

ПАЛЕОКЛИМАТ

УДК 550.2+551.793+551.583.7

**РАННИЙ ОТКЛИК ВНУТРИКОНТИНЕНТАЛЬНОЙ АЗИИ
НА ПЛЕЙСТОЦЕНОВЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ**
(по результатам сопоставления осадочных летописей Байкала, океана
и полярного льда в орбитальных хронологиях)

М.А. Федорин^{1,2}, Е.Л. Гольдберг²

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Коптюга, 3, Россия

² Лимнологический институт СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, Россия

Принимая гипотезу орбитальной модуляции плейстоценовых климатических циклов, мы конструируем новый вариант глубинно-возрастной модели для байкальской геохимической летописи (колонка BDP-96-2) и сравниваем ее с глобальными летописями палеоклиматов неоплейстоцена ($\delta^{18}\text{O}$ океана; δD льда и CH_4 , $\delta^{18}\text{O}$ газа ст. Восток). Возрасты для всех летописей получены орбитальной хронометрией в предположении произвольных, но неизменных во времени фазовых сдвигов между орбитальными параметрами и откликами. В отличие от традиционных методов орбитальной корреляции, мы используем полную суперпозицию всех основных рядов орбитальных вариаций, включая 100-тысячелетний цикл эксцентриситета. В качестве дополнительных ограничений использованы радиоизотопные датировки, а также известные ограничения на фазы орбитальных откликов в глобальных летописях.

В скорректированных орбитальных хронологиях, помимо закономерного акцентирования орбитальных периодов (100, 41, 23 и 19 тыс. лет), подавлены „комбинационные“ циклы длительностью 70 и 30 тыс. лет, отсутствующие в орбитальных вариациях. Показано, что в байкальской летописи эти циклы могут быть связаны в основном с нелинейными, неодинаковыми для разных возрастов, искажениями исходной хронологии. Неустраненные остатки комбинационных циклов во всех рассмотренных летописях допустимо соотносить с нелинейным откликом климатической машины на орбитально обусловленные изменения инсоляции.

Для всех летописей сопоставлена последовательность фаз отклика на изменения прецессии, наклона и эксцентриситета. Установлено, что отклик континента был самым ранним. Наиболее контрастна ранняя фаза 100-тысячелетнего цикла, отклик на который в байкальской летописи опережает планетарные ледниковый цикл и цикл парникового CH_4 и почти синхронен с изменением температуры Южного полюса. Полученные результаты могут свидетельствовать об очень быстрой реакции континента на цикл эксцентриситета, но допускают и альтернативные гипотезы возникновения 100-тысячелетнего цикла в плейстоценовой истории планеты.

Палеоклиматические летописи плейстоцена, орбитальные циклы, байкальская летопись, 100-тысячелетний цикл.

EARLY RESPONSE OF CONTINENTAL ASIA TO PLEISTOCENE CLIMATE CYCLES

(retuned orbital chronologies for Baikal, marine, and ice core records)

M.A. Phedorin and E.L. Goldberg

Assuming orbital modulation of Pleistocene climate cycles, we have generated a new time scale for the Asian geochemical limnic record in the BDP-96-2 Baikal and the KDP-01 Hovsgöl cores and updated the chronologies for the global marine $\delta^{18}\text{O}$ and Vostok ice-gas records. The time scales were obtained by orbital tuning with the assumption of arbitrary but time invariable amplitudes and phase lags of the orbital parameters and responses.

The retuned chronologies highlighted the cycles of eccentricity (100 kyr), obliquity (41 kyr), and precession (23 and 19 kyr), but the combined 70 and 30 kyr cycles became less prominent in the continental (Baikal) record though persisted in the global data (Vostok δD). The residual 70 and 30 kyr harmonics, more likely, result from errors in the untuned chronology for the Baikal record but are rather due to natural climate nonlinearity in the global records.

We investigated the leads and lags of orbital climate signals with a special focus on the 100 kyr cycle. The phases of precession, obliquity, and eccentricity cycles, compared among the records, showed the lead of the continent. The Baikal geochemical signal at the 100 kyr band led the global glacial and greenhouse CH_4 responses

and was almost synchronous with the earliest responding polar temperature signal. The reported results characterize the continent as a system highly responsive to eccentricity variations but do not contradict alternative hypotheses for the origin of the 100 kyr cycle in the Earth's climate history.

Pleistocene paleoclimate records, orbital climate cycles, Baikal records, 100 kyr cycle

ВВЕДЕНИЕ

Большинство современных гипотез связывают цикличность ледниковых и межледниковых событий плейстоцена с внешним периодическим фактором — с орбитально обусловленными изменениями (перераспределениями) инсоляции, имеющими периоды 19 и 23 тыс. лет (прецессия оси Земли) и 41 тыс. лет (наклонение оси). Такая цикличность ясно обнаруживается и в плиоценовых летописях [Shackleton et al., 1990]. Тем не менее в неоплейстоцене доминирующим является 100-тысячелетний ритм, который соотносят с циклом изменений эксцентриситета орбиты Земли. Однако вклад эксцентриситета в изменения инсоляции крайне незначителен, и в настоящее время не существует единого мнения о механизмах усиления климатической машиной Земли столь малого воздействия до уровня доминирующей климатической цикличности. Для выяснения причинно-следственных взаимоотношений между различными климатическими механизмами, приводящими к чередованию ледниковых эпох, необходимо изучать последовательность климатических событий в разных участках земного шара — как по траекториям глобального переноса, так и в относительно изолированных экосистемах. Особую роль в таких цепях играют континенты. Озеро Байкал находится в центрально-континентальной части Азии. Его донные отложения законсервировали информацию о палеоэкологических перестройках в регионе, связанных с изменениями условий среды и климата. Осадочные летописи Байкала являются важным объектом на пути решения указанной проблемы.

