

## ПРИЧИНА ВЕКОВЫХ ВАРИАЦИЙ КЛИМАТА: АСТРОНОМИЧЕСКАЯ ГИПОТЕЗА ИЛИ ФЛИККЕР ШУМ?

В. В. Кузнецов, Н.Д. Кузнецова

Изменения климата в течение 700 – 800 тыс. лет хорошо известны: четко выделяются несколько периодов колебаний температуры. Длительность периода, в состав которого входят этап медленного понижения температуры – оледенения и период быстрого повышения температуры поверхности Земли, когда происходит таяние ледников, - равняется примерно 100 тыс. лет. На этом фоне можно выделить ещё несколько более короткопериодных колебаний температуры. Такие вариации обычно объясняются т.н. астрономической гипотезой (теорией) М. Миланковича. Более тщательный анализ данных показывает, что колебания климата, - это хорошо известный в природе фликкер-шум.

### ВВЕДЕНИЕ

Климат (греч. κλίμα, κλίματος) - означает *наклон солнца*, иначе сказать, полуденную высоту солнца. Древние географы делили Землю на климатические пояса в зависимости от этого явления и длины дня, принимая в расчет так называемые *астрономические климаты*, зависящие от положения Земли относительно Солнца. В настоящее время называют *физический* или *метеорологический* климат или среднее состояние атмосферы в данной стране, которое зависит, кроме причин астрономических, еще от высоты над уровнем моря, близости моря, расположения горных цепей и т. д. Можно сказать, что климат - выражение совокупности погоды в данное время и в данном месте.

Авторы [Монин, Шишков, 2000] задачу климата разбивают на две части. Одна из них состоит в определении глобальных горизонтальных неоднородностей полей температуры, создаваемых разностью инсоляций в экваториальных и полярных зонах. Другая половина задачи состоит в определении вертикальных неоднородностей температурного поля, включая парниковый эффект, создаваемых на Земле нагревом её поверхности солнечным излучением. В настоящей работе рассматривается вопрос, имеющий отношение ко второй половине задачи, в частности, к проблеме вертикального переноса солнечного излучения, прямо связанного с образованием парникового и антипарникового эффектов.

Взаимосвязь между вековыми изменениями климата, солнечной активностью, космическими лучами и другими различными геофизическими параметрами обсуждается геофизиками в течение многих лет. В настоящее время принято считать, что главная причина вековых климатических изменений вскрывается теорией Дж. Кролла (1864) и М. Миланковича (1930) [Миланкович, 1939; Rampino, 1979; Imbrie, Imbrie, 1980; Bassinot et al., 1994; Kent, Carlut, 2001; Монин, Шишков, 2000]. Согласно этой теории климатические изменения на Земле являются откликом на вариации в её орбите. Считается, что причина вариаций, происходящих с основными периодами 19, 23 и 41 тыс. лет, связана с возмущениями орбиты Земли за счет её эксцентриситета (периоды: 95, 136 и 413 тыс. лет), прецессии (19 и 23 тыс. лет) и наклона плоскости эклиптики.

Другой причиной влияния внешних факторов на климат считается эффект прямого воздействия космических лучей на атмосферу и биосферу в моменты экскурсов и инверсий геомагнитного поля. Например, Харрисон [Harrison, 1968] полагал, что в моменты инверсий возможно значительное возрастание уровня радиации, которое может

вызвать повышение скорости мутаций, в результате чего возникнет некоторого рода эволюционное нарушение последовательности, иначе, прерывистость хода эволюции. В дальнейшем, в своей совместной статье с Просперо [Harrison, Prospero, 1974] авторы считают, что инверсии ГМП могут вызвать изменение климата Земли, косвенно приводя к исчезновению фауны. Эту идею проверял Файрбридж [Fairbridge, 1977], изучая климатические изменения, произошедшие в период самого «молодого» экскурса Gothenburg (13.5 тыс. лет назад), когда произошло хорошо изученное резкое потепление климата. Ему возражал Хечт [Hecht, 1977], считая, что единственная корреляция геомагнитного поля и климатических событий 13500 лет назад не в состоянии объяснить похожие климатические изменения, происходящие с некоторой регулярной частотой на протяжении всего Голоцена. Автор критики считает, что в статье Файрбриджа нет убедительных доказательств в пользу корреляции между геомагнетизмом и климатом, хотя это все и очень интересно. Главное затруднение в интерпретации данных, предоставленных Файрбриджем, состоит в том, что по ним невозможно обнаружить циклический характер записи климата Голоцена. Резким противником подобных гипотез выступил Ваддингтон [Waddington, 1967]. Он утверждал, что гипотеза, суть которой состоит в том, что радиация дополнительных энергетических частиц, получивших возможность свалиться на Землю во время инверсии геомагнитного поля и оказавшихся причиной популяционных изменений, - является несостоятельной.

Теория климатических изменений Миланковича построена в приближении прозрачной атмосферы. Действительно, прозрачная атмосфера существует на Земле в течение последних 12 тыс. лет, однако раньше она не всегда была такой прозрачной. В последние годы, при анализе кернов антарктического льда и льда Гренландии, - обнаружено, что в более ранние периоды эволюции Земли в её атмосфере присутствовало довольно большое количество пыли [Petit et al., 1999; Vimeux et al., 2002]. Согласно одной из моделей, наличие пыли (скорее всего - вулканической) экранировало солнечное тепло, что приводило к охлаждению поверхности Земли [Кузнецов, Кузнецова, 2004]. Согласно другой версии, похолодание наступало в соответствии с циклами Миланковича, а пыль переносилась в Гренландию и Антарктиду ветрами из Сахары и Патагонии. Сложившаяся ситуация дает основание предполагать, что климатические изменения определялись не только и не столько астрономическими причинами, как это следует из теории Миланковича, но и внутренними, - земными. В пользу такого предположения говорит и тот факт, что изменения климата коррелируют с вариациями геомагнитного поля. Некоторые из авторов полагают, что вариации геомагнитного поля могут быть связаны с изменением скорости вращения Земли и так же имеют астрономическую причину [Rampino, 1979]. Однако, основной аргумент против теории Миланковича, подмеченный рядом авторов [Brook et al., 1996; Steig et al., 1998; Blunier et al., 1998; Dallenbach et al., 2000], состоит в том, что изменения климата в Гренландии и Антарктиде происходили практически одновременно. Очевидно, что астрономическая гипотеза объяснить этот факт не в состоянии. Таким образом, настоящая работа посвящена решению только одной из многих проблем климата: в чем состоит причина вековых его вариаций.

## ДАННЫЕ

В течение последних 400 тыс. лет на Земле произошли четыре глобальных похолодания, периодичность которых равна примерно 100 тыс. лет (рис. 1) [Petit et al., 1999; Vimeux et al., 2002]. Последнее похолодание (ледниковый период) сменилось резким потеплением примерно 12 тыс. лет тому назад, что привело к быстрому таянию

льда и увеличению уровня океана на 50 - 100 м. Возможно, именно это событие было отражено в истории как Библейский Великий Потоп.

