

**СВЯЗЬ ВАРИАЦИЙ КЛИМАТА С ЭКСКУРСАМИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ
(гипотезы, модели, механизмы)**

В. В. Кузнецов, Н.Д.Кузнецова

*Институт космофизики и распространения радиоволн ДВО РАН, Камчатка
e-mail:vyk@ikir.kamchatka.ru*

Обсуждается проблема возможной связи между вариациями климата, произошедшими на Земле в течение последних 400 тыс. лет, и экскурсами геомагнитного поля. Выявлена корреляция между периодами резкого повышения температуры на поверхности Земли, уменьшением количества пыли в стратосфере, увеличением концентрации изотопа ^{10}Be в донных осадках и экскурсами геомагнитного поля. Предлагается модель, согласно которой, на Земле, в момент экскурсов, когда происходит значительное (почти до нуля) понижение модуля геомагнитного поля, частицы высокой энергии солнечного ветра и галактических космических лучей, обычно отклоняемые магнитным полем Земли, проходя стратосферу, разрушают находящийся там пылевой аэрозольный слой, экранирующий Землю от потока солнечного излучения в ледниковые периоды. Атмосфера становится прозрачной, Солнце нагревает поверхность Земли, что приводит к быстрому таянию ледников и возникновению глобальных климатических катастроф.

1. ВВЕДЕНИЕ

В течение многих лет обсуждается связь между вековыми изменениями климата и вариациями геомагнитного поля. [Jacobs, 1994; Wollin, et al., 1971; Wollin, et al., 1978; Chave, Denham, 1979; Doake, 1977; Doake, 1978; Bassinot, et al., 2002; Мёрнер, и др., 2001; Пудовкин, Распопов, 1992; Петрова, Распопов, 1998; Rampino, 1979; Worm, 1997; Thejll, et al., 2003; Guyodo, Valet, 1996; Robinson, et al., 1995;]. Во многих работах отмечалась взаимосвязь между температурой поверхности Земли и изменением величины её магнитного момента. Одной из возможных посылок образования такой связи принято считать теорию Дж. Кролла (1864) и М. Миланковича (1930) [Rampino, 1979; Imbrie, Imbrie, 1980; Монин, Шишков, 2000; Bassinot, et al., 1994; Kent, Carlut, 2001], согласно которой климатические изменения на Земле являются откликом на вариации в её орбите. 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. Соответствие теории Миланковича экспериментальным данным в нашей модели представляет особое значение, т.к. из этой теории следует, что изменения климата на Земле должны происходить в её северном и южном полушариях - в противофазе, в то время как показано практически полное совпадение данных, полученных в Антарктиде и Гренландии.

Другой причиной такой связи можно считать эффект прямого воздействия космических лучей на атмосферу и биосферу в моменты экскурсов и инверсий геомагнитного поля. Например, Харрисон [Harrison, 1968] полагает, 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 Prospero [Harrison, Prospero; 1974] признаётся, 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), когда произошло хорошо изученное резкое потепление климата. Ему возражал Хечт [Hecht, 1977], полагая, что единственная корреляция геомагнитного 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], который полагал, 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.

Заметим, что содержание нашей статьи как раз и состоит в попытке разобраться в этом вопросе. Однако прежде следует сказать несколько обобщающих слов о климате. 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 [Монин, Шишков, 2000] эффектов.

Теория климатических изменений Миланковича построена в приближении прозрачной атмосферы. 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], наличие которой экранировало солнечное тепло, что приводило к охлаждению поверхности Земли. Эта идея 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. Хотя ряд авторов полагают, что эти вариации, связанные с изменением скорости вращения Земли, так же имеют астрономическую причину [Rampino, 1979]. Однако, основной аргумент против теории Миланковича, подмеченный рядом авторов [Brook, 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.

Принято рассматривать корреляцию между изменениями климата и вековыми вариациями магнитного поля Земли, при которых происходит либо полная (инверсии), либо почти полная перемена полярности (экскурсы) магнитного поля. При экскурсах, в

отличие от инверсий, после смены полярности, геомагнитное поле вскоре возвращается в свое прежнее состояние. Периоды таких колебаний различны и меняются от события к событию от 100 лет до 10 тыс. лет. Так как большинство работ, посвященных этой теме, ограничивают рассмотрение климата в течение последних 400 тыс. лет, а последняя инверсия произошла на Земле около 800 тыс. лет назад, мы будем рассматривать корреляцию климата только с экскурсами. Среди наиболее известных и изученных, можно назвать экскурсы [Petrova, Pospelova, 1990]: Этрессия, Гетеборг, Моно Лайк, Лашамп, Каргаполово, Блейк, Ямайка, Бива (I, II, III), произошедших в интервале $\sim 0 - 400$ тыс. лет.

2. ДАННЫЕ

Известно, что в течение последних 400 тыс. лет на Земле произошли четыре глобальных похолодания с периодичностью примерно в 100 тыс. лет [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. Возможно, именно это событие было отражено в истории как Библейский Великий Потоп. Интересно и то, что это событие совпадает по времени с экскурсом Гетеборг [Fairbridge, 1977]. Предыдущее резкое и сильное потепление, случившееся примерно 115 – 130 тыс. лет тому назад, так же совпадает по времени с экскурсом Блейк. Два других, оставшихся из четырех названных резких потепления, произошедших в течение последних 400 тыс. лет, так же приурочены экскурсам: Ямайка и Бива II. После резкого потепления всегда наступало похолодание. Кроме выделенных нами 4-х интенсивных потеплений, можно отметить и другие, не такие резкие и сильные, но и они, как правило, коррелируют с экскурсами геомагнитного поля. К их числу можно отнести, например, такие события в геомагнетизме как Лашамп, Моно Лайк, и др. Кроме этого явно прослеживаются резкие колебания температуры поверхности Земли не связанные с особенностями геомагнетизма.

Авторы [Petit, et al., 1999], при анализе керна льда, полученного при бурении ледника Антарктиды в районе станции Восток, обнаружили, что в течение «последних» 420 тыс. лет, резкое уменьшение максимальной концентрации примеси в виде пылевых частиц наблюдалась, соответственно, в периоды: 20, 120, 250 и 330 тыс. лет тому назад. Эти периоды достаточно хорошо совпадают по времени как с периодами потепления, так и с экскурсами. По всей видимости, именно в эти периоды, когда происходили обсуждаемые нами совсем не случайные совпадения, на Земле происходили глобальные климатические катастрофы.

Рисунок 1 показывает корреляцию циклов потепления с экскурсами геомагнитного поля. Потепление и уменьшение величины оледенения совпадает по времени с резким уменьшением концентрации пыли. Отметим, что во всех четырех рассматриваемых случаях, концентрация пыли, после её уменьшения, совпадающего по времени со временем прохождения экскурса, возрастала не сразу, это происходило по истечении примерно 12 – 18 тыс. лет. Периоды низкой концентрации пыли выделены на рисунке 1 темной полосой. Связь потепления с экскурсами подтверждается независимым изучением самого последнего экскурса, когда авторы [Архипов и др, 2000] зафиксировали смену фазы похолодания на потепление климата во время экскурса «Этрессия» 2.8 тыс. лет назад. Можно привести и другие примеры отмеченной связи экскурсов с глобальными потеплениями.