В данной работе мы рассматриваем байкальскую летопись, отражающую континентальные изменения среды [Goldberg et al., 2000], корректируем ее хронологию в соответствии с парадигмой орбитальной модуляции и проводим сопоставление с летописью океанических осадков ($\delta^{18}\text{O}$ в бентосных фораминиферах) и ледниковыми летописями Антарктики (дейтерий δD льда и состав газа в нем: $\delta^{18}\text{O}$ и CH_4), хронологии для которых мы строим тем же методом. В новых хронологиях мы анализируем фазовые соотношения (запаздывание) между летописями по всем трем орбитальным откликам (эксцентриситет (E), наклонение (T), прецессия (P)).

В настоящем исследовании мы не обсуждаем достоинства и недостатки теории орбитальной модуляции параметров экосистем, но принимаем эту парадигму как данность, используем при построении шкал и анализируем, к каким выводам это приводит.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Байкальская летопись. Одними из первых и до сих пор наиболее часто используемых индикаторов климатических оптимумов в осадках Байкала являются следы расцвета диатомовых (створки и биогенный кремнезем) [Грачев и др., 1997; Кузьмин и др., 1997; Карабанов и др., 2001]. В то же время причины такой корреляции окончательно не установлены и дискутируются. Мы связываем „диатомовый сигнал“ с изменением состава воды Байкала — как растворенной компоненты, так и массы взвешенного обломочного материала, вместе влияющих на биопродуктивность. В работах [Goldberg et al., 2000; Phedorin et al., 2000, Гольдберг и др., 2001б] было показано, что ледниковые и межледниковые интервалы на Байкале отличались также по геохимическим характеристикам источников терригенного сноса в озеро: в межледниковые периоды в озеро поступает много урана, кремниевой кислоты и, по-видимому, с водами Селенги других элементов в растворенной форме. Межледниковый источник также характеризовался повышенными отношениями ряда элементов, особенно Sr/Rb. В ледниковые периоды увеличивалась поставка элементов, связанных с глинистой фракцией: K, Ti, Rb, Th, Nb, Nd и др., в связи с активизацией ледникового выветривания. С увеличением поставки ряда питательных веществ в межледниковом источнике связан, по-видимому, и последующий расцвет диатомовых [Гавшин и др., 2001; Чебыкин и др., 2004; Гольдберг и др., 2005]. С диатомовыми блями и общим расцветом биопродуктивности связывают и накопление Vg в осадках [Phedorin et al., 2000]; мы же рассматриваем все известные нам геохимические маркеры межледникового источника как (почти) прямое отражение интенсификации процессов выветривания в водосборном бассейне, связанных с работой водных потоков на суше, т. е. с первичным климатическим фактором — влажностью. На основе одного из этих маркеров — аутигенного урана в осадках — проведена количественная реконструкция влажности климата [Гольдберг и др., 2005].

В данной работе была сконструирована сводная летопись (рис. 1) из элементов и их соотношений, связанных с межледниковым источником вещества, в осадках байкальской скв. BDP-96-2, пробуренной в

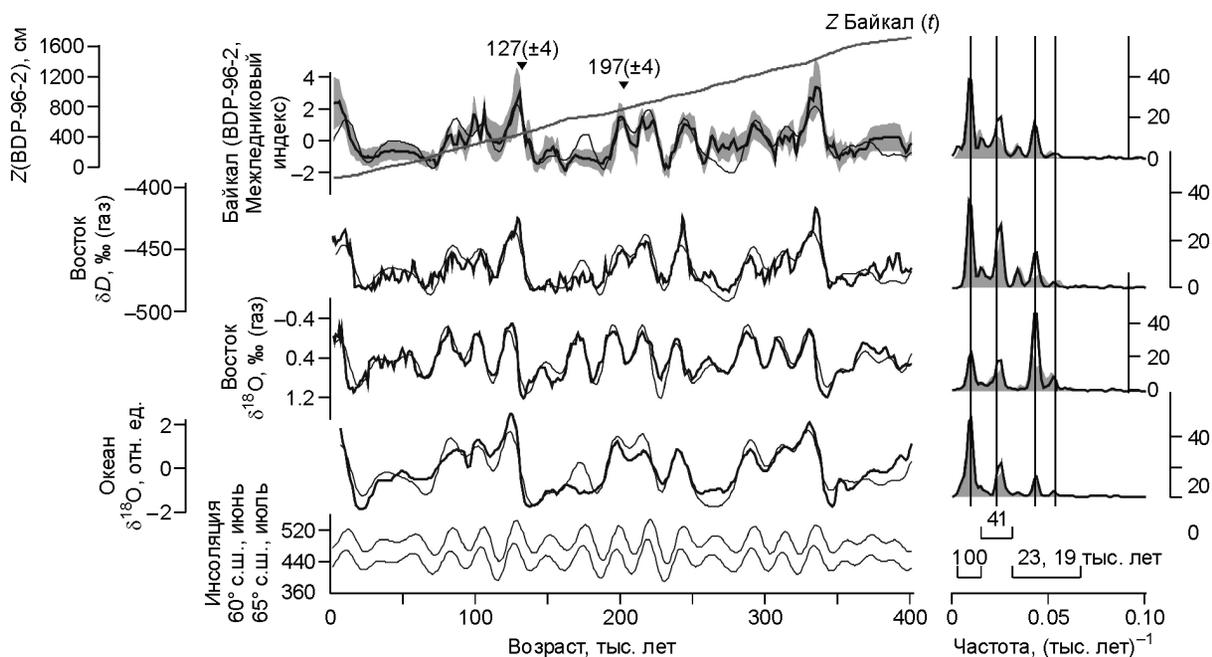


Рис. 1. Сопоставление палеоклиматических летописей неоплейстоцена в хронологии настоящей работы.

