

## Лекция 19. НОВАЯ МОДЕЛЬ КЛИМАТА

В 19-лекции предложена принципиально новая модель климата. Показана роль вариаций геомагнитного поля, делается предположение, что климат самоорганизующаяся фрактальная структура, которую также можно представить как фликкер-шум.

### Новая модель, роль вулканизма и геомагнитных вариаций

В течение последних 400 тыс. лет на Земле произошли четыре глобальных похолодания с периодичностью, примерно, в 100 тыс. лет. Последнее похолодание (ледниковый период) сменилось резким потеплением около 12 тыс. лет тому назад, что привело к быстрому таянию льда и увеличению уровня океана на 50 - 100 м. Это событие, которое, возможно, было отражено в истории как «Библейский Великий Потоп», совпадает по времени с экскурсом Гетеборг. Резкое и сильное потепление, случившееся, примерно 115 – 130 тыс. лет тому назад, так же совпадает по времени с экскурсом Блейк. И двум другим резким потеплениям, произошедшим в течение последних 400 тыс. лет, так же предшествовали экскурсии Ямайка и Бива II (рис. 1). Общность этих событий такова, что после резкого потепления всегда наступало похолодание. Кроме обсуждаемых нами четырех интенсивных потеплений, можно отметить и другие, не такие резкие и сильные. Но и они, как правило, совпадают по времени с экскурсами геомагнитного поля Лашамп, Моно Лайк, и др. Связь климатических изменений с экскурсами подтверждается изучением самого последнего экскурса, когда авторы зафиксировали смену фазы климата во время экскурса Этруссия 2.8 тыс. лет назад. Можно привести и другие примеры отмеченной связи экскурсов с глобальными потеплениями, однако заметим, что не во всех случаях наблюдается синхронность экскурсов и потеплений. Например, авторы рассматривают не только эффекты потепления, но и похолодания, приуроченные к экскурсам и инверсиям.

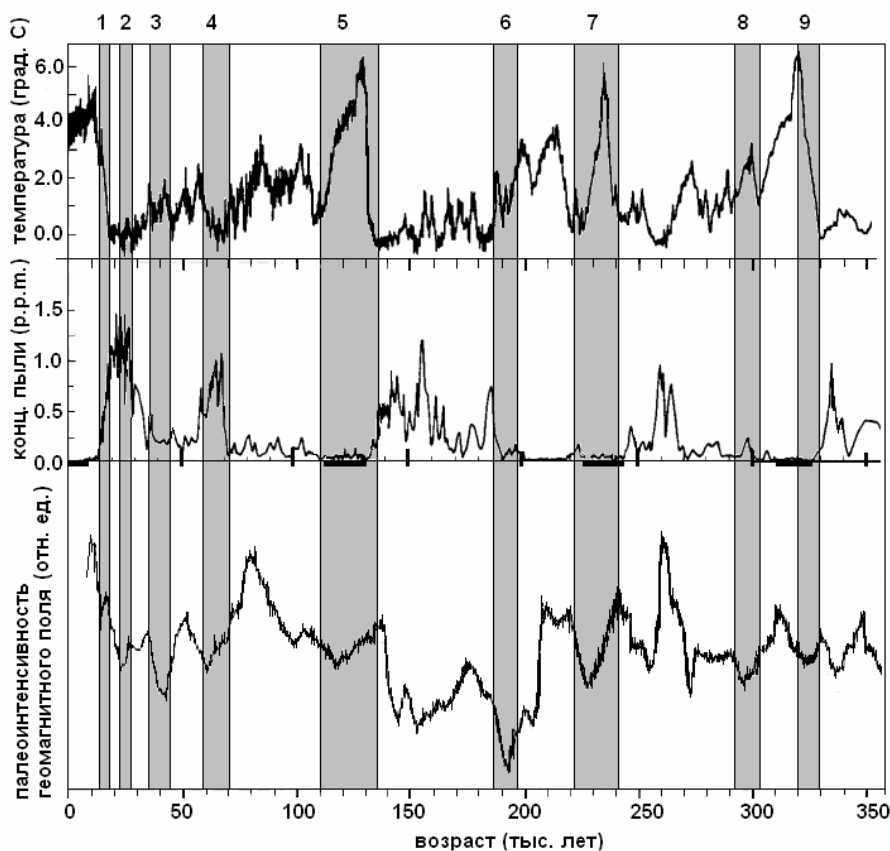


Рис. 1. Изменение температуры поверхности Земли и относительной концентрации пыли во льду [1]. Нижняя строка – палеоинтенсивность геомагнитного поля. Полосы –

понижение геомагнитного поля в периоды экскурсов (слева направо): Gothenburg (1); Mono Lake (2); Laschamp (3); Kargopolovo (4); Blake (5); Biwa – I (6); Jamaica (7); Biwa – II (9). Понижение поля 300 тыс. лет (8) с экскурсом не идентифицировано. Экскурс Kargopolovo (Event Gaotai).

При анализе кернов льда, полученных при бурении ледника Антарктиды в районе станции Восток, авторы обнаружили, что в течение последних 420 тыс. лет резкое уменьшение концентрации пылевых частиц во льду наблюдалось, соответственно, 20, 120, 250 и 330 тыс. лет тому назад, совпадая по времени и с потеплениями, и с экскурсами. По всей видимости, именно в эти периоды, когда происходили обсуждаемые нами совсем не случайные совпадения, на Земле происходили глобальные климатические катастрофы.

Принято считать, что пыль, вмороженная в лед, это осевший стратосферный аэрозоль (СА), образующихся в результате взрывных извержений вулканов. На рис. 1 черными полосками под кривой временного изменения содержания пыли в слоях льда выделены периоды времени, предшествующие началу появления пыли, что, по-видимому, связано с началом активного вулканизма. Продолжительность выделенных интервалов времени составляет около 10 тыс. лет. Как видно из рисунка 1, в течение последних, примерно, 10 тыс. лет, в стратосфере Земли пыли практически нет, тогда как, в течение предшествующих 60 тыс. лет, концентрация пыли во льду достигала одного и более р.р.м. ( $10^{-6}$ ).

Одно из самых сильных вулканических извержений, произошедших на Земле, это извержение вулкана Тоба (VEI = 8), которое произошло 74 тыс. лет тому назад (VEI - Volcanic Explosivity Index, индекс взрывного вулканизма, его максимальное значение равно 8). При этом в стратосферу было выброшено, по разным оценкам, от 500 до 5000 млн. тонн аэрозолей (см. рис. 2). Судя по рис 1, концентрация пыли, вмороженной в лед, достигала в этот период времени 1 р.р.м. После этого извержения наличие пыли в стратосфере отмечалось практически непрерывно в течение 60 тыс. лет, возрастая после очередного сильного извержения и уменьшаясь в промежутках между ними (см. рис. 1).

Роль СА вулканического происхождения (вулканической пыли) в изменении климата, в частности – похолодании, - хорошо изучена; это т.н. «вулканическая зима». Величина понижения температуры поверхности Земли после сильных эксплозивных извержений современных вулканов оценена (рис. 2). Извержение вулкана Тамбора (Индонезия) самое сильное (VEI = 7) из произошедших за последние 200 – 300 лет. После этого извержения (1815) в течение 2-3 лет концентрация пыли во льду Гренландии достигала 94 р.р.б. ( $1 \text{ р.р.б.} = 10^{-9}$ ).

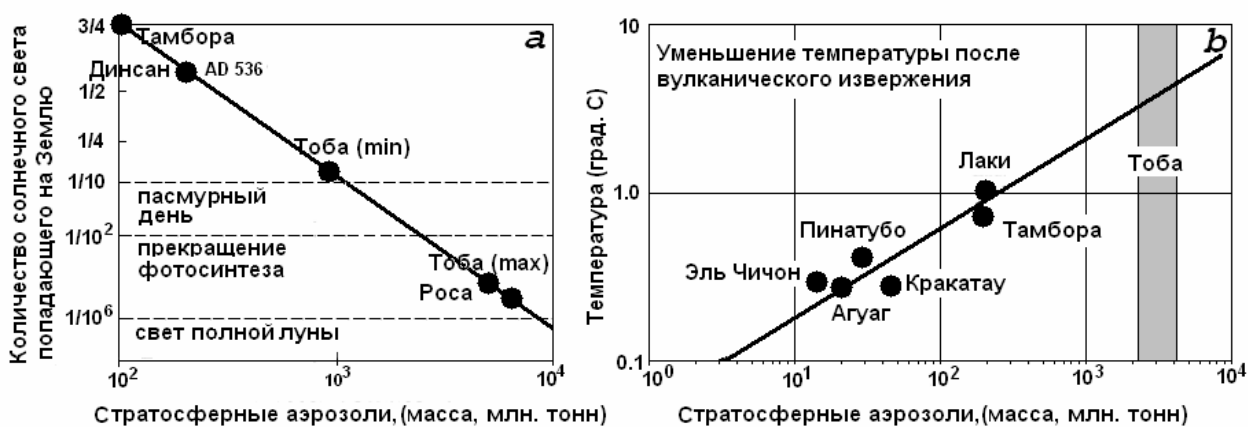


Рис. 2. а - экранирование солнечного света СА эксплозивных вулканических извержений. Нижняя шкала: масса аэрозоля, выброшенного в стратосферу, при извержении. Шкала слева: количество солнечного света попадающего на Землю.

b- понижение температуры поверхности Земли после вулканического извержения, в зависимости от массы аэрозоля.