Понижение температуры примерно на 10 градусов после её «быстрого» подъема происходит в течение 100 тыс. лет, откуда скорость охлаждения: $dT/dt = - 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{год}$. Увеличение температуры на те же 10 градусов, приуроченное к геомагнитным

экскурсам, занимает период времени примерно в 10 тыс. лет: $dT/dt = + 10^{-3}$ °C/год. Скорость современного потепления: 1 градус за 100 лет, для сравнения, $dT/dt = + 10^{-2}$ °C/год. На рис. 1 и 2 видно, что и похолодание, и следующее за ним потепление сопровождаются быстрыми изменениями (вариациями) температуры. За 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 должно начаться похолодание с примерно такой же скоростью, как происходит современное потепление [Bard, 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.

Рисунок 2 [Petit, et al., 1999] показывает последовательность изменения температуры поверхности Земли и концентрации пыли, приуроченной ко времени экскурса Gothenburg. Из рисунка видно, что максимальная концентрация пыли соответствует самой низкой температуре; предвзяв начало экскурса, концентрация пыли начинает уменьшаться; и, при достижении концентрации пыли некоторой малой величины, начинается рост температуры; температура достигает максимума, концентрация пыли при этом очень мала, экскурс кончился, и после этого температура начинает снова плавно, медленно убывать. Этот сценарий практически повторяется во всех экскурсах, правда, время начала экскурса запаздывает относительно начала роста температуры немного по-разному, в различных случаях. Возможно, это запаздывание связано с тем, что образцы горной породы для определения возраста экскурсов и глобальных потеплений были взяты из различных мест, а как показано в [Kuznetsov, 1999], инверсии, за счет конечности скорости перемещения магнитного полюса по поверхности Земли, могут фиксироваться в различных регионах Земли не совсем одновременно. Скорее всего, это касается и экскурсов. Более того, Клемент недавно показал [Clement, 2004], что время инверсии Брюнес-Матуяма оказывается заметно отличающимся для различных регионов. Как выяснил автор период прохождения инверсии зависит от широты. Он составляет ~ 2 тыс. лет в широтах, близких к экватору, и возрастает (до ~ 12 тыс. лет), по мере увеличения широты взятия проб.

Наблюдая на рис. 1 и 2 ход температурной зависимости, заметим, что как при потеплении, так и при охлаждении поверхности Земли температура поверхности изменялась не плавно, а резкими «толчками», амплитуда которых редко превышала 2 – 3 градуса, а время «толчка» - не более 1 тысячи лет. В статье [Rahmstorf, 2003] приведены точные значения дат резких изменений температуры в течение последнего оледенения (Т 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 ($\delta^{18}\text{O}$). Аналогичные данные приведены в [Dallenbach, et al., 2000]. Здесь выделены четыре периода последнего оледенения (Last Glacial): 1) 11.63 - 12.5 тыс. лет – Younger Dryas; 2) 12.7 - 14.5 – Bolling-Allerod; 3) 16.7 - 20.3 – Last Glacial Maximum и 4) 26.0 - 46.0 – Cold & Warm periods. Очевидно, что эти колебания температуры связаны не с экскурсами. Скорее всего, как и принято считать, решающую роль в таких изменениях играет изменение концентрации метана и двуокси углерода. В течение первого периода (Younger Dryas, 11.63-12.5 тыс. лет), 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. 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 (δD), 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 (δD).

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.

Обратим внимание на данные, полученные рядом авторов по изучению временного распределения концентрацией изотопа ^{10}Be в осадочных породах. Рисунок 3 [Aldahan, Possnert, 2003] (с увеличением масштаба) демонстрирует связь между геомагнитными экскурсами и концентрацией изотопа ^{10}Be . В работах [Robinson, et al., 1995; Aldahan, Possnert, 2003; Frank, et al., 1997] показано, что этот изотоп является индикатором интенсивности галактических космических лучей, достигнувших поверхности Земли и оставивших «следы» в осадках. Использование именно этого изотопа (^{10}Be) связано с тем, что его концентрация в породах земной коры значительно ниже, чем в космических лучах. Поэтому принято считать, что наличие этого изотопа однозначно обязано попаданию космических лучей на поверхность Земли.

Способность галактических космических лучей (ГКЛ) достигнуть земной поверхности зависит от их энергии, величины геомагнитного поля Земли и широты «точки приема ГКЛ», т.к. вектор модуля поля изменяется в зависимости от географической (магнитной) широты места, в котором регистрируются «следы» ГКЛ. Например, для современного значения величины геомагнитного поля, в области экватора энергия частиц должна быть порядка (и более) 14 ГэВ, на широте 40° энергия частиц попадающих на Землю снижается до 4 ГэВ, а на широте 60° - 0.5 ГэВ и т. д. (эффект геомагнитного обрезания) [Vazilevskaya, 2000]. Очевидно, что интенсивность ГКЛ, достигающих поверхности Земли, может возрасти неоднократно, если на некотором пространстве земной поверхности величина геомагнитного поля окажется практически равной нулю. Как отмечалось, в состав ГКЛ, кроме очевидных элементов: водорода и гелия, входит изотоп ^{10}Be (редко встречающийся в природе). Его содержание в ГКЛ остается постоянным в течение времени порядка 10^6 лет. Принято считать, что «время жизни» ГКЛ, т.е. время, необходимое для того, чтобы от источника ГКЛ «добраться до Земли», составляет примерно 10^7 лет. При этом отношение изотопов $[^{10}\text{Be}]/[^7\text{Be} + ^9\text{Be} + ^{10}\text{Be}] = 0.028$. ГКЛ проходят толщу вещества атмосферы 5 г/см^2 [Атмосфера, 1991] и после этого средняя концентрация частиц ГКЛ составляет 0.2 см^{-3} . Таким образом, наличие повышенной концентрации ^{10}Be может быть индикатором того, что в определенное время, в определенном пространстве Земли, геомагнитное

поле имело существенно меньшую величину, чем обычно. Известно (см. рис. 3), что увеличение концентрации изотопа ^{10}Be в осадочных породах совпадает по времени с экскурсами [Robinson, et al., 1995; Aldahan, Possnert, 2003; Frank, et al., 1997].

Роль ГКЛ в формировании климата и, в частности, в образовании облаков, активно обсуждается в последние годы [Harrison, 2000; Tinsley, 2000; Marsh, Svensmark; 2000-a; 2000-b; Kristjansson, 2001; Usoskin et al., 2004]. Марш и Свенсмарк [Marsh, Svensmark; 2000-a; 2000-b] проанализировали имеющиеся массивы данных по глобальным среднемесячным аномалиям облачности в нижней, средней и верхней атмосфере и по колебаниям потока космических лучей. Оказалось, что облачный покров на высоте менее 3.2 км над земной поверхностью изменялся в период между 1980-м и 1995 г. в соответствии с интенсивностью космических лучей, а в более высоких слоях атмосферы такой корреляции не наблюдалось. Если космические лучи действительно существенно влияют на приземный облачный слой, то колебания их потока придется учитывать в качестве немаловажного фактора климатообразующих процессов.

Результаты наблюдений, изображенные на рисунках 1 – 3, а так же результаты других, упомянутых выше работ, приведены в Таблице. Колонки II, VI, VIII и IX выделены, они соответствуют периодам максимальных потеплений (рис. 1). В Таблице приведено время (в тыс. лет) событий: 1 – экскурсов (GMF), 2 максимальной концентрации ^{10}Be , 3 – резкому уменьшению концентрации пыли. 4 – увеличению максимальной температуры поверхности - началу потепления (ΔT°), для 10 экскурсов, произошедших в течение последних 400 тыс. лет эволюции Земли. В последнем столбце Таблицы – литература.

