

Глава IX. СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫЕ СВЯЗИ

Традиционный подход к проблеме солнечно-земных связей, т.е. взаимосвязи геооболочек, ограничивается рассмотрением влияния Солнца на магнитосферу, ионосферу, атмосферу, океан и литосферу, вернее на её самую верхнюю оболочку, хотя иногда это влияние пытаются находить даже в сейсмичности Земли. На общем грандиозном фоне фундаментальных работ в области физики Солнца и солнечно-земных связей, физики атмосферы и океана, физики сейсмичности и вулканизма, эта проблема не получила должного внимания, соответствующего её важности. Нельзя отрицать колоссальной роли Солнца во многих процессах, происходящих на Земле, однако, в ряде ситуаций ведущую роль во взаимосвязи геооболочек играют эндогенные, внутри земные процессы и явления. Огромная роль в этих процессах отводится геомагнитному полю, которое, меняя свою интенсивность и даже полярность, «контролирует» многие явления, происходящие на Земле, «управляя» потоком высокоэнергичных частиц, поступающих на Землю в те моменты, когда поле практически исчезает. Ещё одним из наиболее ярких примеров, показывающих преимущественную роль Земли в процессах, происходящих в атмосфере, океане, ионосфере, - это комплекс явлений, связанных с сейсмичностью и вулканизмом.

В качестве «агентов», связывающих геооболочки, принято рассматривать модифицированные в гелиосфере космические лучи, как солнечные, так и галактические. Различные электромагнитные явления, в частности, ОНЧ и атмосферное электрическое поле, а так же упругие волны, которые могут рассеиваться и возбуждаться на границах оболочек Земли и излучаться в атмосферу, как акустические, - так же рассматриваются как «агенты». Нельзя забывать и о вулканизме, особенно о роли извержений супервулканов, которые являются одной из главных причин похолодания климата и оледенений. В последние годы обнаружилось, что практически все геофизические объекты: ландшафты и береговые линии, облака и магнитосферные возмущения, землетрясения, извержения вулканов и солнечные вспышки, а так же космические лучи, - фрактальны. С одной стороны, это означает, что всех их можно, в определенном смысле, представить как результат самоорганизующихся процессов, происходящих в Природе, а, с другой, - все они находятся во взаимосвязях между собой и Солнцем, подчас не слишком явных и скрытых от пытливого взгляда наблюдателя.

IX. 1. Фрактальные свойства Земли и связь геооболочек.

Модель горячей Земли, о которой идет речь в этой книге, базируется на теснейшей взаимосвязи геооболочек. По модели: внутренне ядро связано с внешним, посредством реализации процессов «конденсация-испарение», происходящих в F-слое; внешнее ядро – с мантией, посредством происходящих в D”-слое явлений «кристаллизация-плавление». Термодинамические явления и процессы, происходящие в F-слое, где, по модели, осуществляется генерация геомагнитного поля, «маркируются» магнитным полем и мы регистрируем их как джерки, фокусы векового хода, инверсии и т.п. Сейсмичность и вулканизм Земли, согласно нашей модели, являются своеобразным «инструментом», направленным на то, чтобы «исправить» её форму, искаженную во время циклов расширения и сжатия. Эти явления теснейшим образом связаны с движениями литосферы. Посредством этих явлений на Земле реализуется принцип минимизации гравитационной энергии, приводящий к тому, что Земля стремится «быть» более компактной, а её форма – в большей степени соответствовать скорости её вращения. Растекание литосферы, с одной стороны, и сейсмичность и вулканизм, с другой, являются «участниками» происходящих на Земле процессов самоорганизации. На Земле можно видеть теснейшую связь между структурой внутреннего ядра, мантии и высоты геоида и т.п.

В этом разделе мы остановимся на некоторых работах автора, имеющих отношение к процессам самоорганизации на Земле и взаимосвязи её оболочек, которые, по той или иной причине, не рассматривались нами подробнее. Тем не менее, упоминание об этих

работах дополняет общую картину взаимосвязи верхних геооболочек и ещё глубже раскрывает физику Земли и планет.

Фликкер-шум в природных явлениях. Практически все процессы и явления, происходящие в Природе, в том числе и на Земле, случайны и уподоблены шуму. Однако, это не хорошо известный нам т.н. «белый» шум, когда система каждый раз начинает заново и не “помнит” о своих предыдущих действиях. В Природе преобладает другой принцип, согласно которому, процессы случайны, но система помнит, что произошло с ней раньше. Этот алгоритм носит название “фликкер-шум”. Временные и пространственные события, происходящие в системе, реализующей алгоритм фликкер-шума, фрактальны. Они сопряжены с самоорганизацией процесса, а сами фракталы-кластеры возникают в системе, как реакция на процессы переноса и перколяции, и как продукт деятельности механизмов, препятствующих переносу и перколяции. Эти процессы характеризуются линейной зависимостью между логарифмом энергии события и логарифмом частоты его появления, а так же высокой степенью пространственной и временной масштабной инвариантности процессов (scaling). В качестве примера природного фликкер-шума, обычно приводят известный закон повторяемости землетрясений и извержений вулканов. Похожий закон характеризует, например, зависимость полной энергии излучения вспышек на звездах, в том числе и на Солнце (рис. 9-1), аналогичные зависимости характерны для спектров галактических космических лучей и т.п. По-видимому, первыми, кто обратил внимание на этот закон, были египтяне, которые обнаружили, что интенсивность разливов Нила, - обратно пропорциональна их частоте. Всё это говорит об универсальности в Природе такого явления, как фликкер-шум.

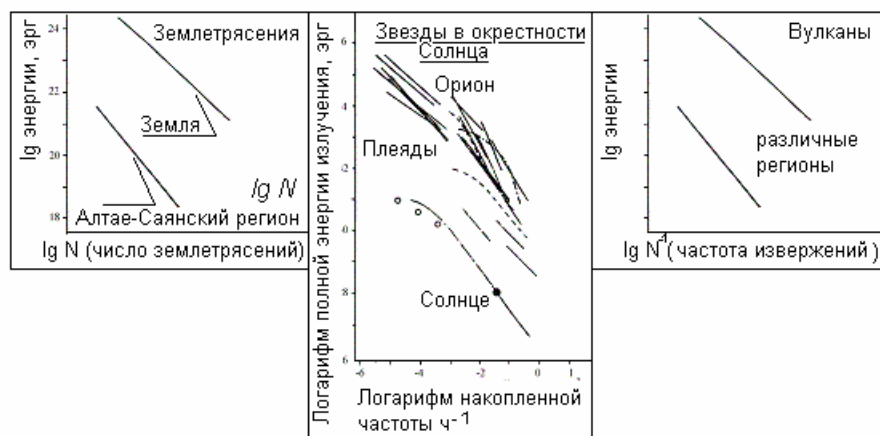


Рис. 9-1. Повторяемость землетрясений, энергетические спектры вспышек, частота извержений вулканов (Кузнецов, 1992).

Баланс энтропии. Определяющую роль энтропии и негэнтропии (отрицательной энтропии) в процессе самоорганизации планет Солнечной системы вскрывает Изаков (1997). Для планеты притоком и оттоком массы можно пренебречь, а в энергетическом балансе рассматривать только приток солнечной радиации Φ_c , поглощенной планетой и отток инфракрасной радиации Φ_n . Это справедливо для планет земной группы, где поток тепла из недр пренебрежимо мал по сравнению с радиационными потоками:

$$B = \Phi_c - \Phi_n = f_c(1 - A) \pi R^2 - 4 \pi R^2 f_n \quad (9.1)$$

Здесь f_c – поток солнечной радиации на единицу площади, A – альбеда планеты, R – её радиус, $f_n = sT^4$ – поток инфракрасной радиации, испускаемый с единицы площади планеты, T – равновесная температура. Многолетние измерения потоков радиации с

помощью приборов, установленных на спутниках, показали, что энергетический баланс Земли в среднем за год близок к нулю, т.е. приток и отток энергии примерно равны. Из уравнения 9.1 видно, что при увеличении солнечного потока увеличивается и планетный поток, обеспечивая, таким образом, примерное постоянство климатических условий на планете.

Изаков задает вопрос, что же расходуется в планетарных процессах, в которых перерабатывается огромное количество энергии и вещества и отвечает на него, доказывая, что расходуется получаемая планетой негэнтропия.

Если считать, что спектры солнечной и планетарной радиации близки к спектрам радиации абсолютно черного тела, то приток негэнтропии на планету равен:

$$\Delta S = 4/3(\Phi_c/T_c - \Phi_n/T_n). \quad (9.2)$$

Температура Солнца T_c ($T_c = 5780$ К) всегда больше чем температура тепловой радиации планеты T_n (для планет земной группы $T_n = 211 - 441$ К), следовательно, на любой планете всегда есть отток энтропии $\Delta S < 0$ и приток негэнтропии $\Delta N = -\Delta S$, которая расходуется во всех процессах, происходящих на планете. Физика этого явления не раскрывается, однако, как следует из нашей модели, под этим понятием можно иметь в виду, условно, конечно, теплоту фазового перехода U .

Представим себе, что изменилась величина T_c , хотя величина солнечной постоянной f_c осталась прежней. Согласно формулам 9.1 и 9.2, Земля будет получать тот же приток энергии, но меньший приток негэнтропии. При этом многие процессы на Земле могут пойти по другому сценарию. Например, фотоны, приходящие на Землю окажутся неспособными обеспечить фотосинтез и биосфера будет совсем другая, отличная от настоящей. Таким образом, негэнтропия, в этом случае, уже выражает качество притока энергии.

На Земле по данным спутниковых измерений: $f_c = 1368$ Вт м⁻², $A = 0.29$, $T_c = 5778$ К, $T_n = 254$ К. Приток негэнтропии на Земле $\Delta N = 6.2 \times 10^{14}$ Вт К⁻¹; на Венере - $\Delta N = 4.0 \times 10^{14}$ Вт К⁻¹; на Марсе - $\Delta N = 9.9 \times 10^{13}$ Вт К⁻¹. Приток негэнтропии расходуется на поддержание теплового баланса планеты, на что идет примерно 70% негэнтропии, приходящей на Землю. Около 25% притока негэнтропии расходуется на испарение воды с поверхности океанов. Водяной пар, поднимаясь в атмосфере, конденсируется, создавая облака, переносимые ветром на сушу, и выпадающие осадки обеспечивают водой биосферу. В этом процессе принимает участие примерно 5×10^{14} т воды в год. (Как будет показано в следующем разделе, этот процесс приводит к возникновению атмосферного электричества и “контролю” его полярности). Из этих оценок следует, что на всю динамику атмосферы и океана, включая все потоки массы и тепла в атмосфере и океане, цунами, ураганы и тому подобные явления, расходуется не более 5% пришедшей на Землю негэнтропии. Кстати, на Венере, где вода отсутствует, на динамику атмосферы расходуется большая часть приходящей негэнтропии.

Такие процессы и явления на Земле, как парниковый эффект, гидрологический цикл воды, общая циркуляция атмосферы и океана, а также ряд других, - по сути, диссипативные структуры, поддерживаемые притоком негэнтропии и слагающие единую самоорганизующуюся систему, характеристикой которой является климат Земли.

Фрактальность климата. Проблема изменений климата продолжает волновать ученых, т.к. она не находит простого и логичного объяснения. Парниковый эффект, причем, принято считать, что решающую роль здесь всегда играла его антропогенная компонента, был до недавних пор основным фактором, на базе которого строили объяснения изменений климата. В последнее время специалисты пришли к общему мнению, что обнаружить антропогенный вклад на фоне мощных естественных колебаний климата, по-видимому, не удастся. Этот вывод показывает, что необходимо пересмотреть ряд прошлых концепций. К аналогичному выводу подталкивают и новые данные по климату. Об этом – ниже в этой главе.

Метеорологи выделяют ряд областей, в которых климат постоянно становится суше и холоднее. Таких областей примерно 1/3 от общего числа. В другой трети регионов Земли становится теплее и влажнее, а в последней трети изменений климата вообще не наблюдается. Размеры регионов с однородным изменением климатических условий имеют широкие пределы, что может говорить о скейлинговых свойствах процессов изменения. Потепление климата сказывается на нарушении циркуляции крупнейших теплых течений мира Гольфстрима и Курошио, а это, в свою очередь, приводит к похолоданию в умеренных широтах. Последнее обстоятельство можно истолковать как признаки процессов самоорганизации системы формирования климата, а сами регионы считать фрактальными структурами. (Как известно, наличие фракталов-кластеров приводит к ограничению влияния процессов переноса).

Одним из наиболее значимых и представительных временных рядов климатических вариаций является известный ряд средних месячных температур в Центральной Англии за 1659-1674 гг., опубликованный Гордоном Мэнли и продолженный затем, как в прошлое, до 1400 г (по годовым кольцам деревьев), так и до наших дней. Эта зависимость, после исключения сезонных колебаний и пятилетнем осреднении, представляет собой «белый шум». Если период осреднения данных увеличить до 30 лет (Монин, Шишков, 1998), то спектральная плотность ряда имеет вид «красного» – фликкер-шума ($1/f$). Этот пример показывает ещё раз, что климат фрактален, более того, характерное время самоорганизации климатической структуры оказывается порядка 30 лет. Ниже будет показано, что в масштабе в нескольких сотен тысяч лет – климат «контролируется» геомагнитным полем и, вместе с тем, обладает ярко выраженными фрактальными свойствами. Здесь нет парадокса, т.к. и сами инверсии и экскурсы так же фрактальны.