Оценим концентрацию вулканических аэрозолей в стратосфере, учитывая, что они занимают не весь объем атмосферы, а сосредоточены в слое толщиной, порядка, 1 км на высоте около 20 км. Для начала сделаем общую оценку концентрации пыли. Масса атмосферы, как известно,  $\approx 5 \cdot 10^{15}$  тонн, масса СА может достигать, как при извержении Тоба, значения  $5 \cdot 10^9$  тонн, объемная концентрация аэрозолей  $10^{-6} = 1$  р.р.м. Эта величина, по данным рис. 1, соответствует концентрации пыли в слое льда, образовавшегося в период времени извержения Тоба. Казалось бы, мы получили соответствие величин концентраций, однако, учитывая то, что аэрозоль находится в сравнительно тонком слое, объемная концентрация аэрозолей в этом слое должна быть значительно выше.

Поверхностная плотность пыли, от которой зависит пропускание солнечного излучения к поверхности Земли, не зависит от того, расположены пылинки в тонком слое или по всему объему атмосферы. Если площадь поверхности Земли равна  $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^2$ , то поверхностная плотность пыли в случае извержения вулкана Тоба составляет около  $10^{-3} \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ . Попытаемся оценить этот параметр по характеристикам льда. Отметим, что в кернах льда пыль распределена неравномерно. Характерное время нарастания концентрации пыли от извержения Тоба (см. рис.2) составляет 1 – 2 тыс. лет. Средняя скорость образования льда равна, примерно, 1,5 см в год, и толщина льда, образовавшегося в период накопления пыли от извержения вулкана Тоба, достигает, примерно, 20 м, что соответствует поверхностной плотности пыли во льду  $\sim 10^{-3} \text{ г} / \text{см}^2$ . Полагая, что пыль была сосредоточена в слое атмосферы толщиной 1 км, расположенным на высоте 20 км, и если масса пылинки равна  $10^{-14} \text{ г}$ , то концентрация пыли в этом слое достигала  $10^6 \text{ см}^{-3}$ . Поскольку плотность воздуха на такой высоте составляет, примерно,  $10^{-4} \text{ г} / \text{см}^3$ , то получим реальную концентрацию пыли в таком слое, равную 100 р.р.м. Таким образом, концентрация пылевого аэрозоля в слое атмосферы может на два порядка превышать концентрацию, регистрируемую во льду и осадках. Поскольку поверхностная плотность пыли составляет  $10^{-3} \text{ г} / \text{см}^2$ , то при плотности вещества в конденсированном состоянии, равной, примерно,  $1 \text{ г} / \text{см}^3$  толщина слоя этого вещества будет равна 10 мкм.

Оценим скорость убывания концентрации стратосферной пыли  $dN/dt$  (рис. 3). Предположим, что убывание пыли связано с воздействием на неё потока заряженных частиц космических лучей, плотность которого значительно возрастает в моменты экскурсов и инверсий, когда исчезает экранирующий эффект геомагнитного поля, а при разрушении радиационных поясов, - в верхнюю атмосферу высыпается огромное количество релятивистских протонов и электронов. Плотность потока заряженных частиц при этом на стратосферных высотах может возрастать на 4 – 6 порядков.

Рисунок 3 показывает, что плотность пыли ( $N = 1000$  р.р.б.) в моменты экскурсов, уменьшается до нуля за время  $t = 10$  тыс. лет. Но тогда время убывания пыли с начальной концентрацией  $N = 100$  р.р.б. должно было бы составлять  $t = 1$  тыс. лет. Однако, как известно, пылевой слой после извержения вулкана Тамбора ( $N = 94$  р.р.б.) исчез в течение  $t \approx 4$  лет после извержения, т.е. значительно быстрее, чем это происходило в ранние периоды времени (рис.1). Отсюда следует, что наклоны линейной зависимости между  $N$  и  $t$  – оказываются различными для отдельных вулканических извержений и общей пылевой обстановки в атмосфере Земли в течение нескольких сотен тысяч лет вплоть до момента времени 10 - 12 тыс. лет тому назад, когда атмосфера Земли стала прозрачной. Возможная причина различий в продолжительности времени просветления состоит в том, что СА, образующийся в результате отдельных вулканических извержений, даже таких сильных как Тамбора, был сернокислым. В то время как при извержениях супервулканов, таких как Тоба, образуется большое количество мелкодисперсной минеральной вулканической пыли, способной существовать в стратосфере десятки тысяч лет. По оценкам, количество

такой пыли достигало 0,8% в веществе извержения при общем количестве пыли, равном почти  $2 \cdot 10^{10}$  тонн, то есть около  $2 \cdot 10^8$  тонн.

На рис.3 показана скорость убывания концентрации пыли  $dN/dt$ . На вставке 3-в параметр  $dN/dt$  равен 30, тогда как этот же параметр, рассчитанный по наклону различных частей кривой 3-а, равен 0,1 (р.р.м./тыс. лет). Как видно, в обоих случаях наблюдается линейная зависимость  $dN/dt$  от  $t$ . Следуя нашей модели, убывание концентрации пылинок ( $dN/dt$ ) обязано взаимодействию их с частицами космических лучей (или производимыми ими частицами, например, водными кластерами) с концентрацией  $n$ . Процесс убывания СА можно описать:  $dN/dt = \gamma Nn$ , где параметр  $\gamma$  – показывает скорость изменения размера пылинки, причем, как следует из рис. 3-с, он меняет свою величину:  $\gamma \approx 1/nt$ .

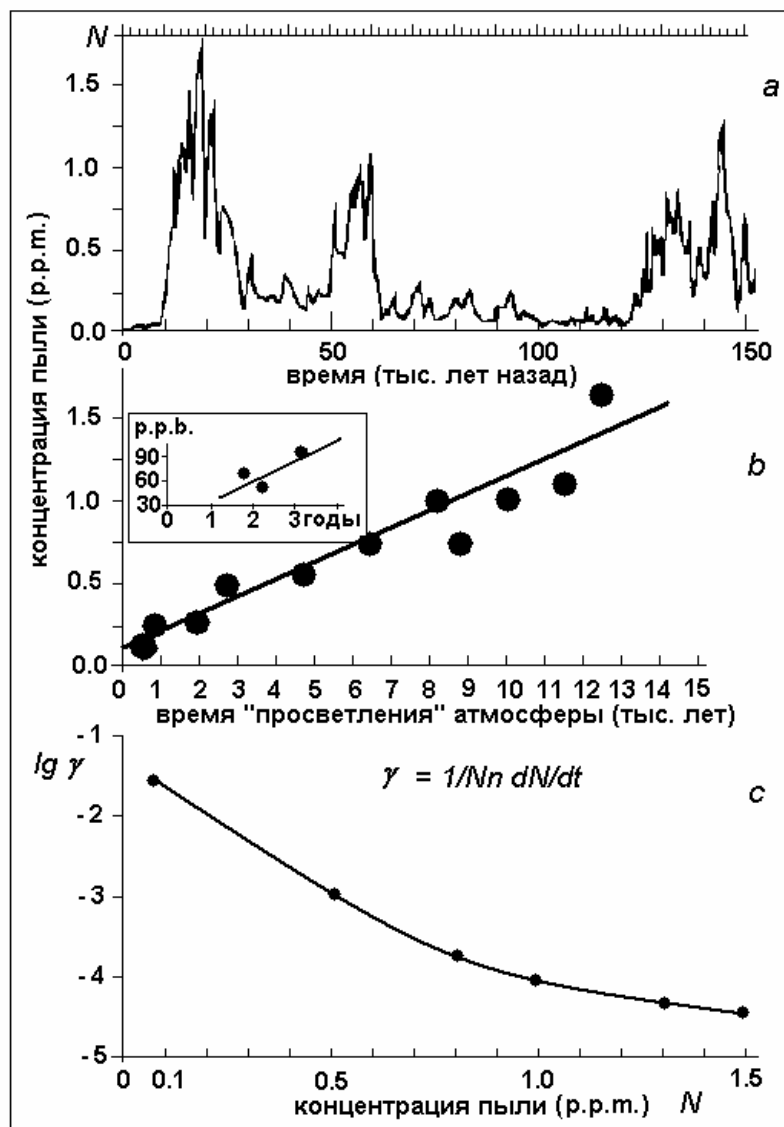


Рис. 3. Концентрация пыли (р.р.м.) во льду – а; время убывания пыли (время просветления атмосферы) в зависимости от её начальной концентрации – б; параметр убывания  $\gamma$  – в зависимости от начальной концентрации пыли – с.