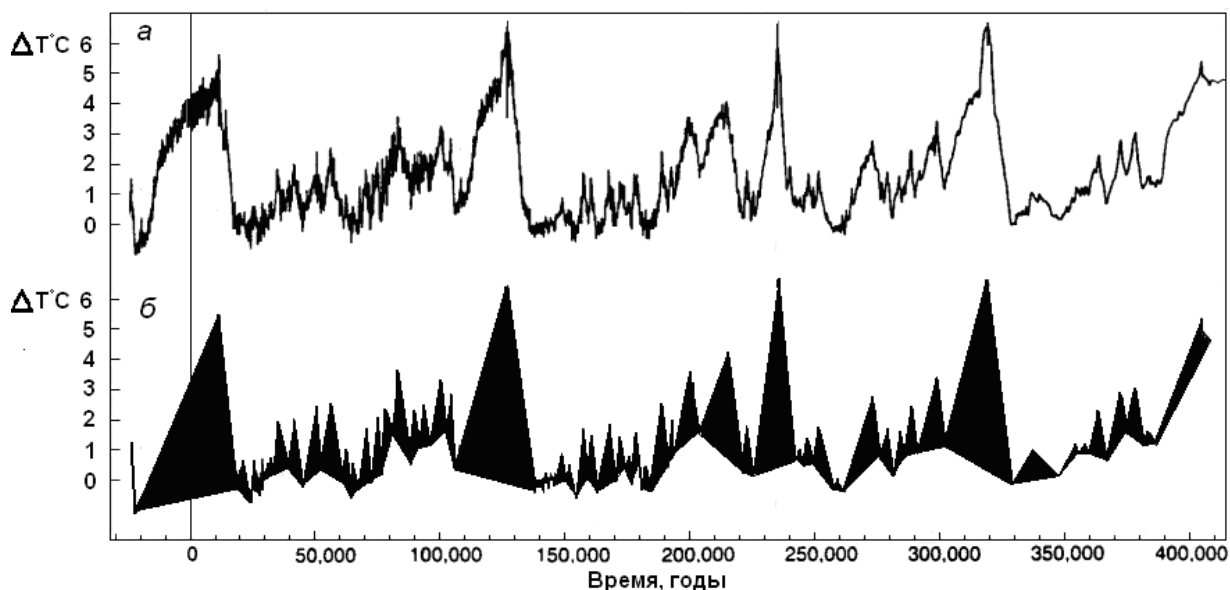


Рис. 1. Вариация температуры в течение 400 тыс. лет. Верхняя панель – по данным (Petit et al., 1999; Vimeux, et al., 1999; Vimeux, et al., 2002), нижняя – эта же кривая после преобразования.

Обратим внимание на характер поведения температуры (рис. 1). Понижение температуры примерно на 6 - 7 градусов после её «быстрого» подъема происходит в течение примерно 100 тыс. лет с различной скоростью охлаждения:  $dT/dt = - (1 - 3) \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{год}$ . Скорость увеличения температуры (на те же градусы) в рассматриваемый период 0 – 350 тыс. лет очень стабильна и равна:  $dT/dt = + 7 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{год}$ . Это различие хорошо видно на рис. 1: скорость нагрева примерно в 3 – 5 раз выше, чем скорость охлаждения. Сравним эти цифры с – современными скоростями. Скорость современного потепления: 1 градус за 100 лет,  $dT/dt = + 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{год}$ . Похолодание и следующее за ним потепление, сопровождаются быстрыми изменениями (вариациями) температуры. В течение 10 тыс. лет потепления сменяют резкие похолодания не менее 10 раз, при которых температура изменяется примерно на  $\pm$  один – два градуса за каждые 100 – 200 лет. Возможно, именно такой процесс происходит и в наше время и, следуя логике этих данных, на Земле вскоре может начаться похолодание с примерно такой же скоростью, как происходит современное потепление [Vard, 2002]. Очевидно, что такой прогноз не учитывает роль антропогенного влияния на климат Земли. Однако насколько это влияние сравнимо с естественными природными процессами, ещё далеко не ясно.

Наблюдая ход температурной зависимости, заметим, что как при потеплении, так и при охлаждении поверхности Земли, её температура изменялась не плавно, а резкими «скачками», амплитуда которых редко превышала 2 – 3 градуса, а время «скачка» - не более 1 тысячи лет. В статье [Rahmstorf, 2003] приведены значения дат резких изменений температуры в течение последнего оледенения ( $T$  по  $\delta^{18}\text{O}$ , в град.): с 10 тыс. лет до 11.6 тыс. лет – увеличение температуры; 13.07 тыс. лет – начало её понижения; 14.6 тыс. лет - резкий подъем на фоне плавного повышения; 23.39 тыс. лет – начало плавного повышения; 23.4 тыс. лет - 45.36 тыс. лет – колебания (повышения и понижения) температуры ( $\delta^{18}\text{O}$ ). Длительность периода последнего оледенения (Last

Glacial) разделена на четыре этапа [Dallenbach et al., 2000]: 1) Younger Dryas (11.63 - 12.5 тыс. лет); 2) Bolling - Allerod (12.7 - 14.5); 3) Last Glacial Maximum (16.7 - 20.3) и 4) Cold - Warm (26.0 - 46.0).

Вполне возможно, что не все колебания температуры связаны с экскурсами. Скорее всего, как и принято считать, решающую роль в таких колебаниях играет изменение концентрации метана и двуокиси углерода. В течение первого периода - Younger Dryas на фоне общего потепления и увеличения концентрации метана, как в Гренландии, так и в Антарктиде, наблюдается резкое понижение уровня концентрации метана и, соответственно, похолодание (заметное – в Гренландии и слабо заметное – на Антарктиде). После похолодания температура восстанавливается и потепление продолжается. В этой работе, так же как в [Blunier, et al., 1998], наблюдается опережение (примерно на 1 тыс. лет) изменения концентрации метана в Антарктиде по сравнению с Гренландией. В [Jouzel et al., 2001] сравниваются данные по дейтерию ( $\delta D$ ), полученные на 5 станциях Антарктиды. Показано, что температура синхронно повышается в интервале 28 - 12 тыс. лет. При этом на всех станциях наблюдается резкое понижение с последующим восстановлением температуры в диапазоне 12 - 13 тыс. лет. После максимума при 11 - 12 тыс. лет начинается плавный спад температуры ( $\delta D$ ).

На фоне отмечаемого рядом авторов синхронизма колебаний климата в Гренландии и Антарктиде, при более тщательном анализе данных, обнаружено, что изменения климата в Антарктиде опережают аналогичные изменения климата в Гренландии в период 47 - 23 тыс. лет тому назад примерно на 1-2.5 тыс. лет [Blunier, et al., 1998]. В работе [Watanabe et al., 2003] авторы сравнивают изменение температуры поверхности льда восточной Антарктиды с ходом температуры на поверхности Земли в течение последних 20 тыс. лет. Температура оценивается по содержанию изотопов дейтерия и кислорода, в течение трех предыдущих ледниковых периодов (330, 240 и 130 тыс. лет тому назад). Показано, что характер похолодания, наступившего после пика температуры примерно 15 тыс. лет назад, отличается более мягким климатом, чем в течение трех предыдущих ледниковых периодов. Во всех трех предыдущих случаях после потепления наступало более резкое, чем в настоящее время, похолодание поверхности Антарктиды.

## ТЕОРИЯ МИЛАНКОВИЧА

Космические факторы могут влиять на климат Земли за счёт вызываемого ими изменения количества солнечного тепла, получаемого нашей планетой. За счет изменения угла наклона земной оси происходит изменение климата на поверхности Земли. Период изменения угла наклона земной оси составляет 40 100 лет.