3. МОДЕЛЬ

Принято считать, что продолжающееся в наше время примерно в течение последних 100 лет потепление, связано с развитием парникового эффекта. Разовьем эту идею, причем будем ориентироваться на высказанную в [Монин, Шишков, 2000] мысль, что основная роль в возникновении парникового эффекта принадлежит природным, а совсем не антропогенным, как принято считать, примесям. Если этот тезис можно считать доказанным, то мы приходим к совсем не тривиальному предположению. Суть его заключается в следующем. Парниковый эффект обязан выбросу в атмосферу Земли некоторого дополнительного количества природных газов, паров и микрочастиц (пылинок, аэрозолей). Со временем, при определенных условиях, например, при усилении вулканической деятельности Земли [Rampino, Stothers, 1985], количество пыли и, как следствие, рост облачности и экранирование солнечного излучения, попадающего на Землю, - будет увеличиваться. Предположим, что увеличение концентрации пыли в атмосфере (концентрации стратосферных аэрозолей) связано с изменением тектонической активности Земли, связанной, в свою очередь, с увеличением количества действующих одновременно вулканов, тогда парниковый эффект может плавно перейти в антипарниковый, и на Земле, вместо потепления, начнется похолодание и рост ледников. Подтверждение правомерности такого предположения можно найти в обзоре [Монин, Шишков, 2000]. Роль облачности в изменении климата Земли была обоснована значительно раньше [Монин, 1969].

В [Асатуров и др., 1986] приведены теоретические и экспериментальные оценки, показывающие, что стратосферные аэрозоли (СА), возникающие при вулканических извержениях, могут значительно менять альбедо Земли (a):

$$Da/t = -4(1 - w)a + 2wh(1 - a)^2,$$

где $h = \frac{d\alpha(m)}{dm} dm$ - средний коэффициент трансформации для диффузионного излучения, t - оптическая толщина слоя СА, w - вероятность выживания фотона, $m = \cos q$, где q - угол между излучением и поверхностью Земли. Из формулы видно, что наличие СА может, как увеличивать, так и уменьшать глобально осредненное альbedo Земли. При $(1 - a)^2/2a > (1 - w)/wh$ - альbedo Земли возрастает. Например, при концентрации стратосферного аэрозоля $N_{CA} = 10^4 \text{ см}^{-3}$ и объемной концентрации $\rho = 160 \text{ мкм}^3/\text{см}^3$ для солнечного излучения в интервале длин волн от 0.2 до 2 мкм, величина $a = 100\%$ [Rahmstorf, 2003]. Размер пылинки a ($a \sim V^3$, $V = r/N_{CA} = 1.6 \times 10^{-2} \text{ мкм}^3$): $a \approx 0.25 \text{ мкм}$. Если концентрация пыли (СА) будет порядка (или больше) $N_{CA} = 10^4 \text{ см}^{-3}$, а размер пылинок не менее 0.25 мкм, то поверхность Земли будет экранирована от солнечного тепла практически полностью.

Таким образом, при изменении толщины слоя аэрозолей, и их размера (параметры w , h , a), можно менять альbedo, что будет приводить либо к охлаждению, либо к нагреву поверхности Земли солнечным излучением. В [Асатуров и др., 1986] показано, что после вулканического извержения, при высокой изначально концентрации пыли (стратосферного аэрозоля), температура поверхности понижается относительно начальной. Через некоторое время после уменьшения концентрации пыли, температура становится выше прежней. Более конкретные примеры показывают, что даже одно большое извержение может заметно понизить температуру. Например, извержение в 1815 г. вулкана Тамбора (Индонезия), привело к тому, что средняя температура летнего периода в восточной части США понизилась в 1816 г. почти на 2 градуса.

Обратимся к рисункам 1 и 2, откуда следует, что максимальная концентрация пыли во льдах Антарктиды порядка 1 р.р.м. Оценим возможную величину концентрации пыли в атмосфере: 1 р.р.м = $10^{-6} \approx 10^{-6} \text{ г/см}^3$. Принимая размер пылинки = 0.25 мкм, её объем $\sim 10^{-14} \text{ см}^3$, массу $\sim 10^{-14} \text{ г}$, концентрация пылинок во льду n равна примерно 10^8 см^{-3} . Предположим, что вся пыль, содержащаяся в столбе атмосферы толщиной h , была адсорбирована во льду. Оценим концентрацию пыли $N_{CA} \approx 10^4 \text{ см}^{-3}$, присутствие которой на высоте около 20 км будет практически полностью экранировать солнечное излучение и приведет к похолоданию. Предположим, что концентрация пыли величиной $N_{CA} \approx 10^4 \text{ см}^{-3}$ сосредоточена в пылевом слое толщиной ($h \sim n/N_{CA} = 10^4 \text{ см}$) порядка 100 м. Тогда слой стратосферного аэрозоля (пыли) с размером пылинок не менее 0.25 мкм, с концентрацией $N_{CA} \approx 10^4 \text{ см}^{-3}$ и толщиной слоя около 100 метров – практически полностью экранирует солнечное излучение.

Поток протонов (ионов) солнечного ветра, обладающих энергией $E = 1 - 100 \text{ эВ}$ на подходе к магнитосфере Земли равен $j_o \sim (10 - 100) 10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Предположим, что поток ионов с энергией 100 эВ: $j = 10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. При «нормальной» величине магнитного поля на Земле поток протонов, взаимодействуя с этим полем, отклоняется, и на Землю не попадает. В момент инверсии или экскурса, величина магнитного поля значительно уменьшается (на короткое время, - практически до нуля). В это время поток быстрых протонов может достичь стратосферы, где существует вулканический аэрозоль и разрушить его, диспергировав аэрозоли на очень мелкие частицы, на которых солнечное излучение рассеиваться уже не будет, или, испарив пылинки целиком. Атмосфера Земли станет прозрачной, солнечное тепло больше не будет экранироваться пылью, сможет проникнуть до поверхности Земли и нагреть её на те самые 10 градусов, на которые нагревается Земля в течение экскурса (см. рис. 1 и 2). При этом происходит таяние огромного количества льда, и возникают климатические катастрофы, такие как «Библейский Великий Потоп».

Известно [Spitzer, 1978], что протоны с энергией порядка 100 эВ выбивают атомы и молекулы из пылинок вплоть до их полного испарения. Например, для того, чтобы

отделить от пылинки (аэрозоля) одну молекулу воды, необходима энергия всего 0.2 эВ. Предположим, что удельная теплота испарения вещества пылинки $U = 10$ кДж/г. Так как массу пылинки мы определили $m = 10^{-14}$ г, необходимая энергия для испарения пылинки $E = U \cdot m = 10^{-10}$ Дж, или $\sim 10^9$ эВ. Если при каждом соударении с пылинкой, ион будет терять свою энергию полностью, то для полного испарения пылинки необходимо произвести по ней удар примерно 10^7 ионов. В столбе атмосферы сечением 1 см^2 и толщиной $h = 100$ м, при концентрации $N_{CA} \approx 10^4 \text{ см}^{-3}$, находится 10^8 пылинок. Если предположить, что количество пылинок за время воздействия t на них потока j не увеличивается, то для полного испарения всей пыли потребуется примерно около года. По-видимому, это минимально возможное время. Дело в том, что при этой оценке мы не учитывали тот факт, что ионы сталкиваются не только с пылинками, а также тратят значительную часть своей энергии на рассеяние, возбуждение и ионизацию атомов и молекул атмосферы. Мы не учитывали также то, что при лобовом столкновении иона с пылинкой ей передается лишь малая часть кинетической энергии и т.п. Таким образом, время, необходимое для испарения (диспергирования) пылинок реально значительно больше и может достигать сотен и даже тысяч лет.

