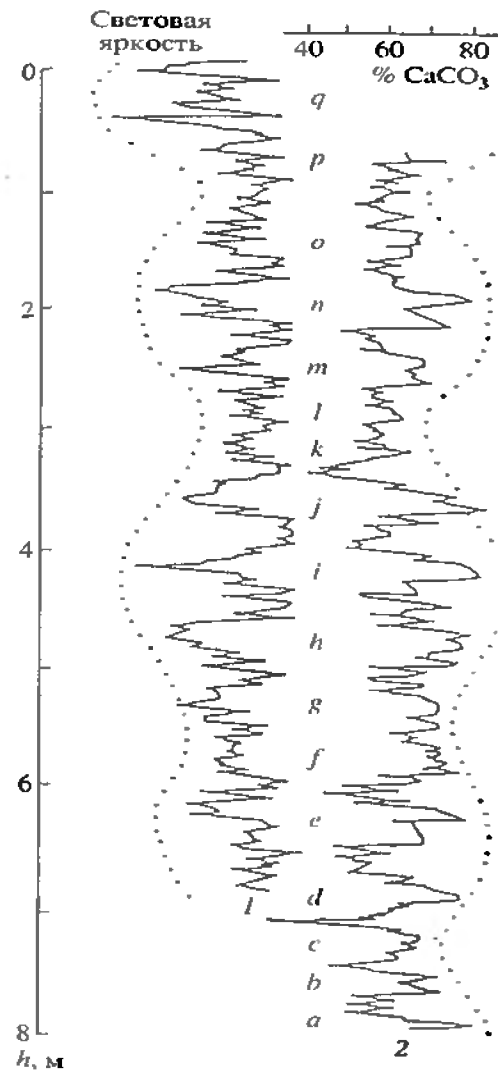


Рис. 38. Световая яркость (1) и содержание карбонатов (2) в зависимости от глубины для части разреза верхнего альба (Т. Praectinensis фораминиферовая подзона). Световая яркость осадка увеличивается влево, т.е. темные слои соответствуют правой части кривой 1; они коррелируют с уменьшением содержания карбонатов на кривой 2. (По [Herbert, Fisher 1986, Fig.1].)

“...антимуссонным: восстановительные условия имели место во время периодов с малой амплитудой эксцентриситетного и прецессионного циклов”. Этим авторы подчеркивают, что их механизм противоречит “муссонному” механизму установления восстановительных условий, которые связывались с увеличением сезонных контра-

стов инсоляции в наиболее изученных средиземноморских отложениях [Rossignol-Strick, 1983; Barron et al., 1985; Hilgen, 1991].

Однако механизм, предложенный Herert, Fisher, [1986], «антимуссонным» назвать нельзя, поскольку он, являясь противоположностью «муссонному», должен осуществляться при уменьшенных сезонных контрастах инсоляции. Как уже говорилось вы-

ше, и понижение, и повышение сезонных контрастов происходит при возрастании эксцентриситета и соответствует экстремальным значениям прецессионного индекса (рис. 8, 37): при максимальном его значении – понижение, а при минимальном – повышение контрастов инсоляции северного полушария. Поэтому наиболее выраженные сапропелевые слои на рис. 37 приходится на интервалы максимальных значений эксцентриситета и соответствуют наиболее глубоким прецессионным минимумам, следующим друг за другом в среднем через 21 тыс. лет. Если же эксцентриситет близок к нулю (орбита Земли почти круговая), то осуществляются некие промежуточные, средние сезонные контрасты инсоляции, определяемые углом наклона земной оси при практически неизменном в течение года расстоянии между Землей и Солнцем (близким к длине большой полуоси орбиты Земли).

Более того, помимо неверного использования термина «антимуссонный», последний вывод авторов [Herbert, Fisher, 1986] противоречит их же собственным данным (рис. 38). Так, если судить по кривой световой яркости, наиболее темные (восстановленные) слои связаны с циклами эксцентриситета, скорее характеризующимися большими, а не малыми амплитудами изменений. Более четко это видно на кривой содержания  $\text{CaCO}_3$ , если, следуя авторам, связывать уменьшение  $\text{CaCO}_3$  с “недостатком кислорода”.

Отмеченное противоречие порождает сомнение и относительно интерпретации авторов о проявлении самостоятельного климатического влияния вариаций эксцентриситета, приводящих к уменьшению инсоляции при уменьшении  $e$  и к увеличению инсоляции при его увеличении. В этом случае экстремальные значения эксцентриситета должны определять и экстремальные значения изучаемых палеоклиматических параметров (содержания  $\text{CaCO}_3$  или оптических характеристик). Например, минимуму эксцентриситета должен соответствовать минимум (или максимум) содержания  $\text{CaCO}_3$ . Чтобы определить конкретно это соответствие, необходимо разработать реальный механизм связи между величинами  $e$  и содержанием  $\text{CaCO}_3$  в осадке или световой яркостью последнего. Однако такой механизм авторами не предложен, поэтому нельзя признать обоснованным их утверждение о том, что “минимум эксцентриситета приводил к недостатку кислорода (глубоководному восстановлению)” [Herbert, Fisher, 1986, p. 740]. Далее,

поскольку изменение палеоклиматических параметров связывается авторами и с влиянием прецессии (менее выраженные пики внутри обозначенных на рис. 38 буквами циклов), эксцентриситет должен модулировать прецессионные изменения. Это означает, что максимальным значениям  $e$  должны соответствовать максимальные прецессионные изменения, минимальным – минимальные. Однако, поскольку неизвестно, максимальное или минимальное содержание  $\text{CaCO}_3$  соответствует, например, максимуму эксцентриситета, вывод о наличии модуляции можно сделать лишь в случае, если амплитуда прецессионных колебаний закономерно изменяется с изменением  $\text{CaCO}_3$  по разрезу: либо увеличивается при увеличении  $\text{CaCO}_3$  и уменьшается при его уменьшении, либо при увеличении  $\text{CaCO}_3$  уменьшается, а при уменьшении – увеличивается. Такой закономерности, как видно из рис. 38, нет. И большие, и маленькие амплитуды изменений “прецессионных” пиков соответствуют как малым, так и большим величинам значений  $\text{CaCO}_3$  и световой яркости.

Гораздо большее соответствие механизму модуляции будет, если точечную линию сопоставить с 100-тысячелетними изменениями  $e$ , а обозначенные буквами циклы – с прецессионными изменениями. Тогда амплитуды практически всех циклов  $a-q$  изменяются в согласии с механизмом модуляции: максимальным значениям  $e$  соответствуют наибольшие амплитуды колебаний  $\text{CaCO}_3$  и яркости (циклы  $a; d, e; h, i, j; m, n; q$ ). В этом случае уже можно однозначно сопоставить изменения палеоклиматических параметров и эксцентриситета. Более конкретно, минимальным значениям  $e$  соответствует не “недостаток кислорода” в процессе осадконакопления, который отражается уменьшением  $\text{CaCO}_3$  и потемнением осадка, а наименьшая амплитуда изменений условий осадконакопления и, соответственно, промежуточные значения величин  $\text{CaCO}_3$  и яркости (циклы  $b, c; f, g; k, l; o, p$ ). При этом на максимальные значения эксцентриситета приходится максимальные амплитуды изменения  $i$ , и, соответственно, экстремальные (наименьшие и наибольшие) значения  $\text{CaCO}_3$  и яркости, что подтверждается данными рис. 38.

Таким образом, из нашего рассмотрения вытекает, что в палеоклиматических записях содержания  $\text{CaCO}_3$  в осадке и его световой яркости, приведенных в работе [Herbert, Fisher, 1986],

представлены 23-тысячелетние прецессионные циклы (обозначенные на рис. 38 буквами *a-g*), промодулированные 100-тысячелетними циклами вариаций эксцентриситета (точечная линия). Следовательно, весь изученный разрез охватывает интервал времени не 1,6 млн. лет, а 400 тыс. лет и, соответственно, скорость седиментации в разрезе повышается до двух сантиметров в тысячу лет по сравнению с принятой авторами скоростью 0,5 см/тыс лет.

По-видимому, более высокая скорость седиментации более реальна, поскольку скорость 0,5 см в тыс. лет характерна для значительно удаленных от материков абиссальных глубоководных равнин, что не имеет места для изученного разреза. Причиной занижения скорости седиментации, принятой авторами [Herbert, Fisher, 1986], может быть то, что эта скорость определялась, исходя из оценок мощности отложений альба около 65 м. и длительности их формирования около 15 млн. лет. Для такого длительного промежутка времени, однако, весьма реальны перерывы осадконакопления, которые могли уменьшить суммарную мощность отложений альба и, соответственно, среднюю скорость осадконакопления. Вероятно, это и могло стать причиной неправильной, по моему мнению, оценки периодов седиментационных циклов изученного разреза, что, в свою очередь, привело к неправильной интерпретации палеоклиматического влияния вариаций эксцентриситета земной орбиты и прецессии, т.е. к неправильному пониманию причин климатических изменений.

Также следует признать неверным и очень важное заключение авторов о сравнимости климатической значимости измеренных ими вариаций содержания  $\text{CaCO}_3$  с ледниково-межледниковыми вариациями изотопов кислорода в плейстоценовых осадках. Последние отражают глобальные колебания климата плейстоцена, выраженные в колебаниях уровня Мирового океана и температуры на планете, смещении природных зон и т.д., тогда как вариации  $\text{CaCO}_3$ , связанные с прецессионными вариациями, представляют гораздо менее значительные, региональные климатические изменения, определяющие соответствующие изменения условий осадконакопления.

В пользу правильности сделанных здесь выводов можно привести следующие доводы. 1. Предложенная мною интерпретация устраняет противоречия авторов, связанные с сопоставлением

полученных ими палеогеографических записей с циклами орбитально обусловленных вариаций инсоляции. 2. Новая интерпретация согласуется с конкретным, уже разработанным механизмом климатического влияния вариаций инсоляции в районах низких и умеренных широт, характеризуемых муссонным типом климата [Baron et al., 1985; Prell, Kutzbach, 1987]. Интерпретация авторов [Herbert, Fisher, 1986] противоречит упомянутому механизму, не предлагая ничего конкретного взамен.