Явление Эль-Ниньо-1982. При изучении уникального явления Эль Ниньо 1982-83 г., С.Ю. Хомутовым (1997) была исследована корреляция глобальных параметров Земли и параметров околоземного пространства. Событие, получившее название «Эль Ниньо» (ЭН), состоит в нарушении нормального цикла циркуляции атмосферы и гидросферы в тропической и субтропической областях южной части Тихого океана. Это явление считается отрицательной фазой Южного колебания, оно сопровождается широкомасштабными аномальными климатическими процессами. Естественно ожидать, что такие глобальные временные возмущения в системе «атмосфера – океан» могут найти отражение и в других геофизических процессах и полях: с одной стороны, как следствие причин, порождающих ЭН, с другой, - как результат его воздействия.

Хомутов сопоставил временные серии ряда параметров, представляющих состояние различных геоболочек. Качественный анализ показал наличие практически во всех данных синхронного во времени возмущения в период 1982-83 гг., совпадающего с наиболее сильным за последнее столетие событием ЭН. Значительно менее ярко выражены аномальные вариации в эпоху ЭН 1972-73 гг. и продолжительного ЭН, начало которого приходится на 1991 г. Месячные значения таких параметров, как: поток солнечного радиоизлучения на частоте 2800 МГц (F), плотность плазмы солнечного ветра n в см^{-3} и оценка потока его энергии через магнитопаузу nV^3 в $10^6 (\text{км/с})^3 \text{см}^{-3}$, где V – скорость плазмы, интенсивность космических лучей по данным мониторов Новосибирска и Клаймэкса, aa - и Dst -индексы геомагнитной активности, среднее по 13 станциям значение вертикальной составляющей магнитного поля Земли, индекс Южного колебания SOI, продолжительность суток dP , параметры сейсмической активности и количество землетрясений в районе желобов Тонга-Кермадек – оказались скоррелированными.

Полученные Хомутовым результаты позволяют предположить, что вероятной причиной наиболее геоэффективных Эль-Ниньо является приток солнечной энергии в магнитосферу и ионосферу с последующим переносом возмущений в систему «атмосфера-океан» и к внутренним оболочкам Земли.

Влияние границы океан-материк на ОСО. До недавних пор специалисты метеорологи полагали, что глобальное распределение общего содержания озона (ОСО), в частности, известные т.н. озоновые дыры, в значительной степени определялось наличием на Земле урбанического фактора. Иначе, считалось, что ОСО зависело от деятельности человека. Причем, у многих, кто не соглашался с таким подходом, всегда вызывало недоумение объяснение причины возникновения озоновых дыр в Антарктиде с помощью фреонов, связанных с антропогенной активностью. По-видимому, нельзя полностью исключать этот фактор в динамике ОСО, но, не думаю, что он по своему влиянию может сравниться с пространственными и временными флуктуациями, связанными с атмосферными переносами.

В последнее время появились сообщения о связи ОСО с орографическими особенностями планеты, в частности, с границей материк-океан (Казимировский, Матафонов, 1998). Использовались данные спутниковых измерений ОСО, в частности, с помощью бортового спектрометра TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer). На картах, построенных с использованием данных TOMS достаточно четко видны контуры Африки, Аравийского полуострова, Красного моря, Индии; видны Гималаи, Кордильеры, Скалистые горы и т.п. Физический механизм континентальных и орографических эффектов в распределении ОСО пока неизвестен. Авторы полагают, что причина явления может быть как во влиянии восходящих воздушных потоков, так и распространении вверх внутренних гравитационных волн, возникающих при столкновении воздушных потоков с горными хребтами. Это ещё один пример связи между геоболочками: озоном и земной поверхностью. Здесь явно прослеживается масштабный фактор, т.к. при наблюдении ОСО в районе Сибири, в частности, Байкала, такого эффекта не наблюдается (Кашкин и др., 1997). Возможной причиной не сопоставимости орографических особенностей в случае исследования озона в Сибири является то, что в этом случае измерения ОСО велись на приборе HIRS ИК-диапазона, в то время как спектрометр TOMS работает в УФ диапазоне.

Фрактальность и самоорганизация магнитосферы. Как следует из предыдущего, в атмосфере Земли, контролируемой Солнцем, если нет дополнительных связей, например, с океаном через механизмы конденсации-испарения, - самоорганизующихся структур не возникает. Наши попытки найти «следы» самоорганизации в озоносфере, ионосфере и магнитосфере не привели к желаемым результатам. Тем не менее, Barraclough и De Santis (1997) обнаружили в вековых вариациях геомагнитного поля за период с 1647 по 1990 гг. фрактальную структуру, что может говорить о наличии процессов самоорганизации в магнитосфере. Процессы самоорганизации в магнитосфере в периоды спокойного Солнца были обнаружены группой М.И.Пудовкина (Урицкий, Пудовкин, 1998). Авторы показали, что низкочастотные флуктуации АЕ-индекса геомагнитной активности обладают спектром мощности вида фликкер-шума ($1/f^b$). Была предложена гипотеза механизма генерации флуктуаций такого типа в токовом хвосте магнитосферы, основанная на представлениях о возможной роли самоорганизованной критичности.

Анализ вековых вариаций компонент геомагнитного поля, измеренных на трех канадских обсерваториях: Resolute Bay (находится в области полярного каспа, polar cap), другая, - Fort Churchill (в области овала полярных сияний), а третья, Ottawa (в субавроральной зоне), показал, что отношение мощности возмущений к их амплитуде (в log-log координатах) всегда показывало степень, равную 2 ($\pm 2\%$). Это обстоятельство говорит, скорее всего, о том, что фрактальности (которая характеризуется дробной степенью размерности) – не наблюдается. Полученный результат (Boteler, 1998) подтверждает наши выводы относительно того, что в земных оболочках, где нет фазовых переходов и активной взаимосвязи с океаном, нет и процессов самоорганизации. Если в системе, например, в магнитосфере, нет сильной зависимости процессов от Солнца, и есть

причины возникновения сильной положительной обратной связи между явлениями различной природы, то возникают процессы самоорганизации. Как правило, в такой системе можно выделить взаимодействующие друг с другом механизмы диффузии и протекания. Один из примеров самоорганизации был рассмотрен нами в главе VI, при обсуждении уникального явления возникновения долгоживущих вихрей в атмосферах Юпитера и Сатурна. На Земле, где атмосфера «контролируется» Солнцем, таких вихрей не образуется.

Механизмы взаимосвязей геоболочек. Обилие различного рода корреляционных связей, обнаруживаемых авторами при анализе данных геофизических параметров, находится в явном противоречии с недостатком физически прозрачных механизмов этих взаимосвязей. Как правило, явления, происходящие на Земле, в её недрах и окружающих её оболочках, многопараметрические. Сильные связи между различными параметрами практически никогда не наблюдаются, а если они есть, то это, как правило, связано с влиянием Солнца. Поведение таких оболочек Земли как магнитосфера, ионосфера, озоносфера, в значительной степени «контролируются» Солнцем и вращением Земли. Такой интересный параметр, как унитарная вариация (подробнее ниже, в следующем разделе), показывает влияние Солнца на атмосферное электричество, ионосферу и магнитосферу, находящиеся в спокойном состоянии. Если в этих оболочках Земли происходят сильные вариации и возмущения, то унитарной вариации не наблюдается. По-видимому, этот параметр может служить показателем «нормального» состояния геоболочек, возможно, проявление этой вариации показывает, что в системе не происходят процессы самоорганизации. Несмотря на то, что эта вариация достаточно хорошо изучена, однозначного механизма её проявления на Земле, так и не придумано.

IX. 2. Идеи самоорганизованной критичности в атмосфере и климате.

Фрактальность облаков. В качестве одного из примеров самоорганизации, рассмотрим физику образования облаков, т.е. капель воды в атмосфере, с точки зрения подходов, развиваемых в открытых самоорганизующихся системах. Правомерность такого подхода очевидна, т.к. образование капель, их дальнейший рост за счет коагуляции и уменьшение их размеров за счет процессов испарения, - это явления нестационарного фазового перехода первого рода. Как известно, такие переходы являются предметом изучения открытых самоорганизующихся систем, временной и пространственной «срезы» которых, представляет собой фрактальную структуру. С другой стороны, известно и хорошо экспериментально изучено явление фрактальности облаков (Федер, 1991; Lovejoy, 1982), хотя физика этого явления так и не понята. Фрактальность облаков описывается формулой, в которой периметр P задается как корень квадратный из площади A , возведенный в степень D : ($P \sim A^{D/2}$), где D интерпретируется как фрактальная размерность периметра. Делается вывод, что периметры облаков и областей дождя являются фракталами, т.к. они не имеют характеристического масштаба горизонтальной длины в диапазоне от единиц километров до 1000 км.

Воспользуемся стандартным подходом к проблеме устойчивости капель в облаке, а так же используем алгоритм самоорганизованной критичности, и покажем, что оба этих приема в сумме, возможно, дают правильное понимание фрактальности облаков.

Для вычисления скорости испарения a_g используется термодинамическая формула Кельвина-Гиббса, определяющая равновесное давление пара p над каплей критического размера, содержащей g^* молекул:

$$\ln(p/p_{\text{н}}) = 8\pi/3 (3\nu/4\pi)^{2/3} (S/kT) g_*^{-1/3}, \quad (9.3)$$

где $p_{\text{н}}(T)$ - давление насыщенного пара при температуре T , k - постоянная Больцмана, S - коэффициент поверхностного натяжения, ν - объем молекулы жидкости, пересыщение пара $S = (p/p_{\text{н}})$, а p - давление пересыщенного пара.

Скорость испарения кластера a_g при малых g , быстро возрастает при уменьшении его размера:

$$a_g \sim g^{2/3} \exp(-U_g/kT), \quad (9.4)$$

где U_g - энергия связи молекулы в кластере. Скорость присоединения (конденсации, коагуляции) молекул пара к критическому зародышу:

$$b_g \sim g^{2/3}, \quad b_g = an(kT/2\pi m)^{1/2} \cdot 4\pi(3v/4\pi)^{2/3} g^{2/3}, \quad (9.5)$$

здесь a - коэффициент конденсации, n - плотность пара, m - масса молекулы, v - ее объем в жидкой фазе. Условие локального минимально-стабильного состояния системы:

$$a_g = b_g.$$

Это условие справедливо как в целом для системы из N капель, так и для одной из них. Оно показывает, что размер капли не меняется. Если для какой-либо капли оно не выполняется, капля может либо испариться ($a > b$), либо коагулировать ($a < b$). Давление пара в окрестности этой капли изменится, что приведет к нарушению термодинамического равновесия для соседних капель. Капли начинают либо коагулировать, если первая капля стала испаряться, либо - испаряться, если первая - коагулировала. Равновесие системы нарушается и все более отдаленные, от первой, капли вступают в этот процесс, который можно уподобить процессу падающих домино. Процесс развивается лавинообразно до тех пор, пока образовавшиеся кластеры из капель не станут препятствовать его распространению. На границе этих кластеров выполняется условие: ($a = b$). Однако, система, в которой выполняется это условие, заметно отличается от системы в локально стабильном состоянии, в которой это условие выполнялось в целом. В первом случае принято считать, что такая система находится в состоянии самоорганизованной критичности, во втором - это уже фрактальная структура, обладающая свойствами пространственно-масштабной инвариантности (scaling). По характеру распределения размеров кластеров (фракталов) можно судить о величине фрактальной размерности структуры ($D \sim t^{-a}$) и степени при частоте ω , в формуле спектральной мощности:

$$S(\omega) = \int dt (tD(t) / [1 + (\omega t)^2]) \gg \omega^{-2+a}, \quad (9.6)$$

здесь t ("временной масштаб") - частота "встречаемости" фракталов определенных размеров, " $1/\omega$ " - динамический отклик системы на малые случайные возмущения (фликкер-шум).

Наша модель, в первом приближении, представляет собой ячеистый автомат (cellular automaton), описывающий взаимодействие некоторой целой переменной z с его ближайшими соседями. В двумерном случае, если z превышает критическое значение k , то z изменяется следующим образом (Bak et al., 1987):

$$\begin{aligned} z(x, y) &\rightarrow z(x, y) - 4, \\ z(x \pm 1, y) &\rightarrow z(x \pm 1, y) + 1, \\ z(x, y \pm 1) &\rightarrow z(x, y \pm 1) + 1. \end{aligned} \quad (9.7)$$

В системе нет других, кроме z , параметров, т.к. изменение k приводит к изменению z . Используется граничное условие $z = 0$ на границе. Начальное состояние системы $z \gg k$. После этого она развивается до тех пор, пока все z не станут меньше k . Затем динамика развития исследуется посредством измерения отклика системы (количества и размера фракталов) на случайные локальные возмущения. Под переменной z можно, согласно (Bak et al., 1987), подразумевать любой динамический параметр системы. В рассматриваемом нами случае, это может быть, например, масса m или размер капли r , которые либо увеличиваются, при $a < b$, либо уменьшаются, при $a > b$.

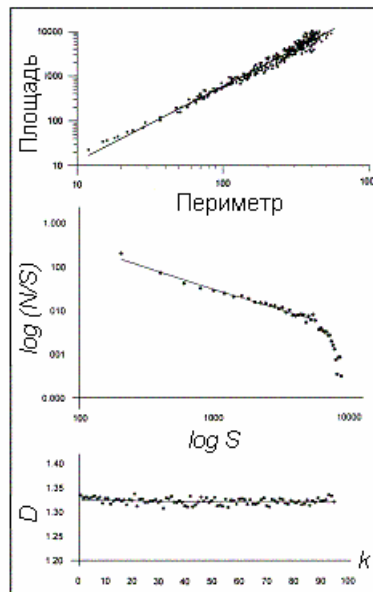


Рис. 9-2. Размерность синтезированного ряда кластеров-облаков.