Рассмотрим два возможных механизма изменения размера пылинки. Во-первых, это её испарение, т.е. физическое уничтожение, под воздействием прямого теплового воздействия на пылинку излучения Солнца или космических лучей. Сюда можно отнести и механизм измельчения, деструкции пылинки быстрыми частицами. Во-вторых, пылинку можно удалить за счет увеличения её размера при адсорбции пылинкой находящейся в атмосфере водных кластеров и быстрого гравитационного осаждения её на поверхность

Земли. То же самое произойдет в процессе роста капель воды и адсорбции на них пылинок, или, иначе, при образовании своеобразного «стратосферного дождя».

Рост капель в стратосфере происходит путем конденсации паров воды на ядрах конденсации, в качестве которых могут выступать ионы, образующиеся в результате поступления в стратосферу дополнительного, в периоды экскурсов и инверсий, потока заряженных частиц. Отметим, что этот же механизм, но в отсутствие пыли, будет приводить к росту концентрации СА и, связанному с этим явлением, - поглощению солнечного излучения и уменьшению альбеда Земли, то есть похолоданию.

Приведены теоретические и экспериментальные оценки, показывающие, что СА при вулканических извержениях могут значительно менять альбеда Земли ( $\alpha$ ):

$$\Delta\alpha/\tau = -4(1 - \omega)\alpha + 2\omega\eta(1 - \alpha)^2,$$

где  $\eta = \int \eta(\mu) d\mu$  - средний коэффициент трансформации для диффузионного излучения,  $\tau$  - оптическая толщина слоя СА,  $\omega$  - вероятность выживания фотона,  $\mu = \cos\theta$ , где  $\theta$  - угол между излучением и поверхностью Земли. Из формулы видно, что наличие СА может, как увеличивать, так и уменьшать глобально осредненное альбеда Земли. При:

$$(1 - \alpha)^2/2\alpha > (1 - \omega)/\omega\eta$$

- альбеда Земли возрастает. Например, при концентрации СА:  $N = 10^4 \text{ см}^{-3}$  и объемной концентрации  $\rho = 160 \text{ мкм}^3/\text{см}^3$  для солнечного излучения в интервале длин волн от 0.2 до 2 мкм, для пылинки с радиусом  $r \approx 0.25 \text{ мкм}$ , величина  $\alpha = 100 \%$ . Если концентрация пыли (СА) будет порядка (или больше)  $N = 10^4 \text{ см}^{-3}$ , а радиус пылинок не менее 0.25 мкм, то поверхность Земли будет экранирована от солнечного тепла практически полностью.

Таким образом, меняя толщину слоя СА и его размер (параметры  $\omega$ ,  $\eta$ ), можно менять альбеда, что будет приводить либо к охлаждению, либо к нагреву поверхности Земли солнечным излучением. Показано, что после вулканического извержения, при высокой изначально концентрации пыли, 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. более чем на 1 градус.

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 капель 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  $10^2 \text{ см}^{-3}$  (кривая 2) и  $10^3 \text{ см}^{-3}$  (кривая 3) представлены на рис. 7. 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  $N = 10^7 \text{ см}^{-3}$ .

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 водный 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  $\approx 1 \text{ р.р.т}$ . При этом слой аэрозолей толщиной 1 км будет экранировать примерно половину солнечного излучения. Для концентрации  $\approx 10 \text{ р.р.т}$ . слой аэрозоля с радиусом  $r = 0.1 \text{ мкм}$  будет экранировать уже 90 % солнечной

энергии. При этом, как следует из рисунка 2, поверхность Земли будет освещена, как в пасмурный день. Если экранирование достигнет 99 % ( $W = 1\%$ ), то, в соответствии с тем же рис. 2, на Земле может прекратиться фотосинтез. При этом концентрация аэрозолей радиусом  $r = 0.1$  мкм должна быть  $N \approx 10^7$  см<sup>-3</sup>, а концентрация пыли в керне льда:  $\geq 1000$  р.р.в.

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

Заряженные частицы с энергией в сотню МэВ, могут разрушить (диспергировать) СА до такой степени, что слой окажется прозрачным для солнечного света. Известны данные по корреляции сигналов нейтронного монитора и концентрации стратосферного аэрозоля на высоте 26.5 км, причем, уменьшение интенсивности потока ГКЛ на 25 % от начального значения соответствует возрастанию концентрации аэрозоля почти на три порядка. Воспользуемся данными по испарению слоя лития толщиной 100 мкм пучком протонов с плотностью  $\approx 0.1$  мА/см<sup>2</sup>, энергией 2 МэВ и скоростью  $4 \cdot 10^{-14}$  см с<sup>-1</sup>. Время испарения слоя лития, по оценке авторов, может достигать 3 тыс. лет.

Поток протонов ГКЛ с энергией  $\approx 1$  МэВ плотностью  $10^{-1} - 10^{-2}$  (см<sup>2</sup>·с·ср·МэВ)<sup>-1</sup> соответствует, на высоте 30 км, плотности тока  $\approx 10^{-16} - 10^{-15}$  мА/см<sup>2</sup>, что на 15 порядков меньше плотности тока испарения слоя лития. Оценка показывает, что просветление атмосферы путем испарения СА - не реально. Дробление пылинок на мелкие части тоже не даст результата, т.к. массовая концентрация остается прежней, а уменьшение размера пылинки  $r$  автоматически приводит к росту  $N$ .

Оценим возможность очищения атмосферы от пыли за счет укрупнения микрочастиц пыли при коагуляции микрокапель воды с образованием большой капли и её гравитационного осаждения на поверхность Земли. Модель может состоять также в том, что вырастает капля, которая захватывает пылинку и падает на Землю. Необходимым условием реализации этого механизма очищения является наличие довольно большого количества микрокапель воды – водных кластеров, способных адсорбироваться частичкой пыли или друг другом, что потребует ввода в стратосферу требуемого числа ядер конденсации (ЯК). В качестве ЯК могут выступать ионы, образующиеся при проникновении в стратосферу дополнительного потока солнечных и галактических космических лучей, а так же частиц радиационных поясов.

Для оценки параметров модели примем высоту слоя СА  $h = 30$  км и предположим, что скорость оседания аэрозоля из стратосферного слоя на Землю определяется законом Стокса:  $v_c \approx mg/6\pi\eta r$ , где  $m$  – масса капли,  $\eta$  – вязкость воздуха, или, после подстановки:  $v_c$  (м/с)  $\approx kr^2$  ( $r$  – размер аэрозоля, мкм;  $k = 10^{-2}$ ). Время оседания (т.е. время удержания СА в слое, без учета восходящих потоков и горизонтальных переносов - ветров):  $t$  (годы) =  $k/r^2$ . Если предположить, что время нахождения (удержания) аэрозоля в слое составляет 1 – 10 тыс. лет, то условный размер пылинки:  $r \approx 0.0003 - 0.001$  мкм (30 – 100 Å). Для того чтобы капля ( $r \approx 1000$  Å), образовавшаяся при адсорбции такой пылинкой водных кластеров размером  $r_0 \approx 10$  Å, опустилась на Землю за время порядка 10 лет, необходимо присоединить к исходной пылинке, примерно, миллион кластеров ( $g \approx 10^6$ ). Пусть  $N$  концентрация пылинок и выросших на них капель, а  $n$  – концентрация водных кластеров, образовавшихся на ЯК. Очевидно, что  $n \approx gN$ , причем концентрация кластеров  $n$  должна быть равна минимальной концентрации заряженных частиц, вносимых в стратосферный слой при увеличении потока ГКЛ в период инверсий и экскурсов. Очевидно так же то, что концентрация молекул воды  $an$  ( $a$  – количество молекул воды в одном кластере) должна быть больше концентрации паров воды на стратосферных высотах. Заметим, что это условие в интервалах величин концентраций  $n$  всегда выполняется.

Оценим время формирования капли, для чего воспользуемся моделью коагуляции, т.е. роста капли при адсорбции водяных кластеров. Время столкновения частицы водного пара с ЯК определяется формулой  $t = (\sigma n p)^{-1}$ , где  $\sigma = \pi r^2$  - сечение “капли”,  $n = \rho/m$  - концентрация частиц в атмосфере на соответствующей высоте,  $m$  - масса частицы,  $p$  - её скорость,  $r = (V_k)^{1/3}$  - радиус капли,  $V_k = V_c g$  - объем капли,  $V_c$  - объем частицы,  $g$  - число частиц в капле.

Время роста капли:  $t = \int dg / \sigma n p$ , т.к.  $\sigma = \pi (V_c g)^{2/3}$ , то  $t = g^{1/3} / (V_c^{2/3} n p)$ , или  $t \approx r / (V_c n p)$ . Подставляя значение  $t$  в формулу  $\gamma$ , получаем:  $\gamma = 1/nt = V_c p / r$ . Зависимость демонстрирует, что по мере увеличения размера капли  $r$ , скорость её роста уменьшается. Скорость роста капли пропорциональна объему водного кластера и скорости его дрейфа. Покажем, что время роста капли  $t$  определяет скорость очищения атмосферы от пыли.