Конечно, нельзя исключить возможность существования перерывов и в приведенной в работе [Herbert, Fisher, 1986] восьмиметровой толще, охватывающей, по принятым мною оценкам, 400 тыс. лет. Однако это не изменит значительно скорости седиментации, которая определялась исходя из того, что каждый цикл от *a* до *g* соотносится с 23-тысячелетним прецессионным периодом. Поскольку модуляция этих циклов проявляется в разрезе довольно хорошо, можно предположить, что перерывы в осадконакоплении в течение представленного в разрезе 400-тысячелетнего интервала времени маловероятны или очень малы.

Необходимо отметить принципиальное отличие и преимущество подхода к методу астрохроностратиграфии, использованного здесь для выявления связи между орбитальными вариациями и изменением условий седиментации, от подхода, использованного Herbert, Fisher [1986]. Нами эта задача решалась путем идентификации орбитальных циклов в палеогеографических записях, основанной на рассмотрении механизма климатического влияния орбитально обусловленных вариаций инсоляции и тщательном анализе палеогеографических записей, направленном на адекватную интерпретацию проявления эксцентриситетной модуляции прецессионных колебаний. Анализ работы [Herbert, Fisher, 1986] подтверждает и необходимость объективного подхода к обсужденному методу астрохроностратиграфии.

Отмечу, что не только относительно климатического влияния вариаций эксцентриситета, но и относительно влияния вариаций угла наклона земной оси наша позиция отличается от мнения, высказанного в работе [Herbert, Fisher, 1986]. Авторы этой работы считают, что отсутствие 41-тысячелетней периодичности в седиментационной записи обусловлено тем, что изменения инсоляции низких широт определяются в основном прецессионными и экс-

центриситетными вариациями, а не вариациями, связанными с изменениями угла наклона земной оси. Однако такое мнение вряд ли основательно, если учесть, что в колонках 677 и MD 900963 [Shackleton et al., 1990; Bassinot et al., 1994], отобранных в низких широтах, 41-тысячелетний климатический цикл явно преобладает над 23-тысячелетним. Как было показано ранее [Большаков, 2001; 2003б], отсутствие 41-тысячелетнего цикла климатических записей в периоды термоэр, связывается скорее с отсутствием значительных объёмов льда, усиливающего инсоляционный сигнал вариаций наклона земной оси в периоды гляциоэр.

Таким образом, представления, развитые в новой концепции ОТП, позволяют с единых позиций объяснить причины и предсказать некоторые особенности проявления характеризующих орбитальными периодами климатических изменений, проходивших как в периоды гляцио- так и термоэр фанерозоя. Климатические изменения гляциоэр являются глобальными и более значительными, по сравнению с периодами термоэр. Они проявляются в изменениях глобальной температуры, климатической зональности и других климатических показателей, в колебаниях уровня Океана и изменениях рельефа поверхности суши. Такие различия естественно связать с наличием покровных оледенений в периоды гляциоэр, что позволяет утверждать, что именно ледники определяют наличие наиболее значительной обратной связи, трансформирующей орбитально обусловленные вариации инсоляции в глобальные климатические изменения. Данное заключение соответствует теоретическим представлениям [Будыко, 1974].

Подчеркну, что изложенная выше единая, простая и ясная картина климатического влияния отдельных орбитальных элементов в природных условиях различных геологических эр получена именно в рамках новой концепции ОТП. Теория Миланковича, в которой климатическая значимость вариаций орбитальных элементов определяется лишь количественным вкладом связанных с ними изменений инсоляции в общую инсоляционную кривую, подсчитанную для вариаций инсоляции летних калорических полугодий под  $65^\circ$  с.ш., возможности построения такой картины не дает. Аналогичное заключение может быть сделано и относительно модификаций этой теории последователями Миланковича.

## Глава 5. ПРИКЛАДНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОКД, НЕКОТОРЫЕ ИТОГИ И ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ НОВОЙ ВЕРСИИ ОРБИТАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ПАЛЕОКЛИМАТА

### 5.1. Использование ОКД в качестве эталона для сравнения палеоклиматических записей плейстоцена

Проблема корреляции палеогеографических событий плейстоцена, отраженных в глубоководных и континентальных отложениях, продолжает оставаться актуальной. В последние годы основой такой корреляции все больше становится изотопно-кислородная (ИК) климатохроностратиграфическая шкала. Однако ИК записи различных глубоководных колонок, отражающие в основном изменения глобального объема льда, обычно несколько отличаются друг от друга. Нет никакой гарантии, что усреднение таких записей для нескольких колонок, подобное составлению ИК шкалы SPECMAP [Imbrie et al., 1984], наиболее адекватно отражает эти изменения. Кроме этого, палеоклиматические события, записанные в континентальных и океанских отложениях, имеют свою специфику. Поэтому наличие *независимого*, полученного на основе теоретических соображений эталона, отражающего глобальные палеоклиматические изменения плейстоцена, стало бы фактором, способствующим не только более объективному сопоставлению палеоклиматических событий, записанных в различных типах отложений, но и выявлению наиболее адекватных палеоклиматических записей в глубоководных осадках.

Способ построения ОК диаграммы и ее сравнение с ИК записями [Большаков 2000а, 2001а,б] позволяют рассматривать эту диаграмму как *независимый*, полученный в основном исходя из теоретических соображений *эталон*, отражающий глобальные палеоклиматические изменения плейстоцена. Отметим как положительный фактор и возможность варьирования отношением коэффициентов климатической значимости орбитальных элементов для получения максимального подобия ОК диаграммы с палеоклиматическими данными. Таким способом можно подчеркнуть специфику климатического влияния вариаций каждого орбитального элемента для различных палеоклиматических записей, как во времени, так и в пространстве. Напомним, что изначально величины климатических коэффициентов для построения ОКД определялись из условия максимального подобия диаграммы с наиболее надеж-

ными ИК записями глубоководных осадков. Теперь же варьирование величинами климатических коэффициентов предлагается для установления максимального подобия ОК диаграммы с палеоклиматическими записями, полученными при использовании как разнообразных палеоклиматических индикаторов, так и отложений различного генезиса. Это может служить наглядной демонстрацией степени влияния вариаций отдельных орбитальных элементов в различных регионах и для различных геологических интервалов времени. Такой способ подобен спектрально-временному анализу, проведенному [Imbrie et al., 1993], однако имеет свою специфику, связанную с иной теоретической основой интерпретации эмпирических данных и с наглядным графическим сопоставлением теоретически полученной ОКД с палеоклиматическими кривыми.

Очевидно, что корреляция палеоклиматических кривых с ОК диаграммой только по форме, внешней похожести этих кривых, может оказаться ненадежной. Нужен хотя бы один временной репер на ИК записи в пределах до 1 млн. лет. Таким репером обычно служит инверсия Матуяма-Брюнес, которая проходит почти в середине 19-й ИК стадии, соответствующей максимуму ОКД около 780 тыс. лет. Зная, что выше нее должно быть записано восемь циклов оледенение-межледниковье, можно, на основе сравнения с диаграммой, делать выводы о полноте геологической летописи и особенностях палеоклиматической записи рассматриваемой ИК кривой. Это же замечание касается и континентальных разрезов, причем чем больше датировочных уровней, тем, конечно, точнее корреляция. Надежность корреляции будет зависеть и от надежности выделения на палеоклиматических кривых событий, соответствующих по рангу оледенениям и межледниковьям, которые наиболее уверенно выделяются на диаграмме.

Не исключено, что сравнение ОКД с независимо полученными палеоклиматическими данными по континентальным и глубоководным отложениям поможет разрешить и некоторые менее значительные, чем указаны выше, несогласованности между ОК диаграммой и ИК записями (рис. 35, 36). Что означают эти несоответствия – проявление тонкой структуры климатических изменений, связанных с земными условиями, которые не отражены в диаграмме, – или это дефекты ИК записи? Несогласованности и дефекты палеоклиматических записей могут обуславливаться и

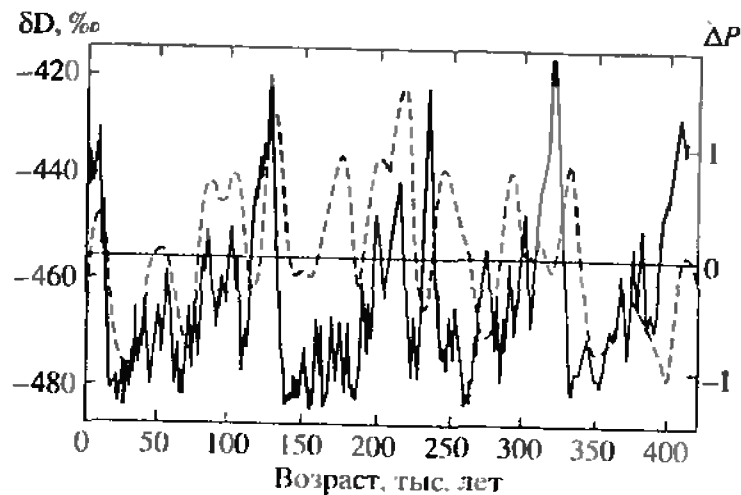


Рис. 39. Запись изменения содержания дейтерия в ледяном керне станции «Восток» (по [Котляков, Лориус, 2000]) в сравнении с ОК диаграммой (штриховая линия).

субъективными причинами, например, стремлением обязательно выделить орбитальные циклы в этих записях.

На рисунке 39 ОК диаграмма сравнивается с вариациями дейтерия  $\delta D$  в уникальном ледяном керне станции «Восток» в Антарктиде [Petit et al., 1999; Котляков, Лориус, 2000], охватывающем 4 климатических цикла. Вариации  $\delta D$  отражают изменения температуры в месте взятия керна [Petit et al., 1999]. Поэтому не исключены отличия в зависимости  $\delta D$  ледяного керна и  $\delta^{18}O$  глубоководных осадков от времени. Однако временное соответствие ОК диаграммы вариациям дейтерия примерно такое же, как и вариациям тяжелого изотопа кислорода глубоководных осадков (рис. 35, 36). По-видимому, это естественно, поскольку при построении временной шкалы дейтериевой кривой была проведена привязка последней к ИК шкале. Некоторое изменение соотношения амплитуд климатических вариаций, отраженных в записях  $\delta^{18}O$  и  $\delta D$ , по отношению к колебаниям значений  $\Delta P$  диаграммы, вероятно, отражают специфику записи изменений глобального объема льда и поверхностной температуры в соответствующих объектах. Больше количество мелких экстремумов в записи  $\delta D$  связано, очевидно,

но, с большей подробностью данной записи – ведь длина ледяного керна превышает 3,5 км. Тем не менее, общее сходство и главные несоответствия ОКД с кривой  $\delta D$  остаются такими же, как и с кривой  $\delta^{18}O$  глубоководных осадков (рис. 35, 36, 39).