Компьютерное моделирование проводилось Г.В.Нестеровой в ИГФ (Новосибирск) по схеме, предложенной Баком и др. (алгоритм 9.7). Случайным образом задавался двумерный массив целых чисел - матрицу из 100×100 элементов. Выбиралось критическое число k ($k = 10$), значения чисел в двумерном массиве были значительно больше, чем k (100 - 200). Процедура (9.7) повторялась до тех пор, пока все элементы матрицы не окажутся меньше или равными k . Мы считали, что получившийся массив находится в критическом состоянии. После этого, в выбираемую компьютером точку с координатами (x, y) и амплитудой z , добавляется “возмущение”, величина которого равна, например, 2 (или 3, 4, и т.д.). После этого вновь применяется процедура (9.7) до тех пор, пока все значения матрицы не окажутся меньше 10. Компьютер запоминает все точки матрицы, в которых менялось значение z , т.е. те точки, в которых изменения претерпели “воздействие” от вынуждающего “возмущения”. Сумма этих точек и представляет собой кластер. Вычисляется его площадь A , как сумма клеток, и периметр P , т.е. число точек, рядом с которыми имеются “пустые” клетки матрицы не претерпевшие изменений. После того, как процесс образования кластера закончится, компьютер “выбирает” другую точку (клетку), в которую вновь добавляется “возмущение” и процесс образования следующего кластера повторяется.

В результате многократного повторения этой процедуры выявляется ряд пар чисел A и P , что позволяет оценить E и D . Большая статистика экспериментов продемонстрировала устойчивое значение $E = 1.54 \pm 0.006$ и, соответственно, $D = 1.32$ (рис. 9-2). Исследование облаков показало (Федер, 1991; Lovejoy, 1982; Рис, Вальдфогель, 1988), что они фрактальны. Фрактальная размерность D периметра сечения облака величина, близкая $D \approx 4/3$ для очень широкого класса облаков (дождевых, грозовых и пр.) различных размеров. Изменяя размер облаков в широком интервале (площадь изменялась на 6 десятичных порядков) площадь контура облака A связана с его периметром P соотношением: $A = A_0 P^E$. Где показатель E связан с фрактальной размерностью облака соотношением $E = 2/D$. Это приводит к выводу, что в атмосфере отсутствуют пространственные масштабы, а облака самоафинные фракталы. Величина $E: E = \lg A / \lg P \approx 1.5$, а фрактальная размерность $D = 1.33$ (по другим данным: $1.37 < D < 1.41$).

Фрактальность климата. Выясним, можно ли считать климат фрактальным, а структуру, образующую климат на Земле, - открытой самоорганизующейся структурой? Основания к положительному ответу на этот вопрос, по-видимому, есть. Дело в том, что в течение

последних 400 тыс. лет на Земле произошли четыре глобальных оледенения с периодичностью примерно в 100 тыс. лет (Petit et al., 1999; Vimeux, et al., 1999; Vimeux, et al., 2002). Последний ледниковый период сменился резким потеплением примерно 12 - 15 тыс. лет тому назад. Потепление привело к быстрому таянию льда и увеличению уровня океана. Достоверные данные по изменению температуры поверхности Земли получены при анализе кернов льда, полученных при бурении ледников Антарктиды, - в районе станции Восток, и ледников Гренландии. Результаты анализа приведены на рис. 9-3.

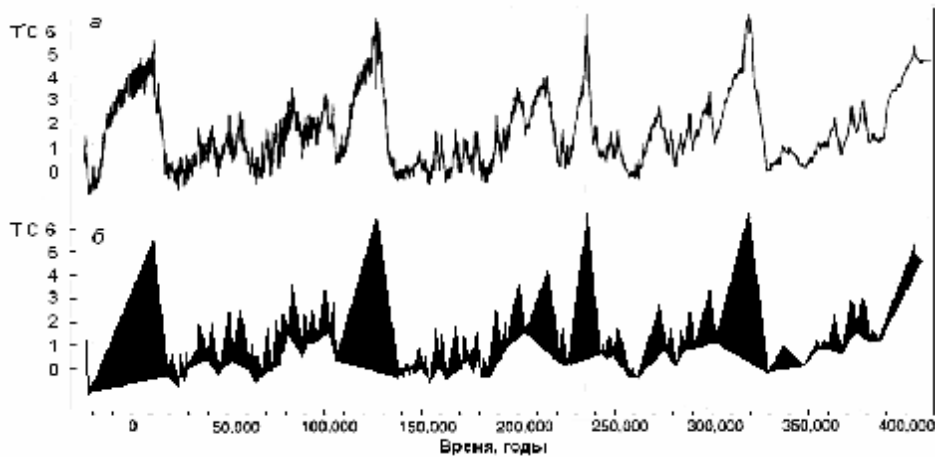


Рис. 9-3. Вариация температуры в течение 400 тыс. лет. Верхняя панель – по данным (Petit et al., 1999; Vimeux, et al., 1999; Vimeux, et al., 2002), нижняя – эта же кривая после преобразования.

Наблюдаемый на рис. 9-3 пилообразный характер вариации температуры может говорить о том, что самоорганизация климата имеет место. Приведем пример, где зависимость, полученная при наблюдении за высотой падения оползня в течение 20 тыс. лет наблюдений [Hergarten, Neugebauer, 1998], внешне очень похожа на график, приведенный на верхней панели рис. 9-3. В этой работе авторы утверждают, что для объяснения характера движения оползней с проскальзыванием можно эффективно использовать идею самоорганизованной критичности, впервые высказанную в работе [Bak et al, 1987].

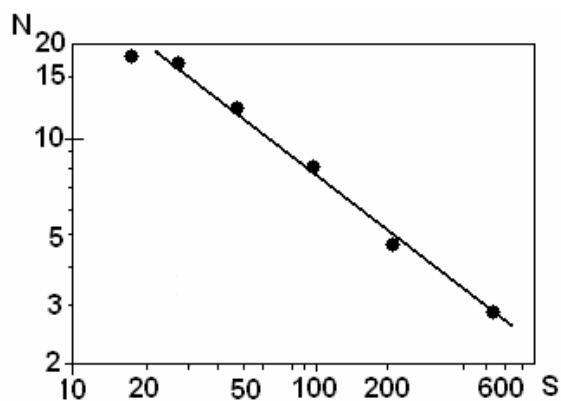


Рис. 9-4. График $\lg N - \lg S$, где S – «пик» повышения температуры (в отн. ед.), N – число пиков в интервале величин S . В течение 400 тыс. лет выделено 45 «пиков».

На нижней панели рис. 9-3 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. 9-4). Наличие подобной зависимости, как принято считать, характеризует систему, способную к самоорганизации. Отсюда следует фундаментальный вывод о том, что климат мог быть фрактальным, по крайней мере, в течение последних 400 тыс. лет. Казалось бы, все просто и понятно, однако, анализ кернов льда и масса другой подобной информации показывает, что ситуация намного сложнее. Оказывается, что изменения климата явно связаны с вариациями стратосферной пыли, изменениями модуля геомагнитного поля, концентрацией изотопа Be^{10} , показывающего изменение уровня радиации на Земле и т.д.

IX. 3. Связь вариаций климата с экскурсами геомагнитного поля.

Корреляция между вековыми изменениями климата и вариациями геомагнитного поля обсуждается много лет (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; Clement, 2004) и др. Во многих работах отмечалась взаимосвязь между температурой поверхности Земли и изменением величины её магнитного момента. Теоретической основой вековых температурных вариаций принято считать теорию Дж. Кролла и М. Миланковича (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 наблюдения показывают практически полное совпадение данных, полученных в Антарктиде и Гренландии. Этот факт иллюстрирует неправомочность применения теории Миланковича. Более того, Миланкович создавал свою теорию для прозрачной атмосферы, в то время, как следует из рис. 9-4, огромную роль в понижении температуры играла стратосферная пыль. Можно считать, что природа температурных вариаций, наблюдаемых на поверхности Земли, остается не совсем ясной. Не ясной остается и возможная взаимосвязь между температурными вариациями и вариациями геомагнитного поля.

Причиной связи климата с геомагнитным полем можно считать эффект прямого воздействия космических лучей на атмосферу и биосферу в моменты экскурсов и инверсий геомагнитного поля. Например, Харрисон (Harrison, 1968) полагал, что в моменты инверсий возможно значительное возрастание уровня радиации, которое может вызвать повышение скорости мутаций, в результате чего возникнет некоторого рода эволюционное нарушение последовательности, иначе, прерывистость хода эволюции. В дальнейшем, в своей совместной статье с Prospero (Harrison, Prospero; 1974) он полагает, что инверсии ГМП могут вызвать изменение климата Земли, косвенно приводя к исчезновению фауны. Эту идею разрабатывал Файрбридж (Fairbridge, 1977), изучая климатические изменения, произошедшие в период экскурса Gothenburg (~ 13.5 т. 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.

Монин и 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, как будет видно из дальнейшего текста, существует на Земле в течение последних 12 тыс. лет, однако раньше она не всегда была такой. В последние годы, при анализе кернов антарктического льда и льда Гренландии, обнаружено, что в некоторые, более ранние периоды эволюции Земли, в её атмосфере присутствовало довольно большое количество пыли (Petit et al., 1999; Vimeux, et al., 2002). Пылевой слой экранировал солнечное тепло, что вело 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, основным аргументом против теории Миланковича, подмеченный рядом авторов (Brook, et al., 1996; Steig, et al., 1998; Blunier et al., 1998; Dallenbach, et al., 2000), состоит, как мы отмечали, в том, что изменения климата в Гренландии и Антарктиде происходили практически одновременно.

Принято рассматривать корреляцию между изменениями климата и вековыми вариациями магнитного поля Земли, при которых происходит полная (инверсии), либо кратковременная перемена полярности (экскурсы) геомагнитного 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 примерно 800 тыс. лет назад, мы будем рассматривать корреляцию климата только с экскурсами. Среди наиболее известных и изученных, - можно назвать экскурсы (Petrova, Pospelova, 1990): Этруссия, Гетеборг, Моно Лайк, Лашамп, Каргаполово, Блейк, Ямайка, Бива (I, II, III), произошедших в интервале ~ 0 – 400 тыс. лет.

Данные. В течение последних 400 тыс. лет на Земле произошли четыре глобальных оледенения с периодичностью примерно в 100 тыс. лет (Petit et al., 1999; Vimeux, et al., 1999; Vimeux, et al., 2002). Последний ледниковый период сменился резким потеплением примерно 12 - 15 тыс. лет тому назад. Потепление привело к быстрому таянию льда и увеличению уровня океана. Возможно, именно это событие было отражено в истории как Библейский Великий Потоп. Как утверждал Файрбридж, потепление Земли совпадает по времени с экскурсом Гетеборг. Предыдущее резкое и сильное потепление, случившееся примерно 120 тыс. лет тому назад, так же совпадает по времени с другим экскурсом - Блейк. Два оставшихся из четырех названных резких потепления, произошедших в

течение последних 400 тыс. лет, так же можно приурочить экскурсам: Ямайка и Бива II. После резкого потепления, всегда неизменно 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.

Анализ керна льда, полученного при бурении ледников Антарктиды, - в районе станции Восток, и ледников Гренландии, показал, что периоды потепления совпадают по времени с периодами, в течение которых происходит изменение концентрации пыли в керне. Авторы (Petit et al., 1999; Vimeux et al., 2002), обнаружили, что в течение «последних» 330 тыс. лет наблюдается резкое уменьшение максимальной концентрации примеси в виде пылевых частиц, соответственно, в периоды: 15, 120, 220 и 320 тыс. лет тому назад (рис. 9-4). Эти периоды совпадают по времени с периодами потепления и с экскурсами. По всей видимости, именно в эти периоды, когда происходили не совсем случайные совпадения, на Земле происходили глобальные климатические катастрофы.

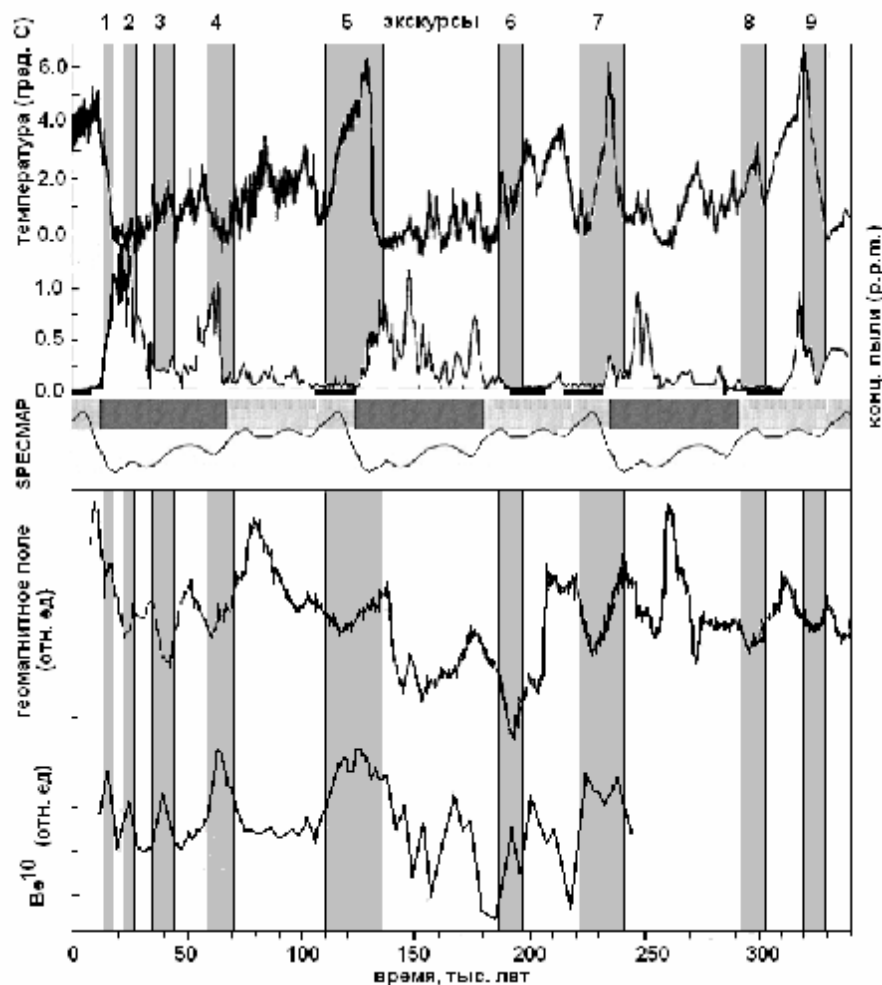


Рис. 9-5. Изменение температуры поверхности Земли (верхняя панель) и относительной концентрации пыли во льду (вторая панель). Третья панель - СПЕСМАР- океаническая изотопная кислородная кривая. Четвертая панель - интенсивность геомагнитного поля. Пятая панель – концентрация изотопа Be^{10} в осадках. Вертикальные полосы – понижение геомагнитного поля в периоды экскурсов (слева направо): Gothenburg (1); Mono Lake (2); Laschamp (3); Kargopolovo (Event Gaotai, 4); Blake (5); Biwa – I (6); Jamaica (7); Biwa – II (9). Понижение поля 300 тыс. лет (8) с экскурсом не идентифицировано.