Эксцентриситет земной орбиты, т.е. степень ее вытянутости, изменяется с периодом в 90800 лет. При наибольшем эксцентриситете заметно возрастает расстояние Земли от Солнца в афелии, и соответственно уменьшается количество получаемого тепла. Зато в перигелии Земля, наоборот, оказывается заметно ближе к Солнцу, чем в эпоху малого эксцентриситета, и получает больше тепла. Наибольший эффект оба указанных фактора дают тогда, когда максимальный наклон земной оси совпадает по времени с наибольшим эксцентриситетом орбиты.

Югославский ученый Миланкович (1939) вычислил ход изменений солнечной радиации за последние 600 тыс. лет существования Земли под воздействием двух этих факторов. Вычерченная им кривая обнаруживает за этот период три максимума похолодания климата на Земле. Эти максимумы похолодания ни кривой Миланковича

многие стремятся отождествить с тремя эпохами оледенения и течение четвертичного оледенения, однако имеется ряд весьма важных факторов, противоречащих такому толкованию причин оледенений.

Согласно теории Миланковича оледенения были одновременными в обоих полушариях, тогда как фактически, по крайней мере, в четвертичном периоде, они были одновременными. Кроме того, причины, которые учитывает теория Миланковича, действуют непрерывно, а, следовательно, и оледенения, если они действительно вызваны этими причинами, должны были бы повторяться через небольшие промежутки времени в течение всей истории Земли. На самом же деле их не было совсем в течение всего мезозойского и третичного периодов, а в четвертичном периоде они следовали друг за другом через десятки тысячелетий.

Главным и очень существенным недостатком расчетов Миланковича является то, что они основаны на учете исключительно астрономических факторов без учета влияющих на изменение климата земных факторов. Между тем в отдельных случаях значение этих факторов может быть весьма существенным, хотя и трудно оценить его количественно.

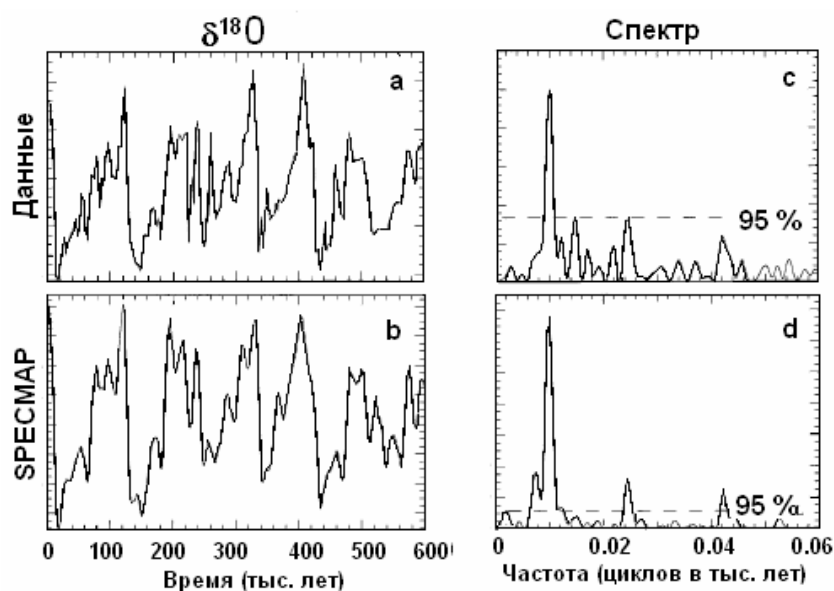


Рис. 2. Кислородная кривая  $\delta^{18}\text{O}$  для последних 800 тыс. лет: данные – а; после обработки программой SPECMAP - б; Спектры мощности: данных – с; после обработки SPECMAP -d. В теории Миланковича: пик около 0.01 (100 тыс. лет); 0.024 (41 тыс. лет) – наклонение орбиты; 0.043 (23 тыс. лет) – прецессия [Muller, MacDonald; 1997].

Реальная кривая изменения температуры значительно отличается от кривой, построенной по суммированию синусоид, соответствующих спектру Миланковича, поэтому был предложен подход, получивший название SPECMAP (отображение изменения спектров в климате) [Muller, MacDonald; 1997] (рис. 2). Суть метода состоит в том, что кривая изменения температуры, оцененная по изотопу кислорода, фильтруется спектрами Миланковича и «избавляется от ненужного шума» таким образом, и настраивается на известные циклы изменений астрономических параметров. В принципе, с таким подходом можно согласиться. Все было бы хорошо, если бы кривая SPECMAP соответствовала не только первому циклу (на рис. 1), но и всем предыдущим, более ранним. Этого, как следует из рис. 3, - не происходит. Многие авторы решают аналогичную задачу для второго и третьего цикла, каждый раз подбирая свои частоты,

фазы и амплитуды спектральных компонент, а это принципиально противоречит астрономической гипотезе Миланковича, т.к. в этой теории не предусматривается изменение частот, фаз и амплитуд на временных границах циклов. Такая подгонка противоречит теории Миланковича.

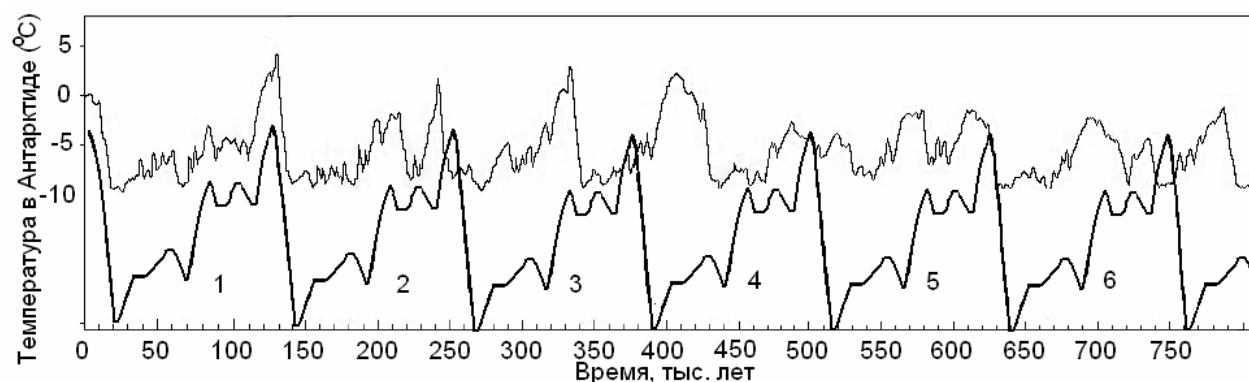


Рис. 3. Верхняя кривая – температура (по данным полученным при анализе льда в Антарктиде), нижняя – шесть циклов SPECMAP.

Ещё раз повторим, что теория Миланковича базируется на учете эффектов прецессии земной оси и изменения угла её наклона. Это должно приводить к тому, что изменение температуры в северном и южном полушариях должно происходить в противофазе, чего не наблюдается. Кроме этого, оледенение, начавшись, не должно было бы кончатся потому, что рост ледников должен приводить к увеличению альбедо Земли и, соответственно, к уменьшению поглощения солнечного излучения. На самом деле оледенения сменяются периодами потепления климата, причем, переход от межледникового периода к оледенению и обратно происходит в течение нескольких лет, а не в течение сотен и тысяч лет, как это должно было бы быть в соответствии с теорией оледенения Миланковича.