Летописи показаны жирной линией, тонкой линией даны их *ETP*-аппроксимации, найденные при построении хронологий; справа приведены нормированные амплитудные спектры летописей (серой заливкой — для исходной хронологии, жирной линией — для новой).

Сводная байкальская летопись (межледниковый индекс) составлена из распределений химических элементов и их отношений, связанных с межледниковым источником терригенного вещества, в осадках скв. BDP-96-2; интервал 0—65 тыс. лет представлен колонкой ст. 2, которой приписаны отрицательные глубины Z (BDP-96-2). Серой полосой показан доверительный интервал $\pm 3\sigma$. Возрастные ограничения отмечены треугольниками.

Ряды изменения инсоляции в июне на широте 60° с.ш. и в июле на широте 65° с.ш. показаны для общепринятых сопоставлений.

1996 г. на подводном Академическом хребте [Кузьмин и др., 1997] в точке с координатами $53^\circ 41' 48''$ с.ш., $108^\circ 21' 06''$ в.д. Утерянный при бурении верхний участок керна заменен перекрывающимся интервалом со ст. 2, отобранном поршневым бурением также на Академическом хребте (координаты точки отбора $53^\circ 33' 04''$ с.ш., $107^\circ 54' 53''$ в.д.; в работах [Goldberg et al., 2001; Чебыкин и др., 2004] представлены результаты изучения геохимии этих осадков). Предлагаемая сводная летопись составлена из распределений Br, Mo, U, Sr/Ti, Sr/Rb, Sr/Th, Zn/Nb, U/Th, определение концентраций этих элементов в осадках осуществлено методом РФА-СИ [Phedorin et al., 2000; Goldberg et al., 2000].

Летописи глобальных изменений, использованные в этой работе, — это летописи δD во льду и $\delta^{18}O$, CH_4 в пузырьках газа, замороженных в лед ст. Восток (Антарктика) [Petit, 1999] и композиционная летопись $\delta^{18}O$ в бентосных океанических фораминиферах [Bassinot, 1994].

Метод построения хронологий. Хронологии всех летописей, обсуждаемых в настоящей работе, пересмотрены и построены с использованием единого метода, что снимает ряд проблем при сопоставлении. Метод и результаты обсуждаются ниже.

Основой сконструированных хронологий служат орбитальные циклы, запечатленные в самих климатических летописях — из полярных льдов, осадков океана и Байкала. Использованный метод хронометрии несколько отличается от общепринятых способов датировки на основе „орбитальной корреляции“. Традиционно летопись климата подвергают фильтрации, удаляя из нее „нелинейный“ 100-тысячелетний цикл, затем несколько контрольных точек фильтрованной летописи синхронизируют с соответствующими точками взвешенной суммы орбитальных функций, чтобы зафиксировать фазовые сдвиги (метод подробно изложен в [Shackleton, 2000], принудительная подгонка фаз использована в [Martinson et al. 1987]). Применяются и более простые методы орбитальной подгонки. Для успеха такого подхода требуется как можно более адекватная хронология *a priori* с тем, чтобы последующие фильтрация и синхронизация не приводили к заметным искажениям периодичности. Это сужает диапазон применимости метода. Имеются и другие недостатки, как, впрочем, и достоинства, подробно рассмотренные в [Нуыберс,

2004]. Другой способ корреляции — „пик в пик“ с инсоляционной кривой или напрямую с прецессионным рядом, также ненадежен: суперпозиция орбитальных „отпечатков“ в летописи изменяет как чередование пиков, так и фазовые задержки, учесть которые в таком подходе невозможно. По этой причине орбитально коррелированные хронологии [Карабанов и др., 2001] для байкальской летописи могут быть использованы лишь в качестве первого приближения.

В методе, предлагаемом ниже, мы не используем предварительное удаление (фильтрацию) 100-тысячелетнего цикла из летописей. Использование сразу трех компонент (эксцентриситет, наклонение и прецессия — E, T, P) служит естественной регуляризацией решения задачи.

Для имеющейся летописи $F(Z)$ ищется наилучшая аппроксимация в виде суперпозиции орбитальных функций $f_i(t)$, описывающих орбитальную модуляцию (здесь $Z \in [Z_0; Z_{\max}]$ — глубина керна, t — возраст). В число искомых параметров аппроксимации входят амплитуды и фазы $a_1, \dots, a_3, \varphi_1, \dots, \varphi_3$ орбитальных функций и хронология $t(Z)$. Для их нахождения минимизируется функционал невязок

$$\sum_{k=1}^M \left\{ \int_{Z_0}^{Z_{\max}} \left(G_k [F(Z)] - G_k \left[\sum_{i=1}^N a_i f_i(t(Z) + \varphi_i) \right] \right)^2 dZ \right\} = \min, \quad (1)$$

где $G_k, k = 1, \dots, M$ — некоторые трансформации, в том числе весовые коэффициенты. В качестве дополнительных ограничений для (1) мы использовали абсолютные радиоизотопные даты, а для глобальных летописей также и ограничения на отдельные фазы, которые мы вскоре обсудим. Базисные функции — временные ряды изменений орбитальных параметров (E, T, P), взятые из [Berger, Loutre, 1991]; ряд эксцентриситета отфильтрован от 430-тысячелетнего периода. Поиск минимума (1) осуществлялся (квази-ньютонскими) методами нелинейной оптимизации. Для подбора „удачного“ начального приближения использовался метод Монте-Карло.