Рисунок 9-5 и Таблица 9.1 демонстрируют корреляцию циклов потепления с экскурсами геомагнитного поля. Потепление и уменьшение величины оледенения совпадает по времени (немного отстает) с резким уменьшением концентрации пыли. Отметим, что во всех четырех рассматриваемых случаях концентрация пыли уменьшалась чуть раньше начала времени прохождения экскурса. После экскурса, пыль появлялась не сразу, а в течение примерно 15 тыс. лет. Периоды низкой концентрации пыли выделены на рисунке 9-5 темной полосой. Связь потепления с экскурсами подтверждается независимым изучением самого последнего экскурса, в котором 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 отмечаемой нами связи экскурсов с глобальными потеплениями, повторим, что одним из первых, кто обсуждал связь потепления с экскурсом Gothenburg, был Файрбридж.

Результаты наблюдений (рис. 9-5), а так же других, упомянутых выше работ, приведены в Таблице 9.1. Колонки II, VI, VIII и IX выделены, они соответствуют периодам максимальных потеплений. В Таблице: время (тыс. лет) событий: 1 - экскурсы (GMF), 2 – период максимальной концентрации (^{10}Be), 3 - период резкого уменьшения концентрации пыли (Dust. min). 4 – период увеличения максимальной температуры поверхности (начало потепления, ΔT°), для 10 экскурсов, произошедших в течение последних 400 тыс. лет эволюции Земли. В последнем столбце Таблицы 9.1 – литература.

Таблица 9.1

N\Ex	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	[]	
1 GMF	2.8	20	25	43		130	200	220	320	360	1	
		12.3	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	180		295		10
				27	42	62	115	190		290	385	11
2 ^{10}Be max		20	25	40	70	120		220			12	
				30-42	60-75	85-	180-				13	
				40		110	192				14	
3 Dust min		20			60	150		260	340	400	15	
		12				130		250			16	
		17		40							17	
4 ΔT° incr	2.8	12		40		130	200	240	330	400	18	
		12				140	220	280	330	390	19	
		15				130	215	250			20	
		15				130					21	
		20				140					22	
		20				140	190	230			23,	
		15				130					24	
		10			38							25
		10			38							26
		12			38	70	120					27

Эккурсы: 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).

Надо заметить, что далеко не все авторы придерживаются этой идеи. Например, в одной из работ авторы утверждают, что экскурсы геомагнитного поля являются причиной похолодания или, по крайней мере, связаны с похолоданием (Распопов и др., 2000; YANG Taibao, et al. 2004). Физической модели обсуждаемого явления авторы либо не приводят, либо она не верна. Например, в работе (Распопов и др. 2000) авторы утверждают, что интенсивность галактических космических лучей возрастает в периоды понижения интенсивности геомагнитного поля (по возрастанию концентрации изотопа ^{10}Be), что очевидно. Однако, это, по мнению авторов, приводит к похолоданию и развитию оледенения (?). Совершенно не ясна позиция авторов, когда, якобы выявленный ими этап оледенения, они соотносят с признанным всеми периодом потепления, произошедшим примерно 15 тыс. лет тому назад.

В рамках нашей модели горячей Земли можно попытаться найти объяснение явлению похолодания, например, потому, что в моменты прохождения экскурсов полярность геомагнитного поля меняется, Земля расширяется, что сопровождается увеличением интенсивности вулканической деятельности и возникновением т.н. «вулканической зимы» (Rampino, Stothers, 1985; Rampino, Ambrose, 2000). Температура поверхности Земли при этом понижается. Однако в такой модели не находится причины, которая может привести к резкому потеплению, наблюдаемому во всех рассматриваемых нами случаях. Растопить льды может только Солнце, но для этого необходимо ликвидировать, причем за очень малое время, экранирующее действие вулканического пылевого «одеяла». Поэтому, модель, в которой экранирующая солнечное излучение стратосферная пыль быстро разрушается космическими лучами, интенсивность которых резко возрастает в течение экскурса или инверсии, представляется более правдоподобной. В дальнейшем будем рассматривать именно эту модель.

Ещё раз обратимся к рисунку 9-5. Понижение температуры примерно на 10 градусов, после её «быстрого» подъема, происходит в течение ~ 100 тыс. лет. Скорость «охлаждения» $dT/dt = -10^{-4}$ °C/год. Увеличение температуры на 10 градусов, совпадающее по времени с геомагнитными экскурсами, 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. 9-5 видно, что и похолодание, и следующее за ним потепление сопровождаются быстрыми изменениями (вариациями) температуры. В течение 10 тыс. лет - потепления сменяют резкие похолодания не менее 10 раз, при этом 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, с которой происходит современное потепление. 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.

Обратим внимание на такую деталь. Рис. 9-5 и 9-6 (Petit et al., 1999; Vimeux et al., 2002) показывает, что температура ($\delta^{18}\text{O}$) начинает возрастать немного раньше начала экскурса, а концентрация пыли продолжает уменьшаться, причем начало уменьшения концентрации пыли предшествует началу роста температуры до того, как она стала равной нулю. В том случае, если модуль геомагнитного поля является суммой поля дипольного источника и поля ГМА, причем полярность ГМА совпадает с полярностью дипольного источника, то начало экскурса (по палеомагнитным данным) произойдет позже, чем в первом случае.

Это случится в тот момент, когда поле отрицательной полярности станет равным полю аномалии.

Уравнение эволюции температуры поверхности Земли на фоне двух процессов, один из которых приводит к похолоданию – за счет увеличения альбедо Земли α и уменьшения солнечного тепла, попадающего на Землю, и второй, приводящий к увеличению прозрачности атмосферы, увеличению потока тепла и нагрева земной поверхности можно записать следующим образом:

$$\partial T/\partial t = dT_0/dt + \partial/\partial h [D \partial T/\partial h - KT], \quad (9.8)$$

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, D – коэффициент диффузии солнечного излучения ($D \approx \lambda c$, λ – длина пробега фотона в «мутной» среде, c – скорость света), K – параметр дрейфа, который в нашем случае имеет смысл скорости переноса аэрозоля (пыли) в стратосфере Земли. Если рассматривать механизм убывания концентрации пыли только за счет гравитационного опускания пылинки на поверхность Земли, то параметр K будет соответствовать формуле Стокса для скорости падения капли:

$$K = v = (mg - \epsilon_0 qE)/6\pi\eta r, \quad (9.9)$$

где m – масса капли, а $q = \epsilon_0 \zeta r$ – её заряд, ζ – электрокинетический потенциал воды ($\zeta \approx 0.25$ В). В облаке принято считать: $mg \gg qE$. В нашем случае, для оценки минимального размера капли, можно остановиться на условии: $mg \geq qE$. $K = mg/6\pi\eta r$, заменяя $m \approx 4\rho r^3$, получаем, что $K = \rho r^2 g/4\eta$ (η – вязкость воздуха) зависит от квадрата размера капли. Легко показать, что если размер пылинки $r < 0.1$ мкм, то пыль в стратосфере будет находиться тысячи лет. Фактически параметр дрейфа значительно сложнее. Сюда входит нерегулярный источник пыли, механизм переноса пыли по стратосфере, взаимодействие пыли с космическим излучением, водным аэрозолем и т.п.

Уравнение (9.8) по смыслу и форме, это уравнение Фоккера-Планка (ФП), т.е. уравнение, описывающее процесс самоорганизации системы или среды [Хакен, 2005]. В нашем случае (9.8) описывает функционирование климатической системы, включающей источник пыли, механизм доставки её в стратосферу и распространения в этом слое, а так же механизм, приводящий к очищению стратосферы от пыли как за счет гравитационных сил, так и разрушения пылинок жестким излучением и вымывания пыли из стратосферы водным аэрозолем.

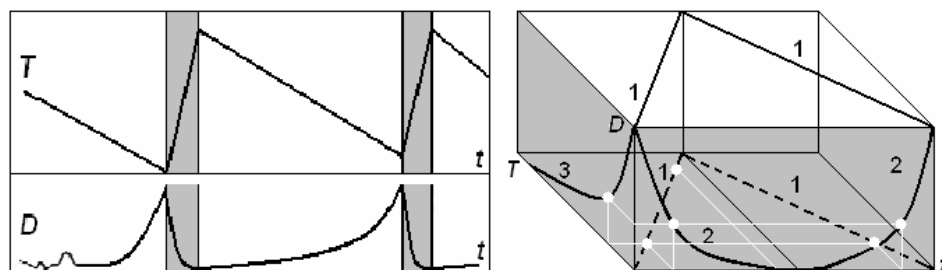


Рис. 9-6. Вариации температуры T и концентрации пыли D в течение времени t (слева). Пространственная модель, связывающая температуру T , с плотностью пыли в стратосфере D и временем эволюции климатической системы t . Белые точки соответствуют величинам T и D (справа).

Изобразим кривые T и D полученные при анализе ледяных кернов Антарктиды и Гренландии (на левом рисунке) в виде трехмерной модели (справа, рис. 9-6). Сравним $\partial T/\partial t$ с формулой (9.9). Сравнение показывает, что увеличение T связано с «просветлением» атмосферы, описываемой параметром $D \partial T/\partial h$, а перенос пыли в атмосфере с параметром KT . Заметим, что эта формула дает только качественное описание сложных процессов, происходящих в атмосфере даже в том, упрощенном виде, когда рассматривается только заполнение стратосферы вулканической пылью и последующее очищение стратосферы.

Экспурсы, пыль и геомагнитное поле. Анализируя данные по пыли и поведению геомагнитного поля (рис. 9-5), можно отметить некоторое запаздывание начала экскурсов относительно уменьшения концентрации пыли и температуры поверхности. Это явление, возможно, связано с тем, что экскурсы и инверсии – глобальные процессы, причина которых состоит в изменении режима работы фазовых переходов на границе внутреннего ядра. Экскурсы и инверсии происходят не мгновенно. Их началу, предшествует плавное понижение интенсивности поля B . Уменьшение модуля геомагнитного поля B ведёт к возрастанию интенсивности попадающего в атмосферу Земли космического излучения. Частицы высоких энергий разрушают пылевой слой в стратосфере. Атмосфера становится прозрачней. Солнце начинает греть поверхность Земли более интенсивно, начинается этап потепления.

В образцах горной породы, используемых в палеомагнитных исследованиях, экскурс фиксируется по резкому изменению величины наклонения. Это происходит тогда, когда вектор поля уже меняет знак. Собственно этот момент и считается началом экскурса или инверсии. Естественно, этот момент отстает по времени от того этапа, в течение которого началось и происходило уменьшение поля. Как мы отмечали, понижение интенсивности поля может привести к увеличению интенсивности ГКЛ, что вызовет разрушение стратосферного аэрозоля, что, в конечном счете, приведет к повышению температуры поверхности. Нашу модель подтверждают данные работы (Valet, Meunadler, 1993), в которой авторами получена зависимость между уменьшением величины дипольного поля в течение инверсии B и длиной интервала смены полярности ΔT . В первом приближении: $\Delta T \sim B^2$. Рассмотрим, как можно интерпретировать полученный результат в рамках нашей модели. Предположим, что инверсия происходит в зоне влияния аномалии и в момент смены полярности фиксируется поле аномалии B_A . По модели, чем больше величина B_A , тем длиннее ΔT . Поле аномалии интегрируется таким образом, что $\Delta T \sim \int B_A dt$. После интегрирования получаем: $\Delta T \sim B_A^2$, что и требовалось доказать.

Авторы (Hartl, Tauxe, 1996) показали, что уменьшение модуля поля в момент инверсии Матуяма - Брюнес и предшествующего этой инверсии экскурса Хурамильо было различным для различных регионов. Пробы брались в районах расположения базальтов, излившихся на дно океанов вблизи Индонезии (0° , 160° E) и западного берега Африки (0° , 20° W). В первом случае модуль поля уменьшался не более, чем в 10 раз от его нормальной величины, во втором, - понижение модуля было большим, не менее, чем в 30 раз. Эти данные подтверждаются другими аналогичными наблюдениями. Так, например, в (Oda et al., 2000) показано, что в момент этой инверсии в базальтах, излившихся в районе острова Борнео (7° N, 122° E), модуль поля уменьшился примерно в 5 – 7 раз от его нормальной величины. Аналогичное по величине уменьшение было зафиксировано вблизи побережья Калифорнии (Heider et al., 2000). Значительное понижение модуля геомагнитного поля в периоды инверсии Матуяма-Брюнес и экскурса Хурамильо было зарегистрировано вблизи западного побережья Африки (Yamazaki, Oda, 2001), здесь оно было не менее, чем в стократным.