### ФРАКТАЛЬНОСТЬ КЛИМАТА

Выясним, можно ли считать климат фрактальным, а структуру, образующую климат на Земле, - открытой самоорганизующейся структурой? Основания к положительному ответу на этот вопрос, по-видимому, есть. Дело в том, что в течение последних 400 тыс. лет на Земле произошли четыре глобальных оледенения с периодичностью примерно в 100 тыс. лет [Petit et al., 1999; Vimeux, et al., 1999; Vimeux, et al., 2002]. Последний ледниковый период сменился резким потеплением примерно 12 - 15 тыс. лет тому назад. Потепление привело к быстрому таянию льда и увеличению уровня океана. Достоверные данные по изменению температуры поверхности Земли получены при анализе кернов льда, полученных при бурении ледников Антарктиды, - в районе станции Восток, и ледников Гренландии.

Наблюдаемый на рис. 1 пилообразный характер вариации температуры может говорить о том, что самоорганизация климата имеет место. Приведем пример, где зависимость, полученная при наблюдении за высотой падения оползня в течение 20 тыс. лет наблюдений [Hergarten, Neugebauer, 1998], внешне очень похожа на график, приведенный на рис. 1. В этой работе авторы утверждают, что для объяснения характера движения оползней с проскальзыванием можно эффективно использовать идею самоорганизованной критичности, впервые высказанную в работе [Bak et al, 1987].

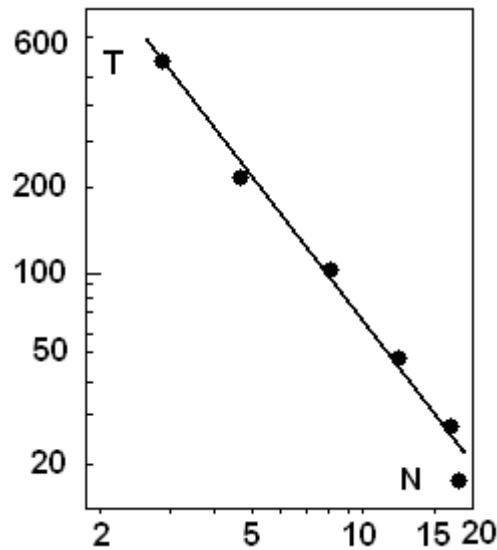


Рис. 4. График  $\lg N - \lg S$ , где  $S$  – «пик» повышения температуры (в отн. ед.),  $N$  – число пиков в интервале величин  $S$ . В течение 400 тыс. лет выделено 45 «пиков».

На нижней панели рис. 1-б приведен график  $T(t)$ , преобразованный таким образом, чтобы пик температуры можно было бы выразить как площадь затемненного треугольника  $S$ . Подсчитав количество пиков данной площади  $N$ , построим график:  $\lg N - \lg S$ . Как и предполагалось, этот график можно аппроксимировать линией, наклон которой к горизонту определяет фрактальную размерность климата (рис. 4). Наличие подобной зависимости, как принято считать, характеризует систему, способную к самоорганизации. Отсюда следует фундаментальный вывод о том, что климат мог быть фрактальным, по крайней мере, в течение последних 400 тыс. лет. Казалось бы, все просто и понятно, однако, анализ кернов льда и масса другой подобной информации показывает, что ситуация намного сложнее. Оказывается, что изменения климата явно связаны с вариациями стратосферной пыли, изменениями модуля геомагнитного поля, концентрацией изотопа  $Be^{10}$ , показывающего изменение уровня радиации на Земле и т.д. [Кузнецов, Кузнецова, 2004].

### КОЛЕБАНИЯ КЛИМАТА - ФЛИККЕР ШУМ?

Фликкер-шум был обнаружен экспериментально как некоторый избыточный шум, который по своему характеру существенно отличается от настоящего белого шума. Его спектр мощности представляет собой не прямую, параллельную оси частот, а более или менее крутую гиперболу, вертикальная ветвь которой загибается вверх по мере уменьшения частоты. В переводе с языка спектров это означает, что интенсивность шума растет с уменьшением частоты. Поэтому, его часто называют  $1/f$  шумом, в котором частота  $f$  в степени  $1 \leq n \leq 2$ . Суть фликкер-шума очевидна: чем сильнее событие, тем реже оно встречается. Считается, что впервые фликкер-шум был обнаружен в древнем Египте, когда жрецы определили, что чем сильнее разливы Нила, тем реже они повторяются. Большинство природных явлений, происходящих на Земле, как в «открытой системе», подвержены фликкер-шуму, например, землетрясения (закон Гуттенберга-Рихтера), вспышки на Солнце, энергия космических лучей и т.п. Надо сказать, что, несмотря на то, что это обычное явление в Природе, физика его до сих пор

так и не ясна. В последнее время всё чаще появляются работы, в которых фликкер-шум связывается с квантовыми эффектами [Paladino, et al., 2002].

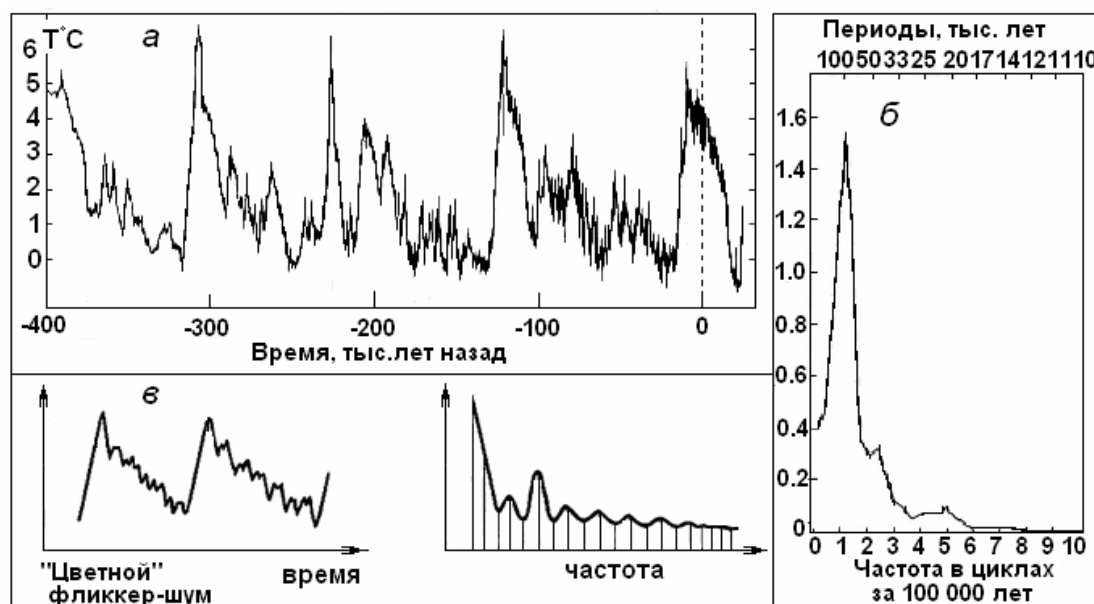


Рис. 5. Изменения температуры в «нормальной» (слева-направо) шкале времени – а; спектр колебаний климата в плейстоцене по Дж. Имбри и Н. Шеклтону [Монин, 1977, рис. 72] – б; «цветной» фликкер-шум и его спектр [Жвирблис, 1983] - в.