Воспользовавшись рисунками 1 и 2, можно оценить характерное время убывания концентрации пыли. Оно оказывается порядка 10 тыс. лет, что значительно больше, чем оцененное нами. Учитывая, что наши оценки весьма предположительны, более того, мы оценивали лишь минимальное время, необходимое для испарения пылинок, можно считать, что рассматриваемый механизм разрушения антипарникового слоя и нагрева Солнцем Земли и её атмосферы вполне возможен. Скорость современного потепления (1° за 100 лет) 10^{-2} °/год, скорость потепления в период экскурса (10° за 10 тыс. лет) на порядок меньше. Этот факт может говорить о том, что скорость потепления в периоды экскурсов ограничивается не излучением Солнца, а альбедо Земли.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Существуют ли данные, которые можно было бы использовать в качестве подтверждения предлагаемой модели, или модель имеет только умозрительный характер? Ответим на этот принципиальный вопрос:

1. Как известно, в настоящее время на Земле не существует значительных источников пыли: нет сильных и частых извержений вулканов, не происходит интенсивного испарения океана и образования солевых частиц, а стратосфера, - практически прозрачна. Поэтому наблюдать экспериментально разрушение пылевого слоя быстрыми протонами и ионами нет возможности. Сильные извержения вулканов, и другие источники пыли, приводящие к похолоданию, производили пылевые завесы солнечного излучения задолго до того как были освоены методы оптического мониторинга атмосферы и поэтому мы не имеем возможности сравнить скорость убывания пыли в атмосфере, и роль в этом процессе частиц солнечного ветра. Конечно, имеется некоторая вероятность того, что мы обнаружили случайное совпадение экскурсов с периодами уменьшения концентрации пыли. Однако, так как это не единственное совпадение, а совпадения достаточно часты, как это следует из Таблицы 1, то можно предполагать реальную возможность влияния частиц солнечного ветра и галактических космических лучей (ГКЛ), проникающих в атмосферу Земли в момент отсутствия геомагнитного поля, на изменения климата. Выясним, как влияет величина модуля геомагнитного поля на количество частиц солнечного ветра и ГКЛ, попадающих на Землю. На Земле в настоящее время, наблюдается достаточно спокойное геомагнитное поле, - нет ни экскурсов, ни инверсий. Однако в магнитном поле Земли имеются глобальные магнитные аномалии, в зоне влияния которых модуль

геомагнитного поля заметно отличается от поля диполя, что вызывает заметное локальное изменение концентрации частиц солнечного ветра, попадающих на Землю.

Наиболее изучена в этом плане Бразильская магнитная аномалия, в эпицентре которой величина модуля магнитного поля почти в 2 раза ниже, чем в её окрестности. Анализируя материалы, полученные на японском спутнике EXOS-A [Oyama, Schlegel, 1984], и на космической станции с телескопом Хаббл [Pinto, et al., 1992], можно убедиться в том, что Бразильская аномалия "проявляется", по крайней мере, до высот 600 км. Плотность потока заряженных частиц в районе Бразильской аномалии на несколько порядков превышает аналогичную величину в других районах, удаленных от неё. Этот факт свидетельствует, что в момент экскурса или инверсии, когда модуль поля заметно уменьшается, на Землю обрушивается поток частиц солнечного ветра и ГКЛ, который может не только разрушить пылевой слой, но и повысить уровень радиации и оказать влияние на живую природу, в том числе и на человечество.

Заметим, что Бразильская магнитная аномалия изучалась археомагнитными методами [Pinto, et al., 1992]. В течение последних 4-х тыс. лет она практически не меняла своего положения, ее эпицентр всегда находился там же где сейчас, на восточном побережье Бразилии (2 на рис. 4). Интенсивность поля этой аномалии за 4 тыс. лет была непостоянной: она дважды возростала относительно современной примерно в 1.5 раза. Одно из наиболее интересных свойств глобальных магнитных аномалий состоит в том, что в момент инверсий и экскурсов они остаются источниками магнитного поля. Например, известно, что в момент инверсии виртуальные магнитные полюса оказывались ориентированными на Сибирскую глобальную магнитную аномалию [Petrova, 1990].

2. В качестве аргумента в поддержку нашей модели сошлемся на полученный недавно экспериментальный результат [Vanhellemont, et al., 2002] по корреляции интенсивности нейтронов галактических космических лучей и концентрации стратосферных аэрозолей. Авторы показали, что уменьшение числа нейтронов, регистрируемых в течение 1987 – 1991 гг. с месячным усреднением у поверхности Земли, примерно на 30 %, соответствует увеличению концентрации аэрозолей (высота 26.5 км) - на два порядка. Галактические космические лучи представляют собой протоны, либо мезоны, с энергией, большей, чем 10 ГэВ. Эти частицы полностью поглощаются атмосферой, и поверхности Земли достигают только электрически нейтральные нейтроны, которые регистрируются нейтронными мониторами. Полученный в [Vanhellemont, et al., 2002] результат, так же как в предыдущем случае, подтверждает обсуждаемую здесь модель связи концентрации атмосферных аэрозолей с ГКЛ.

3. Астрономическая теория климата Миланковича давно признана и, за редким исключением, не подвергается сомнению. Наша модель, в отличие от общепринятого подхода, в качестве основного аргумента предлагает учитывать роль внутренних эндогенных процессов, которые, с одной стороны, приводят к накоплению пыли в стратосфере, с другой, - к разрушению пылинок протонами солнечного ветра и ГКЛ в периоды, когда на Земле практически отсутствует магнитное поле. Реальность астрономической гипотезы климата подвергалась сомнению ещё 70 лет тому назад, когда метеоролог В.А.Костицын [Kostitzin, 1935] 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 (самое большее, - на неделю). До оледенения континента отсюда так далеко, что приходится удивляться распространенности этой гипотезы.

Изменения уровня содержания метана обнаруженные в толще льда, извлеченного вблизи станции Восток на Антарктиде [Brook, et al., 1996], сравниваются с аналогичным керном льда, извлеченным в Гренландии. Эти данные, а так же данные по изотопу ^{18}O и дейтерию идентичны для образцов льда из Антарктиды и Гренландии. Этот результат ставит под сомнение теорию Миланковича, согласно которой такие данные должны находиться в противофазе для Северного и Южного полушарий.

4. Как отмечалось выше, в период 47-23 тыс. лет тому назад изменения климата в Антарктиде опережают аналогичные изменения климата в Гренландии примерно на 1-2.5 тыс. лет [Blunier, et al., 1998]. Насколько известно, объяснения этого эффекта нет. Оценим его с точки зрения нашей модели дрейфа магнитных полюсов в момент инверсии [Kuznetsov, 1999]. Естественно предположить, что полюса в момент экскурса дрейфуют по поверхности Земли по тем же трассам, что и в момент инверсии (рис. 4-а). Согласно модели дрейфа полюсов [Kuznetsov, 1999], заметную роль в этом процессе играют глобальные магнитные аномалии (ГМА), наличие и местоположение которых определяет трассы дрейфа полюсов. Глобальные магнитные аномалии, согласно нашей модели, представляют собой магнитогидродинамические генераторы, квазинезависимые от основного дипольного генератора геомагнитного поля. В период инверсий и экскурсов дипольный источник изменяет свою полярность, при этом магнитное поле ГМА ещё в течение некоторого времени сохраняет прежнее значение. В тот момент, когда поле дипольного источника равно нулю, поле на Земле целиком обязано полю ГМА. В принципе, в этот момент поле может иметь недипольный, например, квадрупольный характер (рис. 4-б). В момент времени, когда поле дипольного источника обратной полярности становится локально равным полю аномалии, оно «аннигилирует», и в течение некоторого времени, в конкретной точке пространства может оказаться так, что поле отсутствует. Так как во времени величина дипольного поля обратного знака возрастает, - локальная точка нулевого поля перемещается по поверхности Земли (рис. 4-б). Скорость дрейфа магнитных полюсов в момент инверсий и экскурсов составляет порядка 20 км/год. Расстояние между Гренландией и Антарктидой равно примерно половине длины экватора. Поделив это расстояние на скорость дрейфа, получаем искомую величину задержки климатических изменений порядка 1 тыс. лет.