Приведенные факты по поведению модуля поля в моменты инверсий согласуются с данными в (Clement, 2004), где установлено, что чем короче период инверсии $\sim \Delta T$, тем

на большую величину понижается интенсивность геомагнитного поля $\sim \Delta B$ ($\Delta T \cdot \Delta B \approx const$). Полученная зависимость позволяет связать скорость смены полярности поля (ΔT) с продолжительностью периода, следующего за инверсией, - хрона T^* . Так как $\Delta T \sim 1/\Delta B$, а $T^* \sim \Delta B^2$, получаем: $T^* \sim \Delta T^2$. Чем быстрее происходит смена полярности дипольного поля, тем больше длительность следующего за инверсией хрона.

Рассмотрим, насколько обсуждаемые нами результаты согласуются с теорией дрейфа магнитных полюсов в моменты инверсий и экскурсов. Согласно этой теории, дрейф полюсов происходит по вполне определенным траекториям, на которых располагаются глобальные магнитные аномалии (Kuznetsov, 1999). В момент времени инверсии (экскурса), когда поле дипольного источника становится близким к нулю, собственное поле глобальных магнитных аномалий ещё сохраняет свое прежнее значение. Затем поле дипольного источника возрастает от нулевого значения со знаком, обратным предыдущему, что приводит к аннигиляции полей дипольного источника и аномалии. Так происходит смена полярности поля на выделенных трассах. В тех районах, где влияние аномалий не сказывается, например, в Африке, модуль поля во время инверсий и экскурсов снижается, практически, до нуля. Именно в этих регионах фиксируется и самое короткое время переполюсовки. Таким образом, палеомагнитные данные однозначно показывают, что в момент инверсии модуль геомагнитного поля в Африке уменьшается значительно больше (в 100 и более раз), по сравнению с другими регионами: Азией, Австралией, Америкой, где модуль поля уменьшается менее чем в 10 раз.

Характер изменения температуры. Температура поверхности Земли, как при потеплении, так и при охлаждении, - изменялась не плавно, а резкими «толчками», амплитуда которых редко превышала 2 – 3 градуса, а время броска температуры, «толчка» - составляло не более 10^3 лет. В (Rahmstorf, 2003) приведены точные значения дат резких изменений температуры в течение последнего оледенения (T по $\delta^{18}O$, 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 ($\delta^{18}O$). В работе (Dallenbach et al., 2000), авторы выделяют 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. По-видимому, эти колебания температуры связаны не только с экскурсами. Возможно, как и принято считать, решающую роль в таких изменениях играет изменение концентрации метана и двуокиси 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 менее 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, 250 и 120 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 похолодание, следующее после потепления, наступало более резкое, чем похолодание поверхности Антарктиды в настоящее время.

Концентрация ^{10}Be . Обратим внимание на данные, полученные рядом авторов по изучению временного распределения концентрацией изотопа ^{10}Be в осадочных породах. Рисунок 9-5 (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 очень мала и появление этого изотопа полностью определяется интенсивностью космических лучей, т.к. ^{10}Be получается при бомбардировке ГКЛ атомов атмосферного азота.

Таким образом, совпадение увеличения плотности космических лучей в периоды экскурсов может служить подтверждением нашей модели. Совпадение периодов прохождения экскурсов и резких потеплений однозначно говорит в пользу того, что происходит увеличение прозрачности атмосферы, т.к. льды может растопить только Солнце. Никаких внутренних источников тепла для этого не достаточно.

Способность галактических космических лучей (ГКЛ) «пробить» толщу атмосферы и 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). Очевидно, что энергия и плотность потока ГКЛ, которые могут достигнуть поверхности Земли, может возрасти неоднократно в том случае, если на некотором пространстве земной поверхности величина геомагнитного поля окажется практически равной нулю. Принято считать, что в результате ядерной реакции протонов ГКЛ с атомами азота атмосферы образуется очень редкий в литосфере изотоп ^{10}Be . Его наличие свидетельствует о присутствии ГКЛ, а его концентрация пропорциональна плотности потока.

Отношение изотопов $[\text{}^{10}\text{Be}]/[\text{}^7\text{Be} + \text{}^9\text{Be} + \text{}^{10}\text{Be}] = 0.028$ (Aldahan, Possnert, 2003) показывает, что ГКЛ проникали сквозь атмосферу и попадали в почву. 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. 9-4), что увеличение концентрации изотопа ^{10}Be в осадочных породах совпадает по времени с прохождением экскурсов и инверсий (Raisbeck et al., 1985; Robinson, et al., 1995; Aldahan, Possnert, 2003; Frank et al., 1997).

Модель. Принято считать, что продолжающееся в наше время примерно в течение последних 100 лет потепление, связано с развитием парникового эффекта. Разовьем эту идею. Учтем высказанную в (Монин, Шишков, 2000) идею, согласно которой основная роль в возникновении парникового эффекта принадлежит природным, а не антропогенным примесям. Если этот тезис 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, приводящей, в свою очередь, к увеличению количества действующих одновременно вулканов. В этом случае парниковый эффект может плавно перейти в антипарниковый, и на Земле, вместо потепления, начнется «вулканическая зима» - 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):

$$\Delta a/t = -4(1 - w)a + 2wh(1 - a)^2, \quad (9.10)$$

где $h = \int h(m) dm$ - 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 альбедо Земли. При $(1 - a)^2/2a > (1 - w)/wh$ - альбедо Земли возрастает. Например, при концентрации стратосферного аэрозоля $N_{CA} = 10^4 \text{ см}^{-3}$ и объемной концентрации $r = 160 \text{ мкм}^3/\text{см}^3$ для солнечного излучения в интервале длин волн от 0.2 до 2 мкм, величина $a = 100 \%$ (Rahmstorf, 2003). Размер пылинки a ($a \sim V^{1/3}$, $V = r / N_{CA} = 1.6 \times 10^{-2} \text{ мкм}^3$): $a \approx 0.25 \text{ мкм}$. 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 при толщине слоя $h \leq 1 \text{ км}$, будет экранирована от солнечного тепла практически полностью.

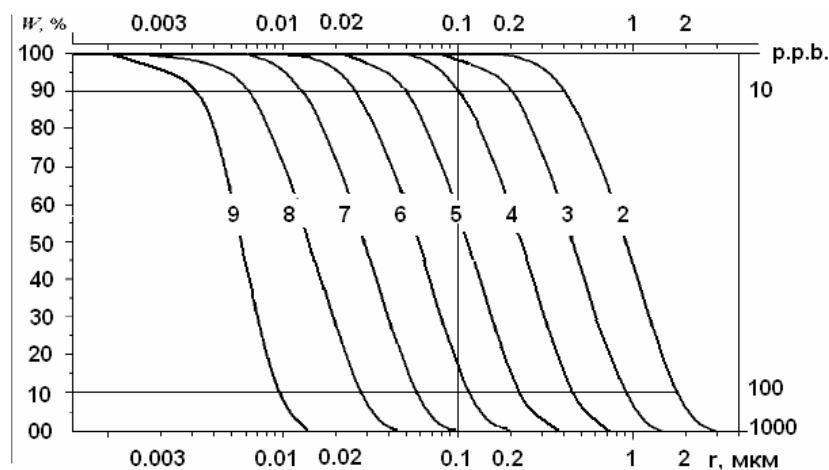


Рис. 9-7. Коэффициент прозрачности стратосферы W в зависимости от размера СА для слоев различной концентрации. Кривая 2 соответствует $N = 100 \text{ см}^{-3}$ и т.д., по данным (Гончаренко, Кивва, 2002).

Как следует из рисунка 9-5, максимальная концентрация пыли во льдах Антарктиды и Гренландии $N \approx 1 \text{ р.р.м.}$ (10^6) Очевидно, что концентрация пыли в палеоатмосфере могла отличаться от этого значения. Учитывая плотность льда (1 г/см^3), 1

$\rho \cdot m \approx 10^{-6}$ г/см³. Примем размер пылинки $r \approx 0.25$ мкм, тогда её объем $\sim 10^{-14}$ см³, площадь поверхности $S \approx 10^{-9}$ см² и масса $\sim 10^{-14}$ г, а концентрация пылинок во льду n равна примерно 10^8 см⁻³. Предположим, что вся пыль, содержащаяся в столбе атмосферы толщиной h , была адсорбирована в слое льда толщиной l . Учитывая скорость наращивания льда $v \approx 1$ см/год и принимая характерное время процесса наращивания пыли $t \approx 1$ тыс. лет, получим величину $l = 10$ м. Общее количество пылинок в слое льда площадью 1 см² и толщиной 10 м равно 10^{11} . При толщине слоя аэрозоля, равной 1 - 3 км, концентрация пыли N_{CA} в слое составит не менее 10^5 см⁻³.

Экстраполируя результаты расчетов эффектов экранирования солнечного излучения слоем стратосферного аэрозоля (СЭ), приведенных в работе (Гончаренко, Кивва, 2002), получим, что слой СЭ с размером частиц 0.25 мкм и концентрацией N_{CA} будет полностью (на 100%) экранировать Землю от солнечного света (рис. 9-7). Воспользуемся полученной в этой работе связью между N_{CA} и радиусом пылинки на широкий спектр её размеров и покажем, что при нулевой прозрачности атмосферы, увеличение размера пылинки r в 2 раза эквивалентно понижению N_{CA} в 10 раз: $r \sim N_{CA}^{-d}$, где показатель $d \approx 0.3$; r (мкм) $\approx 15N_{CA}^{-0.3}$ (см⁻³).

Как ГКЛ «очищают» стратосферу от пыли. Как отмечалось, наша модель подразумевает воздействие потока ГКЛ на СА таким образом, что в результате этого воздействия величина N_{CA} уменьшается практически до нуля. Выясним, насколько правомерна такая постановка, для чего обратимся к полученному недавно экспериментальному результату (Vanhellemont, et al., 2002) по корреляции интенсивности нейтронов ГКЛ и концентрации СА. Авторы показали, что число нейтронов, регистрируемых в течение 1987 – 1991 гг. с месячным усреднением у поверхности Земли, уменьшается примерно на 30 % при увеличении концентрации СА (высота 26.5 км) - на два порядка. Полученный в (Vanhellemont, et al., 2002) результат показывает, что обсуждаемая нами модель связи концентрации атмосферных аэрозолей с ГКЛ имеет основание.

Известно (Spitzer, 1978), что протоны с высокой энергией 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, то необходимая энергия для испарения пылинки $E = U \cdot m = 10^{-10}$ Дж, или $\sim 10^9$ эВ. Эта энергия близка энергии ГКЛ, способных проникнуть в атмосферу Земли при современном геомагнитном поле. Проходя пылевой слой, протоны и мезоны ГКЛ отдают на разрушение частиц лишь малую долю своей энергии. При экскурсии или инверсии все частицы ГКЛ с энергией ≈ 100 МэВ будут проникать в атмосферу Земли, но плотности их потока явно недостаточно для разрушения пылевого слоя. Как мы отмечали, в столбе атмосферы сечением 1 см² и толщиной 1 км, при концентрации $N_{CA} \approx 10^5$ см⁻³, находится 10^{11} пылинок. Предположим, что количество пылинок за время воздействия t на них потока ГКЛ j не увеличивается, тогда для полного испарения всей пыли потребуется некоторое количество лет. Примем характерное время убывания концентрации пыли равным ~ 10 тыс. лет, примем, что для испарения одной пылинки необходимо затратить 10^9 эВ, и, соответственно, для испарения 10^{11} пылинок необходимо иметь энергию $\sim 10^{20}$ эВ·см⁻². Время процесса уменьшения концентрации пыли можно оценить из эксперимента, как равное $t \approx 10^{11}$ с, тогда можно так же оценить минимальную плотность потока частиц, равную $j \sim 10^9$ см⁻² с⁻¹. В этой оценке не учитывается, что частица космических лучей, достигнув стратосферного слоя, должна обладать немалой энергией, порядка 100 МэВ. Причем на столкновения с пылинками энергия частицы будет потрачена далеко не вся, а лишь незначительная её часть. Мы не учитывали тот факт, что заряженные частицы космических лучей 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, что при лобовом столкновении иона с пылинкой ей передается лишь малая часть кинетической энергии, т. е. плотность потока, необходимого для испарения (диспергирования) пылинок, значительно больше, чем оцененная нами величина. Даже если учесть, что плотность потока ГКЛ при энергии частиц, равной 10 ГэВ, составляет $\sim 0.1 - 1 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, и, что на стратосферных высотах она, примерно, на два порядка выше (Асатуров и др., 1986), - все равно, идея испарения СА только частицами космических лучей оказывается сомнительной.

Учтем эффекты, связанные с разрушением радиационных поясов (РП) при исчезновении геомагнитного поля. Частицы РП - это частицы высоких энергий, порядка 10 – 100 МэВ, которые образуются при распаде нейтронов альbedo космических лучей, т.е. нейтронов, возникающих при взаимодействии ГКЛ с атмосферой. При этом заряженные частицы попадают в магнитные ловушки РП. О плотности потока частиц РП можно судить по потоку, регистрируемому спутниками в районе Бразильской глобальной магнитной аномалии (ГМА), иногда её называют Южно-Атлантической ГМА. Принято считать, что в районе Бразильской ГМА внутренний РП опускается очень низко - на спутниковые высоты и, таким образом, в этом районе регистрируется поток частиц на 3 - 4 порядка выше, чем поток ГКЛ. Однако, как показывают оценки, этого увеличения плотности потока КЛ всё равно недостаточно для испарения в течение 10 тыс. лет слоя СА с концентрацией = 1 p.p.m.

Рассмотрим альтернативную модель воздействия ГКЛ на атмосферу в периоды экскурсов и инверсий геомагнитного поля, когда плотность проникающего в атмосферу потока ГКЛ значительно больше, чем обычно. При этом в стратосфере образуется большое количество ионов, которые являются ядрами конденсации паров воды. На ядрах конденсации образуются мелкие капли (частицы) водного аэрозоля. Образовавшиеся частицы коагулируют на находящихся пылинках, увеличивая их размер (аналог камеры Вильсона). Выросшие капли падают на Землю и доставляют к её поверхности исходную пылинку значительно быстрее, чем осела бы она сама в первоначальном виде. Скорость падения капель v пропорциональна квадрату их размера r , т.к. она оценивается по формуле Стокса.