Сравнение температурной кривой поверхности Земли (рис. 5-а) и спектра колебаний климата в плейстоцене (рис. 5-б) с графиком и спектром «цветного» фликкер-шума (рис. 5-в) – показывает, что климат Земли, - это «цветной» фликкер-шум. Основной период (частота) «цвета» равна приблизительно 100 тыс. лет. Таким образом, для доказательства этого тезиса, необходимо найти непротиворечивый по физике механизм, согласно которому на Земле могут происходить явления, экранирующие солнечное излучение с периодом повторения равным, примерно, 100 тыс. лет.

### ОСНОВНАЯ ЧАСТОТА

Ослабление солнечного излучения при рассеянии его на слое СА оценивается по порядку величины множителя ослабления (дБ/км), который определялся при помощи закона Бугера:

$$\beta \sim \int r^2 N f(r) K(x, \varepsilon) dr$$

$N$  – концентрация аэрозолей ( $\text{см}^{-3}$ );  $r$  - радиус капель (мкм);  $f(r)$  - закон распределения частиц по размерам;  $K(x, \varepsilon)$  - коэффициент рассеяния электромагнитных волн на частицах аэрозоля, определяемый по уравнениям Ми. Коэффициент  $\beta$  используется при оценке коэффициента прозрачности атмосферы  $W$  (%).

Результаты расчетов коэффициента прозрачности  $W$  для отражающего слоя толщиной 1 км с концентрацией водных аэрозольных частиц  $10^2 \text{ см}^{-3}$  (рис. 6, кривая 2) и  $10^3 \text{ см}^{-3}$  (кривая 3), выполненные авторами [Гончаренко, Кивва, 2002], представлены на рис. 6. Здесь же приведены аналогичные кривые для большей концентрации частиц, в зависимости от их размера (номер кривой соответствует порядку числа  $N$ ,  $\text{см}^{-3}$ ). Этот рисунок показывает, что для аэрозоля с радиусом частиц 0.1 мкм,  $W = 90\%$  соответствует



концентрации  $N = 10^4 \text{ см}^{-3}$ , для концентрации  $N = 10^5 \text{ см}^{-3} \sim W \approx 50 \%$ ; концентрации  $N = 10^6 \text{ см}^{-3} \sim W \approx 20 \%$ , полное поглощение света  $W = 0$  происходит при  $N = 10^7 \text{ см}^{-3}$ .

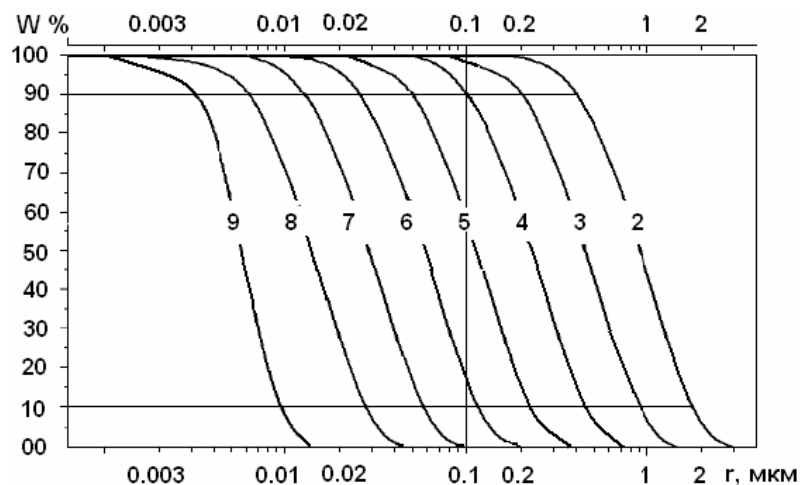


Рис. 6. Коэффициент прозрачности стратосферы  $W$  в зависимости от размера СА для слоев различной концентрации (кривая 2 соответствует  $N = 100 \text{ см}^{-3}$  и т.д. [Гончаренко, Кивва, 2002]).

Вес одной капли воды радиусом  $r = 0.1 \text{ мкм}$  равен, примерно,  $10^{-15} \text{ г}$ . Вес одного  $\text{см}^3$  воздуха, в котором имеется аэрозоль с  $N = 10^5 \text{ см}^{-3}$ , будет составлять  $10^{-10} \text{ г}$ . Плотность воздуха на высоте стратосферы равна, примерно,  $10^{-4} \text{ г/см}^3$ , и, следовательно, концентрация аэрозоля в нем составляет  $\approx 1 \text{ р.р.м}$ . При этом слой аэрозолей толщиной 1 км будет экранировать примерно половину солнечного излучения. (Пересечение перпендикуляра  $r = 0.1 \text{ мкм}$  с кривой 5). Для концентрации  $\approx 10 \text{ р.р.м}$  слой аэрозоля с радиусом  $r = 0.1 \text{ мкм}$  будет экранировать уже 90 % солнечной энергии. При этом, как следует из [Rampino, et al., 1988; Rampino, 2002], поверхность Земли будет освещена, как в пасмурный день. Если экранирование достигнет 99 % ( $W = 1\%$ ), то на Земле может прекратиться фотосинтез. При этом концентрация аэрозолей радиусом  $r = 0.1 \text{ мкм}$  должна быть  $N \approx 10^7 \text{ см}^{-3}$ , а концентрация пыли в керне льда:  $\geq 1000 \text{ р.р.м}$ .

Похожие оценки были получены и другими авторами. Например, если концентрация СА  $N = 10^4 \text{ см}^{-3}$  и объемная концентрация  $\rho = 160 \text{ мкм}^3/\text{см}^3$ , то для солнечного излучения в интервале длин волн от 0.2 до 2 мкм величина  $\alpha = 100 \%$  [Rahmstorf, 2003]. Размер пылинки  $r$  ( $r \sim V^{1/3}$ ,  $V = \rho/N = 1.6 \times 10^{-2} \text{ мкм}^3$ ):  $r \approx 0.25 \text{ мкм}$ . Как видно из рис. 6, если концентрация пыли (СА) будет порядка (или больше)  $N = 10^4 \text{ см}^{-3}$ , а размер пылинок не менее 0.25 мкм, то поверхность Земли будет экранирована от солнечного излучения практически полностью.

Уравнение эволюции температуры поверхности Земли описывает два процесса, один из которых приводит к похолоданию – за счет увеличения альбедо Земли  $\alpha$  и уменьшения солнечного тепла, попадающего на Землю, и второй, приводящий к увеличению прозрачности атмосферы, увеличению потока тепла и нагрева земной поверхности. Это уравнение можно записать следующим образом:

$$\partial T/\partial t = dT_0/dt + \partial/\partial h [F \partial T/\partial h - KT],$$

где  $dT_0/dt$  – вариация температуры Земли за счет изменения потока Солнечного излучения. Сюда могут входить как астрономические причины, так и вековые изменения светимости Солнца,  $h$  – высота атмосферы,  $F$  – коэффициент диффузии солнечного излучения ( $F \approx \lambda c$ ,  $\lambda$  – длина пробега фотона в «мутной» среде,  $c$  – скорость света),  $K$  –

параметр дрейфа, который в нашем случае имеет смысл скорости переноса аэрозоля (пыли) в стратосфере Земли. Если рассматривать механизм убывания концентрации пыли только за счет гравитационного опускания пылинки на поверхность Земли, то параметр  $K$  будет соответствовать скорости Стокса:  $K = v$ . Легко показать, что если размер пылинки  $r \leq 0.1$  мкм, то пыль в стратосфере (при выполнении условия:  $mg \approx eE$ , где  $e$  – заряд частицы, а  $E$  – атмосферное электрическое поле) может находиться тысячи лет. Фактически параметр дрейфа значительно сложнее. Сюда входит нерегулярный источник пыли, механизм переноса пыли по стратосфере, взаимодействие пыли с космическим излучением, водным аэрозолем и т.п.