Сходимость метода к точному решению установлена экспериментами на синтетических летописях, в качестве которых брались различные комбинации осциллирующих функций, им приписывались хронологии $t(Z)$, искаженные (по сравнению с линейным законом $t = aZ + b$) случайными отклонениями на величину +100...–60 % на каждом из 40 интервалов Z , и затем проводился процесс восстановления. Восстанавливались как хронологии, так и амплитуды, и фазы модели. В этих экспериментах адаптированы веса и трансформации G_k , весьма эффективной среди них является спектральная. В дальнейшем метод был применен к реальным летописям палеоклиматов.

Хронология байкальской летописи длительностью 420 тыс. лет построена с использованием описанного выше подхода орбитальной корреляции. Две контрольные точки, полученные датированием по неравновесной U-Th серии [Гольдберг и др., 2001a], использованы для привязки абсолютных возрастов хронологии (см. рис. 1). Летопись геохимических параметров, связанных с функционированием межледникового источника в водосборе Байкала, приведена в полученной хронологии на рис. 1 (Байкал, VDP-96-2, межледниковый индекс).

Новые хронологии льда и газа ст. Восток построены на основе того же подхода: хронология льда — путем аппроксимации ряда дейтерия δD , хронология газа — путем аппроксимации (совместно с δD) рядов метана CH_4 и $\delta^{18}O$ в пузырьках воздуха. Абсолютные возрасты газа здесь реконструированы не назначением контрольных точек известного возраста, но назначением фазы прецессионной компоненты для $\delta^{18}O$ воздуха, величина фазы взята, следуя [Shackleton, 2000], 4.7 тыс. лет; для льда фаза не задавалась, но было введено условие, исходя из которого лед не может быть старше замороженного в него воздуха менее чем на 1.8 и более чем на 7 тыс. лет.

Разница возрастов льда и газа $t_{\text{льда}} - t_{\text{газа}}$ приведена на рис. 2, характер ее распределения качественно не изменился в сравнении с хронологией [Petit et al., 1999], однако $t_{\text{льда}} - t_{\text{газа}}$ стремится к большему контрасту (преимущественно во время ледниковых периодов, а также самых выраженных максимумов температуры); разница возрастов льда и воздуха во льду зависит от палеотемпературы и скорости аккумуля-

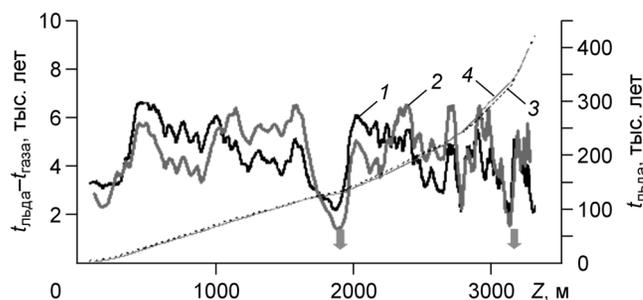


Рис. 2. Сопоставление хронологии $t(Z)$ льда, а также разницы возрастов льда и газа ст. Восток:

1, 3 — исходная, по [Petit et al., 1999] и 2, 4 — по настоящей работе. Стрелками указаны интервалы с тенденцией к еще большему уменьшению разницы возраста льда и газа в нем.

муляции и течения льда; в работе [Petit et al., 1999] возраст газа был непосредственно рассчитан из физико-математической модели этих явлений; наш результат не приводит к существенному пересмотру параметров модели. Отличие исходной [Petit et al., 1999] и новой хронологий $t(Z)$ для льда также приведено на рис. 2. Основные корректировки сказались древнее 200 тыс. лет (глубже 2500 м). Среди других недавних исследований, в которых строились орбитальные шкалы для летописей ст. Восток и обсуждаются последовательности фаз отклика, следует отметить также работу [Ruddiman, Raymo, 2003], с рядом положений которой наши результаты также согласуются. Распределение дейтерия δD во льду и $-\delta^{18}O$ в пузырьках воздуха на ст. Восток в новой хронологии этой работы также приведено на рис. 1.

Хронология океанической летописи (композиционная летопись $\delta^{18}O$ в бентосных фораминиферах из осадков Тихого океана [Bassinot et al., 1994]) здесь также построена путем оптимизации $t(Z)$, амплитуд и фаз E , T , P до получения наилучшей аппроксимации ряда $\delta^{18}O$. Отметим, что динамически новая хронология почти не отличается от прежней [Bassinot et al., 1994]: та была получена классической орбитальной корреляцией, по-видимому, очень тщательной. Однако новые координаты времени статически сдвинуты: события летописи в основном стали „моложе“. Этот результат не случаен и связан с тем, что фаза сигнала летописи $\delta^{18}O$ океана обязана опережать фазу сигнала в $\delta^{18}O$ воздуха примерно на 1 тыс. лет (1 тыс. лет составляет характерный интервал времени, за который изотопный состав океанической воды наследуется атмосферным воздухом [Bender et al., 1994; Shackleton, 2000]). В последние годы прежние результаты датировки океанических осадков на основе орбитальной корреляции подвергаются критике в направлении „омоложения“ хронологий, и полученный здесь результат также поддерживает такое мнение [Shackleton, 2000]. Распределение бентосного $\delta^{18}O$ океанических осадков в новой хронологии приведено на рис. 1.