Оценим время формирования капли, обозначим через t характерное время столкновения частицы с растущей каплей. Тогда $t = (S n v)^{-1}$, где $S = \pi r^2$ - сечение “капли”, $n = r/m$ - концентрация частиц в атмосфере на соответствующей высоте, r - плотность атмосферы на этой высоте, m - масса частицы, v - 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:

$$t_R = \int dg / S n v, \quad (9.11)$$

и т.к. $S = \pi (V_c g)^{2/3}$, то $t = g^{1/3} / (V_c^{2/3} n v)$, или $t_R \gg r / (V_c n v)$. Время роста капли пропорционально её размеру и обратно пропорционально концентрации возникших на ядрах конденсации мелких частиц (микрокапель), их объему и их тепловой скорости дрейфа. С другой стороны, время падения капли – обратно пропорционально квадрату размера капли. Время нахождения в стратосфере капель малого размера определяется скоростью их падения, больших капель - скоростью их роста. Атмосфера очищается быстрее всего, когда эти времена близки по величине : $t_R \leq t_C$.

Оценим размер исходной пылинки, полагая, что время её пребывания в стратосфере известно, а оседает она на Землю со скоростью Стокса. Учтем два момента. Примем к сведению следующее. Стратосферный аэрозоль, образовавшийся при вулканических извержениях в течение современного летоисчисления (2 тыс. лет), представляет собой SO_4^{2-} (Zielinski et al., 1994). В то же время, можно предположить, что СА древних вулканов (старше 15 тыс. лет) – это нерастворимые в воде осадки, результат пленианских извержений. В первом случае, (из наблюдений) время оседания СА порядка года, а во

втором случае – это ≈ 1 тыс. лет. Т.о., различие во времени существования СА составляет 3 порядка. Время t_C оценим по Стоксовой скорости v , учитывая, что $v \sim r^2$. Положим, что СА, оседая на поверхность земли, проходят при этом путь $L = 20-30$ км. Время падения t_C будет определяться $t_C = L/v$. Или, после подстановки значения вязкости воздуха $t_C \approx 10^6/r^2$ (r , мкм; t , сек). В первом случае размер СА (SO_4^{2-}): $r \approx 0.2$ мкм, во втором, r должен быть примерно в 30 раз меньше: $r \approx 10^{-2}$ мкм.

Положим, что концентрация СА в слое стратосферы толщиной 1 км ≈ 100 р.р.м. – это почти максимальное значение концентрации пыли. При этом объемная концентрация пылинок n размером 0.01 мкм может достигать 10^9 см^{-3} , и она будет в 1000 раз ниже: $n \approx 10^6 \text{ см}^{-3}$ для пылинок размером 0.2 мкм. Эта оценка совпадает с полученной нами ранее взаимосвязи радиуса СА r с концентрацией N_{CA} при условии полного поглощения солнечного излучения на поверхности Земли: $r \text{ (мкм)} \approx 15N_{CA}^{-0.3} \text{ (см}^{-3}\text{)}$.

Концентрация водных комплексов (микрокапель), состоящих из нескольких молекул воды, на высоте 30 км, $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Для того, чтобы в среде успешно происходила конденсация паров воды, и образовывался водный аэрозоль, необходимо наличие ядер конденсации (ЯК), в качестве которых могут выступать ионы, возникшие при прохождении через атмосферу КЛ. Для образования СА размером 0.1 мкм из пылинок размером 0.01 мкм необходимо, примерно, 1000 микрокапель и, соответственно, 1000 ЯК. Следовательно, концентрация ЯК должна быть того же порядка $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Определим величину dQ/dt – скорость образования ионов. Учтем, что ГКЛ с энергией выше энергии обрезания вносят в нижнюю атмосферу заряд $\approx 10^3$ кулон/с (ток атмосферного электричества). ГКЛ совместно с СКЛ и частицами радиационных поясов (в момент их разрушения при экскурсах и инверсиях геомагнитного поля), могут вносить в стратосферу заряд, примерно, на 5 - 6 порядков больший, чем ГКЛ в нижнюю атмосферу. В этом случае: $dQ/dt = 10^9$ кулон/с. Оценим величину плотности зарядов (ЯК) N , используя равенство: $dN/dt = \alpha N^2$. Положим, что $N^+ = N^-$, тогда, зная коэффициент рекомбинации ионов α , можно оценить скорость образования зарядов в атмосфере dN/dt . Подставив в формулу величину элементарного заряда e , получим скорость накопления зарядов: $dQ/dt = eV \cdot dN/dt = eV \cdot \alpha N^2$, где V – объем слоя СА ($\sim 10^{22} \text{ см}^3$). Учитывая величину коэффициента рекомбинации $\alpha \approx 10^{-6} \text{ (см}^3 \text{ с}^{-1}\text{)}$ и принятую нами скорость образования ионов $dQ/dt = 10^9$ кулон/с, получаем: $N_0 \approx 10^6 \text{ см}^{-3}$. Предполагая, что N_0 накапливается со временем, оценим время накопления, необходимого для получения заданной величины N . Помножив N на величину единичного заряда e , получим необходимую плотность заряда в слое: $n = 10^{-7}$ кулон см^{-3} . Оценим полный заряд слоя СА в момент экскурса или инверсии: $Q = 10^{15}$ кулон. Такой заряд может быть внесен потоком заряженных частиц за время $t = Q/(dQ/dt) \approx 1$ год.

Характерное время снижения концентрации пыли ≈ 1 тыс. лет. Это означает, что в наших оценках, время t можно увеличить, по крайней мере, на три порядка. Скорость образования ионов dQ/dt может быть уменьшена так же на три порядка, что, очевидно, проще достижимо в моменты экскурсов и инверсий, когда магнитное поле перестает выполнять защитные функции от попадания в атмосферу космических лучей и удерживать в «ловушках» заряженные частицы радиационных поясов.

Из предложенной модели следует, что прохождение экскурса или инверсии может приводить Землю к потеплению. Оговоримся, что в качестве исходного состояния мы рассмотрели ситуацию, когда атмосфера сильно запылена. В настоящее время атмосфера прозрачна и наша модель не применима. Возникает вопрос, всегда ли экскурс или инверсия приводит к потеплению? Как мы отмечали выше, на этот счет имеются различные мнения. В моменты прохождения экскурсов полярность геомагнитного поля меняется, на Земле происходит увеличение интенсивности вулканической деятельности, сопровождающейся выбросом пирокластики, самая тонкая фракция которой может находиться годами взвешенной в атмосфере, в результате чего и возникает т.н. «вулканическая зима» (Rampino, Stothers, 1985; Rampino, Ambrose, 2000). Температура

поверхности Земли при этом понижается. Известно, что в условиях прозрачной атмосферы понижение температуры может произойти при повышении плотности потока космических лучей в моменты солнечных вспышек, когда возрастает поток СКЛ. Это приводит к дополнительной ионизации, образованию ЯК, атмосферных аэрозолей и, в конечном счете, к экранированию солнечного излучения – т.е. к похолоданию (Гончаренко, Кивва, 2002). Из вышесказанного следует вывод, что в зависимости от оптических свойств атмосферы, прохождение экскурса или инверсии может приводить к похолоданию (в ситуации с чистой атмосферой) либо к потеплению, когда на Земле холодно.

Супервулканы - источник стратосферной пыли. Принято считать, что пыль, вмороженная в лед, это осевший стратосферный аэрозоль (СА), образующихся в результате взрывных извержений вулканов, хотя существуют и другие точки зрения. На рис. 9-5, где приведено временное изменение концентрации пыли в слоях льда, чертой снизу выделены периоды времени, предшествующие началу появления пыли, что, по-видимому, связано с началом активного вулканизма. Выделенные интервалы составляют время порядка 10 тыс. лет. Отметим, что 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.

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. 9-8) (Zielinsky et al., 1994). 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.9-5).

Роль СА вулканического происхождения (вулканической пыли) в изменении климата, в частности – похолодании, - хорошо изучена; это т.н. «вулканическая зима» (Rampino M.R., et al., 1988). 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. ($1 \text{ р.р.б.} = 10^{-9}$) (Rampino, 2002).

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 (Rampino M.R., et al., 1988; Zielinsky et al., 1994), объемная концентрация аэрозолей $10^{-6} = 1 \text{ р.р.м.}$ 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.

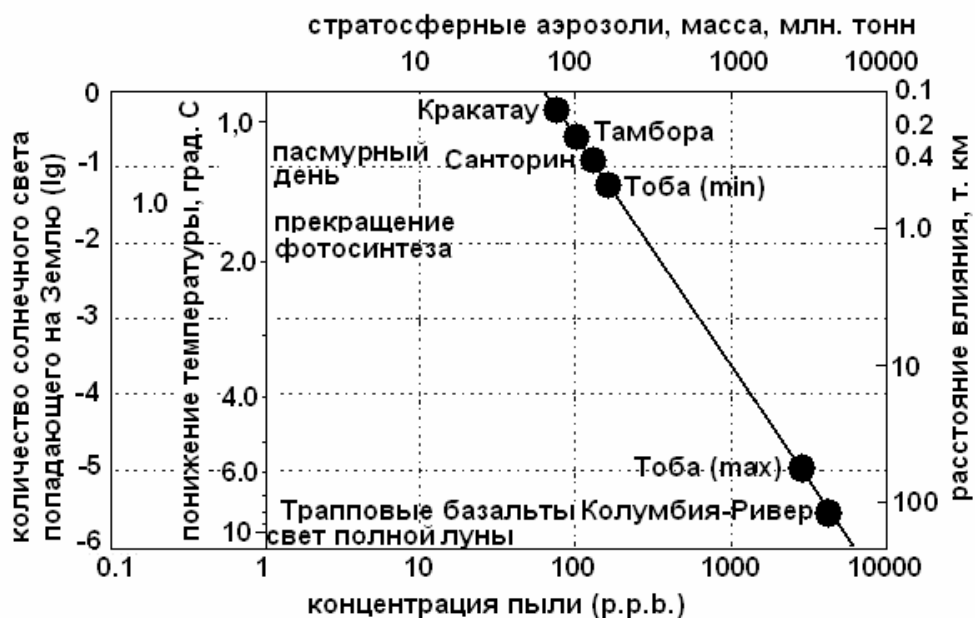


Рис. 9-8. Экранирование солнечного света СА эксплозивных вулканических извержений (Rampino, et al., 1988; Rampino, 2002). Верхняя шкала: масса аэрозоля, выброшенного в стратосферу, при извержении. Нижняя шкала – концентрация пыли Шкала слева: количество солнечного света падающего на Землю и понижение температуры поверхности Земли в зависимости от массы аэрозоля. Справа – расстояние влияния извержения

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 $10^{-3} \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$. Попробуем оценить этот параметр по характеристикам льда. Отметим, что в ядрах льда пыль распределена неравномерно. Характерное время нарастания концентрации пыли от извержения Тоба (см. рис. 9-5) составляет 1 – 2 тыс. лет. Средняя скорость образования льда равна, примерно, 1,5 см в год (Juozel, 1993), 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} г , то концентрация пыли в этом слое достигала 10^6 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.т. 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.

Информация об извержении супервулкана Тоба хорошо известна. Вероятно, эпизод резкого возрастания концентрации пыли во время его извержения – обоснован. Значительно меньше информации о других супервулканах, те сведения, которые удалось по ним собрать, - представлены на рис. 9-9. Очевидно, что эту работу следует продолжить, т.к. знание о супервулканах крайне необходимо, т.к. одно извержение супервулкана, например, такого как происходит сейчас на Ио – спутнике Юпитера, может оказаться очень полезным.

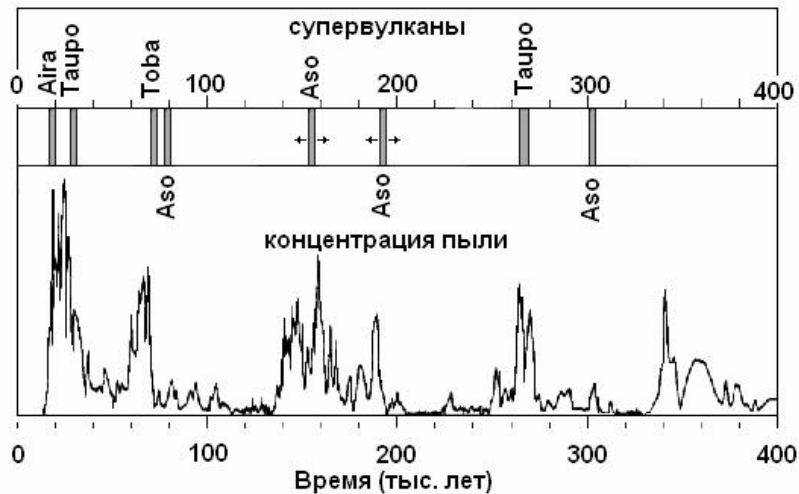


Рис. 9-9. Супервулканы и концентрация пыли.