5. Выше мы обсуждали роль экскурсов геомагнитного поля и связанные с их появлением эпизоды уменьшения модуля геомагнитного поля и возможность проникновения к поверхности Земли частиц солнечного ветра и ГКЛ, в изменениях климата Земли. Взаимодействие этих частиц с пылевым аэрозолем, экранирующим солнечное излучение и приводящим к похолоданию поверхности Земли, может привести к разрушению стратосферного аэрозоля и уменьшению антипарникового эффекта. Заметим, что эта идея не нова, она высказывалась, например, в [Пудовкин, Распопов, 1992]. Однако, из рисунка 1 следует, что изменение климата, как похолодания, так и потепления, происходят на Земле и при отсутствии пыли. В частности, эта ситуация свойственна современному периоду, продолжающемуся уже 12 тыс. лет.

Общепринято считать, что изменение климата обязано вариации концентрации метана и CO_2 . Очевидно, что относительно небольшая концентрация этих веществ, приведет к усилению парникового эффекта и потеплению. Однако, когда концентрация их достигнет порогового уровня, парниковый эффект перейдет в антипарниковый, и начнется похолодание. Основным источником метана в атмосфере является Природа [Наг, 1998], причем наибольшее количество метана, способное очень быстро попасть в атмосферу, сосредоточено в газогидратах [Sloan, 1998]. В этих работах рассматривается возможность выделения метана из газогидратов, например, при понижении уровня

океана и уменьшении при этом давления, поддерживающего газогидраты в метастабильном состоянии. Другой причиной может быть повышение температуры воды в океане и т.п.

Особый интерес представляет собой вопрос, который в последние годы интенсивно дискутируется, о роли антропогенного фактора в увеличении концентрации метана и, соответственно, его роли в изменении климата. Этот вопрос не имеет однозначного толкования, например, в [Kalnay, Cai, 2003] сравнивается влияние парникового эффекта и изменений климата за счет урбанизации и влияния сельскохозяйственной деятельности. Разделить эти причины довольно трудно, т.к. каждая из них приводит к повышению средней дневной температуры поверхности Земли. В работе сравниваются тренды температуры, измеренной в течение последних 50 лет в США, в районах больших городов и в сельскохозяйственных районах. Показано, что антропогенный фактор оказывает влияние только в районах мегаполюсов, в то время как он практически не сказывается в сельскохозяйственных районах.

И, наконец, что же происходит в настоящее время на Земле: нагревается она или остывает? По данным американских спутников “Tropical Rainfall Measuring Mission” и “Earth Observing System Terra” [Chen, et al., 2002] предназначенных для изучения баланса поглощаемой и излучаемой Землей энергии, показано, что за период 1985-2000 гг. тепловое излучение Земли возросло более чем на 5 Вт/м^2 , в то время как количество отраженной энергии солнечной радиации упало на 2 Вт/м^2 . (Поток солнечной энергии, падающий на Землю составляет 1360 Вт/м^2). Эти данные показывают, что Земля скорее охлаждается, чем нагревается. Авторы полагают, что причина дисбаланса потоков тепла состоит в усилении циркуляции в тропической атмосфере, и приходят к выводу о том, что с полной уверенностью обозначить механизм климатических перемен ещё невозможно.

6. 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 12 – 18 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 окончиться.

В 1860 г. магнитные полюса прервали свой хаотический дрейф и устремились друг навстречу другу по траекториям, выделенным для дрейфа магнитных полюсов в момент инверсии (рис. 4-а). Скорость северного магнитного полюса постоянно возрастает. Южный, наоборот, тормозится. Возможно, это связано с тем, что он уже достаточно близко подошел к Антарктической магнитной аномалии, где он, согласно [Kuznetsov, 1999], должен находиться до смены знака дипольного поля. Известно, что дипольная компонента геомагнитного поля постоянно, в течение всего времени

наблюдения, убывает. Эти факты могут означать, что Земля стоит на пороге начала инверсии или экскурса. Возможно, они уже начались, а эти события, как мы отмечали, оказывают огромное влияние на климат.

Работа выполнена при поддержке интеграционного проекта Президиума РАН (№ 13.13).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Адушкин В.В., Кудрявцев В.П., Турунтаев С.Б.* Глобальный поток метана в межгеосферном газообмене // ДАН. Т. 391, № 6, С. 813-816, 2003.
- *Архипов С.А., Волкова В.С., Гнибиденко З.Н., Орлова Л.А.* Палинология, хронология и тонкая структура геомагнитного поля голоценовых отложений юга Западной Сибири // ДАН Т. 372, С. 204-207, 2000.
- *Асатуров М.Л., Будыко М.И., Винников П.Я. и др.* Вулканы, стратосферный аэрозоль и климат Земли. Л.: Гидрометеиздат. 1986.
- *Атмосфера.* Справочник. Л.: Гидрометеиздат. 1991.
- *Мёрнер Н.А., Петрова Г.Н. и др.* Появление экскурсов на фоне изменения магнитного момента Земли // Физика Земли, № 10, С. 24-32, 2001.
- *Монин А.С.* Предсказание погоды как проблема физики. М.: Наука. 1969.
- *Монин А.С., Шишков Ю.А.* Климат, как проблема физики // УФН, Т. 170, С. 419-445, 2000.
- *Петрова Г.И., Распопов О.М.* Связь изменений магнитного момента Земли и палеоклимата за последние 12 тысяч лет // Геомагнетизм и Аэрномия. Т. 38, № 5, С. 141-150, 1998.
- *Прокопенко А.А., Карабанов Е. Б., Кузьмин М. И., Вильямс Д. Ф., Хурсевич Г. К.* Кратковременные климатические события 130-70 тыс. лет назад в осадочной записи озера Байкал // Геология и геофизика Т. 44, № 7, С. 623-637, 2003.
- *Пудовкин М.И., Распопов О.М.* Механизм воздействия солнечной активности на состояние нижней атмосферы и метеопараметры // Геомагнетизм и Аэрномия, Т. 32, № 5, С. 1-22, 1992.
- *Aldahan A. Possnert G.* Geomagnetic and climatic variability reflected by ¹⁰Be during the Quaternary and late Pliocene // Geophys. Res. Lett. V. 30. doi: 10.1029/2002GL016077. 2003.
- *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.
- *Bazilevskaya G.A.* Observations of variability in cosmic rays // Space Sci. Rev. V. 94. P. 25-38. 2000.
- *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.
- *Bohnel H., Molina-Garza R.* Secular variation in Mexico during the last 40,000 years // Phys. Earth Planet. Inter. V. 133, P. 99-109, 2002.
- *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.
- *Chave A.D., Denham C.R.* Climatic changes, magnetic intensity variations and fluctuations of the eccentricity of the Earth's orbit during the past 2,000,000 years and a mechanism which