Все полученные здесь хронологии *глобальных* летописей хорошо согласуются с соответствующими орбитальными хронологиями для бентосного $\delta^{18}O$ океанических осадков, $\delta^{18}O$ воздуха и δD ст. Восток, разработанными в [Shackleton, 2000]. Это свидетельствует в пользу корректности использованного нами метода.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Внесенные в возрасты летописей уточнения большей частью изменяются от -5 до $+5$ %, достигая в отдельных точках 20 %. На рис. 1 приведены летописи в новых хронологиях, справа от летописей показаны их амплитудные спектры, серой заливкой обозначены спектры тех же летописей в исходных хронологиях. Для каждой летописи новая хронология сконцентрировала спектральную мощность, изначально заметно рассредоточенную, в более узкие полосы — как вокруг периода наклона (41 тыс. лет), так и вокруг периодов прецессионной компоненты (19 и 23 тыс. лет). Исключение составила летопись бентосного $\delta^{18}O$ океанов [Bassinot et al., 1994], где изменение амплитуды прецессионной компоненты практически не произошло; связано это, по всей видимости, с тем, что прежняя хронология летописи строилась на основе орбитальной корреляции именно с прецессионным сигналом. В 100-тысячелетней полосе эффект концентрации проявляется слабо (см. рис. 1), так как отклонения хронологии в пределах нескольких тысяч лет по отношению к такому долгому периоду не способны серьезно исказить или скорректировать спектральную мощность.

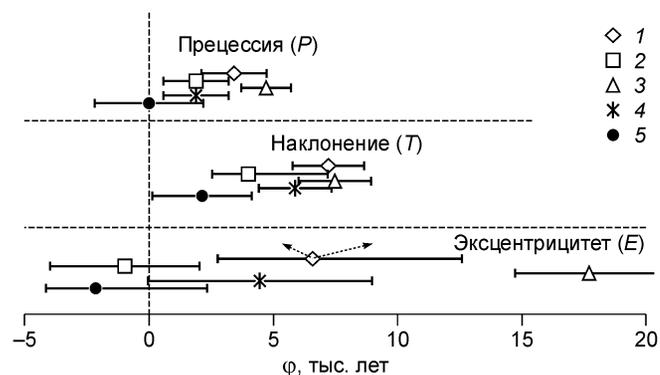
В спектре байкальской летописи при новой хронологии существенно подавлен ~ 70 -тысячелетний период, существование которого ранее отмечалось в [Goldberg et al., 2000; Phedorin et al., 2000; Kravchinsky et al., 2003]. Данная периодичность отсутствует в рядах орбитальных вариаций, но может возникать и как следствие нелинейностей ($1/41 - 1/100 = 1/70$) отклика климата на орбитальное воздействие (таких как обратные связи в климатической машине, или пороговые эффекты отклика), и из-за нелинейностей, генерируемых искажениями хронологии (т. е. искажениями, величины которых неодинаковы для разных возрастов). Обратим внимание, что в случае с δD льда ст. Восток оптимизация хронологии почти не уменьшила 70-тысячелетний пик в спектре; в полной мере это относится и к ~ 30 -тысячелетнему комбинационному циклу. Остатки 70- и 30-тысячелетних гармоник имеет смысл отнести именно к нелинейности климатической системы или отклика, так как наша процедура орбитальной хронометрии была нацелена именно на устранение дефектов имеющихся хронологий, способных генерировать нелинейные частотные искажения.

В новой хронологии последовательность хода $\delta^{18}O$ в океане и атмосфере (как меры объема полярных льдов), падения температуры на полюсе, уменьшения концентрации парниковых газов в атмосфере, аридизации климата в Центральной Азии и соответствующих изменений июньской и июльской инсоляции 65° с.ш. на качественном уровне видна из рис. 1. Сводка фазовых сдвигов φ_i по каждой орбитальной

Рис. 3. Фазовые взаимоотношения компонент, связанных с прецессией, наклоном и эксцентриситетом в глобальных летописях палеоклимата и в геохимической летописи байкальских осадков BDP-96-2, в хронологии данной работы.

1 — $\delta^{18}\text{O}$ фораминифер (Тихий океан); 2 — δD льда (ст. Восток); 3 — $\delta^{18}\text{O}$ газа (ст. Восток); 4 — CH_4 газа (ст. Восток); 5 — межледниковый индекс (BDP-96-2, Байкал). Величины фазовых сдвигов для компонент аппроксимации отсчитываются относительно соответствующих рядов E, T, P [Berger, Loutre, 1991], положительные величины соответствуют запаздыванию. Указанные диапазоны погрешностей определения фазы соответствуют падению качества аппроксимации на 7 %.

Стрелками показаны фазы двух одинаковых, но смещенных по времени рядов эксцентриситета (с разными весами), которыми допустимо заменить единственную компоненту эксцентриситета в ETP -аппроксимации бентосного $\delta^{18}\text{O}$ (см. текст), при том же качестве аппроксимации.



компоненте $f_i(t + \varphi_i)$ в ETP -аппроксимациях относительно исходных орбитальных рядов $f_i(t)$, $i = 1, 2, 3$, дана на рис. 3. Мы намеренно приводим величины фаз, взятые не из самих летописей, а из их ETP -аппроксимаций. В противном случае возрастает неточность определения фаз на этапе фильтрации летописей в полосе периодов прецессии, наклона и эксцентриситета; на близких частотах. Построенные же модели E, T, P

влияет также естественный „шум“ в летописи свободны от подобных артефактов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ фазовых сдвигов. Фазовый анализ откликов на изменения прецессии и наклона (19, 23 и 41 тыс. лет) в глобальных летописях ($\delta^{18}\text{O}$ океана и атмосферы) ранее проводился в [Shackleton, 2000], и та часть наших результатов, которая относится к глобальным летописям, хорошо согласуется с этими данными. Важным результатом настоящей работы является то, что отклик байкальской летописи на изменение как прецессии и наклона, так и эксцентриситета является самым ранним, опережая все глобальные тренды (см. рис. 3).