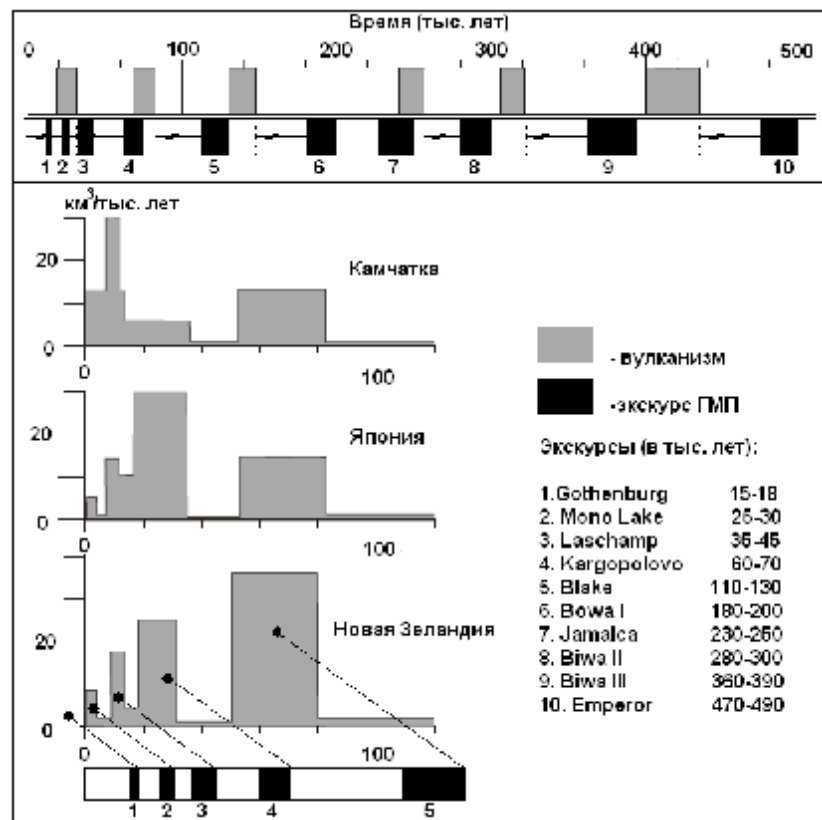


Рис. 9-10. ЭкскуРСЫ ГМП предшествуют кратковременным периодам усиления вулканизма.

На верхней панели рис. 9-10 приведена последовательность циклов вулканизма и ГМП. Рис. 9-10 показывает, что экскурсы предшествуют циклам вулканизма примерно на 20 – 30 тыс. лет. Геомангнитное поле, как это следует из модели горячей Земли, инерционностью не обладает. Все явления геомагнетизма происходят (по модели) на границе внутреннего ядра. Именно здесь возникает избыточное давление, которое передается на границу ядро-мантия и, релаксируя в литосфере, вызывает её упруго-пластическое течение.

Оценим характерное время вязкоупругой релаксации вещества мантии на воздействие геодинамического импульса вызванного кратковременным циклом

расширения Земли: $t = \mu/G$, где μ – «вязкость» среды, а G – модуль упругости. По различным оценкам, μ варьирует в диапазоне $10^{21} - 10^{22}$ Па с, модуль упругости изменяется в интервале: $G \approx 10^9 - 10^{10}$ Па. Отсюда характерное время: $t \approx 10^{12}$ с = 30 000 лет, что неплохо совпадает с характерной задержкой начала усиления вулканизма после экскурса (рис. 9-10), или, как следует из модели горячей Земли, - импульса её расширения и последующего сжатия.

На рис. 9-10 (нижняя панель) показана вариация активного вулканизма за последние 100 тыс. лет - для трех регионов (Селиверстов, 2004). На этом же рисунке приведен список экскурсов и показано, что замеченная выше особенность, подтверждается ещё в большей степени, чем на верхней панели этого рисунка. Можно отметить такую особенность: чем продолжительнее экскурс, тем больше время задержки и интенсивнее вулканизм.

Сказанное выше позволяет считать взаимосвязь: экскурс ГМП – вулканизм – стратосферная пыль – похолодание вполне обоснованной. Представляется, что этот результат должен быть использован в дальнейшем, при построении теории климата.

Подведем итоги этого раздела:

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 наблюдатель не имеет возможности исследовать экспериментально разрушение пылевого слоя быстрыми протонами и ионами. 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 можем 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 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.

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. Это ставит под сомнение теорию Миланковича согласно которой, потепления Северного и Южного полушарий должны быть в противофазе.

Следует учесть ещё одно, немаловажное обстоятельство. Миланкович разработал теорию для чистой атмосферы. Возможно, будь на Земле атмосфера всегда такой же чистой как в наше время, его теория была бы применима.

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 (см. Главу VI). Естественно предположить, что полюса в момент экскурса дрейфуют по поверхности Земли по тем же трассам, что и в момент инверсии. Как отмечалось, 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, а например, - квадрупольный характер. 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 со скоростью порядка 40 км/год. Расстояние между Гренландией и Антарктидой равно примерно половине длины экватора. Поделив это расстояние на скорость дрейфа, получаем искомую величину задержки климатических изменений меньше 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). Рисунок 9-5 показывает, что изменение климата, причем, 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, Jr, 1998; Адушкин и др., 2003). 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.

Обратимся к 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 мегаполисов, 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.

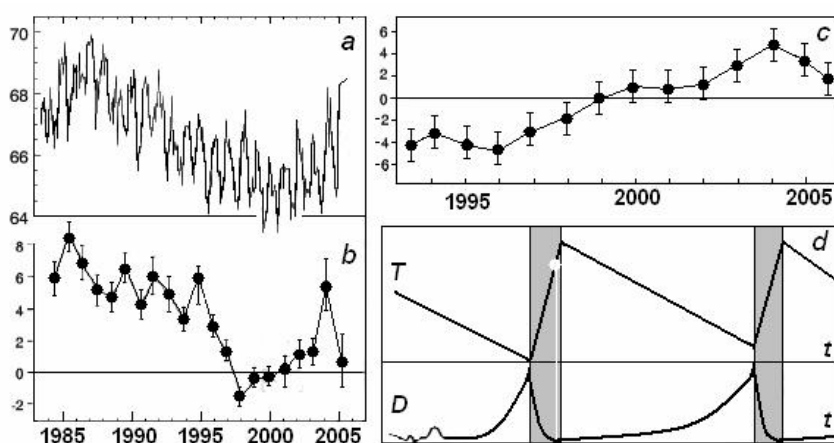


Рис. 9.11. Вариации концентрации стратосферного аэрозоля % (a), альбедо Земли (b) (Palle, et al., 2006), аномалии теплосодержания океана (c) и температуры T и концентрации пыли D (d).

Этот вывод был подкреплён исследованиями, проведенными в течение последних пяти лет (рис. 9-11-а). Выяснилось, что Земля все интенсивнее отражает солнечные лучи.

Аналогичным образом ведет себя и теплосодержание океана, в то время как температура Земли продолжает увеличиваться. Каким образом происходит непрерывное потепление, если количество солнечного излучения, достигающего поверхности Земли, сокращается?

Головко (2006) 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. О первом говорит автор, однако, анализ палеоданных по температуре и концентрации стратосферной пыли позволяет рассматривать и другой ход развития событий.

Обратимся к данным по палеоклимату (рис. 9-5). Оказывается, что такая ситуация происходила и ранее. Конечно, точно определить величину альbedo Земли примерно 100 тыс. лет тому назад невозможно. Однако если допустить, что альbedo может быть связано с концентрацией пыли в стратосфере, то окажется, что в конце периода потепления, концентрация пыли, после достижения нулевого значения, уже начинает возрастать, хотя температура ещё продолжает увеличиваться, как бы «не замечая» возрастания пыли, иначе, переводя на современную ситуацию, «не замечая» возрастания «альbedo». Связь альbedo с концентрацией стратосферного аэрозоля подтверждает рис. 9-11-а и 9-11-б, а связь температуры и концентрации пыли - рис. 9-11-d. По всей видимости, обсуждаемое явление связано с тем, что Земля в такой ситуации нагревается не столько солнечным излучением, которое уменьшается, сколько переносом тепла к твердой Земле от океана.

В частности, на рис. 9-11-d видно, что концентрация пыли D уже достигла минимума и стала увеличиваться (альbedo возрастает), а температура T продолжала расти. Не происходит ли подобная ситуация в настоящее время? Если это так, то **Земля стоит на пороге начала резкого похолодания.**

IX. 4. Роль инверсий и экскурсов геомагнитного поля в эволюции человека.

Одним из первых, кто высказал предположение, что жизнь на Земле могла бы быть совершенно иной, если бы отсутствовало геомагнитное поле, т.е. отсутствовало его экранирующее от радиации космоса влияние, был Р. Уффен (Uffen, 1963). С этим мнением был согласен известный магнитолог Паркинсон, который считал, что жизнь на Земле могла бы зародиться лишь после того, как возникло геомагнитное поле, экранирующее Землю от смертоносных космических лучей.

Покажем, что вековые вариации геомагнитного поля - инверсии и экскурсы «контролируют» не только этапы резкого потепления климата, но и этапы биологической эволюции Земли, в частности, эволюции человека. Как отмечалось выше, в моменты инверсий и экскурсов радиационный фон Земли значительно возрастает, что приводит, с одной стороны, к резкому потеплению и таянию ледников и, с другой, - к генетическим мутациям животного и растительного мира. Так, например, в момент инверсии Гаусс-Матуяма, произошедшей примерно 2.3 млн. лет тому назад, произошла сильная генетическая мутация человекоподобной обезьяны (австралопитека), которая привела к возникновению нового вида (гомо эректус), который, в свою очередь, подвергшись нескольким импульсным радиационным воздействиям, превратился, в конечном счете, в современного человека.

Эволюция человека. Известно довольно большое количество схем эволюции человека, причем, каждая из таких схем, несколько отличаясь в деталях от других, аналогичных, имеет некую общность. Она состоит в том, что все схемы, в той или иной степени, представляют собой генетическое, эволюционное «дерево». Такой подход к проблеме

эволюции берет начало с работ Ч. Дарвина. Согласно общепринятым представлениям, один вид, эволюционируя, развивается и замещает собой другой, - родительский. Именно поэтому на большинстве схем их авторы проводят соединительные межвидовые линии, как правило, сопровождаемые вопросами. Возникновение вопросов вызвано тем, что антропологи не находят устойчивых данных, подтверждающих конкретные связи предков человека – гоминид, с человеком современным.

Единого мнения по поводу временной схемы развития гоминид и человека, а также взаимосвязи видов, не существует (Wood 2002). Антропологи и генетики согласны лишь в том, что и те, и другие произошли в Африке. Антропологи (Wood, 2002) аргументируют этот вывод тем, что возраст неафриканских находок ископаемых останков гоминид не превышает 2 млн. лет. Тогда как в Африке найдены останки, имеющие возраст около 6 - 7 млн. лет (Brunet, et al., 2002). Генетические исследования эволюционной истории человечества так же указывают на Африку (Jorde, et al., 1998; Satta, Takahata, 2004; Cann, et al., 1987; Horai, et al., 1995; Foley, 1998; Huelsenbeck, Imennov, 2002), как на место зарождения современного человека.

Генетическими исследованиями событий эволюционной истории человека выявлены следующие точки на временной шкале. Известно, что люди и человекообразные обезьяны имели общих предков, но не горилла и не орангутанг, оказались нашими ближайшими родственниками, - а шимпанзе. Расхождение филогенетических ветвей человека и шимпанзе произошло около 5 млн. лет назад (Табл. 9.2), по разным данным: (Takahata, Satta, 1997) = 4.5; (Gagneux, et al., 1999) = 4.7; (Takahata, et al., 1995) = 4.6; (Horai, et al., 1995) = 4.9; (Chou, et al., 2002) = 5.3; (Glazko, Nei, 2003) = 6.3. Дата ~ 5 млн. лет назад соответствует инверсии геомагнитного поля и является пограничной точкой эпох Миоцена и Плиоцена.

Известно, что для реконструкции истории человечества используется метод “молекулярных часов”. Наиболее информативными в настоящее время объектами исследований являются митохондриальная ДНК и У-хромосома. Первая (мтДНК) передается только по материнской линии, в то время как У-хромосома, - только по мужской. Мутации, которые в них появляются, маркируют потомство. Анализируя древние мутации в современных людях, можно понять, как шла эволюция человека. Так как скорость накопления мутаций – величина постоянная, то можно установить, когда жил последний общий предок данных видов. В настоящее время генетики оценивают датировку этих мутаций, анализируя ДНК современных людей, так как биополимерные молекулы, выделенные из останков старше 100 тыс. лет (Chou, et. al., 2002), теряют исходные свойства, и требуют специальных операций при работе с ними.

Методом “молекулярных часов” была получена дата отделения линии гориллы (в млн. лет): (Takahata et al., 1995) = 7.2; (Glazko, Nei, 2003) = 7.0. Эта дата совпадает с нижней границей Мессенианского этапа миоценового периода и времени инверсии на палеомагнитной шкале.

Граница этапов эпохи Плиоцена (возраст 2,6 млн. лет) является датой мутаций, обнаруженных у всех современных людей. Эти мутации предшествуют времени возникновения принципиально нового вида *Homo erectus* (Wood, 2002). Этот вид отличается от всех ранее живущих гоминид резким возрастанием объема головного мозга и считается предком современного человека (Hawks, et al., 2000). Мутация, в результате которой был инактивирован ген, кодирующий наработку сахарозы на поверхности клетки, имеет возраст ~ 2,8 млн. лет (Chou, et al., 2002). Примерно этот же возраст (~ 2,4 млн. лет) имеет мутация гена миозина, в результате которой произошло значительное уменьшение объема и силы мощных жевательных мускулов, характерных для человекообразных обезьян и, по словам авторов (Stedman, et al., 2004), были ликвидированы анатомические ограничения роста объема черепной коробки, и, как следствие, увеличения объема головного мозга.

К событиям этого времени ($2,60 \pm 0,94$ млн. лет) отнесем недавно обнаруженное разделение африканских слонов на два вида (Roca, et al., 2001). Заметим, что предшествующее этому разделение слонов на азиатских и африканских, - по времени совпадает с расхождением генетических линий человека и шимпанзе (~ 5 млн. лет) (Roca, et al., 2001).