- may be responsible for the relationship – a discussion // *Earth Planet. Sci. Lett.* V. 44, P. 150-152, 1979.
- *Chen J., Carlson B.E., Del Genio A.D.* Evidence for strengthening of the tropical general circulation in the 1990s // *Science* V. 295, P. 838-841, 2002.
 - *Clement B.M.* Dependence of the duration of geomagnetic polarity reversals on site latitude // *Nature* V. 428. P. 637-640, 2004.
 - *Creer K.M., Thouveny N., Blunk I.* Climatic and geomagnetic influences on the Lac du Bouchet palaeomagnetic SV record through the last 110 000 years // *Phys. Earth Planet. Inter.* V. 64, P. 314-341, 1990.
 - *Cuffey K.M., Vimeux F.* Covariation of carbon dioxide and temperature from the Vostok ice core after deuterium-excess correction // *Nature* V. 412, P. 523-527, 2001.
 - *Dallenbach A., Blunier T., Fluckiger J., et al.* Changes in the atmospheric CH₄ gradient between Greenland and Antarctica during the Last Glacial and the transition to the Holocene // *Geophys. Res. Lett.* V. 27, P. 1005-1008, 2000.
 - *Doake C.S.M.* A possible effect of ice ages on the Earth's magnetic field // *Nature* V. 267, P. 415-417, 1977.
 - *Doake C.S.M.* Climatic change and geomagnetic field reversals: a statistical correlation // *Earth Planet. Sci. Lett.* V. 38, P. 313-318, 1978.
 - *Fairbridge R.W.* Global climate change during the 13,500-b.p. Gothenburg geomagnetic excursion // *Nature*. V. 265 P. 430. 1977.
 - *Frank M., Schwarz B., Baumann S., et al.* A 200 kyr record of cosmogenic radionuclide production rate and geomagnetic field intensity from ¹⁰Be in globally stacked deep-sea sediments // *Earth Planet. Sci. Lett.* V. 149, P. 121-129, 1997.
 - *Guyodo Y., Valet J.-P.* Relative variations in geomagnetic intensity from sedimentary records: the past 200,000 years // *Earth Planet. Sci. Lett.* V. 143, P. 23-36, 1996.
 - *Haq B.U.* Natural gas hydrates: searching for the long-term climatic and slope-stability records. *Gas Hydrates Relevance to world margin stability and climate change.* Ed. J.-P. Henriot and J. Mienert. Publ. Geol. Soc. London. P. 303-318, 1998.
 - *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.
 - *Hartl P., Tauxe L.* A precursor to the Matuyama/Brunhes transition-field instability as recorded in pelagic sediments // *Earth Planet. Sci. Lett.* V. 138. P. 121-135. 1996.
 - *Hecht A.D.* Geomagnetism and climate (and replies Fairbridge) // *Nature*. V. 268. P. 669, 1977.
 - *Heider F., F. Hufenbecher, U. Graeger, A. Hayashida.* The Brunhes-Matuyama and Jaramillo transitions recorded in sediments from California margin // *Proc. Ocean Drill. Program, Scient. Results.* V. 167. P.311-318. 2000.
 - *Holt J.W., Kirschvink J.L.* Geomagnetic field inclinations for the past 400 kyr from the 1 km core of the Hawaii scientific drilling project // *J. Geophys. Res.* V. 101, P. 11655-11663, 1996.
 - *Imbrie J., Imbrie J.Z.* Modeling the climatic response to orbital variations // *Science* V. 207, P. 943-953, 1980.
 - *Jacobs J.A.* Reversals of the Earth's magnetic field. Second Edition. Cambridge Univ. Press 1994.
 - *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.
 - *Kalnay E., Cai M.* Impact of urbanization and land-use change on climate // *Nature* V. 423, P. 528-531, 2003.

- Kent D.V., Carlut J. A negative test of orbital control of geomagnetic reversal and excursions. *Geophys. Res. Lett.* V. 28, P. 3561-3564, 2001.
- Kent D.V., Hemming S.R., Turrin B.D. Laschamp excursion at Mono Lake? // *Earth Planet. Sci. Lett.* V. 197, P. 151-164, 2002.
- Kostitzin V.A. Evolution de l'atmosphere. Circulation organique epoques glaciaires. Paris.: Hermann, 1935.
- Kristjansson J.E. Latest news on cosmic rays and clouds // *Cicerone* 1/2001.
- Kuznetsov V.V. A model of virtual geomagnetic pole motion during reversals // *Phys. Earth Planet. Int.* V. 115, P. 173-179, 1999.
- Liddicoat J.C., Coe R.S. Mono Lake geomagnetic excursion // *J. Geophys. Res.* V. 64, P. 261-271, 1979.
- Longair M. S. High energy astrophysics. Cambridge Univ. Press. London. 1981.
- Marsh N., Svensmark H. Low cloud properties influenced by solar activity // *Phys. Rev.Lett.* V.85. P. 5004- 5007. 2000 -a.
- Marsh N., Svensmark H. Cosmic rays, clouds, and climate // *Space Sci. Rev.* V. 94. P. 215-230. 2000-b.
- Oda H., Shibuya H., Hsu V. Palaeomagnetic records of the Matuyama/Brunhes polarity transition from ODP Leg 124 (Celebes and Sulu seas) // *Geophys. J. Int.* V. 142. P. 319-338. 2000.
- Oyama K.J., Schlegel K. Anomalous electron temperatures above the South American magnetic field anomaly // *Planet Space Sci.* V. 32, P. 1513-1522, 1984.
- 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.
- Petrova G.N. Displacement of VGP during reversals, Geomagnetic field in Quaternary. Potsdam, P. 37-42, 1990.
- Pinto O. Jr., Gonzalez W.D., Pinto I.R.C., et al. The South Atlantic magnetic anomaly: three decades of research // *Journ. Atmos. Terr. Phys.* V. 54, P. 1129-1134, 1992.
- 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 excursion and the eccentricity of the Earth's orbit // *Geology* V. 7, N.12, P. 584-587, 1979.
- Rampino M.R., Stothers R.B. Climatic effects of volcanic eruptions // *Nature* V. 313, P. 272, 1985.
- Robinson C., Raisbeck G.M., Yiou F., et al, The relationship between ¹⁰Be and geomagnetic field strength records in central North Atlantic sediments during the last 80 ka. // *Earth Planet. Sci. Lett.* V. 136, P. 551-557, 1995.
- Rothlisberger R., Mulvaney R., Wolff E.W., et al. Dust and sea salt variability in central East Antarctica (Dome C) over the last 45 kyrs and its implications for southern high-latitude climate // *Geophys. Res. Lett.* V. 29, P. 24, (1-4), 2002.
- Schulz H., von Rad U., Erinkeuser H. Correlation between Arabian Sea and Greenland climate oscillations of the past 110,000 years // *Nature* V. 393, P. 54-57, 1998.
- Sloan E.D, Jr. Physical-chemical properties of gas hydrates and application to world margin stability and climatic change *Gas Hydrates Relevance to world margin stability and climate change.* Ed. J.-P. Henriot and J. Mienert. Publ. Geol. Soc. London. 1998. P. 31-50.
- Spitzer Jr. L. Physical processes in the interstellar medium. N.-Y.: J. Wiley & Sons, Inc. 1978.
- 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.