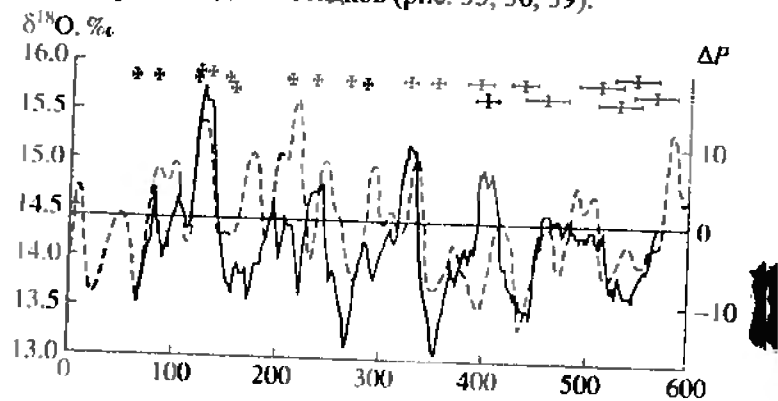


Рис. 40 Сравнение записи вариаций  $\delta^{18}O$  в керне кальцита из пещеры в штате Невада, США (по [Winograd et al., 1992]) с ОК диаграммой. Крестообразные знаки наверху означают: место отбора образца – вертикальная линия и точность определения возраста – горизонтальная линия. По оси абсцисс – время в тысячах лет до современности.

На рис. 40 представлены данные изменения соотношения изотопов кислорода в 36-сантиметровом керне, выбуренном в слое кальцита, образовавшегося на дне заполненной водой пещеры в штате Невада, США. По мнению авторов работы [Winograd et al., 1992], эта запись отражает изменения температуры выпадающих на поверхность водосбора в окрестностях пещеры осадков. Временная запись  $\delta^{18}O$  в керне основана на 21 датировке по неравновесному урану, что особенно важно для сравнения с ОК диаграммой, поскольку датировки не связаны с орбитальными циклами. Согласно полученным датировкам, 36 см керна кальцита представляют интервал палеоклиматической записи от 560 тыс до 60 тыс лет назад. Сравнение ОК диаграммы и ИК записи показывает в основном то же подобие и те же несоответствия, которые были отмечены выше при сравнении диаграммы с другими записями. Однако на рис. 40 отмечаются качественные временные несоответствия. Например, начало потепления, или терминации, не-

сколько опережает орбитальный сигнал для терминации 2 (около 150 тыс лет), 4 (около 350 тыс. лет) и 5 (около 440 тыс лет). Наибольшее временное несоответствие отмечено для терминации 6 (около 520 тыс лет). Очевидно, запаздывание орбитального сигнала относительно климатического отклика не должно иметь места. Судя по графическим данным рис 40, временные рассогласования в целом находятся в пределах ошибок определения возраста и ИК кривая авторов [Winograd et al., 1992] может быть приведена в соответствие с ОК диаграммой. Для этого надо сопоставить наиболее характерные минимумы и максимумы диаграммы и ИК кривой и учесть запаздывание климатического ответа на 5-6 тыс лет.

Winograd et al., [1992], анализируя полученную ими по кальциту запись  $\delta^{18}O$ , обнаружили, что длительность 4-х последних ледниковых циклов увеличивалась к современности от 80 тыс лет до 130 тыс лет. Это послужило основанием для заключения, что "...главные климатические изменения были аперриодическими", и что "...орбитально обусловленные вариации инсоляции не были главным фактором, вызывающим таяние ледников" [Winograd et al., 1992, p. 255]. (Очевидно, в данном случае сказалось некоторое заблуждение авторов, в которое их ввели результаты спектрального анализа ИК данных. Обычно, в связи с недостаточно хорошим разрешением, спектральный анализ даёт в области периодов около 100 тысяч лет один широкий максимум (рис. 18, 41), тогда как должны проявляться два периода, около 125 и 95 тыс. лет – см. рис. 5, 44, 46-48). Однако проведенное нами сопоставление ОК диаграммы с кривой  $\delta^{18}O$  кальцита убедительно показывает, что именно орбитально обусловленные вариации инсоляции определяли ритм и направленность (потепление или похолодание) климатических колебаний (рис. 40). Изменение длительности ледниково-межледниковых циклов подчиняется вариациям инсоляции и не требует привлечения дополнительных механизмов, которые предлагаются, например, в работах [Rial, 1999; Elkibby, Rial, 2001] для объяснения указанных изменений.

Анализ данных, представленных на рис. 35, 36, 39, 40 позволяет заключить, что орбитально-климатическая диаграмма может использоваться как общий, а, следовательно, достаточно независимый, эталон глобальных палеоклиматических колебаний плейстоцена. Сравнение ОКД с палеоклиматическими записями в глу-

боководных отложениях, ледяном керне Антарктиды и образованиях кальцита в Северной Америке обнаружило в основном одинаковые результаты такого сравнения, несмотря на то, что все перечисленные записи имеют свои особенности. Это говорит о хорошей сопоставимости главных палеоклиматических событий плейстоцена в различных регионах планеты и о глобальности факторов, ими управляющих. Одним из таких факторов, несомненно, являются орбитально обусловленные вариации инсоляции.

Проведенные нами сопоставления палеоклиматических записей с ОК диаграммой демонстрируют и похожие во всех трех случаях основные рассогласования, связанные с записью палеоклиматических событий, соответствующих 6-й и 11-й ИК стадиям глубоководных осадков. Данный факт может указывать и на глобальность иных, помимо вариаций орбитальных элементов, факторов воздействия на палеоклиматы Земли в плейстоцене. Как уже отмечалось, одним из наиболее вероятных объяснений этих рассогласований я считаю возможность осуществления в плейстоцене механизма управляемых автоколебаний в системе атмосфера-гидросфера-криосфера-литосфера, рассматриваемого многими исследователями [Imbrie et al., 1993]. Комплексное взаимодействие указанных четырех важнейших приповерхностных компонентов планеты, очевидно, может обеспечить глобальность их воздействия на климаты Земли. Однако и эти, и более мелкие несогласованности ОК диаграммы и палеоклиматических записей требуют дальнейшего изучения, в частности сопоставления диаграммы с возможно большим количеством независимо полученных и корректно обоснованных палеоклиматических данных.

## 5.2. Использование ОКД для хронометрирования и проведения спектрального анализа ИК записей

Использование спектрального анализа ИК данных направлено обычно на выявление роли (амплитуды) и периодов основных климатических циклов плейстоцена. Первые его результаты выявили наличие периодов глобальных климатических колебаний, близких к периодам вариаций орбитальных элементов, подтвердив общую гипотезу о связи между вариациями орбитальных элементов и глобальными климатическими изменениями плейстоцена [Hays et al., 1976]. Качество получаемых с помощью спектрального

анализа результатов определяется прежде всего точностью временной шкалы изменений изучаемого явления и детальностью представленных в каждом временном интервале данных. В работе [Bassinot et al., 1994], на основе ИК данных по колонке MD 900963, отобранной в Индийском океане (координаты отбора: 05°03' с.ш. 73°52' в.д.) была разработана климатохроностратиграфическая шкала для интервала времени 880 тыс. лет. Используемая авторами [Bassinot et al., 1994] исходная временная шкала состояла из 25 временных реперов, полученных путем визуального сопоставления ИК записи с теоретической кривой изменения глобального объема льда [Imbrie, Imbrie, 1980], построенной на основе теории Миланковича. Это послужило отправной точкой для дальнейшей математической обработки полученных ИК данных, в том числе спектрального анализа, и созданию, в конечном итоге, одного из наиболее используемых вариантов изотопно-кислородной шкалы. Следует отметить, что проведение палеомагнитных исследований колонки MD 900963 позволило получить важный хронологический репер – инверсию Матюяма-Брюнес – который существенно облегчает и делает более достоверным визуальное сопоставление ИК кривых с другими графическими построениями, отражающими палеоклиматические колебания. Основные периоды климатических колебаний, выделенные Bassinot et al. [1994] с помощью спектрального анализа – 100, 41, 23 и 19 тыс. лет (рис. 41).



Рис. 41 Амплитудно-частотный спектр ИК кривой колонки MD 900963, по [Bassinot et al., 1994]. Цифры у кривой – выделенные периоды, в тыс. лет

Нами [Большаков, Гамбурцев, 2002; Большаков, 2003] для проведения спектрального анализа ИК записи колонки MD 900963 использовалось сопоставление ИК кривой с ОКД, основанное также на их визуальном сходстве. (Отдельно отмечу, что принятый

нами способ хронометрирования имеет общую основу с примененными ранее методами [Hays et al., 1976; Johnson, 1982; Imbrie et al., 1984; Shackleton et al., 1990; Bassinot et al., 1994], которая заключается в предположении об определяющей роли вариаций орбитальных элементов в проявлении глобальных климатических изменений последнего миллиона лет). Однако в нашем подходе есть определенные преимущества по сравнению с обычным подходом, принятым в указанных публикациях. Во-первых, построение ОКД основано на новой концепции ОТП, не имеющей противоречий с эмпирическими данными, в отличие от теории Миланковича, на основе которой построена теоретическая кривая изменений объема льда [Imbrie, Imbrie, 1980], используемая для сравнения с ИК записью в [Bassinot et al., 1994]. Во-вторых, временное сопоставление проводится нами с использованием наиболее однозначно выраженных минимумов и максимумов сравниваемых кривых (рис. 42 43 и 44), что точнее и намного проще, чем сопоставление по границам ИК стадий, которое использовалось Bassinot et al. Более того, временные даты минимумов и максимумов ОК диаграммы, как отмечалось выше, непосредственно могут быть основой хронологической шкалы, без проведения процедуры выделения различных орбитальных периодов в ИК записях.