Увеличение  $T$  связано с «просветлением» атмосферы, описываемой параметром  $F \partial T / \partial h$ , а перенос пыли в атмосфере с параметром  $KT$ . Заметим, что эта формула дает только качественное описание сложных процессов, происходящих в атмосфере даже в том, упрощенном виде, когда рассматривается только заполнение стратосферы вулканической пылью и последующее очищение стратосферы.

## ВРЕМЯ НАКОПЛЕНИЯ АЭРОЗОЛЕЙ В СТРАТОСФЕРЕ

Оценим «время жизни» пылинки в стратосфере. Примем размер пылинки равным 0.1 мкм, её масса  $m = 10^{-15} - 10^{-14}$  г. Концентрацию пылинок  $n$  примем исходя из того, что слой пылинок принятого размера полностью экранирует Землю от Солнца ( $W = 0$ ): равной  $n = 10^6 - 10^7 \text{ см}^{-3}$  (рис. 6). Расстояние между пылинками  $l \sim 100$  мкм, концентрация зарядов в стратосфере  $n_e = 10^4 \text{ см}^{-3}$ , дебаевский радиус  $d = (kT/4\pi n_e e^2)^{1/2} = 10$  см. На расстояниях, больших  $d$ , электрическое поле заряда пылинки экранируется зарядами противоположного знака и становится пренебрежительно малым. В нашем случае  $l \ll d$ , и это говорит о том, что экранирования поля пылинки не происходит и, следовательно, она будет взаимодействовать с внешним атмосферным электрическим полем стратосферы  $E$ .

Выполнение очевидного условия:  $mg = eZE$ , где вертикальное атмосферное электрическое поле (АЭП) в стратосфере  $E \approx 1 \text{ В/м}$ ,  $eZ$  – заряд пылинки, позволяет оценить количество единичных зарядов на пылинке  $Z = 1000$ . Заметим, что  $Z = 1000$  зарядов на одной пылинке, входит в диапазон значений, соответствующий наблюдениям. Выполнение этого условия, при отрицательном заряде пылинки, вызванным прилипанием к ней свободных электронов, должно обеспечить существование их в стратосфере бесконечно большое время. В этом случае силы гравитационного притяжения Земли уравниваются силами электростатического отталкивания между каплями аэрозоля в электрическом поле стратосферы. В принципе в природе возможна ситуация, когда пылинки действительно находятся в стратосфере бесконечно долго. Реально, они рано или поздно притянутся друг к другу, слипнутся и упадут на Землю. Авторы [Гундиенков, Яковленко, 2002] полагают, что силы притяжения между пылинками возникают, когда дебаевский радиус равен расстоянию между пылинками, а также, если заряды одного из знаков сосредоточены преимущественно на пылинках. Если пылинки несут малую долю зарядов одного из знаков, пылинки отталкиваются. В рассматриваемом нами случае, возможны оба варианта в зависимости от того, насколько изменились внешние условия: увеличилась концентрация зарядов, например, за счет дополнительной ионизации заряженными частицами, или уменьшилось количество зарядов на пылинках – за счет рекомбинации их с положительными ионами.

Оценим, можно ли на этой, достаточно очевидной идее получить время накопления аэрозолей в слое стратосферы  $t$  порядка 100 тыс. лет. Потенциал положительно

заряженной электросферы (ионосферы) относительно отрицательной Земли  $V = 300$  кВ, плотность тока в «конденсаторе» Земля-ионосфера  $j \approx 10^{-12}$  А/м<sup>2</sup>, полный ток «разрядки»  $I \approx 1$  кА, иначе,  $10^3$  кулон в сек. Предположим, что на зарядку пылинок (аэрозолей) размером 0.1 мкм на каждую частицу приходится заряд  $Z = 1000 e$ .

Концентрацию таких частиц в экранирующем солнечное излучение слое примем равной  $n = 10^6$  см<sup>-3</sup>. Толщина слоя  $h$  была принята равной 1 км. Подсчитаем необходимый для образования такого слоя на Земле заряд:  $Q = ZnhSe$ , где  $S$  - площадь поверхности Земли ( $5 \cdot 10^{18}$  см<sup>2</sup>),  $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$  кулона, элементарный заряд. Отсюда величина  $Q = 10^{14}$  кулон. Оценим величину атмосферного электрического тока, необходимого для того, чтобы «зарядить» аэрозольный слой толщиной  $h = 1$  км, полностью экранирующий солнечное излучение. Величина такого тока  $i = Q/t \approx 30$  А, где необходимое время  $t = 10^5$  лет или  $3 \cdot 10^{12}$  с. Величина тока  $i$  составляет примерно 3 % от полного тока атмосферы  $I \approx 1$  кА. Таким образом, основной период колебаний климата в 100 тыс. лет может быть связан с накоплением аэрозолей в атмосфере до полного перекрытия ими солнечного излучения.

Естественно, такая оценка вызывает вполне справедливые вопросы, например, такие: можно ли обосновать величину 3%, как быть с величиной  $Q = 10^{14}$  кулон, тогда как заряд Земли  $10^6$  кулон, может ли существовать АЭП:  $E \approx 1$  В/м, при наличии такого отрицательного заряда, и т.п.

Однозначных ответов на эти вопросы пока нет. Можно лишь полагать, что 3% - не такая большая величина, она вполне находится в пределах флуктуации параметров тока АЭП. Величина  $Q = 10^{14}$  кулон, конечно, несовместима с представлением о физике АЭП, однако, если будут найдены весомые причины внутренней нейтрализации такого заряда, то наша модель окажется правомерной. Ответ на этот вопрос автоматически разъясняет и третий вопрос. Обсуждая эту проблему, следует вернуться к оценке дебаевской длины. Дебаевский радиус (длина) - расстояние, на которое распространяется действие электрического поля отдельного заряда в нейтральной среде, состоящей из положительно и отрицательно заряженных частиц (плазма, электролиты). Вне сферы радиуса дебаевской длины электрическое поле экранируется в результате поляризации окружающей среды. Как мы оценили выше, расстояние между пылинками  $l \sim 100$  мкм, концентрация зарядов в стратосфере  $n_e = 10^4$  см<sup>-3</sup>, дебаевский радиус  $d = (kT/4\pi n_e e^2)^{1/2} = 10$  см. Если учесть, что заряд частицы в 1000  $e$ , а величина  $d$  обратно пропорциональна корню квадратному из  $n$ , то она оказывается меньше нашей оценки примерно в 1000 раз.

Необходимо выяснить, насколько правдоподобна оценка  $Z = 1000$ ? Сошлемся на серию работ по пылевой плазме (одна из первых [Thomas et al., 1994]), в которых возникает слой заряженных частиц при внесении их в газовый разряд. Частицы накапливают заряд  $Z = 1000$  и более и выстраиваются к гексагональную «кристаллическую решетку» с равными расстояниями между частицами и слоями. На «решетке» возникает огромный заряд, но в силу экранирования его плазмой разряда, он его не искажает. Заметим, что ранее было показано [Ikezi, 1986], что пылевые частицы приобретают в плазме отрицательные заряды, на несколько порядков превосходящие заряд иона, а температуру имеют - близкую к комнатной. Такие частицы могут формировать «кристаллы», доступные для наблюдения в лабораторных условиях.