- *Thejll P., Christiansen Bo, Gleisner H.* On correlations between the North Atlantic Oscillation, geopotential heights, and geomagnetic activity // *Geophys. Res. Lett.* V. 30. doi: 10.1029/2002GL016598. 2003.
- *Tric E., Laj C., Valet J.-P., et al.* The Blake geomagnetic event: transition geometry, dynamical characteristics and geomagnetic significance // *Earth Planet. Sci. Lett.* V. 102, P. 1-13, 1991.
- *Vanhellemont F., Fussen D., Bingen C.* Cosmic rays and stratospheric aerosols: Evidence for a connection? // *Geophys. Res. Lett.* V. 29, P. 10-1 – 10-4, 2002.
- *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.
- *Waddington C.J.* Paleomagnetic Field Reversals and Cosmic radiation // *Science.* V.158. P. 913-915, 1967.
- *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.
- *Wollin G., Ericson D.B., Ryan B.E.* Magnetism of the Earth and climatic changes // *Earth Planet. Sci. Lett.* V.12, P. 175-183, 1971.
- *Wollin G., Ryan W.B.F., Ericson D.B.* Climatic changes, magnetic intensity variations and fluctuations of the eccentricity of the Earth's orbit during the past 2,000,000 years and a mechanism which may be responsible for the relationship // *Earth Planet. Sci. Lett.* V. 41, P. 395-397, 1978.
- *Worm H.-U.* A link between geomagnetic reversals and events and glaciations // *Earth Planet. Sci. Lett.* V. 147, P. 55-67, 1997.
- *Yamazaki T., Oda H.* A Brunhes-Matuyama polarity transition record from anoxic sediments in the South Atlantic (Ocean Drilling Program Hole 1082C) // *Earth Planets Space.* V. 53. P. 817-827. 2001.
- *Yu F.* Formation of large NAT particles and denitrification in polar stratosphere: possible role of cosmic rays and effect of solar activity // *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* V. 4. P. 1037-1062. 2004.
- *Zhang X.Y., Lu H.Y., Arimoto R., Gong S.L.* Atmospheric dust loadings and their relationship to rapid oscillations of the Asian winter monsoon climate: two 250-kyr loess records // *Earth Planet. Sci. Lett.* V. 202, P. 637-643, 2002.

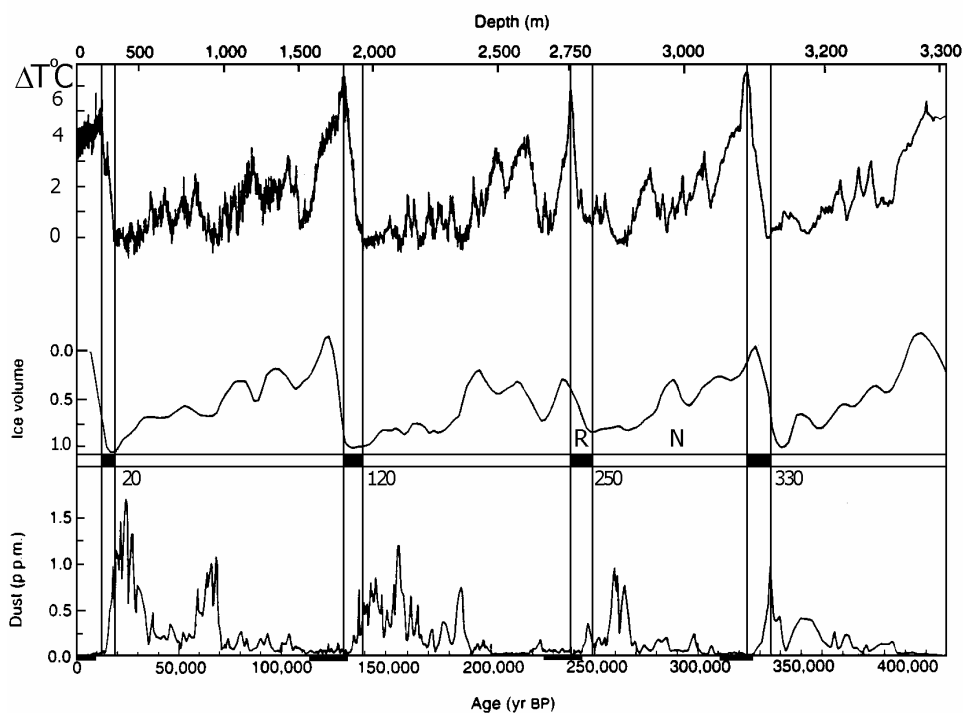


Рис. 1. Верхняя строка – относительное изменение температуры поверхности Земли. Средняя строка – относительный объем льда на Земле. Нижняя – относительная концентрация пыли [Petit, et al., 1999]. Вертикальные столбцы – экскурсы (R): Gothenburg (20); Blake (120); Jamaica (250); Biwa – II (330).

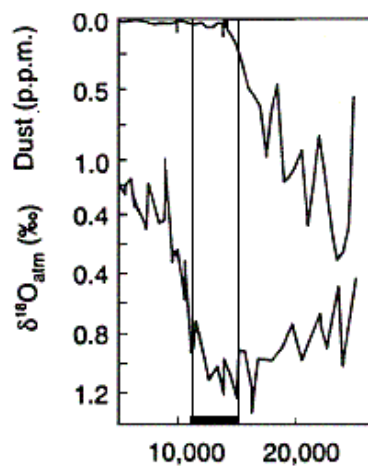


Рис. 2. а - Изменение концентрации пыли (Dust) и относительная концентрация изотопа кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) за 20 – 5 тыс. лет тому назад [Petit, et al., 1999]. Черная строчка внизу – экскурс Gothenburg. Температура поверхности ледника оценивается по изотопному составу кислорода $\delta^{18}\text{O}$. Убывание параметра $\delta^{18}\text{O}$ соответствует возрастанию температуры T.

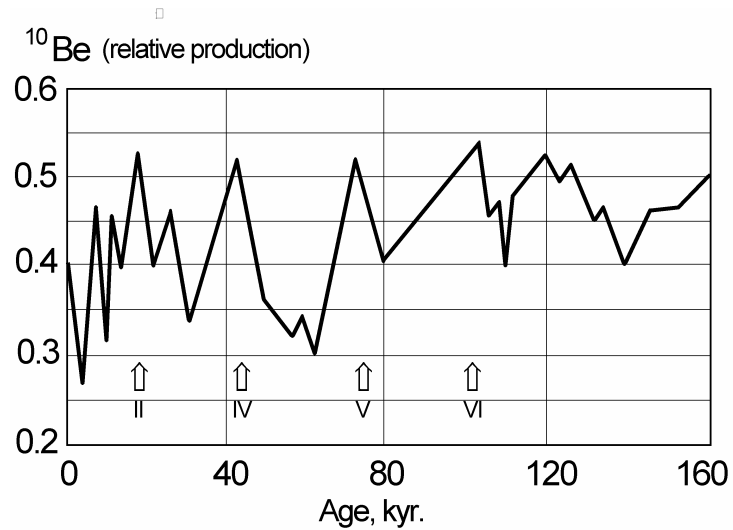


Рис. 3. Изменение концентрации изотопа ^{10}Be в осадочных породах в течение последних 160 тыс. лет. Стрелками показаны экскурсы (цифры соответствуют номерам экскурсов в Таблице).