ОК диаграмма, полученная с применением коэффициентов климатической значимости 1:0,7:0,55 и её амплитудно-частотный спектр показаны на рис. 42. Отмечу еще раз, что важное значение при проведении визуального сопоставления графиков ОКД и ИК данных имеет обнаружение инверсии Матюяма-Брюнес в 19-й ИК стадии исследуемой колонки MD 900963 (рис. 43), соотносимой на ОКД с максимумом  $\Delta P$  в области 788 тыс лет (рис. 42).

Для проведения спектрального анализа ИК данных было выделено 25 наиболее уверенно сопоставляемых на ОКД и ИК кривой (рис. 42, 43, 44) реперных точек, т.е. максимумов и минимумов ОК диаграммы, показанных на рис. 42. Учитывая запаздывание климатического отклика на управляющий орбитальный инсоляционный сигнал, возраст соответствующих максимумов и минимумов ИК кривой (рис.43,44) будет на 5-6 тыс. лет моложе даты, указанной на ОКД. Нами использовано время задержки 5 тыс. лет. Внутри каждого из 24 полученных таким способом временных интервалов ИК запись была представлена величинами  $\delta^{18}O$  с одина-

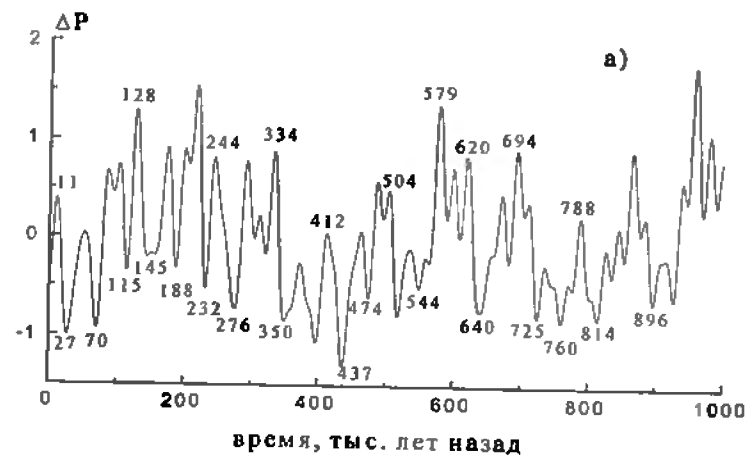


Рис. 42 а) ОК диаграмма, построенная для соотношения коэффициентов климатической значимости эксцентриситета, наклона земной оси и прецессии 1:0,7:0,55. Цифры у кривой – временные даты экстремумов, наиболее хорошо сопоставляемые с соответствующими экстремумами ИК кривой колонки MD 900963 (рис.43, 44). б) Амплитудно-частотный спектр ОКД с выделенными периодами осцилляций в тысячах лет

ковыми временными промежутками 2 тыс. лет, что необходимо для проведения спектрального анализа. При этом предполагалось, что скорость седиментации внутри каждого интервала была

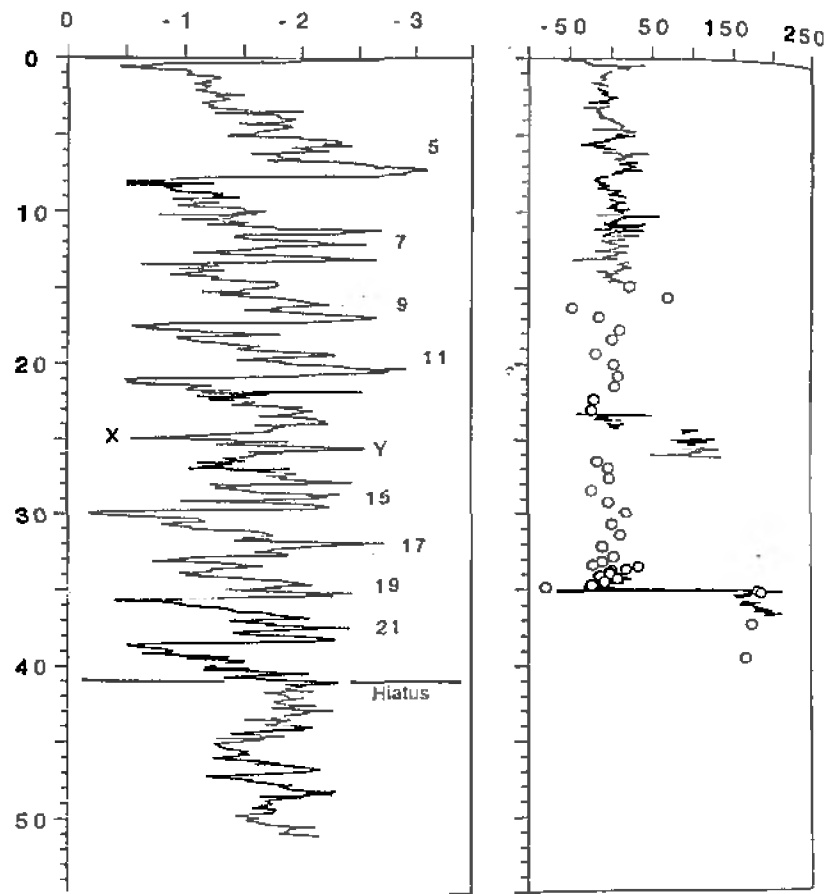


Рис. 43 Изотопно-кислородные (слева, в промилле) и палеомагнитные (изменение склонения, в градусах, справа) данные по глубине колонки MD 900963 (вертикальная ось, в метрах), по [Bassinot et al., 1994]. Изменения склонения отражены как в измерениях отдельных образцов (кружки), так и в непрерывных измерениях с помощью криогенного магнитометра (тонкая линия). На глубине 24,3 – 26,3 м. видна палеомагнитная аномалия, а на глубине 35 м. – инверсия Матуяма-Брюнес. Цифры у ИК кривой – номера ИК стадий. X-Y – резкое изменение величин  $\delta^{18}\text{O}$ , происходящее на тот же интервал глубин, что и палеомагнитная аномалия. Инверсия Матуяма-Брюнес проходит в середине ИК стадии 19. На глубине 41 м. обнаружен перерыв осадконакопления.

постоянной. Поскольку первичные измерения представляются для разных глубин отбора образцов, то  $\delta_k$  – величина  $\delta^{18}\text{O}$  для временных точек, не совпадающих с местами отбора образцов, – вычислялась по формуле:

$$\delta_k = \delta_i + \frac{\delta_{i+1} - \delta_i}{l_i} \times \Delta l_i \quad (13)$$

Здесь  $\delta_i$  и  $\delta_{i+1}$  – измеренные экспериментально величины  $\delta^{18}\text{O}$  в ближайших, расположенных выше и ниже по колонке от места определяемой нами величины  $\delta_k$ , уровнях отбора образцов;  $l_i$  – расстояние между этими уровнями отбора образцов;  $\Delta l_i$  – расстояние между уровнем отбора верхнего образца и местом определяемой с помощью процедуры осреднения временной величины  $\delta_k$ .

При построении временной ИК кривой были исключены из рассмотрения ИК данные для интервала от 24 до 26,5 м. по глубине колонки, (зона X-Y на рис 43) т.к. на этом участке, характеризующем резкими изменениями величин  $\delta^{18}\text{O}$ , была отмечена и палеомагнитная аномалия, что дало нам основание рассматривать эти ИК данные как артефакт. Полученные таким способом, с шагом 2 тыс. лет, величины  $\delta^{18}\text{O}$  (рис. 44а) подвергались спектральному анализу; результаты представлены на рис. 44б. Естественно ожидать, что при использованном способе хронометрирования ИК кривой результаты спектрального анализа ОКД и ИК данных, особенно для более длительных периодов, будут близки. Как видно из рис. 42б и 44б, это все же не совсем так. Однако заметим, что цель проведения данного исследования заключается не в обнаружении орбитальных периодов в ИК записи и доказательстве правильности основной концепции ОТП. Её правильность уже доказана в ряде работ [Hays et al., 1976; Imbrie et al., 1993; Большаков, 2001б и др.]. Цель данного исследования – определить, что нового может дать использование ОКД в качестве хронологического эталона при определении особенностей соотношения орбитальных вариаций с глобальными климатическими изменениями.

Для решения поставленного вопроса логично сравнить результаты спектрального анализа, представленные в работе [Bassinot et al., 1994] и приведенные на рис. 41, с нашими результатами, прежде всего потому, что анализировалась одна и та же ИК запись,

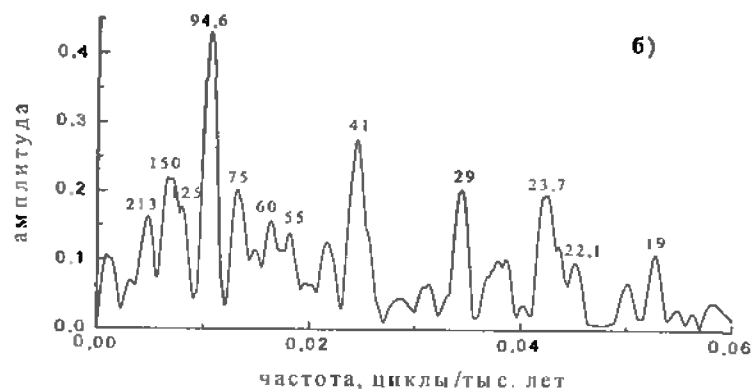
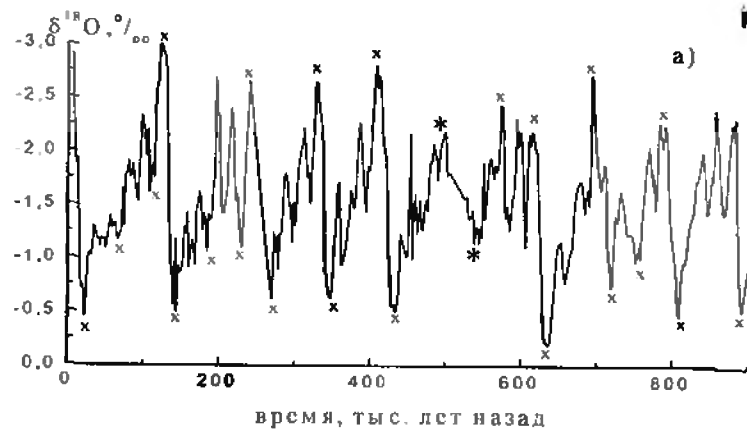