Раннюю (и почти линейную) реакцию со стороны байкальской летописи на короткие орбитальные циклы 19, 23 и 41 тыс. лет можно объяснить двумя факторами. Первый — это малая инерционность континентальной системы (быстрые перестройки регионального оледенения в ответ на локальный инсоляционный форсинг и глобальный атмосферный перенос). Второй — это возможность отклика на более раннесезонные изменения инсоляции: начала лета, а не середины, как принято для полюса (фаза июньской, например, инсоляции меньше, чем июльской). Второй фактор связан с положением Байкальского региона в более умеренных широтах по сравнению с глобальными ледниками, управляющими глобальным климатом, и также усиливается малой инерционностью континентальной системы.

Взаимоотношение фаз эксцентриситета в различных летописях наиболее любопытно, благодаря большой контрасту, который является следствием как наибольшей длины периода (100 тыс. лет), так и нелинейной природы этого цикла [Imbrie et al., 1993]. Последовательность событий в 100-тысячелетнем цикле для рассмотренных летописей выглядит следующим образом:

1) наиболее поздний отклик (~18 тыс. лет) наблюдается в изменении изотопного состава $\delta^{18}\text{O}$ атмосферного газа; причиной задержки служит то, что атмосферный кислород наследует $\delta^{18}\text{O}$ из океанической воды через морской фотосинтез и через длительное перемешивание с дополнительным изотопным фракционированием при эффекте Дола [Bender et al., 1994]; изменение объема льда происходит на ~1 тыс. лет раньше, чем $\delta^{18}\text{O}$ атмосферы;

2) этому предшествует (~7 тыс. лет) изменение бентосного фораминиферного $\delta^{18}\text{O}$ в океане, по-видимому, как прямое следствие большого вклада в этот сигнал от существенно более раннего изменения температуры придонных вод (последнее почти синхронно с температурой воздуха на ст. Восток [Shackleton, 2000]), так как фораминиферный $\delta^{18}\text{O}$ в океане является сложным сигналом и льдов, и придонной температуры [Shackleton, 2000];

3) еще ранее (~4 тыс. лет) происходит рост концентрации парникового CH_4 в атмосфере;

4) этому предшествует повышение полярной температуры (0 тыс. лет и даже менее) [Jouzel et al., 1987; Petit et al., 1999].

Аналогичная последовательность глобальных откликов обсуждалась ранее в [Shackleton, 2000; Imbrie et al., 1993].

Важным результатом настоящей работы является то, что в нашей хронологии 100-тысячелетний цикл на Байкале практически синхронен с самым ранним откликом — с изменением полярной температуры; возможно, даже и раньше, хотя точность полученной оценки не допускает столь категоричного вывода.

Важно также, что ранняя фаза 100-тысячелетнего отклика сохраняется в байкальской летописи даже в том случае, если синхронизировать ее межледниковые максимумы V-E и VII-A с более поздними датами, обычно принимаемыми для глобальных событий, 122 и 193 тыс. лет, т. е. на 5 тыс. лет моложе использованных U-Th дат. В этом случае фаза байкальского 100-тысячелетнего цикла следует сразу за ходом полярной температуры (δD) ст. Восток, опережая реакцию $\delta^{18}\text{O}$ атмосферы, объема полярных ледников, а также (незначительно) и парниковых газов,

Возможны несколько моделей быстрого отклика континента на 100-тысячелетний цикл.

1. С быстрым изменением полярно-экваториального градиента температуры усиливаются меридиональные атмосферные циркуляции, изменяя режим переноса влаги в центрально-континентальные регионы Азии, что приводит к изменению их климата.

2. Возможен частично „автономный“ отклик континентальной климатической системы, которая сама представляет собой уменьшенную модель глобальной системы (горные ледники—поверхность суши—локальные атмосферные массы—озерная гидросистема) и оттого более мобильную.

Обращают внимание отрицательные величины фазы отклика на изменение эксцентриситета в байкальской летописи и в летописи температуры (δD) ст. Восток. Вопрос об опережении 100-тысячелетним циклом в некоторых летописях хода инсоляции обсуждался и ранее [Winograd et al., 1992], однако здесь имеющиеся неточности фаз пока не позволяют сделать однозначного вывода в пользу нарушения причинно-следственных связей между изменениями климата и инсоляции в ритме эксцентриситета. Тем не менее полученные результаты для байкальской летописи допускают рассмотрение альтернативных гипотез природы 100-тысячелетнего цикла в экосистемах, даже напрямую не связанных с изменением эксцентриситета Земли (см., например, [Muller, MacDonald, 1997] и др.).

Обсуждение особенностей построенных хронологий. Предложенная разновидность орбитального хронометра дает точный результат при линейной связи отклика с орбитальным воздействием и отсутствии неучтенных вкладов („шума“) в летописи. Для реальных летописей, *ETP*-аппроксимации оказываются неполными — даже при линейном и стационарном отклике палеомаркеров на климатические изменения и при идеальном измерении в эксперименте, летописи осложнены сигналами различной природы. Это региональные и локальные факторы, суборбитальные климатические механизмы и т. д., полностью устранить следы которых невозможно. Вследствие этого возникают погрешности хронологии при процедуре оптимизации. Сведение их к минимуму возможно на основе регуляризации с использованием независимых дат, что и было нами сделано для байкальской летописи. Отметим, что с ростом числа таких датировок и при выполнении сделанных предположений вся наша хронология стремится к точной, тогда как при использовании обычных методов корреляционной датировки все недостающие даты получаются простой интерполяцией. В случае очень малого числа дат, как было сказано, наша хронология также представляет интерес, так как погрешности распределены по ее длине более равномерно, чем при обычной орбитальной корреляции.