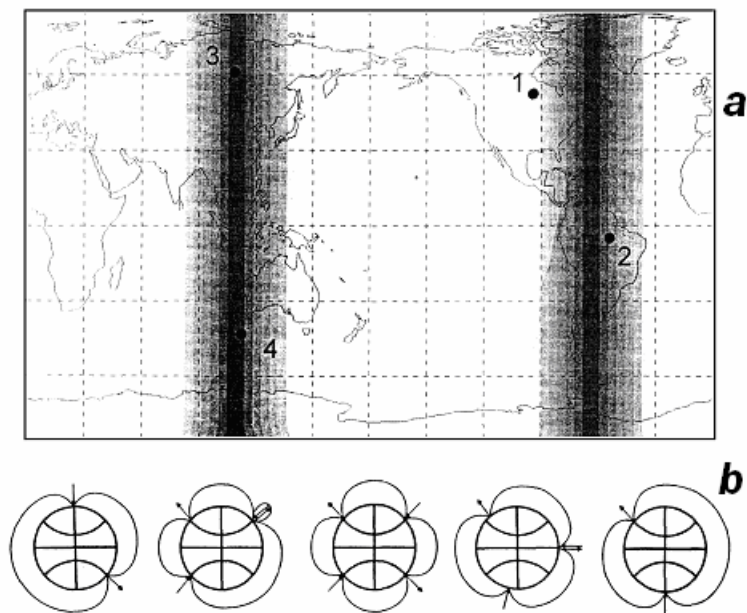


Рис. 4. Трассы дрейфа магнитных полюсов в периоды инверсий. Цифры – глобальные магнитные аномалии (а). Движение полюсов в течение периода инверсии (экскурса). Разнонаправленные полюса в одной точке (аннигиляция полюсов) соответствуют локальному отсутствию магнитного поля [Kuznetsov, 1999] (б).

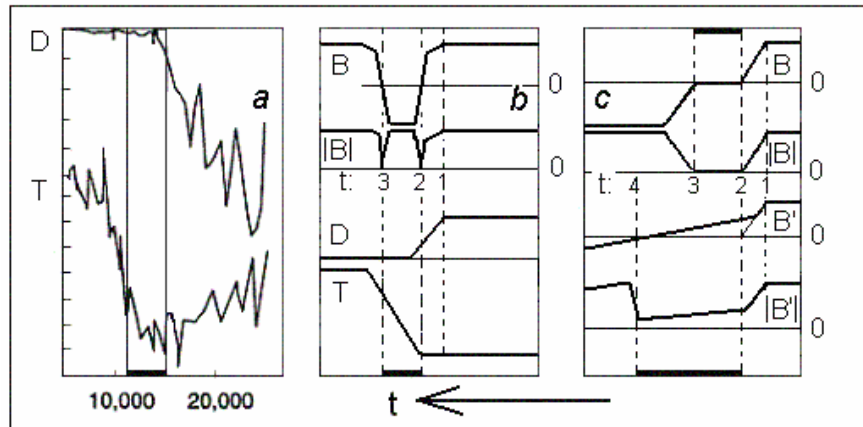


Рис.5. а - Изменение концентрации пыли D и температура T за 20 – 5 тыс. лет тому назад [Petit, et al., 1999]. Черная строчка внизу – экскурс Gothenburg. **б** – Изменение напряженности геомагнитного поля (B) в момент экскурса, модуля поля $|B|$, концентрации пыли D и температуры поверхности Земли T . Время t_1 – начало уменьшения напряженности; t_2 – начало экскурса; t_3 – окончание экскурса. **с** – Изменение напряженности геомагнитного поля в период инверсии B , модуля поля $|B|$ при отсутствии влияния ГМА, изменение напряженности B' и модуля $|B'|$ в период инверсии при наличии глобальной магнитной аномалии. Время t_1 – начало уменьшения напряженности; t_2 – начало инверсии; t_3 – окончание инверсии (нет влияния ГМА); t_4 – окончание инверсии (влияние ГМА).

Таблица

| N\Эк. | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | [] | | | | |
|--------------------------------|-----|---|-----|-------|-------|------------|---------|-------------------|------------|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| 1 GMF | 2.8 | 20 12.3 | 25 | 43 | | 130 | 200 | 220 | 320 | 360 | 1 | | | | |
| | | | 22 | 45 | 70 | 115 | 185 | | | 298 | 380 | 2 | | | |
| | | | | 38.6 | 65 | 132 | 200 | | | 232 | 325 | 360 | 3 | | |
| | | | | 25 | | | | | | | | | | 4 | |
| | | | | 28 | | 41 | 65 | | | | | | | 5 | |
| | | | | 30 | | | 60 | | | | | | | 6 | |
| | | | | | | | 60 | | | 115 | | | | 7 | |
| | | | | | | | 60 | | | 114 | | | | 8 | |
| | | | | | 24 | 42 | 65 | | | 117 | 187 | | 272 | 386 | 9 |
| | | | | 13 | 30 | | 65 | | | 110 | 180 | | 295 | | 10 |
| | | | | | 27 | 42 | 62 | | | 115 | 190 | | 290 | 385 | 11 |
| 2 ¹⁰ Be max | | 20 | 25 | 40 | 70 | 120 | 180-192 | 220 | | | 12 | | | | |
| | | | | 30-42 | 60-75 | 85-110 | | | | | 13 | | | | |
| | | | | 40 | | | | | | | 14 | | | | |
| 3 Dust min | | 20 12 17 | | 40 | 60 | 150 | | 260 250 | 340 | 400 | 15 | | | | |
| | | | | | | 130 | | | | 16 | | | | | |
| | | | | | | | | | | 17 | | | | | |
| 4 ΔT° incr. | 2.8 | 12 12 15 15 20 20 15 10 12 | | 40 | | 130 | 200 | 240 | 330 | 400 | 18 | | | | |
| | | | | | | 140 | 220 | | | 280 | 330 | 390 | 19 | | |
| | | | | | | 130 | 215 | | | 250 | | | 20 | | |
| | | | | | | 130 | | | | | | | 21 | | |
| | | | | | | 140 | | | | | | | 22 | | |
| | | | | | | 140 | | | | | 190 | 230 | 23, | | |
| | | | | | | 130 | | | | | | | 24 | | |
| | | | | | | | | | | | | | 25 | | |
| | | | | | | 38 | | | | 38 | | | 26 | | |
| | | | | | | 38 | | | | 70 | 120 | | 27 | | |

Экскурсы: Etrussia (I); Gothenburg (II); Mono Lake (III); Laschamp (IV); Kargopolovo (V), Blake (VI); Biwa – I (VII); Jamaica (VIII); Biwa – II (IX); Biwa – III (X).

Литература: 1 - (Petrova, Pospelova, 1990); 2 – (Jacobs, 1994); 3 – (Holt, Kirschvink, 1996); 4 – (Liddicoat, Coe, 1979); 5 – (Kent, et al., 2002); 6 - (Bohnel, Molina-Garza, 2002); 7 – (Wollin, et al., 1971; Tric, et al., 1991; Creer, et al., 1990); 8 - (Wollin, et al., 1978); 9 - (Worm, 1997); 10 - (Rampino, 1979); 11 - (Мёрнер и др., 2001); 12 - (Aldaham, Possnert, 2003); 13 - (Frank, et al., 1997); 14 - (Robinson, et al., 1995); 15 - (Petit, et al., 1999); 16 - (Zhang, et al., 2002); 17 - (Rothlisberger et al., 2002); 18 - (Архипов и др., 2000); 19 - (Petit, et al., 1999); 20 - (Vimeux, et al., 2002); 21 - (Zhang, et al., 2002); 22 - (Bard, 2002); 23 - (Cuffey, Vimeux, 2001; Vimeux, et al., 1999); 24 - (Imbrie, Imbrie, 1980); 25 - (Schulz, et al., 1998); 26 - (Rothlisberger et al., 2002); 27 - (Прокопенко и др., 2003)