Рис. 44 а) ИК кривая, построенная с использованием формулы /13/ и первичных данных [Bassinot et al., 1994]. Временная шкала получена с использованием временных реперов рисунка 42. При этом принималось во внимание, что максимум ОКД, приходящийся на время 788 тыс. лет, соответствует ИК стадии 19, в которой зафиксирована инверсия Матюяма-Брюнес (рис. 43). Соответствующие временным реперам временные точки ИК кривой, уменьшенные относительно реперов по возрасту на 5 тыс. лет, показаны крестиками и звёздочками. Между звёздочками находится исключённый нами из рассмотрения интервал X-Y (рис. 43); здесь он показан прямой линией. б) Амплитудно-частотный спектр ИК кривой с выделенными характерными периодами осцилляций, в тысячах лет

с одинаковым шагом представленных данных – через 2 тыс. лет. Можно отметить, что полученный нами спектр (рис. 44б) имеет большее разрешение, т.к. спектральные пики более узкие. Это выражается и в том, что широкий максимум, соответствующий периоду около 100 тыс. лет на рис. 41, у нас разделяется на 4 пика, причем главный пик, отражающий период 94,6 тыс. лет, совпадает с соответствующим пиком спектра теоретической ОКД. Также выделяется и период 125 тыс. лет, близкий к второй главной гармонике 100000-летнего эксцентриситетного цикла (рис. 5б, 42б, 44б). Особенно показательным преимуществом нашего метода, в том числе и используемой методики спектрального анализа, является то, что широкий 23-тысячелетний максимум спектра ИК кривой в работе [Bassinot et al., 1994], на нашем графике является бимодальным, опять же практически совпадающим с соответствующим бимодальным максимумом спектра ОКД (рис. 42б) и спектра прецессионной кривой на рис. 8б. (Все приведённые в этой книге результаты спектрального анализа получены с помощью специальной программы, разработанной А.Г. Прудковским. Эта программа предназначена для нахождения Фурье-образа экспериментальных данных, заданных в конечном числе точек на равномерной сетке. Удобство и достоинство программы состоит в том, что уточнение Фурье-образа ведётся наглядно в полуавтоматическом режиме, что позволяет визуально отслеживать некорректности, возникающие при исключении близлежащих пиков).

Также необходимо отметить результат, о котором не сообщалось ранее при изучении ИК данных морских осадков. Наряду с обычно выделяемыми по ИК записям наиболее значимыми спектральными максимумами для периодов 100, 41, 23 и 19 тыс лет, нами выделен максимум, соответствующий периоду 29 тыс лет, амплитуда которого даже выше амплитуды 23-тысячелетнего пика (рис. 44б). Максимум, соответствующий периоду около 29 тыс лет, имеет место и в спектре на рис. 41, однако его амплитуда заметно меньше амплитуды 19-тысячелетнего пика. Вероятно поэтому 29-тысячелетний пик не выделен авторами [Bassinot et al., 1994] как значимый результат.

Преобладание периодов около 29 тыс. лет в изменениях гранулометрического состава отложений и средней поверхностной температуры в приэкваториальной части Тихого и Индийского

океанов было отмечено в работах [Pisias, Rea, 1988; Clemens, Prell, 1991]. Этот факт довольно неопределенно трактовался как результат нелинейного взаимодействия вариаций эксцентриситета и угла наклона земной оси с резонансными явлениями в климатической системе планеты, в частности, связанными с изменением интенсивности пассатов и муссонов. Однако заметим, что в спектре ОКД есть пик, соответствующий периоду 28,8 тыс лет (являющемуся одной из гармоник цикла вариаций наклона земной оси – см. рис. 6), хотя его амплитуда очень мала (рис. 42б). Близость полученного из эмпирических ИК данных и хорошо выраженного периода 29 тыс. лет с теоретически полученным, но слабо выраженным периодом 28,8 тыс. лет, позволяет предположить существование неизвестного пока механизма нелинейного (индивидуального) усиления, или отклика, климатической системы Земли на орбитальный инсоляционный сигнал, связанный именно с выделенной гармоникой изменения угла наклона земной оси.

Помимо колонки MD 900963, указанным способом был проведён спектральный анализ ИК записей колонки V 28-239, отобранной на плато Соломона в Тихом океане [Shackleton, Opdyke, 1976] (координаты отбора 3°15' с.ш., 159°11' в.д.), и колонки 659 из Атлантического океана [Sarnthein, Tiedemann, 1989], (координаты отбора: 18°04' с.ш., 21°01' з.д.). В обеих колонках зафиксирована инверсия М-Б, что облегчало задачу временного сопоставления ОК диаграммы и ИК кривых и, соответственно, проведения спектрального анализа. Для колонки V 28-239 характерна низкая скорость осадконакопления – примерно 0,9 см/тыс. лет. Поэтому при интервале отбора образцов 5 см. временной интервал отбора близок к 6 тыс. лет (таков и шаг данных на рис. 45а). Скорость седиментации в колонке 659 выше – около 3,2 см/тыс. лет. Однако образцы в этой колонке отбирались в среднем с временным интервалом около 10 тыс. лет, причём в нижней части колонки, с возрастом более 300 тыс. лет, – реже, чем в верхней. Мы хронометрировали эти колонки с помощью ОКД до возраста около 900 тысяч лет. Соответствующие ИК кривые и результаты их гармонического анализа показаны на рис. 45 и 46.

Также было проведено хронометрирование и сделан спектральный анализ колонок 647 и 646 Лабрадорского моря [Aksu et al., 1989] (координаты отбора соответственно 53°20' с.ш., 45°16'

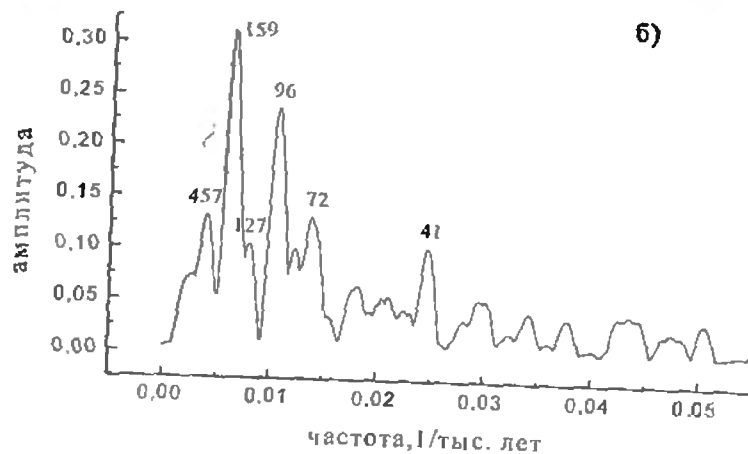
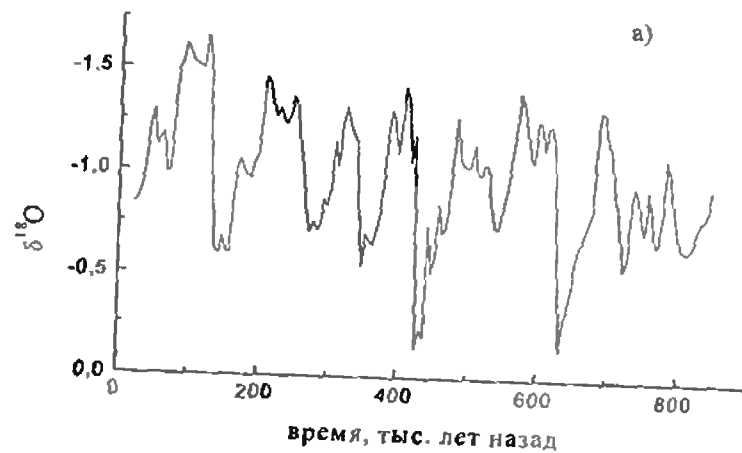


Рис. 45 а) ИК кривая колонки V 28-239 в зависимости от времени, построенная с использованием формулы /13/ и первичных данных [Shackleton, Opdyke, 1976]. Временная шкала получена с использованием 17 временных реперов, выделенных при сравнении ОКД и ИК записи колонки V 28-239. б) Амплитудно-частотный спектр ИК кривой с выделенными периодами осцилляций, в тысячах лет.

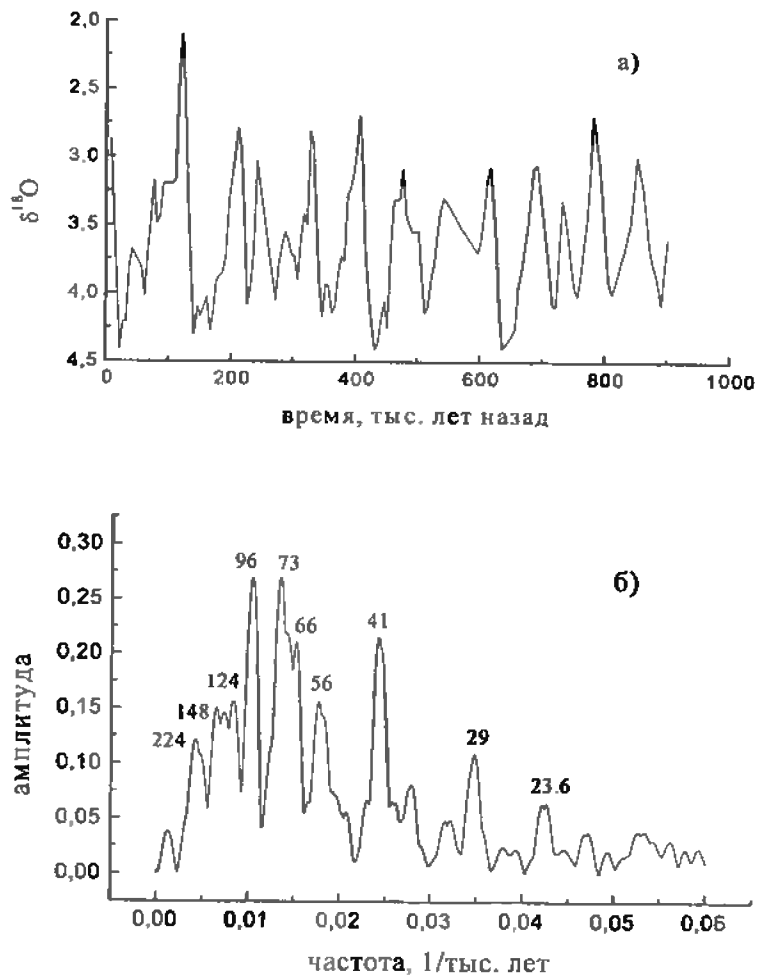


Рис. 46 ИК кривая колонки 659 в зависимости от времени, построенная с использованием формулы /13/ и первичных данных [Sarnthein, Tiedemann, 1989]. Временная шкала получена с использованием 20 временных реперов, выделенных при сравнении ОКД и ИК записи колонки 659. б) Амплитудно-частотный спектр ИК кривой с выделенными периодами осцилляций, в тысячах лет.