Обозначим время роста капли через  $t_1$ , время оседания капли с высоты  $h$  на Землю со стоксовой скоростью -  $t_2$ . Время образования капли радиусом  $r$  ( $t_1 \sim r$ ) обычно больше времени ее оседания ( $t_2 \sim 1/r^2$ ). Полагая:  $r = 1 \text{ мкм}$ ,  $h = 10^6 \text{ см}$ ,  $t_2 = 10^6 \text{ с}$ . Характерное время очищения атмосферы, при заданном размере капли  $r$  определяется параметрами  $V_c$ ,  $n$  и  $p$ . В пределе, -  $p$  не может быть больше скорости звука  $c$ , тогда:  $V_c n = r/ct$ . Поскольку  $V_c = 10^{-20} \text{ см}^3$ ,  $c = 10^4 \text{ см/с}$ ,  $r = 1 \text{ мкм}$ ,  $t = 10^6 \text{ с}$ , то  $n = 10^6 \text{ см}^{-3}$ . Очевидно, что концентрация ЯК должна быть не меньше полученной нами величины  $n$ . Уменьшение  $n$  приводит к возрастанию времени очищения атмосферы от пыли  $t$ . Как следует из [19], концентрация ЯК размером 3 нм на стратосферных высотах составляет  $\approx 10^3 \text{ см}^{-3}$ . Ядра конденсации образуются в процессе взаимодействия стационарного потока ГКЛ с атмосферой. Для образования капли размером 1 мкм с учетом того, что начальная пылинка имеет конечный ненулевой размер, необходимы, примерно,  $10^6 - 10^7$  частиц.

Оценим плотность потока заряженных частиц, образующихся в стратосфере при ионизации её частицами ГКЛ. Распределение плотности электрических зарядов по высоте атмосферы представлено в работе [20], откуда следует, что ионизация воздуха стратосферного слоя происходит под воздействием ГКЛ. Оценим величину  $dl/dt$  - скорость образования ионов, приняв величину плотности зарядов  $l = 2 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , для чего воспользуемся равенством:  $dl/dt = \alpha^* l^2$ , где  $\alpha^*$  - коэффициент рекомбинации ионов. Полагая  $\mu^+ = \mu^-$  и исходя из общепринятого значения  $\alpha^*$ , равного  $\approx 2.5 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ , получим скорость образования зарядов:  $dl/dt = 10 \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ . Полученная нами оценка соответствует плотности потока ГКЛ ( $J$ ) с энергией  $\sim 100 \text{ МэВ}$ , на высоте 20 – 30 км, где  $J \approx 10^{-4} (\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср} \cdot \text{МэВ})^{-1}$ . В моменты экскурсов и инверсий, когда эффект геомагнитного обрезания исчезает, а в поток падающих на Землю частиц добавляются протоны из разрушенного радиационного пояса с той же энергией 100 МэВ, плотность потока частиц  $dl/dt$  вырастает на 4-6 порядков и может достигать  $10^6 - 10^7 \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ , а  $n$ , соответственно, достигать  $10^6 \text{ см}^{-3}$ . Следовательно, эффект очищения стратосферы в моменты экскурсов за счет «дождя», вызываемого воздействием ГКЛ на СА, - вполне реален.

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: большого количества сильных извержений вулканов не было. По прошествии примерно 12 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.

В 1860 г. магнитные полюса прервали свой хаотический дрейф и устремились друг навстречу другу по траекториям, выделенным для дрейфа магнитных полюсов в момент инверсии. Скорость северного магнитного полюса постоянно возрастает, южный полюс наоборот, - тормозится. Возможно, это связано с тем, что ЮМП уже достаточно близко подошел к Антарктической магнитной аномалии, где он, согласно [21], 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, подобное событие уже началось, а оно, как мы отмечали, оказывает огромное влияние на климат.

### Может ли быть климат фрактальным?

Выясним принципиальный вопрос, можно ли считать климат фрактальным и, соответственно, структуру, образующую климат на Земле, - открытой самоорганизующейся структурой, или это колебательная система, изменяющаяся со временем с частотами Миланковича? Основания к первому ответу на этот вопрос, конечно, есть. Начнем с того, что пилообразный характер вариации температуры говорит о том, что такая возможность имеет место. Например, зависимость, полученная при наблюдении за высотой падения оползня в течение 20 тыс. лет наблюдений, внешне очень похожа на график, приведенный на верхней панели рис. 4. Авторы этой работы утверждают, что для объяснения характера движения оползней с проскальзыванием можно эффективно использовать идею самоорганизованной критичности. Используемое в этой работе уравнение, по сути, ничто иное, как уравнение Фоккера-Планка, описывающее поведение самоорганизующихся структур.

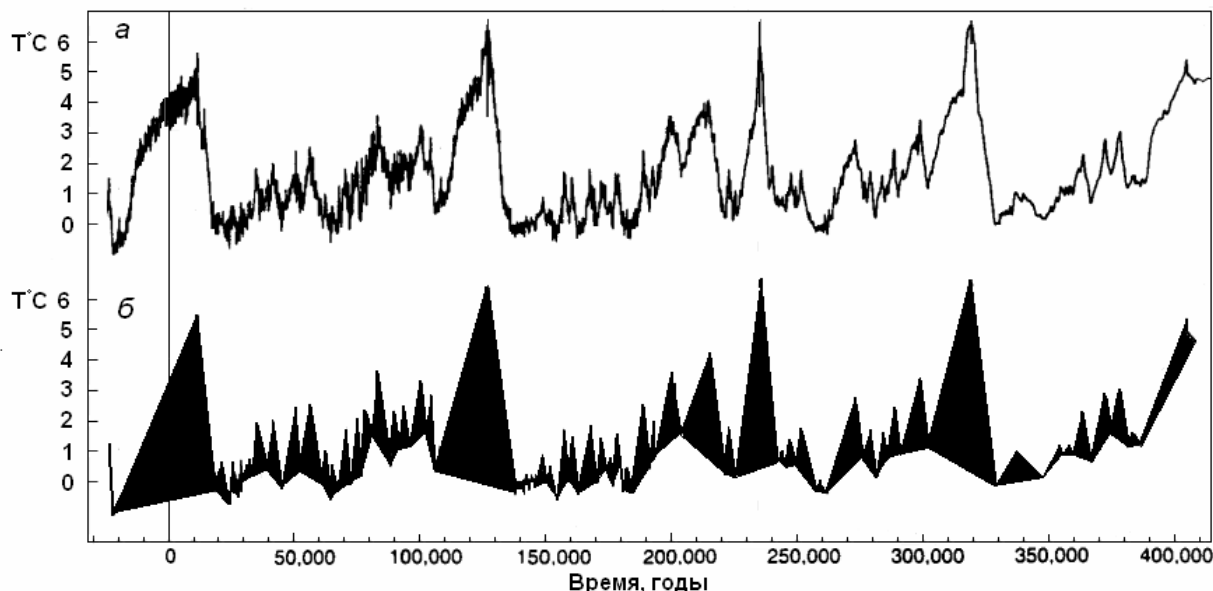


Рис. 4. Вариация температуры в течение 400 тыс. лет. Верхняя панель – по данным, нижняя – эта же кривая после преобразования.

На нижней панели рис. 2 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. 5). Наличие подобной зависимости, как принято считать, характеризует систему, способную к самоорганизации.



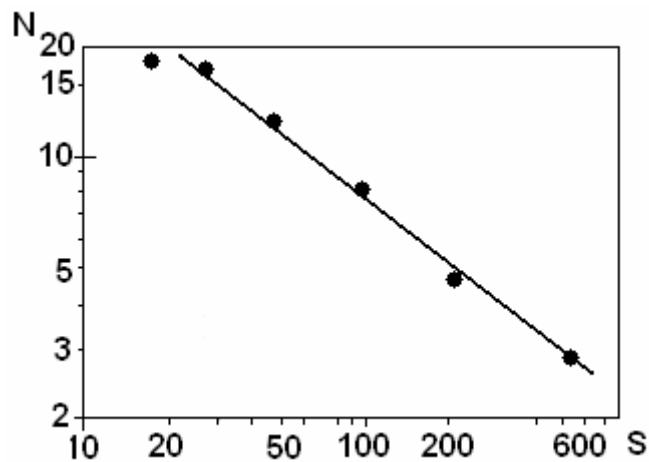


Рис. 5. График  $\lg N - \lg S$ , где  $S$  – «пик» повышения температуры (в отн. ед.),  $N$  – число пиков в интервале величин  $S$ . В течение 400 тыс. лет выделено 45 «пиков».