В традиционной орбитальной корреляции для нахождения фаз приходится приписывать контрольные возрасты точкам фильтрованной летописи, а не исходной, что в общем случае некорректно. Н. Шеклетон [Shackleton, 2000], осознавая это, смог без допущений найти лишь фазу отклика на прецессию и только для $\delta^{18}\text{O}$ воздуха (ст. Восток), где прецессионный сигнал является доминирующим. В предложенном здесь подходе такой трудности не возникает.

По поводу восстанавливаемых фаз необходимо добавить следующее. Реально климатическая система не является односвязной и может генерировать последовательность откликов на единичное воздействие. Когда времена реакции различных компонентов системы заметно отличаются, возможно разделение откликов во времени по разности фаз. В работе [Shackleton, 2000] предложена модель, согласно которой 100-тысячелетний сигнал в бентосном $\delta^{18}\text{O}$ представлен двумя компонентами с различающимися фазами (на 20 ± 10 тыс. лет): 1) отклик объема полярных льдов и 2) изменение температуры глубинных вод океана. Для подобных случаев полученные в настоящей работе фазы могут рассматриваться лишь как средневзвешенные. Специально построенная нами для бентосного $\delta^{18}\text{O}$ *ETP*-аппроксимация с участием двух разнофазных рядов эксцентриситета оказалась не хуже аппроксимации на основе одного *E*-ряда, однако новые фазы лежали в пределах неопределенности исходной величины $6.57 \frac{+6.0}{-3.8}$ тыс. лет (см. рис. 3)

и имели тенденцию автоматически сходиться к ней за счет очень малого изменения качества аппроксимирования.

ВЫВОДЫ

Построены новые, более совершенные орбитальные хронологии для неоплейстоценовых палеоклиматических летописей: Байкала (геохимическая летопись гумидности континентального климата), океана (бентосный $\delta^{18}\text{O}$), ст. Восток (δD льда и $\delta^{18}\text{O}$, CH_4 газа). В новых хронологиях установлено, что „комбинационные“ циклы (~30 и ~70 тыс. лет) в байкальской летописи, скорее всего, связаны с неточностями прежних хронологий, тогда как климатические нелинейности могли давать существенный вклад в комбинационные циклы полярных ледниковых летописей.

Анализ фаз отклика летописей на прецессию, наклонение и эксцентриситет показывает, что по всем трем компонентам самую раннюю реакцию демонстрирует байкальская летопись. Наиболее показателен в этом отношении 100-тысячелетний цикл. Возможные причины быстрого отклика — низкая инерционность (компактной) климатической системы континента, а также ее функционирование именно как самосогласованной климатической машины, способной воспроизводить в масштабе континента планетарные климатические механизмы. Полученные результаты допускают рассмотрение альтернативных гипотез природы 100-тысячелетнего цикла в экосистемах, (см., например, [Muller et al., 1997] и др.), даже напрямую не связанных с изменением эксцентриситета Земли.

Полученная хронология байкальской летописи может быть использована для реконструкции скоростей седиментации при чередовании ледниковых и межледниковых эпох на Байкале. Данную проблему мы предполагаем обсудить в отдельной публикации.

Настоящее исследование проведено при поддержке РФФИ (грант 03-05-65352). Ход работы и материалы статьи обсуждались с А.Д. Дучковым, К.В. Золотаревым и А.П. Федотовым, которым авторы выражают признательность.

ЛИТЕРАТУРА

Гавшин В.М., Бобров В.А., Хлыстов О.М. Периодичность диатомовой седиментации и геохимия диатомовых илов озера Байкал в глобальном аспекте // Геология и геофизика, 2001, т. 42 (1—2), с. 329—338.

Гольдберг Е.Л., Грачев М.А., Эджингтон Д., Навье Ж., Андрэ Л., Чебыкин Е.П., Шульпяков О.И. Прямая U-Th датировка двух последних межледниковий в осадках оз. Байкал // Докл. РАН, 2001а, т. 380, № 6, с. 805—808.

Гольдберг Е.Л., Федорин М.А., Грачев М.А., Золотарев К.В., Хлыстов О.М. Геохимические индикаторы изменений палеоклимата в осадках озера Байкал // Геология и геофизика, 2001б, т. 42 (1—2), с. 76—86.

Гольдберг Е.Л., Чебыкин Е.П., Воробьева С.С., Грачев М.А. Урановый сигнал влажности палеоклиматов в осадках озера Байкал // Докл. РАН, 2005, т. 400, № 1, с. 72—77.

Грачев М.А., Лихошвай Е.В., Воробьева С.С., Хлыстов О.М., Безрукова Е.В., Вейнберг Е.В., Гольдберг Е.Л., Гранина Л.З., Корнакова Е.Г., Лазо Ф.И., Левина О.В., Летунова П.П., Отинов П.В., Пирог В.В., Федотов А.П., Яскевич С.А., Бобров В.А., Сухоруков Ф.В., Резчиков В.И., Федорин М.А., Золотарев К.В., Кравчинский В.А. Сигналы палеоклиматов верхнего плейстоцена в осадках озера Байкал // Геология и геофизика, 1997, т. 38 (5), с. 957—980.

Карabanов Е.Б., Прокопенко А.А., Кузьмин М.И., Вильямс Д.Ф., Гвоздков А.Н., Кербер Е.В. Оледенения и межледниковья Сибири — палеоклиматическая запись из озера Байкал и ее корреляция с западно-сибирской стратиграфией (эпоха прямой полярности Брюнес) // Геология и геофизика, 2001, т. 42 (1—2), с. 48—63.