з.д. и 58°13' с.ш., 48°22' з.д.). Для этих колонок не были проведены палеомагнитные исследования, поэтому фактически сопоставление с ОК диаграммой проводилось путём «отсчёта сверху». Обнадеживающим обстоятельством в данном случае является то, что авторы [Aksu et al., 1989] не обнаружили перерывов осадконакопления в исследованных нами частях колонок. Полученные результаты показаны на рис. 47 и 48. Как видно на рис. 47 и 48, в колонке 647 было идентифицировано 19 ИК стадий, а в колонке 646 – 22 стадии. Временные промежутки (временной шаг) представленных на рис. 47а и 48а данных для колонок 647 и

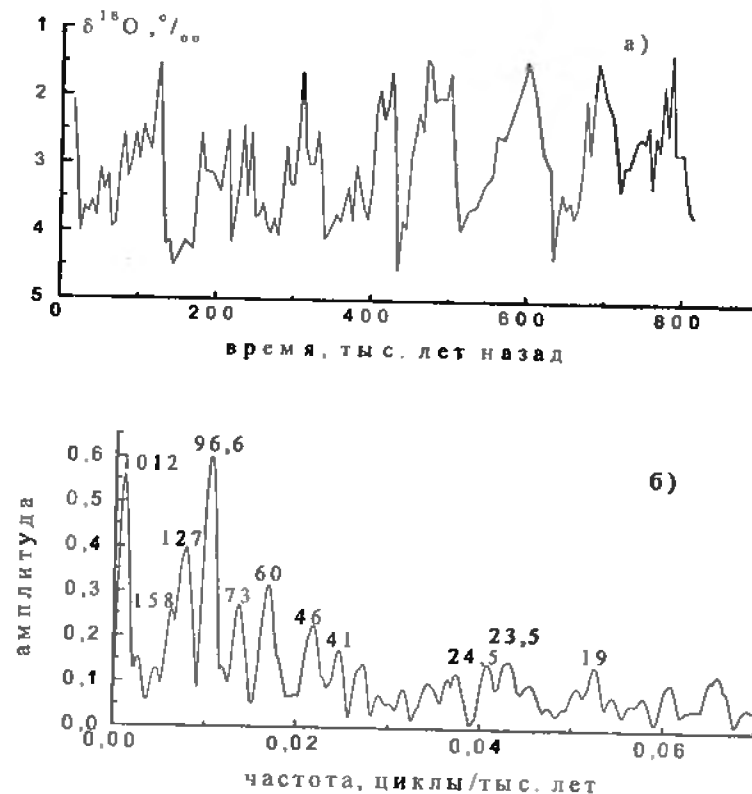


Рис. 47 ИК кривая колонки 647, построенная по 18 реперным временным точкам (а) и её амплитудно-частотный спектр с выделенными периодами осцилляций, в тысячах лет (б).

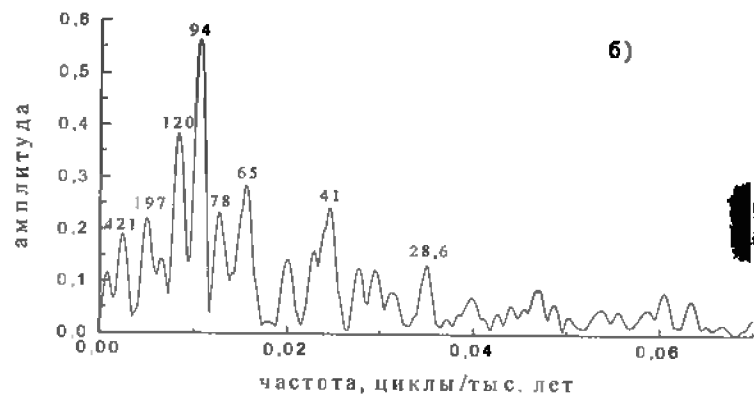
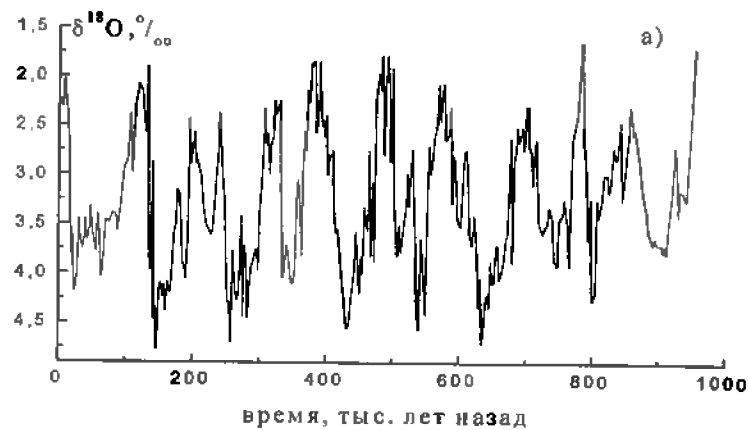


Рис. 48 ИК кривая колонки 646, построенная по 14 временным реперным точкам (а) и её амплитудно-частотный спектр с выделенными периодами осцилляций, в тысячах лет (б).

646 были соответственно 5 тыс. лет и 2,5 тыс. лет. Подведём итог полученным нами данным спектрального анализа.

Было исследовано 5 глубоководных колонок донных осадков, отобранных в различных районах Мирового океана. Скорость седиментации в колонках различна – от 0,9 см/тыс. лет в колонке V 28-239 до 8,2 см/тыс. лет в колонке 646, однако рассмотренные

ИК записи охватывают примерно одинаковый интервал времени, около 900 тысяч лет (рис. 44-48). Во всех колонках хорошо выделяются периоды палеоклиматических осцилляций около 95 и 41 тысячи лет. Несколько неожиданным оказалось то, что в более высокоширотной колонке, 647, амплитуда 41-тысячелетнего сигнала выделяется более слабо на фоне других сигналов, чем в низкоширотных колонках (рис. 44-47). Помимо 95-тысячелетнего, выделяется, хотя и менее уверенно, ещё один основной эксцентриситетный период – около 125 тыс. лет. Прецессионные периоды на спектральных диаграммах имеют меньшую, чем у периода наклона земной оси, амплитуду и видны не во всех колонках. В ИК записях трёх глубоководных колонок (646, 659 и MD 900963) хорошо проявляется период около 29 тысяч лет и в двух колонках выделен период около 55 тыс. лет. Эти периоды сопоставимы с гармониками вариаций наклона земной оси, соответственно 28,9 и 53,8 тыс. лет [Berger, 1977; Berger, Loutre, 1991] (см. рис. 6).

Также выявлены и неорбитальные периоды в ИК записях. Обращает на себя внимание период 72-78 тыс. лет, отмеченный во всех исследованных нами колонках. Примерно такой же период, 75 тыс. лет, был обнаружен при спектральном анализе ИК данных глубоководных колонок 806 и 849 в работе [Rial, Anacleto, 2000]. Кроме этого, в некоторых колонках хорошо видны периоды около 158, 65 и 60 тысяч лет, а также и другие (рис. 44-48).

Очевидно, что выяснение глобальной значимости обнаруженных «нестандартных» периодов (под «стандартными» подразумеваются периоды 404, 125, 95, 41, 23,7, 22,4 и 19 тыс. лет) требует гораздо большей статистики, большего количества исследованных колонок. Желательно, чтобы эти исследования проводились по единой методике и на достаточно представительном материале. Касаясь методики, отмечу, например, что использование 22-х временных реперов при хронометрировании колонки 646 привело практически к тем же результатам спектрального анализа, которые получены при использовании 14 реперов. Также было обнаружено, что применение другой методики спектрального анализа [Гамбурцев и др., 1994; Большаков, Гамбурцев, 2002] приводит к несколько иным результатам, чем получены здесь. Использование ОКД для хронометрирования ИК записей даёт более качественные результаты спектрального анализа, по сравнению с результатами

других авторов. Большой интерес, на мой взгляд, представляет обнаружение в палеоклиматических записях изменений с периодами, близкими к гармоникам вариаций наклона земной оси (41 и 55 тыс. лет), а также осцилляций с периодом около 75 тысяч лет. Таким образом, более широкое исследование спектральных особенностей изотопно-кислородных и других палеоклиматических записей является необходимым для получения новых данных о процессах палеоклиматических изменений.

### 5.3. Основные результаты и некоторые проблемы развития новой версии орбитальной теории палеоклимата

Достаточно очевидно, что развитие новой концепции ОТП является в то же время и началом разработки новой версии теории палеоклимата. Ведь «концепция» – это «определённый способ понимания, трактовки каких-либо явлений, основная точка зрения, руководящая идея для их освещения; ведущий замысел, конструктивный принцип различных видов деятельности», а «теория» – это «система основных идей в той или иной отрасли знания, форма научного знания, дающая целостное представление о закономерностях и существенных связях действительности. Критерий истинности и основа развития теории – практика» [СЭС, 1990].

Каковы же основные результаты развития новой концепции ОТП, которые могут быть использованы при построении новой теории? На мой взгляд, они следующие.