Анализ данных позволяет сделать фундаментальный вывод о том, что климат может быть фрактальным, по крайней мере, он был таким в течение последних 400 тыс. лет. Это означает, что климатическая структура управляется не астрономическими причинами, если вообще они играют заметную роль, а внутренними, земными причинами, например, такими как вариации геомагнитного поля и вулканизм. При этом, естественно, нельзя забывать, что любые внутренние причины вызывают только экранирование поверхности Земли от солнечного излучения, - в предположении, что само солнечное излучение остается постоянным, а орбиты планет не изменяются. Последнее условие можно считать справедливым, т.к. совсем недавно были получены доказательства удивительной стабильности во времени планетных орбит солнечной системы .

### Колебания климата – фликкер шум?

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 и 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. Однако более тщательный анализ данных показывает, что колебания климата, - это хорошо известный в природе фликкер-шум. Этот подход позволяет по-новому подойти к пониманию природы Климата и прогнозу его колебаний.

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  $f$  находится 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. Фликкер-шум обнаружен

и в tropical convective variability. Надо сказать, что, несмотря на то, что это обычное явление в Природе, физика его до сих пор так и не ясна.

Сравнение температурной кривой поверхности Земли (рис. 6-а) и спектра колебаний климата в плейстоцене (рис. 6-б) с графиком и спектром «цветного» фликкер-шума (рис. 6-в) – показывает, что климат Земли, - это «цветной» фликкер-шум. Основной период (частота) «цвета» равна приблизительно 100 тыс. лет. В течение примерно такого ( $100 \pm 20$  тыс. лет) периода времени на Земле происходило похолодание, которое, затем, сменялось резким потеплением. По-видимому, проблема климата как фликкер-шума в течение периода наблюдения порядка 1 млн. лет не может быть решена, если не будет обнаружен физически непротиворечивый механизм, согласно которому в атмосфере Земли могут происходить явления, приводящие к **экранированию солнечного излучения от поверхности Земли с периодом повторения равным, примерно, 100 тыс. лет.** Наша задача состоит в поиске возможного механизма концентрации и накопления в стратосфере слоя аэрозоля (СА).

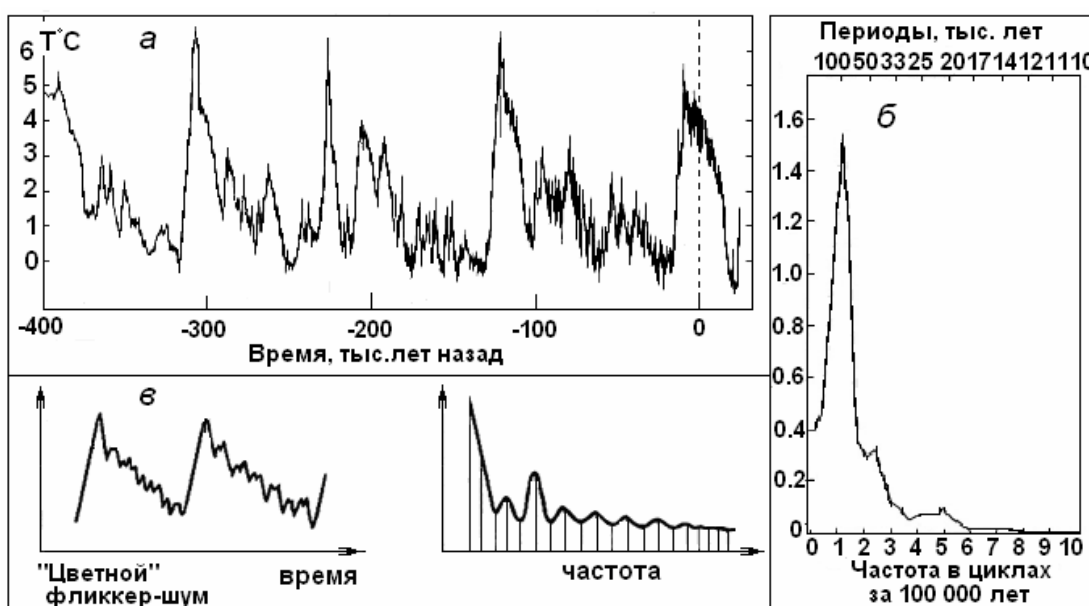


Рис. 6. Изменения температуры в «нормальной» (слева-направо) шкале времени – а; спектр колебаний климата в плейстоцене по Дж. Имбри и Н. Шеклону – б; «цветной» фликкер-шум и его спектр - в.

Оценим «время жизни» пылинки в стратосфере. Примем размер пылинки равным  $0.1 \text{ мкм}$ , её масса  $m = 10^{-15} - 10^{-14} \text{ г}$ . 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. 2). Расстояние между пылинками  $l \sim 100 \text{ мкм}$ , концентрация зарядов в стратосфере  $n_e = 10^4 \text{ см}^{-3}$ , дебаевский радиус  $d = (kT/4\pi n_e e^2)^{1/2} = 10 \text{ см}$ . 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, в которых возникает слой заряженных частиц при внесении их в газовый разряд. Частицы накапливают заряд  $Z = 1000$  и более и выстраиваются в 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 [Pkezi, 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.

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 аэрозоля толщиной 1 км с концентрацией водных аэрозольных частиц  $10^2 \text{ см}^{-3}$  (кривая 2) и  $10^3 \text{ см}^{-3}$  (кривая 3), выполненные авторами, представлены на рис.7. 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 радиусом 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  $N = 10^7 \text{ см}^{-3}$ .

Радиус  $r = 0.1$  мкм водного аэрозоля выбран нами не случайно. Аэрозоль таких размеров – наиболее устойчив. Критический размер, при котором аэрозоли начинают испаряться, был оценен (Harrison, 2001), где показано, что наиболее оптимальный размер водного аэрозоля составляет 0.13 мкм. Меньшие частицы – испаряются, частицы крупнее критического размера – растут. Эта идея подтверждается данными, приведенными в книге Ивлева и Довгалюк, где показано, что в стратосфере максимальная концентрация аэрозолей порядка  $10^4 \text{ см}^{-3}$  соответствует размеру:  $r \geq 0.1$  мкм.

Сравним полученные нами оценки с результатом Рампино и др. полученным ими по охлаждению поверхности Земли во время «вулканической зимы». Масса одной капли воды радиусом  $r = 0.1$  мкм равна, примерно,  $10^{-15}$  г. Масса одного  $\text{см}^3$  воздуха, в котором имеется аэрозоль с  $N = 10^5 \text{ см}^{-3}$ , будет составлять  $10^{-10}$  г. Плотность воздуха на высоте стратосферы равна, примерно,  $10^{-4} \text{ г/см}^3$ , и, следовательно, концентрация аэрозоля в нем составляет  $\approx 1$  р.р.м. При этом слой аэрозолей толщиной 1 км будет экранировать примерно половину солнечного излучения. (Пересечение перпендикуляра  $r = 0.1$  мкм с кривой 5). Для концентрации  $\approx 10$  р.р.м. слой аэрозоля с радиусом  $r = 0.1$  мкм будет экранировать уже 90 % солнечной энергии. При этом, как известно, 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  $r = 0.1$  мкм должна быть  $N \approx 10^7 \text{ см}^{-3}$ .

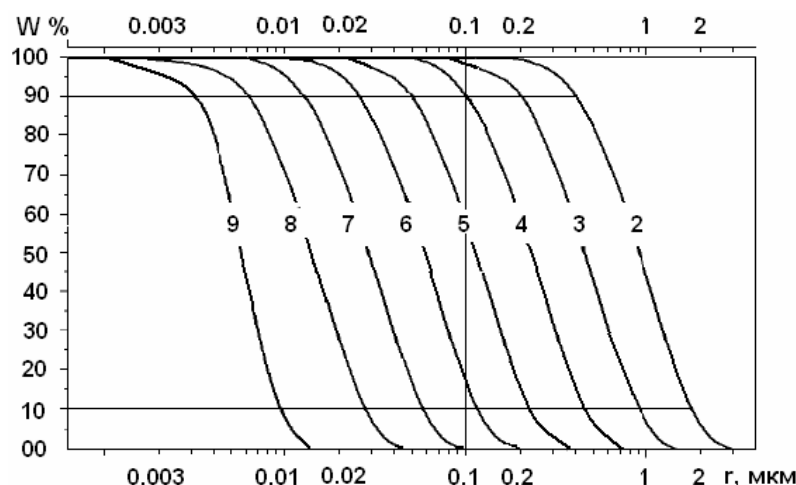


Рис. 7. Коэффициент прозрачности стратосферы  $W$  в зависимости от размера СА для слоев различной концентрации (кривая 2 соответствует  $N = 100 \text{ см}^{-3}$  и т.д.)

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:

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

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),  $c$  – **параметр дрейфа аэрозоля, который в нашем случае имеет смысл скорости переноса аэрозоля в стратосфере Земли**. Если рассматривать механизм убывания концентрации аэрозоля только за счет гравитационного опускания их частиц на поверхность Земли, то параметр  $c$  будет соответствовать скорости Стокса  $v$ :  $c \approx v$ . Фактически параметр дрейфа значительно сложнее. Сюда входит нерегулярный источник аэрозоля, механизм его переноса по стратосфере, взаимодействие с космическим излучением, и т.п. Увеличение  $T$  приводит к «просветлению» атмосферы, описываемой параметром  $F \partial T/\partial h$ , а перенос аэрозоля в атмосфере с параметром  $cT$ . Заметим, что эта формула дает только качественное описание сложных процессов, происходящих в атмосфере даже в том, упрощенном виде, когда рассматривается только заполнение стратосферы аэрозолем и последующее очищение стратосферы.