Кузьмин М.И., Грачев М.А., Вильямс Д., Каваи Т., Хорие Ш., Оберхенсли Х. Непрерывная летопись палеоклиматов последних 4,5 миллионов лет из озера Байкал (первая информация) // Геология и геофизика, 1997, т. 38 (5), с. 1021—1023.

Чебыкин Е.П., Эджингтон Д.Н., Гольдберг Е.Л., Федорин М.А., Куликова Н.С., Железнякова Т.О., Воробьева С.С., Хлыстов О.М., Левина О.В., Зиборова Г.А., Грачев М.А. Изотопы ряда радиоактивного распада урана 238 — сигналы палеоклиматов верхнего плейстоцена и геохронометры в осадках озера Байкал // Геология и геофизика, 2004, т. 45 (5), с. 539—556.

Bassinot F.C., Labeyrie L.D., Vincent E., Quidelleur X., Shackleton N.J., Lancelot Y. The astronomical theory of climate and the age of the Bruhnes-Matuyama magnetic reversal // Earth Planet. Sci. Lett., 1994, v. 126, p. 91—108.

Bender M.L., Sowers T.A., Labeyrie L. The Dole effect and its variations during the last 130 000 years as measured in the Vostok ice core // Global Biochemical Cycles, 1994, v. 8, № 363, p. 363—376.

Berger A., Loutre M.F. Insolation values for the climate of the last 10 million years // Quat. Sci. Rev., 1991, v. 10, № 4, p. 297—317.

Goldberg E.L., Phedorin M.A., Grachev M.A., Bobrov V.A., Dolbnya I.P., Khlystov O.M., Levina O.V., Ziborova G.A. Geochemical signals of orbital forcing in the records of paleoclimates found in the sediments of Lake Baikal // *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.*, 2000, v. A448, № 1—2, p. 384—393.

Goldberg E.L., Grachev M.A., Phedorin M.A., Kalugin I.A., Khlystov O.M., Mezentsev S.N., Azarova I.N., Vorobyeva S.S., Zheleznyakova T.O., Kulipanov G.N., Kondratyev V.I., Miginsky E.G., Tsukanov V.M., Zolotarev K.V., Trunova V.A., Kolmogorov Y.P., Bobrov V.A. Application of synchrotron X-ray fluorescent analysis to studies of the records of paleoclimates of Eurasia stored in the sediments of Lake Baikal and Lake Teletskoye // *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.*, 2001, v. A470, № 1—2, p. 388—395.

Huybers P., Wunsch C. A depth-derived Pleistocene age model: uncertainty estimates, sedimentation variability, and nonlinear climate change // *Paleoceanography*, 2004, v. 19, p. PA1028.

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

Jouzel J., Lorius C., Petit J.R., Genthon C., Barkov N.I., Kotlyakov V.M., Petrov V.M. Vostok ice core: a continuous isotope temperature record over the last climatic cycle (160 000 years) // *Nature*, 1987, v. 329, p. 403—408.

Kravchinsky V.A., Krainov M.A., Evans M.E., Peck J.A., King J.W., Kuzmin M.I., Sakai H., Kawai T., Williams D.F. Magnetic record of Lake Baikal sediments: chronological and paleoclimatic implication for the last 6.7 Myr // *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 2003, v. 195, p. 281—298.

Martinson D.G., Pisias N.G., Hays J.D., Imbrie J., Moore T.C., Shackleton N.J. Age dating and the orbital theory of the ice ages — development of a high-resolution 0 to 300 000-year chronostratigraphy // *Quat. Res.*, 1987, v. 27, p. 1—29.

Muller R.A., MacDonald G.J. Spectrum of 100-kyr glacial cycle: orbital inclination, not eccentricity // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 1997, v. 94, p. 8329—8334.

Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N.I., Barnola J.-M., Basile I., Bender M., Chappellaz J., Davisk M., Delaygue G., Delmotte M., Kotlyakov V.M., Legrand M., Lipenkov V.Y., Lorius C., Pepin L., Ritz C., Saltzman E., Stievenard M. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica // *Nature*, 1999, v. 399, p. 429—436.

Phedorin M.A., Goldberg E.L., Grachev M.A., Levina O.L., Khlystov O.M., Dolbnya I.P. The comparison of biogenic silica, Br and Nd distributions in the sediments of Lake Baikal as proxies of changing Paleoclimates of the last 480 ky // *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.*, 2000, v. A448, № 1—2, p. 400—406.

Ruddiman W.F., Raymo M.E. A methane-based time scale for Vostok ice // *Quat. Sci. Rev.*, 2003, v. 22, p. 141—155.

Shackleton N.J. The 100 000-year ice age cycle identified and found to lag temperature, carbon dioxide, and orbital eccentricity // *Science*, 2000, v. 289, p. 1897—1902.

Shackleton N.J., Berger A., Peltier W.R. An alternative astronomical calibration of the lower Pleistocene timescale based on ODP Site 677. Transactions of the Royal Society of Edinburgh // *Earth Sci.*, 1990, v. 81, p. 251—261.

Winograd I.J., Coplen T.B., Landwehr J.M., Riggs A.C., Ludwig K.R., Szabo B.J., Kolesar P.T., Revesz K.M. Continuous 500 000-year climate record from vein calcite in Devils Hole, Nevada // *Science*, 1992, v. 258, p. 255—260.

*Рекомендована к печати 12 апреля 2007 г.
А.Д. Дучковым*

*Поступила в редакцию
22 декабря 2006 г.*