**Первое.** Показано, что теория Миланковича, являющаяся одной из версий АТП, содержит конкретные ошибки и нуждается в модификации. Данный вывод имеет существенное положительное значение, т.к. позволяет более эффективно решать накапливающиеся проблемы создания непротиворечивой теории палеоклимата.

**Второе.** Сделано заключение, что рассчитанные Миланковичем и его последователями для определённых широт и полугодий, а тем более месяцев вариации инсоляции, приходящей на верхнюю границу атмосферы, взятые отдельно, не могут использоваться для палеоклиматических интерпретаций и палеоклиматического моделирования. Задачу расчета палеоклиматической кривой, подобной инсоляционной диаграмме Миланковича, следует решать только при учёте представляющих внутригодовую и пространственную (по поверхности Земли) изменчивость вариаций инсоляции всех

трех орбитальных элементов, а также при одновременном учёте разнообразных земных обратных связей, преобразующих совокупный инсоляционный сигнал в глобальные климатические изменения. (Таким образом, результаты проделанной М. Миланковичем огромной работы должны использоваться иначе, чем обычно делается сейчас).

**Третье.** Степень и характер климатического воздействия вариаций орбитальных элементов зависят от глобального палеоклиматического состояния, меняющегося от термоэры до гляциэры. Наличие обратных связей является решающим фактором, способствующим глобальному климатическому проявлению относительно слабого воздействия на планету орбитально обусловленных вариаций инсоляции. При этом усиление инсоляционного сигнала посредством земных климатических обратных связей может осуществляться посредством механизма параметрического резонанса, когда изменение внешних условий приводит к изменению параметров климатической системы (периодов колебаний). Специфика земных обратных связей, преобразующих обусловленный вариациями различных орбитальных элементов исходный инсоляционный сигнал в глобальные климатические изменения, в настоящее время полностью не выяснена. Реальное осознание важности обратных связей в трансформации инсоляционных сигналов в климатические изменения не позволяет считать сравнимым, как это сделано в работе [Herbert, Fisher, 1986], климатическое влияние эксцентриситетной инсоляции в мелу и в плейстоцене.

**Четвёртое.** Представляется нелогичным разделение механизмов климатического усиления орбитально обусловленных вариаций на «нелинейный» – более сильный – для вариаций эксцентриситета, и «линейный» – для вариаций двух других орбитальных элементов [Hays et al., 1976; Imbrie et al. 1984, 1992, 1993; Berger, 1988]. Миланкович и его последователи не учитывали различное качество, структуру инсоляционных сигналов, связанных с отдельными орбитальными элементами. А для различных качественных сигналов, очевидно, нелогичен единообразный подход для определения степени их усиления. Следовательно, нелинейный в общем механизм воздействия обратных связей на инсоляционные сигналы в каждом отдельном случае следует считать индивидуальным. Отсутствие учёта качественных различий инсоляционных сигналов явилось

причиной появления не только неадекватных представлений о «линейном» и «нелинейном» механизмах, но и проблемы 100000-летнего периода, и привлечения ненужных в данном случае тригонометрических соотношений, иллюстрирующих «передачу энергии из прецессионной в эксцентриситетную полосу частот», и представлений об определяющем влиянии на глобальный климат сезонных вариаций инсоляции. Сезонные прецессионные вариации инсоляции, вопреки распространенному мнению, оказывают наименьшее воздействие на глобальные климатические колебания в четвертичном периоде.

**Пятое.** Инерционность климатической системы планеты, т.е. запаздывание климатического отклика на орбитальное воздействие оценивается для прошедшего миллиона лет величиной в 5-6 тыс. лет.

**Шестое.** Сделан вывод, что не вариации содержания парниковых газов в атмосфере, в частности  $\text{CO}_2$ , а, скорее, вариации инсоляции и глобального объема льда являются первичными причинами глобальных климатических изменений четвертичного периода. Таким образом, характеризуемые орбитальными периодами вариации  $\text{CO}_2$  нельзя рассматривать как независимое, первичное воздействие на климатическую систему планеты, как это делается в публикациях [Pisias, Shackleton, 1984; Saltzman, Verbitsky, 1994; Berger et al., 1998; Li et al., 1998; Shackleton, 2000]. Эти вариации, с одной стороны, являются следствием изменений климата, с другой – одним из факторов обратной связи, в свою очередь воздействующим на эти изменения.

**Седьмое.** Сходство полученной на основе самых общих представлений ОК диаграммы с разнообразными палеоклиматическими записями, с одной стороны, является важным недостающим звеном, непосредственно подтверждающим определяющее влияние орбитально обусловленных вариаций инсоляции, связанных с изменениями всех трёх орбитальных элементов, на ритм и направленность глобальных климатических колебаний последнего миллиона лет; с другой стороны, это сходство подтверждает адекватность созданной ИК климатохроностратиграфической шкалы прошедшего миллиона лет, в частности, согласуется с выделением 8 оледенений в течение хрона Брюнес. Продолжение ОКД на 100 тыс. лет в будущее показывает (рис. 50), что природный тренд (без

учёта антропогенного воздействия) климатических изменений приведёт к двум стадиям оледенения, примерно через 20-21 тыс лет и 59-60 тыс. лет. После этого должно наступить межледниковье. Такой прогноз действителен при предположении, что в предстоящие 20-60 тысяч лет не будут осуществлены условия для проявления 400-тысячелетнего эксцентриситетного цикла, который имел место в течение пермо-карбонového оледенения.

**Восьмое.** Новая концепция орбитальной теории палеоклимата позволяет непротиворечиво, на основе единой системы взглядов, объяснять характеризуемые орбитальными периодами климатические колебания гляцио- и термоэр фанерозоя.

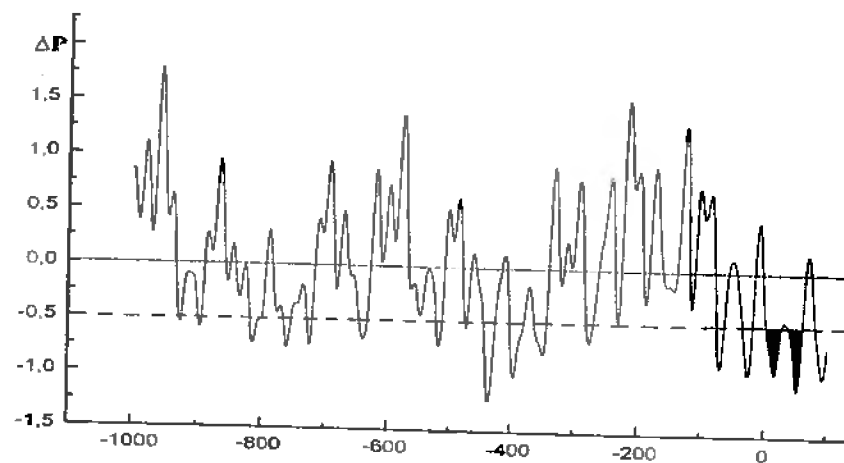


Рис. 50 Продолжение ОКД с коэффициентами климатической значимости 1:0,7:0,55 на 100 тысяч лет в будущее. Затенённые участки – фазы прогнозируемого оледенения, экстремумы которого на ОКД приходятся на 15 тысяч и 54 тысячи лет (в реальном времени – 20-21 тыс. и 59-60 тысяч лет вперёд). По оси абсцисс – время в тысячах лет. При построении диаграммы использованы вычисления [Berger, 1978с; Berger, Loutre, 1991]. Данные вычислений любезно предоставлены автору M.F. Loutre.

Перечисленные основные результаты работы вместе являются единым целым, представляя выраженную в новой концепции ОТП единую систему взглядов на процессы климатических колебаний фанерозоя, характеризуемые орбитальными периодами. Главной отличительной особенностью новой концепции является

одновременный учёт специфики инсоляционных сигналов, обусловленных вариациями всех трёх орбитальных элементов, и воздействующих на эти сигналы обратных связей. Если специфика инсоляционных сигналов, благодаря вычислениям М. Миланковича, определена достаточно точно, то не так хорошо обстоит дело со спецификой обратных связей. Как мы видели выше, проблемой является не только точный расчёт их климатического влияния, но и полный учёт и даже иногда определение механизма обратных связей.

Очевидно, что один из основных способов исследования проблемы обратных связей – получение и анализ эмпирических данных, которые могли бы охарактеризовать пространственные и временные аспекты климатических изменений и соотношение влияния на эти изменения космических и земных факторов. Для этих целей необходимо использовать возможно более широкий спектр палеоклиматических данных, полученных как с применением разнообразных палеоклиматических индикаторов (изотопнокислородные, палеотемпературные, гранулометрические и др. показатели), так и для отложений различного генезиса. Указанные данные должны иметь достаточное статистическое обоснование. ИК кривые глубоководных отложений различных регионов в основном демонстрируют подобие, чего нельзя сказать о данных по другим индикаторам. Например, полученные Hays et al. [1976] кривые поверхностной температуры Индийского океана на примерно  $40^\circ$  ю.ш. (рис.17) изменяются почти в фазе с прецессионной компонентой инсоляции, рассчитанной для лета Северного полушария. Однако в работе [Ruddiman, McIntyre, 1981] изменения поверхностной температуры Атлантического океана ( $\approx 40^\circ$  с.ш.) находятся практически в противофазе с той же прецессионной компонентой инсоляции. При этом и в том и в другом случае колебания температуры представляются как глобальные, а прецессионная (23-тысячелетняя) компонента поверхностной температуры преобладает над выделенной в палеотемпературном сигнале 41-тысячелетней компонентой.

К сожалению, извлечение представительной палеоклиматической информации из потенциально наиболее богатых ею континентальных отложений, в частности, разрезов лёссовой формации, пока затруднено по ряду причин. Среди этих причин необхо-

димо отметить недостатки использования магнитных и палеомагнитных определений, измерения абсолютного возраста отложений [Большаков, 1996, 2000-2002], повышенную вероятность наличия неконтролируемых перерывов в континентальных разрезах. Также проблемой пока является достаточно точное представление изменений палеоклиматических индикаторов лёссов и почв в численной, удобной для анализа форме. Одна из важных проблем – корреляция лёссово-почвенных разрезов с разрезами глубоководных отложений. Во многих отношениях ключевым при решении этой проблемы является определение точного положения инверсии Магюма-Брюнес в отложениях лёссовой формации.