Оценим «время жизни» аэрозоля в стратосфере. Примем его размер равным 0.1 мкм, массу  $m = 10^{-15}$  г. Концентрацию аэрозоля  $n$  примем исходя из того, что его слой принятого размера полностью экранирует Землю от Солнца ( $W = 0$ ): равной  $n = 10^6 - 10^7 \text{ см}^{-3}$  (рис. 2). Расстояние между частицами  $l \sim 100$  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 частицы аэрозоля экранируется зарядами противоположного знака и становится пренебрежительно малым.** В нашем случае  $l \ll d$ , и это говорит о том, что экранирования поля частицы аэрозоля не происходит и, следовательно, она будет взаимодействовать с внешним атмосферным электрическим полем  $E$ .

Взаимодействие заряженной частицы  $eZ$  массой  $m$  в поле силы тяжести в электрическом поле  $E$ , притягивающем частицу, может привести её в состояние левитации. Выполнение очевидного условия:  $mg = eZE$ , где вертикальное атмосферное электрическое поле (АЭП) в стратосфере  $E \approx 1 \text{ В/м}$ ,  $eZ$  – заряд частицы аэрозоля,

позволяет оценить количество единичных зарядов на частице  $Z = 1000$ . Заметим, что  $Z = 1000$  единичных зарядов не является слишком огромным. Например, в лабораторных экспериментах такие величины зарядов были обнаружены на искусственных частицах, введенных в плазму газового разряда. В принципе, в природе возможна ситуация, когда заряженные частицы аэрозоля могут находиться в стратосфере бесконечно долго и способны накапливаться, образуя слои с фиксированными расстояниями между частицами. Такие структуры получили название «плазма-кристалл». Рано или поздно аэрозоли притянутся друг к другу, слипнутся и упадут на Землю. Авторы полагают, что силы притяжения между частицами возникают, когда дебаевский радиус равен расстоянию между частицами, а также, если заряды одного из знаков сосредоточены преимущественно на аэрозолях. Если частицы аэрозоля несут малую долю зарядов одного из знаков, то они отталкиваются. В рассматриваемом нами случае, возможны оба варианта в зависимости от того, насколько изменились внешние условия: увеличилась концентрация зарядов, например, за счет дополнительной ионизации космическими лучами, или уменьшилось количество зарядов на частицах – за счет рекомбинации их с положительными ионами и т.п.

Оценим время накопления аэрозолей  $t$  в слое стратосферы толщиной 1 км. По нашей модели время  $t$  должно быть порядка 100 тыс. лет. Потенциал положительно заряженной электросферы (ионосферы) относительно отрицательной Земли  $V = 300$  кВ, плотность ионного тока Земля-ионосфера  $j \approx 10^{-12}$  А/м<sup>2</sup>, полный ток  $I = jS \approx 1$  кА, иначе,  $10^3$  кулон в сек ( $S$  - площадь поверхности Земли). **Предположим, что на каждую частицу аэрозоля размером 0.1 мкм 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 заряд  $Q$  для образования такого слоя в стратосфере:  $Q = ZnhSe$ , где  $S = 5 \cdot 10^{18}$  см<sup>2</sup>,  $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$  кулона, элементарный заряд. Отсюда величина  $Q = 10^{14}$  кулон. Оценим величину атмосферного электрического тока  $i$ , необходимого для накопления необходимого электрического заряда аэрозольного слоя толщиной  $h = 1$  км, полностью экранирующего солнечное излучение. Величина такого тока  $i = Q/t \approx 30$  А, где принятое нами 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 вполне может быть связан с накоплением аэрозолей в атмосфере до полного перекрытия ими солнечного излучения.

Обсуждая проблему экранирования, вернемся 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 заряда на частице  $Z = 1000$ ? Сошлемся на серию работ по лабораторным исследованиям пылевой плазмы. Как было показано, в этих экспериментах, в плазме возникает слой заряженных частиц при внесении в газовый разряд нейтральных частиц микронных размеров. На каждой из частиц накапливается заряд  $Z = 1000$  и более. Все частицы выстраиваются в гексагональную «кристаллическую решетку» с равными расстояниями между частицами и слоями. На такой «решетке» возникает огромный заряд, но в силу экранирования его плазмой разряда, он его не искажает. Заметим, что ранее было показано, 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 ~ 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.

Серебристые облака 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 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, выстроятся в кристаллическую структуру и приобретут свойства серебристых облаков.

Выделим основные моменты предлагаемой модели: Температура на поверхности Земли определяется инсоляцией. Похолодания связаны с накоплением в стратосфере заряженного водного аэрозоля, отражающего солнечные лучи. Согласно нашей модели эволюции климата в моменты экскурсов и инверсий геомагнитное поле понижается, и в стратосферу попадают частицы космических лучей более низкой энергии, обычно отклоняемых магнитным полем Земли: галактические и солнечные космические лучи и частицы из разрушенного радиационного пояса. Всё это приводит к разрушению отражающего стратосферного аэрозольного слоя за счет слипания и укрупнения аэрозолей. Атмосфера становится прозрачной, что приводит к потеплению. Если экскурс или инверсия происходит в отсутствие слоя экранирующих солнечный свет аэрозолей в стратосфере, то космические лучи 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, космические лучи не достигают поглощаясь в верхних слоях атмосферы.**

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” предназначенных для изучения баланса поглощаемой и излучаемой Землей энергии, показано, что за период 1985-2000 гг. тепловое излучение Земли возросло более чем на  $5 \text{ Вт/м}^2$ , в то время как количество отраженной энергии солнечной радиации упало на  $2 \text{ Вт/м}^2$ . (Поток солнечной энергии, падающий на Землю составляет  $1360 \text{ Вт/м}^2$ ). Эти данные показывают, что Земля **скорее охлаждается, чем нагревается**. По-видимому, причина дисбаланса потоков тепла состоит в усилении циркуляции в тропической атмосфере. Очевидно, что в настоящее время обозначить механизм климатических перемен с полной уверенностью - ещё невозможно.

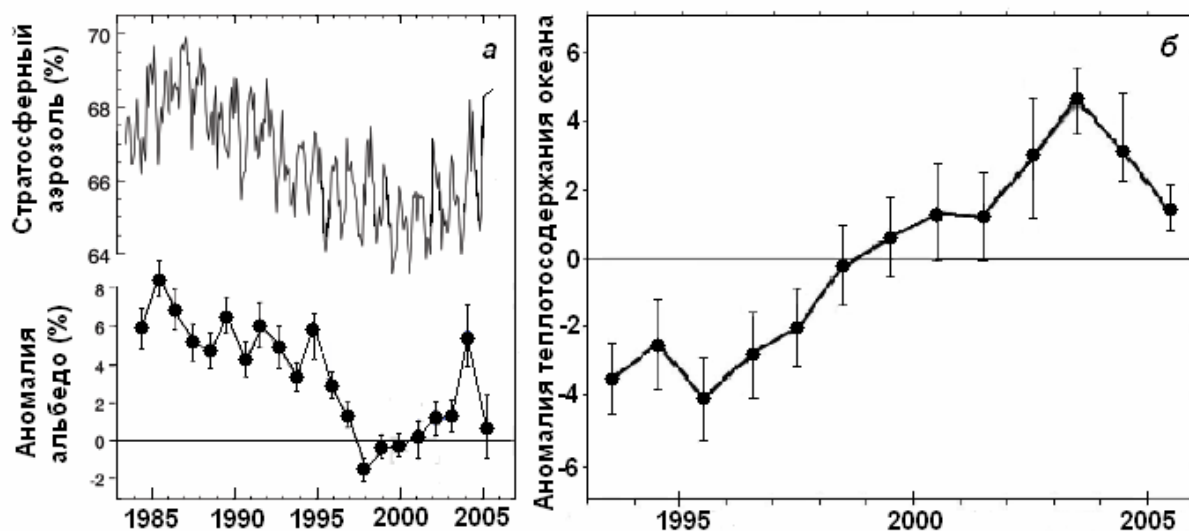


Рис. 8. Вариации концентрации стратосферного аэрозоля % и альbedo Земли (а), аномалии теплотосодержания океана (б).

Этот вывод был подкреплён исследованиями, проведенными в течение последних пяти лет (рис. 8-а). Выяснилось, что Земля все интенсивнее отражает солнечные лучи. Аналогичным образом ведет себя и теплотосодержание океана, в то время как температура Земли продолжает увеличиваться. Каким образом происходит непрерывное потепление, если количество солнечного излучения, достигающего поверхности Земли, сокращается?