Явления возникновения «кристаллической плазмы» исследованы не только в лаборатории, но и в природе, в частности, в облаках. Про облака, кажется, известно всё, однако есть такие виды облаков, которые до сих пор остаются загадкой. Это серебристые и перламутровые облака.

- Перламутровые облака - очень тонкие просвечивающие облака, которые возникают в стратосфере на интересующих нас высотах  $\sim 20$  км. Эти облака имеют радужную

окраску вследствие дифракции света на частицах облаков - переохлажденных каплях или ледяных кристаллов. Вследствие редкости этого явления перламутровые облака мало изучены.

- Что касается серебристых облаков, то они наблюдаются более ста лет. В литературе имеется огромное количество публикаций на эту тему. Физика их, также как перламутровых, до недавнего времени оставалась недостаточно ясной. Авторами [Scales, Ganguli; 2004] предложена модель образования серебристых облаков как структуры типа пылевого плазма-кристалла возникающего на высоте 80-90 км, образующегося на водных аэрозолях размером порядка 50 нм. Аэрокосмическое агентство в CARE (Charged Aerosol Release Experiment) готовит эксперимент по выбросу заряженного аэрозоля с геофизической ракеты Black Brant-XII. Предполагается выпустить облако с микрочастицами пыли. Под воздействием космического излучения микрочастицы приобретут электрический заряд и тем самым станут светиться, как серебристые облака.

## ОБСУЖДЕНИЕ МОДЕЛИ

Выделим основные моменты предлагаемой модели: Температура на поверхности Земли определяется инсоляцией. Похолодания связаны с накоплением в стратосфере пыли в виде заряженного водного аэрозоля, отражающей солнечные лучи. Согласно нашей модели эволюции климата [Кузнецов, Кузнецова; 2004] в моменты экскурсов и инверсий геомагнитное поле понижается, и в стратосферу попадают частицы более низкой энергии, обычно отклоняемые магнитным полем Земли: галактические и солнечные космические лучи и частицы из разрушенного радиационного пояса. Всё это приводит к разрушению стратосферного пылевого слоя за счет слипания и укрупнения мельчайших пылинок. Атмосфера становится прозрачной, что приводит к потеплению. Если экскурс или инверсия происходит в отсутствие пылевого слоя в стратосфере, то заряженные частицы вызывают образование в стратосфере дополнительного количества аэрозолей, что приводит к изменению вертикального профиля температуры в тропосфере и, в свою очередь, ведёт к увеличению низкой облачности, например, за счет увеличения пересыщения паров воды на определенной высоте. Увеличение потока заряженных частиц производит эффект именно в стратосфере, т.к. слоев, где образуется низкая облачность, эти частицы не достигают поглощаясь в атмосфере.

По нашей модели, климат фрактален. Это означает, что климатическая система представляет собой открытую самоорганизующуюся структуру. Однако, по модели, климат управляется вулканизмом и геомагнитным полем. Это делу не мешает, т.к. инверсии и экскурсы геомагнитного поля сами по себе тоже фрактальны, фрактальны так же и вулканические извержения. Оба этих процесса описываются фликкер-шумом, следовательно, и климат так же представляет собой  $1/f$  фликкер-шум.

Это утверждение противоречит астрономической идее Миланковича. На самом деле, противоречий в этой модели значительно больше. Перечислим некоторые из них.

Из астрономических факторов, влияющих на климат Земли, большую роль играют следующие. Главное влияние оказывает наклон оси вращения Земли. Сейчас он около  $23,5^\circ$ , но с периодом в 41000 (40700) меняется от  $21,5^\circ$  до  $24,5^\circ$ . Более слабое влияние оказывает форма земной орбиты. За 100 000 лет орбита вытягивается, а затем снова "округляется". Кроме того, что изменяется наклон земной оси, она еще и вращается как у волчка с периодом 23 тыс. лет. Складываясь, все эти факторы могут уменьшить поступление солнечного тепла в Северном полушарии на 20%. Очевидно, что в южном полушарии произойдет увеличение солнечного тепла ровно на столько же.

Реальность астрономической гипотезы климата подвергалась сомнению ещё 70 лет тому назад, когда метеоролог В.А. Костицын [1984] полагал, что в результате прецессии может происходить лишь небольшое смещение равноденствий. Известно, насколько слаба климатическая роль эллиптичности земной орбиты. Максимальный, возможный эффект прецессии свелся бы, как считал Костицын, к увеличению продолжительности зимы или лета, - на несколько дней, максимум, - на неделю. До оледенения континента отсюда так далеко, что приходится удивляться распространенности этой гипотезы.

Теория Миланковича не может объяснить резких потеплений. Действительно, если началось похолодание и оледенение планеты, то альbedo будет только возрастать, что приведет к ещё большему похолоданию. В такой ситуации не находится причин для потепления и т.п.

Ледниковые периоды случались в истории Земли неоднократно. Следы материковых оледенений обнаружены в слоях карбона и перми (300 – 250 млн. лет), венда (680 – 650 млн. лет), рифея (850 – 800 млн. лет). Самые древние ледниковые отложения, обнаруженные на Земле, имеют возраст более 2 млрд. лет. Это уже совсем другие периоды. Какое отношение к этим оледенениям имеет теория Миланковича? Похоже, что не имеет. Зато хорошо известно, что раньше на Земле происходили вулканические извержения, на много порядков мощнее, чем современные.

Для объяснения причины похолоданий и оледенений, происходящих на Земле в течение всей её эволюции, привлекаются вулканы и супервулканы, при извержении которых в стратосферу выбрасывается огромное количество мелкодисперсной пыли, способной находиться там как угодно долго. Последнее обстоятельство объясняется возможным влиянием атмосферного электричества на заряженные пылинки. Анализ состава пыли и размера пылинок во льду показал, что пылинок размером 0.1 мкм во льду нет. Это подкрепляет идею, что они слипаются и затем падают на Землю. Причина слипания вполне может быть связана с процессами, происходящими в стратосфере в моменты резкого увеличения количества заряженных частиц, связанные с уменьшением величины геомагнитного поля при экскурсах и инверсиях. Если таких явлений в магнитном поле Земли не происходит, в периоды суперхронов, то оледенение может только возрастать.