Дело в том, что, как уже говорилось, эта инверсия в глубоководных отложениях проходит в межледниковой ИК стадии 19. Однако в лёссово-почвенных разрезах она чаще проходит в горизонтах лёссов и реже – в горизонтах погребённых почв [Pecsi, 1993; Большаков, 1996, 2002]. Поскольку обычно лёсы сопоставляются с оледенениями, а почвы – с межледниковьями, очевидно климатостратиграфическое противоречие в положении инверсии М-Б в лёссах и глубоководных отложениях, на что впервые было обращено внимание в работах [Большаков, 1996; Tauxe et al., 1996]. Дальнейший анализ проблемы показал [Большаков, 2001в, 2002], что в большинстве случаев точное положение инверсии либо не определено вовсе из-за отсутствия в палеомагнитных данных непосредственной записи инверсии, т.е. зоны перехода от обратной к прямой полярности намагниченности, либо это определение затруднено в связи с влиянием вторичной намагниченности, искажающей палеомагнитную запись. Ещё один возможный путь разрешения противоречия в климатостратиграфическом положении инверсии М-Б – соотнесение, для аридных регионов, условий лёсообразования с межледниковьями, а почвообразования – с ледниковыми пльвиальными эпохами [Девяткин, 1993], которое подтверждается эмпирическими данными [Пахомов, 1983].

Таким образом, одной из важных задач дальнейшего обоснования новой концепции ОТП и развития теории палеоклимата является получение разнообразных и кондиционных эмпирических данных, особенно по континентальным отложениям. Эти данные, как показывают результаты исследования ледяных кернов Гренландии и Антарктиды, колонок донных отложений Байкала и от-

ложений кальцита в пещере штата Невада (США), имеют свою, отличную от данных по глубоководным отложениям, специфику [Shackleton, Opdyke, 1973, 1976; Winograd et al., 1992; Dansgaard et al., 1993; Bassinot et al., 1994; Petit et al., 1999; Кузьмин и др. 2002].

При исследовании проблемы точного учёта обратных связей в плейстоцене важной задачей является уже много раз упомянутая проблема разработки механизма глобального климатического влияния прецессии. Другая важная задача – конкретизация механизма параметрического резонанса, предложенного для объяснения среднеплейстоценового перехода и, соответственно, 100-тысячелетней ритмики ледниковых осцилляций последнего миллиона лет. На мой взгляд, корректное моделирование именно такого механизма усиления *непосредственных* вариаций эксцентриситетной инсоляции может быть основой для объяснения главных климатических колебаний плейстоцена. Предлагаемые альтернативные варианты объяснения этих колебаний, как было показано в разделе 3.2, противоречивы. Однако приведём ещё один пример.

В работе [Loutre, Berger, 2000a], при моделировании ледниковых циклов Северного полушария, приведены варианты астрономического воздействия на климатическую систему Земли, показанные в таблице 9. Легко видеть, что климатическое воздействие орбитальных элементов в таблице соответствует механизму оледенений Миланковича: «холодная», т.е. 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 инсоляции. «Горячая», межледниковая орбита, характеризуется также большим эксцентриситетом, но максимальным углом  $\epsilon$  и нахождением Земли в перигелии во время летнего солнцестояния в Северном полушарии, следствием чего является максимальное значение июньской инсоляции.

Однако такие представления авторов противоречат прежде всего эмпирическим данным. Как мы помним (рис. 20, 36), 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» несовместимо практически с максималь-

Таблица 9

Значения орбитальных параметров и июньская инсоляция под  $65^\circ$  с.ш. ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ), использованные при моделировании (по [Loutre, Berger, 2000a]).

	Эксцентриситет	Перигелий	Наклон земной оси	Инсоляция
Холодная Орбита	0,07	Зимнее солнцестояние	$21.50^\circ$	403,2
Прохладная Орбита	0,04	Зимнее солнцестояние	$22.45^\circ$	440,9
Современная орбита	0,016724	4 января	$23.45^\circ$	477,6
Тёплая Орбита	0,04	Летнее солнцестояние	$24.45^\circ$	554,2
Горячая Орбита	0,07	Летнее солнцестояние	$25.00^\circ$	602,3

ным значением  $e = 0,07$ . Далее, если сопоставить график июньской (или июльской, рис. 26) инсоляции с ИК кривой, легко видеть, что ледниковые стадии приходятся на далеко не самые низкие значения инсоляции, особенно в интервале времени 300-500 тысяч лет назад. Но даже и в течение последних 200 тыс. лет наибольшим объёмам льда на планете (стадии 2.2, 4.2, 6.2 и 6.4 на шкале Bassinot et al., рис. 36) соответствуют величины июньской инсоляции в интервале от 450 до 475  $\text{Вт}/\text{м}^2$ . Последняя цифра, как следует из таблицы 9, близка к современному значению инсоляции 477,6  $\text{Вт}/\text{м}^2$ , а ведь сейчас межледниковье. Приведённый пример ещё раз демонстрирует необоснованность использования вариаций месячной инсоляции для палеоклиматических интерпретаций.

Помимо указанных противоречий с эмпирическими данными, авторы [Loutre, Berger, 2000], приводя показанную нами таблицу, противоречат и самим себе. В работе [Berger et al., 1999], которая рассмотрена в разделе 3.3, 100000-летний ритм глобальных изменений последнего миллиона лет объясняется тем, что ледниковые условия этого периода времени разрушаются (происходит таяние льда) при высоких значениях инсоляции, которые возможны только при максимальном значении эксцентриситета. А раз максимумы  $e$  имеют период около 100 тыс. лет, это и объясняет указанный период климатической ритмики. Однако из таблицы

9 с очевидностью следует, что при максимальном  $e$  могут быть и оледенения («холодная» орбита) и, следовательно, 100000-летняя периодичность будет значительно усложняться.

Одна из неотложных задач, решение которой может способствовать как успешной разработке механизма параметрического резонанса, так и прогнозированию глобальных изменений климата – установление причин малого ледникового периода. Предполагаемая многими исследователями связь этого явления с минимумом Маундера 1645-1715 гг. обсуждалась во многих работах (библиография в статье [Большаков, 2000б]). При решении этой задачи представляются важными два обстоятельства.

Первое – значительная продолжительность данного минимума солнечной активности (СА), охватывающая шесть 11-летних циклов. Второе – как показали спутниковые измерения, колебания солнечной постоянной в 11-летнем цикле близки к 0,11%, т.е. их можно сравнить с изменениями инсоляции, обусловленными эксцентриситетным циклом. Таким образом, если бы была доказана обусловленность малого ледникового периода падением СА в минимуме Маундера, можно было бы считать, что быстрое, в течение 70 лет, уменьшение инсоляции на 0,1 % сопоставимо по своему воздействию с её медленным изменением, резонансно усиленным в течение длительного эксцентриситетного цикла.

В таком случае, не исключено, что и наблюдаемое резкое изменение  $CO_2$  может на самом деле вызвать значительное потепление за относительно короткий интервал времени. Однако, те же данные стали бы указывать и на существенную роль вариаций СА в колебаниях климата, т.е. на необходимость особенно тщательного исследования её вариаций за последние столетия и особенно в течение XX-го века. Необходимо также учитывать и обратные связи из-за повышения испарения, вызванного потеплением и т.д.

Ещё одна важная и сложная проблема теории палеоклимата – объяснение причин «Великих оледенений» прошлых геологических эпох, таких как ордовикское, пермо-карбоновое и в целом кайнозойское, оледенения. Предложено много гипотез для их объяснения, некоторые из которых были упомянуты в главе 1. С позиций новой концепции ОТП весьма логичным выглядит предположение о влиянии на эти события вариаций наклона земной оси, заметно больших, чем рассчитанные для последних двух миллио-

нов лет изменения угла наклона в пределах примерно от  $22^\circ$  до  $24,5^\circ$ . Вспомним, что при угле  $\epsilon = 0$  инсоляция на географических полюсах была бы равна нулю, что означало бы практически постоянное наличие ледового покрова в высоких широтах обоих полушарий, при условии существования там суши. В действительности, очевидно, для существования в высоких широтах постоянного ледового покрова не требуется такого экстремального уменьшения угла наклона. Вполне возможно, что для перехода от термо- к гляциоэре достаточно изменений угла  $\epsilon$  в пределах от  $30^\circ$  до  $17^\circ$ , которые приводит Ю.Н. Авсюк [1996, стр. 171].

Здесь необходимо отметить и разные точки зрения на эволюцию значений орбитальных элементов в геологических масштабах времени. Характеристики вариаций угла наклона земной оси существенно зависят от расстояния между Луной и Землей [Авсюк, 1996; Berger et al., 1992]. Однако в первой из этих работ изменения угла наклона связываются с циклическими, с периодичностью около 200 млн. лет, изменениями расстояния Земля-Луна, а во второй расчеты вариаций угла наклона и прецессии проводятся, исходя из монотонного увеличения этого расстояния за последние 500 миллионов лет. Согласно оценкам Berger et al. [1992], основной период вариаций угла наклона земной оси 100 млн. лет назад должен был составлять 38,8 тыс. лет, а 200 млн. лет назад – 36,6 тыс. лет. Понятно, что монотонное изменение расстояния Земля-Луна может быть причиной монотонного, однонаправленного изменения угла  $\epsilon$ , что приводит к отсутствию оснований для предположения о связи циклически происходивших оледенений с вариациями угла наклона земной оси. Добавим также, что есть гипотеза [Williams, 1993] о значительном изменении угла наклона земной оси почти на  $50^\circ$  в интервале времени от 650 до 430 млн. лет назад.

Вероятно, специалисты по различным отраслям знаний, которые включает в себя орбитальная теория палеоклимата, видят и другие проблемы развития теории. Было бы хорошо, если бы они высказали своё мнение по поводу обсуждавшихся здесь иногда в довольно общем виде проблем. Этим была бы достигнута одна из главных целей написания данной книги – привлечь внимание возможно более широкого круга специалистов к проблеме создания новой версии орбитальной теории палеоклимата.