Головко рассматривает наличие отрицательного тренда коротковолнового отраженного солнечного излучения как климатический сигнал, показывающий, что Земля не находится в тепловом равновесии с окружающим пространством. Когда будет исчерпана аккумулирующая способность Мирового океана, может начаться резкое изменение климата, например, - увеличение скорости потепления. По нашему мнению, из неустойчивого положения климата на Земле возможны два выхода. Первый хорошо известен, **второй рассмотрен в нашей модели. Согласно первому, температура на Земле будет продолжать повышаться. Как следует из нашей модели, в стратосфере Земли происходят процессы накопления аэрозоля, что, в конечном счете, примерно через 100 тыс. лет может вызвать глобальное похолодание. Появление перламутровых и серебристых облаков является свидетельством надвигающегося похолодания.**

### **Радиация и климат.**

Возможная связь между изменениями климата и вековыми вариациями геомагнитного поля обсуждается уже много лет. Обычно рассматривается корреляция между изменениями климата и вековыми вариациями магнитного поля Земли, инверсиями и экскурсами. При экскурсах, в отличие от инверсий, после смены полярности геомагнитное поле вскоре ее восстанавливает. Общеизвестной является связь глобальных климатических изменений с экскурсами геомагнитного поля, но выводы различны. Широко известна концепция (Christl et al., 2004), в которой космические лучи рассматриваются, как ответственные за ионизацию атомов атмосферы, и поэтому в период экскурса, сопровождающегося уменьшением интенсивности поля и, как следствие, усилением проникающего в атмосферу потока космических лучей, должно развиваться похолодание за счет интенсивного образования облаков, имеющих высокое альbedo. Согласно этой гипотезе, периоды потепления должны совпадать с минимальными потоками космических лучей, и наоборот, что и характеризует некоторые экскурсы хрона



Брюнес. Наряду с этим подтвержденными являются факты потеплений (Svensmark, 2007; Guskova et al., 2007), совпадающих с экскурсами Лашамп и Гетенбург.

Связь между инверсиями магнитного поля Земли и биологической эволюцией обсуждалась ранее. Предложенные способы влияния инверсий на эволюцию жизни включали увеличение уровня мутаций из-за повышенного уровня радиации в эти периоды и изменений климата, приводивших к вымиранию фауны. Близкое совпадение по времени оледенений с этапами быстрого массового вымирания и одновременного или последующего расцвета различных групп организмов обсуждается в работе (Салоп, 1977), где эффективная мутагенная жесткая радиация от вспышек Сверхновых рассматривается, как непереносимое условие эволюции. Автор (Tsacas, 1984) считал, что инверсии и экскурсы приводят к мутациям регуляторных генов, чем объясняется отсутствие переходных форм, в то же время многие виды исчезают из-за усиления генетической нагрузки и экстремальных условий окружающей среды. Многие авторы обнаруживают временную корреляцию резких изменений климата с революционными событиями в эволюции фауны и человека, принимая, что климатические потепления и похолодания вызывали исчезновение одних видов и способствовали появлению новых, лучше адаптированных. Однако стресс от изменений в окружающей среде не дает механизма, согласно которому он мог бы оказывать селективное давление на предка человека, существующего в то время, и приводить к появлению нового семейства или вида (Behrensmeier, 2006). До настоящего времени утверждалось, что достаточное экранирование от космического излучения, как первичного, так и вторичного обеспечивает атмосфера, и, если бы даже вся Земля подверглась воздействию такого же потока космических лучей, как её высокоширотная область, биологический эффект был бы незначительным. Однако авторы работы (Белишева, Гак, 2002) представили экспериментальные данные, свидетельствующие о значении вариаций космических лучей для состояния биосистем. Исследования проводились в приполярной области, где минимальная величина горизонтальной компоненты геомагнитного поля не противодействует проникновению космического излучения в атмосферу, и во время интенсивной вспышечной активности Солнца у поверхности Земли резко увеличивается радиационный уровень, по разным событиям величина увеличения достигает нескольких порядков (Grießmeier et al., 2005). Экспериментами на клеточных культурах была показана сопряженность феномена массового слияния клеток с вариациями космических лучей, и авторы делают вывод, что возрастание потока космических лучей может радикально менять свойства живых объектов, инициируя в них процессы реорганизации генетического материала, что, по мнению авторов, может иметь отношение к механизмам эволюции. Оценкой связи плотности атмосферы с величиной уровня радиации (Grießmeier et al., 2005) на поверхности планеты во время солнечных вспышек, доказано, что плотность земной атмосферы позволяет ожидать биологических эффектов вторичной радиации от проникающего космического излучения во время мощных протонных событий, когда более половины площади земной поверхности подвергается воздействию излучения. В такой ситуации необходимо выяснить, насколько правомерны оценки, касающиеся роли космического излучения в изменениях климата и эволюции жизни во время экскурсов и инверсий геомагнитного поля.

Наиболее интересные и достоверные результаты по изменению климата были получены при бурении ледников Антарктиды и Гренландии. Авторы (Petit et al., 1999), при анализе кернов льда этих ледников, обнаружили, что за предыдущие 420 тыс. лет на Земле произошло четыре цикла, в течение которых температура поверхности Земли четырежды сначала плавно, за время, примерно, 100 тыс. лет, уменьшалась, а затем довольно резко возрастала. Синхронно возрастал и уменьшался объем ледников на Земле. Максимальная концентрация пылевых частиц в кернах льда наблюдалась в слоях, соответствующих периодам похолодания (рис. 21-10), причем, оказалось, что чем выше концентрация пыли, тем ниже температура. Таких данных опубликовано довольно много,

но ни в тексте статей, ни на рисунках, невозможно определить, какой процесс происходит раньше: увеличение концентрации пыли предшествует похолоданию, или наоборот? Нам не встречались так же работы, в которых оценивался бы коэффициент корреляции этих зависимостей. Поэтому, оцифровав данные по вариациям температуры и содержания пыли с интервалами между отсчетами, равными 1 тыс. лет, мы рассчитали функцию их взаимной корреляции и получили, что максимального значения  $-0.56$  она достигает при нулевом временном сдвиге и 95 %-ном доверительном интервале  $(-0.62, -0.49)$ . Это позволяет сделать вывод о том, что с высокой степенью значимости температура и концентрация пыли в кернах льда менялись практически одновременно и в противофазе. Ход временных вариаций температуры, концентрации пыли и модуля геомагнитного поля показан на рис. 9. Видно, что экскурсы сопровождаются минимальными значениями интенсивности поля и повышенными концентрациями космогенного нуклида  $^{10}\text{Be}$  в слоях льда и осадочных пород. Об этом говорят и другие авторы, указывая на почти двукратное возрастание потока космических лучей при 10%-ном уменьшении интенсивности геомагнитного поля (Christl et al., 2004). Из рис. 9 видно, что в периоды экскурсов 1, 5, 7, 8 и 9 происходит уменьшение концентрации пыли и потепление, в периоды экскурсов 3, 4, 6 концентрация пыли была незначительной, и происходило похолодание, что позволило нам предположить, что экскурсы начинались в разных экологических условиях.

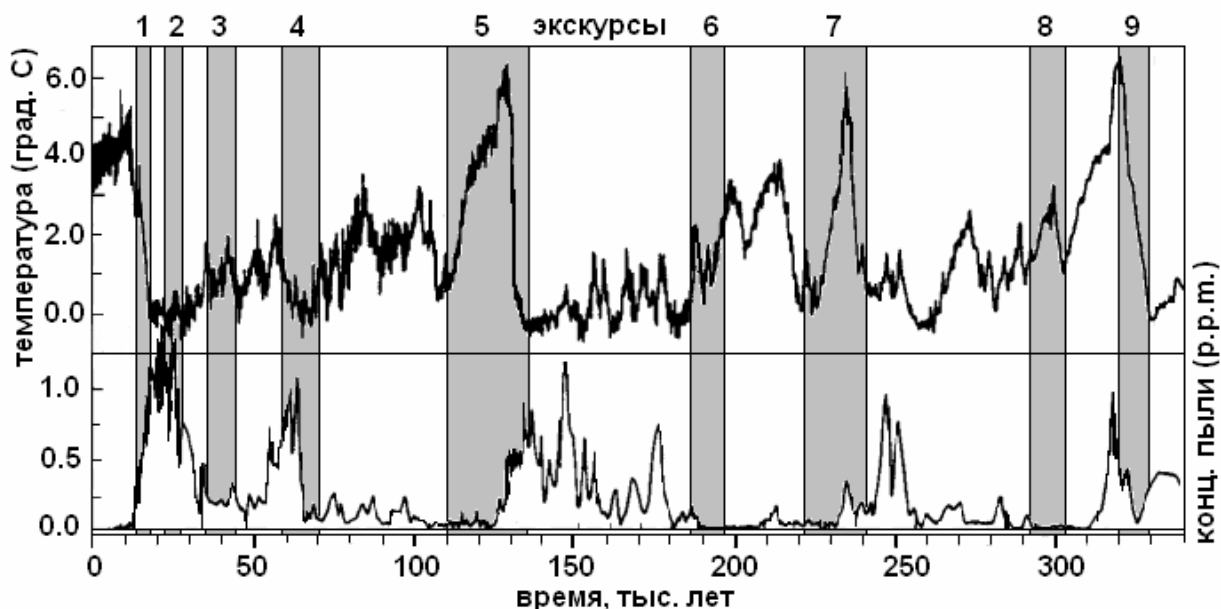


Рис. 9. Изменение температуры поверхности Земли и относительной концентрации пыли во льду. Вертикальные полосы – понижение геомагнитного поля в периоды экскурсов (слева направо): Gothenburg (1); Mono Lake (2); Laschamp (3); Kargopolovo (4); Blake (5); Biwa – I (6); Jamaica (7); Biwa – II (8); Biwa – III (9).