Исследование пыли в ледяных ядрах Антарктиды и Гренландии показало, что там присутствуют и другие пылинки, имеющие явно невулканическое происхождение. Речь идет об идентификации глиняных пылинок. Этот результат подтверждает высказанную ранее идею о том, что в периоды похолодания и иссушения климата, на материках могут возникать пылевые бури, способные переносить осадочные породы на огромные расстояния вплоть до Гренландии и Антарктиды. Однако, это уже вторичная пыль, которая к похолоданиям приводить не может, т.к. сама является продуктом похолодания на Земле.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Анализируя зависимость температуры поверхности Земли от времени её эволюции в течение последних 400 тыс. лет, можно составить более или менее объективный прогноз, что ждет Землю в течение ближайших нескольких тысяч лет. Как отмечалось, всегда после экскурса и резкого потепления наблюдался период, характерный наличием в атмосфере малой концентрацией пыли. Это означает, согласно нашей модели, что в течение этих лет на Земле было относительно спокойно: не было большого количества извержений вулканов и землетрясений. По прошествии примерно 20 – 30 тыс. лет после окончания экскурса, Земля «просыпается» и тектоническая

активность её (вулканизм, сейсмичность) возрастает. Концентрация пыли в стратосфере при этом будет увеличиваться, что приводит к похолоданию и очередному оледенению. Это неумолимая закономерность, изменить которую человечество, по-видимому, не в состоянии. Теплый период, длившийся 12 тыс. лет, в течение которого человечество так интенсивно эволюционировало, может внезапно закончиться. Это в глобальном масштабе времени, порядка тысяч лет. Если рассматривать ситуацию, сложившуюся в течение самого последнего времени, когда альbedo начало возрастать на фоне продолжающегося потепления [Palle et al., 2006], то анализ вариаций климата в прошлом показывает, что может начаться похолодание в ближайшее время. О начале похолодания, кроме альbedo, могут сигнализировать, как следует из нашей модели, учащение появления перламутровых и серебристых облаков.

## ЛИТЕРАТУРА

- Гончаренко Ю.В., Кивва Ф.В.** О размерах частиц атмосферного аэрозоля в отражающих слоях, появляющихся после сильных солнечных вспышек. // Радиофизика и электроника. 2002. Т. 7. № 3. С. 509-512.
- Гундиенков В.А., Яковленко С.И.** Взаимодействие заряженных пылинок в плазме // ЖТФ 2002. Т. 28. вып. 21. С. 81-90.
- Жвирблис В.Е.** Загадка фликкер-шума // Журнал «Знание – сила», № 9, С. 36-39. 1983.
- Ивлев Л.С., Довгалоук Ю.А.** Физика атмосферных аэрозольных систем. Санкт-Петербург: СПбГУ. 2000. 258 с.
- Костицын В.А.** Эволюция атмосферы, биосферы и климата. М.: Наука. 1984.
- Кузнецов В.В., Кузнецова Н.Д.** Влияние космического излучения и вековых вариаций геомагнитного поля на климат и эволюцию жизни на Земле // <http://kcs.dvo.ru/ikir/Russian/Science/2004/3-11.pdf>
- Миланкович М.** Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата М., Л.: ГОНТИ; Ред. техн.-теорет. лит., 1939.
- Монин А.С.** История Земли. Л.: Наука, 1977. 228 с.
- Монин А.С., Шишков Ю.А.** Климат, как проблема физики // УФН. Т. 170, С. 419-445, 2000.
- Bak P., Tang C., Wiesenfeld K.** Self-organized criticality. An explanation of 1/f noise // Phys. Rev. Lett. 1987. 59, P. 381-384.
- Bard E.** Climatic shock: abrupt changes over millennial time scales // Phys. Today, December, P. 32-38. 2002.
- Bassinot F., Labeyrie L., Vincent E., et al.**, The astronomical theory of climate and the age of the Brunhes-Matuyama magnetic reversal // Earth Planet. Sci. Lett. V. 126, P. 91-108, 1994.
- Blunier T., Chappellaz J., Schwander J., et al.** Asynchrony of Antarctic and Greenland climate change during the last glacial period // Nature V. 394, P. 739-743, 1998.
- Brook E.J., Sowers T., Orchado J.** Rapid variations in atmospheric methane concentration during the past 110,000 years // Science V. 273, P. 1087-1091, 1996.
- Dallenbach A., Blunier T., Fluckiger J., et al.** Changes in the atmospheric CH<sub>4</sub> gradient between Greenland and Antarctica during the Last Glacial and the transition to the Holocene // Geophys. Res. Lett. V. 27, P. 1005-1008, 2000.
- Harrison C.G.** Evolutionary processes and reversals of the Earth's magnetic field // Nature. V. 217, P. 46-47, 1968.
- Harrison C.G.A., Prospero J.M.** Reversals of the Earth's magnetic field and climatic changes // Nature. V. 250 P. 563-565, 1974.

- Hergarten S., Neugebauer H.J.** Self-organized criticality in landslide model // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. No. 6. P. 801-804.
- Imbrie J., Imbrie J.Z.** Modeling the climatic response to orbital variations // *Science* V. 207, P. 943-953, 1980.
- Ikezi H.** Coulomb Solid of Small Particles in Plasmas // *Phys. Fluids.* 1986. V.29. P.1764-1766.
- Jouzel J., Masson V., Cattani O., et al.** A new 27 ky high resolution East Antarctic climate record // *Geophys. Res. Lett.* V. 28, P. 3199-3202, 2001.
- Kent D.V., Carluot J.** A negative test of orbital control of geomagnetic reversal and excursions. *Geophys. Res. Lett.* V. 28, P. 3561-3564, 2001.
- Muller R. A., MacDonald J.** Spectrum of 100-kyr glacial cycle: Orbital inclination, not eccentricity // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* V. 94. P. 8329-8334. 1997.
- Paladino E., Faoro L., Falci G., Fazio R.** Decoherence and  $1/f$  noise in Josephson qubits // *Phys. Rev. Lett.* 2002. V. 88. N. 22. P. 228304
- Palle E., Goode P.R., Montanes-Rodriguez P., Koonin S.E.** Can Earth's albedo and surface temperature increase together? // *Eos*, 2006. V. 87, N 4, P. 37, 43.
- Petit J. R., Jouzel J., Raynaud D., et al.** Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica // *Nature* V. 399, P. 429-436, 1999.
- Rahmstorf S.** Timing of abrupt climate change: a precise clock // *Geophys. Res. Lett.* V. 30. doi: 10.1029/2003GL017115. 2003.
- Rampino M.R.** Possible relationships between changes in global ice volume, geomagnetic excursions, and the eccentricity of the Earth's orbit // *Geology* V. 7, N.12, P. 584-587, 1979.
- Rampino M.R.** Supereruptions as a threat to civilizations on Earth-like planets // *Icarus.* 2002. V. 156. P. 562-569
- Rampino M.R., Self S., Stothers R.B.** Volcanic winters // *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 1988. V. 16. P. 73-99.
- Rahmstorf S.** Timing of abrupt climate change: a precise clock // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. doi: 10.1029/2003GL017115.
- Scales W.A., Ganguli G.** Electrodynamics structure of charged dust clouds in Earth's middle atmosphere // *NJP* 2004. V. 6. N. 12. P. 1-15. <http://www.njp.org/>
- Steig E. J., Brook E. J., White J. W. C., et al.** Synchronous climate changes in Antarctica and the North Atlantic // *Science* V. 282, P. 92-95, 1998.
- Thomas H., Morfill G.E., Demmel V. et al.,** Plasma crystal: coulomb crystallization in dusty plasma // *Phys. Rev. Lett.*1994. V. 73. N. 5. P. 652-655.
- Vimeux F., Masson V., Jouzel J., et al.** Glacial-interglacial changes in ocean surface conditions in the Southern Hemisphere // *Nature* V. 398, P. 410-413, 1999.
- Vimeux F., Cuffey K. M., Jouzel J.** New insights into Southern hemisphere temperature changes from Vostok ice cores using deuterium excess correction // *Earth Plan. Sci. Lett.* V. 203, P. 829-843, 2002
- Watanabe O., Jouzel J., Johnsen S., et al.** Homogeneous climate variability across East Antarctica over the past three glacial cycles // *Nature* V. 422, P. 509-512, 2003.