Обнаруженные нами корреляции вынуждают рассматривать два возможных варианта: 1) похолодание на Земле вызвало пылевые бури, но тогда геомагнитное поле и концентрация  $^{10}\text{Be}$  в эту модель «не вписываются» и 2) периодические мощные извержения вулканов и супервулканов привели к заселению стратосферы пылью, которая экранировала солнечное излучение, что привело к похолоданию. Во время экскурса, когда интенсивность геомагнитного поля понижалась, проникающие космические лучи разрушали пылевой слой в стратосфере, что привело к осаждению пыли и быстрому потеплению. Соответственно, если экскурс начинался в условиях прозрачной стратосферы, то развивался сценарий формирования облаков, роста альбедо и похолодания. В настоящее время достаточно сложно оценить, насколько правдоподобны

1-ый и 2-ой варианты. Первый следует из теории Миланковича и в настоящее время считается предпочтительным. Однако теория Миланковича не находит объяснения многим известным фактам, в частности, очень быстрым изменениям климата, как потеплениям, так и похолоданиям. Поэтому мы рассмотрим альтернативный, второй вариант. Однако, для того, чтобы этот вариант имел необходимые основания, следует доказать, что в периоды экскурсов и инверсий значительно возрос уровень радиации.

### Температура и пыль – в чем причина и где следствие?

Видимое совпадение кривых температуры  $T$  и концентрации пыли  $D$  (рис. 1) уже отмечалось: чем выше концентрация пыли, тем ниже температура. Таких данных опубликовано довольно много, но ни в тексте статей, ни на рисунках, невозможно определить, какой процесс происходит раньше: увеличение концентрации пыли предшествует похолоданию, или наоборот? Нам не встречались так же работы, в которых оценивался бы коэффициент корреляции этих зависимостей. Поэтому, данные по вариациям  $T$  и  $D$  были оцифрованы (рис. 10), интервалы между отсчетами были выбраны равными 1 тыс. лет и оценена степень корреляции между кривыми  $T$  и  $D$ . Величина  $R$  – корреляционная матрица, диагональные элементы которой = 1 (автокорреляция), элементы вне главной диагонали – коэффициенты корреляции.  $P$  – матрица коэффициентов значимости корреляции (вероятность получить такие же коэффициенты  $R$  при случайном выборе). Чем меньше величина  $P$ , тем корреляция более значимая. Доверительный интервал для  $R = 95\%$ . Величина  $R = -0.56$ ,  $P=0.0000$ , доверительный интервал  $(-0.62 -0.49)$ . Полученные цифры говорят о высокой и значимой корреляции между двумя рядами. Временная задержка между кривыми (с точностью до 1 – 2 отсчетов) - не обнаружена. Это говорит о том, что  $T$  и  $D$  менялись практически одновременно и в противофазе друг к другу. Этот факт вынуждает рассматривать две возможных причины: 1) сначала на Земле похолодало, что вызвало появление пылевых бурь и 2) периодические извержения вулканов и супервулканов привели к заселению стратосферы пылью, которая экранировала солнечное излучение, что привело к похолоданию. Рассмотрим, насколько правдоподобны оба варианта развития событий.

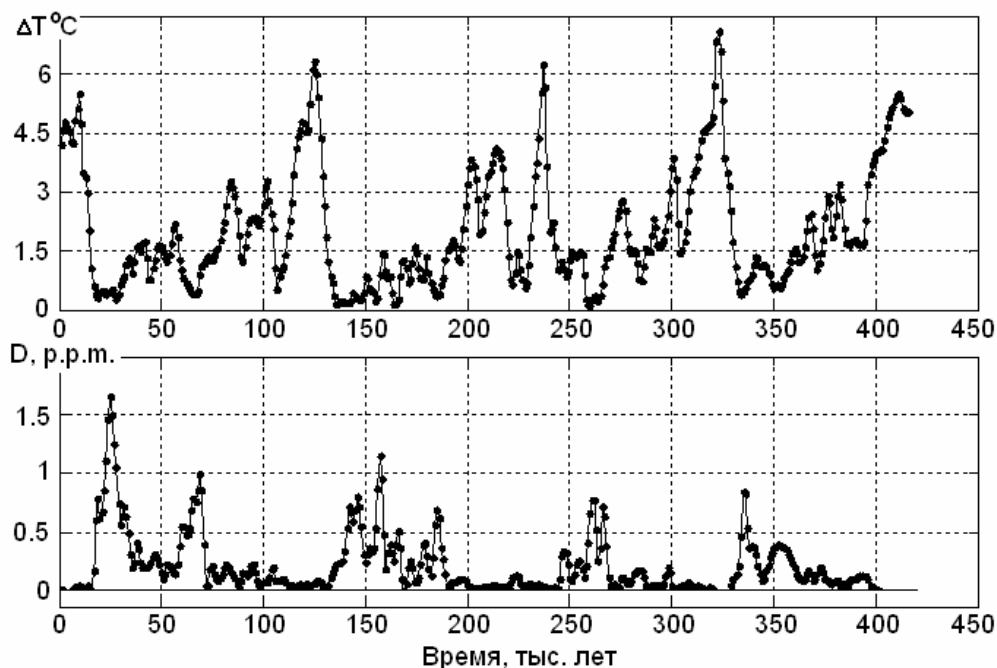


Рис. 10. Изменение температуры поверхности Земли  $\Delta T$  и относительной концентрации пыли во льду  $D$ .

### **Сначала похолодание за счет инсоляции, затем пыль из пустынь**

Этот вариант следует из теории Миланковича и в настоящее время считается предпочтительным. Так как реальная кривая изменения температуры значительно отличается от кривой, построенной по суммированию синусоид, соответствующих спектру Миланковича, был предложен подход, получивший название SPECMAP (отображение изменения спектров в климате). Суть его состоит в том, что кривая изменения температуры, оцененная по изотопу кислорода, фильтруется спектрами Миланковича, «избавляется от ненужного шума» таким образом, и настраивается на известные циклы астрономических параметров. В принципе, с таким подходом можно согласиться. Все было бы хорошо, если бы кривая SPECMAP соответствовала не только первому циклу, но и всем предыдущим. Этого, как следует из рис. 11, - 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.

Теперь о пыли. Принято считать, что похолодание климата и связанное с похолоданием иссушением почвы приведет к возникновению пылевых бурь, причем бури возникшие в Сахаре и Сибири будут снабжать пылью Гренландию, а пылевые бури Патагонии – Антарктиду.

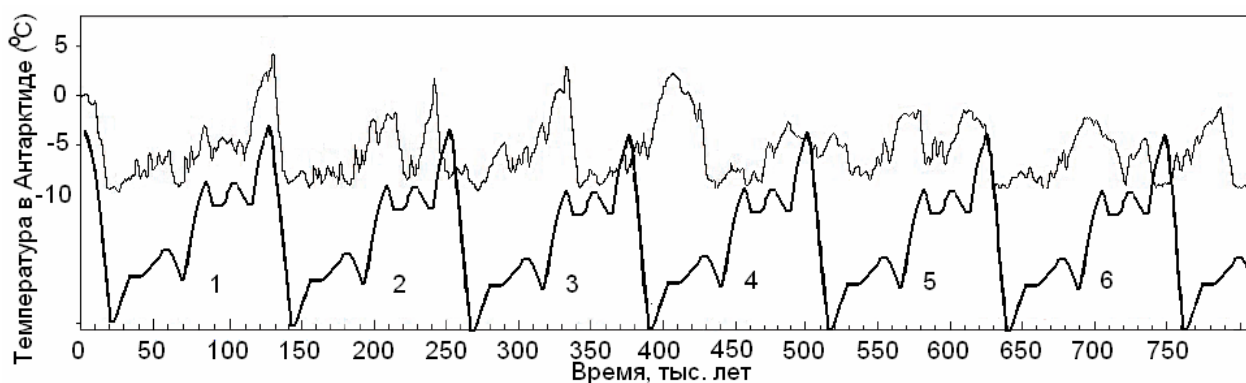


Рис. 11. Верхняя кривая – температура (по данным льда в Антарктиде), нижняя – шесть циклов SPECMAP.

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.