Сравнение мтДНК современных людей и мтДНК, выделенной из останков неандертальцев, до недавнего времени считавшихся нашими предками (Rozzi, Castro, 2004), показало, что их линии являются параллельными, а не последовательными (Serre, et al., 2004). Разъединение между линиями человека и неандертальца произошло около 500 тыс. лет назад (Takahata et al., 2001), что также находит отражение в палеомагнитной шкале.

Таблица 9.2. Этапы эволюции человека, палеонтологическая и палеомагнитная шкалы.

0.015 – раса европейцев и североафриканцев	£	- 0.015	Gothenburg
0.046 – раса жителей северной Азии	¥	- 0.045	Laschamp
0.1 - общий предок современного человека (по Y-хромосоме)	¥	- 0.11 - 0.13	Blake
0.23 - общий предок современного человека (по мт ДНК)	¥	- 0.23 - 0.25	Jamaica
0.5 – разветвление генетических линий современного человека и Неандертальца	¥	- 0.47 - 0.55	Emperor Big Lost
2.1-2.2 - возникновение Homo erectus	¥/F	- 2.110 - 2.270	Reunion
2.4 -2.8 – мутации, обеспечившие возникновение Homo erectus	F	- 2.6	Matuyama-Gauss boundary
$2.6 \pm 0,94$ – разделение Африканских слонов на две группы	F		
5 (4.5; 4.7; 4.9; 4.93; 5.2) – расхождение человека и шимпанзе	F/€	- 5.0	Gilbert boundary
5 – разделение слонов на Африканских и Азиатских			
6-7 – останки гоминид	€	- 6.0 -	инверсия
7.2 – отделение линии гориллы	€	- 7.3 -	инверсия

£ - Holocene; ¥ - Pleistocene; F - Pliocene; € - Miocene

Возраст общего предка современных людей и место его возникновения оценивался различными авторами (Cann, et al., 1987; Vigilant, et al., 1991; Horai, et al., 1995; Takahata, et al., 2001). По последним оценкам, средний возраст самой древней обнаруженной мтДНК составляет 230 тыс. лет, и 100 тыс. лет - для Y-хромосомы, причем, оба имеют африканские корни (Cavalli-Sforza, Feldman, 2003). Однако это совсем не означает, что в эти периоды существовало по одной женщине, или по одному мужчине, или не было линий-современников мтДНК и Y-хромосомы. Считается, что к нашему времени сохранились потомки только этих линий. Дата возникновения этих мтДНК и Y-хромосомы соответствует событиям, отраженным на палеомагнитной шкале, а именно моментам экскурсов геомагнитного поля.

Филогенетическая схема, составленная антропологами исходя из найденных останков, дает представление о временных периодах существования разных видов гоминид. По этой схеме можно видеть, что этап от 5 до 2 млн. лет соответствует гоминидам с маленьким объема головного мозга (Takahata, et al., 2001), не менявшимся в течение этого периода. Обнаружено, что увеличение размеров мозга у представителей семейства (Wood, 2002) произошло в эпоху Плейстоцена. Последние находки новых видов гоминидов заставляют авторов (Wood, 2002) отойти от названия представленной схемы «деревом», согласно которой представленные виды связывались в последовательные цепочки «предок-потомок». Целесообразность нового подхода подтверждается антропологическими характеристиками последних находок останков гоминид, схожих с представителями более позднего времени (Brunet, et al., 2002). Антропологи (Wood, 2002) склонны представлять эволюцию гоминид сродни разрастанию куста, когда в течение данного периода появляется сразу несколько видов гоминид, причем причина такого разрастания не называется.

На рис. 9-12 показано расхождение между расами в генетических расстояниях. Видно, например, что африканская раса не изменялась на дистанции 0.220, в то время как европейцы и североафриканцы подверглись трем бифуркациям. Последняя бифуркация соответствует дистанции 0.015. Генетические расстояния определяются по частоте рекомбинаций между генетическими маркерами. Это количественная характеристика сравниваемых объектов (популяций, видов и т.п.), определяющая среднее число замен нуклеотидов в каждом локусе, которые произошли за время раздельной эволюции двух групп организмов; в настоящее время наиболее широко применяется метод расчета генетических расстояний по Нью (*Nei genetic distance*). Известно, что генетическое расстояние коррелирует с датами бифуркаций. Ниже, на схеме, приведены периоды экскурсов эпохи Брунес. По-видимому, совпадения дат и расстояний не случайны. По нашей модели, именно наличие экскурсов и явлений повышения радиационного фона, с ними связанных, может служить причиной разделения человечества на расы (см. Табл. 2).

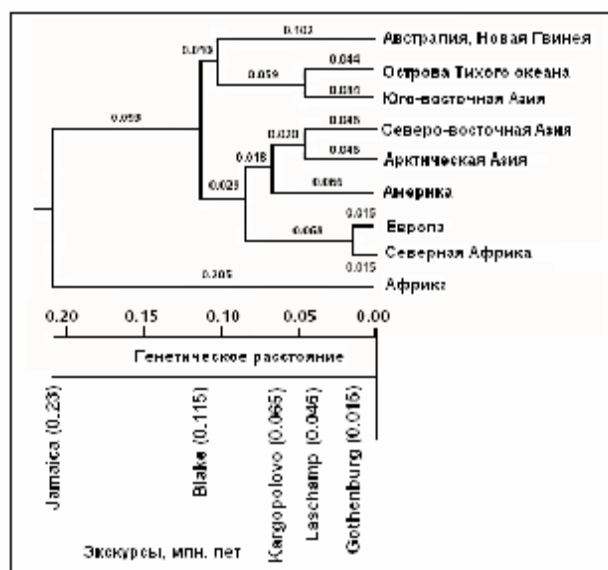


Рис. 9-12. Схема возникновения человеческих рас в терминах генетических расстояний (Cavalli-Sforza, Feldman, 2003) и экскурсы геомагнитного поля (млн. лет).

Почему Африка? Один из принципиальных вопросов из области проблем эволюции человека заключается в том, почему местом рождения современного человека является Африка? Почему все попытки найти следы возникновения (но не миграции) гомо сапиенс на других континентах оканчивались безрезультатно? Почему первобытные люди стали расселяться из Африки? Почему именно в Африке находят следы генетических мутаций многих других биологических видов? Ответом на эти вопросы было бы доказательство того, что именно в Африке радиационный фон в период инверсий и экскурсов был наибольшим, значительно превышающим фон на других континентах. Прямых палеоданных по радиационному фону в периоды инверсий, насколько известно, нет. Нам остается обратиться к опубликованным данным по поведению геомагнитного поля в периоды одних и тех же инверсий и экскурсов, записанных в осадках или вулканических извержениях, произошедших в различных регионах Земли, и выяснить действительно ли магнитное поле в Африке уменьшалось в большей степени, чем в других регионах. Обратимся к данным.

Авторы (Hartl, Таухе, 1996) показали, что уменьшение модуля поля в момент инверсии Брунес-Матуяма и предшествующего инверсии экскурса Хурамильо, было различным для различных регионов. Пробы брались в районах расположения базальтов,

излившихся на дно океанов вблизи Индонезии (0°, 160° E) и западного берега Африки (0°, 20°W). В первом случае уменьшение модуля поля не превышало 1/10 от его нормальной величины, во втором, - понижение модуля было менее 1/30 от нормального значения. Эти данные подтверждаются другими аналогичными наблюдениями. Так, например, в (Oda, et al., 2000) показано, что в момент этой инверсии в базальтах, излившихся в районе острова Барнео (7 ° N, 122 ° E), модуль поля уменьшился примерно в 5 –7 раз от его нормальной величины. Аналогичное по величине уменьшение было зафиксировано вблизи побережья Калифорнии (Heider, et al., 2000). Значительное понижение модуля было зарегистрировано вблизи западного побережья Африки (Yamazaki, Oda, 2001). Авторы зарегистрировали уменьшение модуля геомагнитного поля в периоды инверсии Брюнес-Матуяма и экскурса Хурамильо, не менее чем в сто раз.

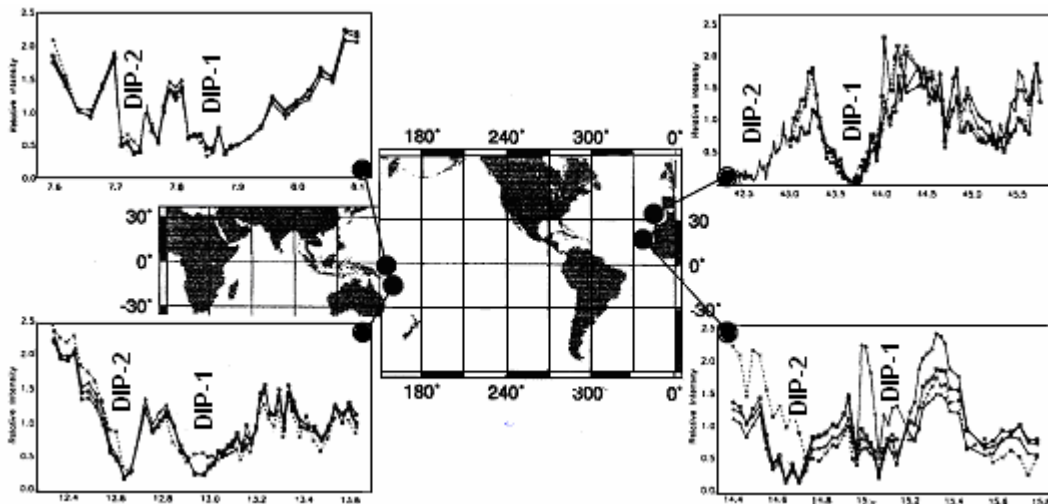


Рис. 9-13. Уменьшение интенсивности геомагнитного поля в период инверсии Брюнес-Матуяма (DIP-2) и предшествующего инверсии экскурса Хурамильо (DIP-1) (Hartl, Tauxe, 1996). Черными точками и линиями показаны места взятия проб.

Приведенные данные по поведению модуля поля в моменты инверсий можно считать подтверждением теории дрейфа магнитных полюсов в моменты инверсий и экскурсов (Глава 6). Согласно этой теории дрейф полюсов происходит по вполне определенным траекториям, на которых располагаются глобальные магнитные аномалии (Kuznetsov, 1999). В момент времени инверсии (экскурса), когда поле дипольного источника становится близким к нулю, собственное поле глобальных магнитных аномалий ещё сохраняет свое прежнее значение. Поле дипольного источника возрастает от нулевого значения со знаком, обратным предыдущему. Это приводит к аннигиляции поля дипольного источника и поля аномалии. По этой схеме происходит смена полярности поля на выделенных трассах. В тех же районах, где влияние аномалий не сказывается, например, в Африке, модуль поля во время инверсий и экскурсов становится практически равным нулю. Палеомагнитные данные однозначно показывают, что в момент инверсии - модуль геомагнитного поля в Африке уменьшается значительно больше (в 100 и более раз), по сравнению с другими регионами (Азией, Австралией, Америкой), где модуль поля уменьшается не более чем в 10 раз.

Рост уровня радиации при уменьшении модуля геомагнитного поля. Оценим характер зависимости радиационной дозы D от величины модуля геомагнитного поля B . Очевидно, что в момент инверсии (экскурса), когда модуль поля значительно уменьшается, величина корпускулярного потока, попадающего на Землю, возрастает, иначе, увеличивается уровень радиации Земли. В целях упрощения оценок, будем полагать, что приходящая на

Землю радиация (в зивертах) биологическими объектами, обитающими на Земле, полностью поглощается, при этом поглощенная доза (в греях) точно равна уровню радиации (в зивертах). Такое допущение, в частности, означает, что радиационный фон ГКЛ (равный на поверхности Земли $\sim 0.5 \cdot 10^{-3}$ Зв) эквивалентен дозе ($\sim 0.5 \cdot 10^{-3}$ Гр, т.к. $1 \text{ Зв} = 1 \text{ Гр} = 10^4 \text{ эрг/г}$).

При построении зависимости: «радиационная доза – модуль геомагнитного поля» учтем величины общепринятых значений дозы. Будем считать, приближенно, что при уменьшении модуля геомагнитного поля в 100 раз, радиационная доза возрастает, по крайней мере, не менее чем в 100 раз. В действительности, увеличение дозы, без учета ослабляющего действия атмосферы, может быть даже больше. Докажем это утверждение. Энергия частиц, отклоняемых геомагнитным полем E примерно пропорциональна величине геомагнитного поля B : $E \sim B$. (Речь идет о величине горизонтальной компоненты поля, т.к. степень отклонения частиц определяется значением Н-компоненты). На заряженную частицу, попадающую в магнитное поле, как известно, действует сила Лоренца $F = Z evB$, равная центробежной силе mv^2/R , иначе: $mv = Z evR$. Переходя к более удобным единицам, получаем: $E = 300 ZBR$, где: E – энергия частицы в МэВ, Z – заряд частицы, B – индукция магнитного поля в Тл, R – радиус кривизны траектории частицы в м, e – заряд электрона, v – скорость частицы, m – её масса.

Принято считать поток ГКЛ величиной фрактальной. Это означает, что число частиц потока ГКЛ N , обладающих энергией E : $N_{(E)} \sim E^{-d}$, где $1 < d < 2$, d – фрактальная размерность. Учет этого обстоятельства позволяет ориентировочно оценить, как будет возрастать радиационная доза, при уменьшении модуля геомагнитного поля. Например, если модуль поля уменьшится в период инверсии в 100 раз, то доза может увеличиться даже больше чем в 100 раз, в пределе, в 10 000 раз. Докажем справедливость этой оценки. Как было показано, чем меньше величина магнитной индукции, тем частицы меньшей энергии способны преодолевать защитную магнитную оболочку Земли: $E \sim B$. Это соответствует тому, что плотность потока КЛ, попадающего на Землю, возрастает. Доза ионизирующего излучения на поверхности Земли D определяется плотностью потока частиц P , коэффициентом передачи энергии L и временем действия ионизирующего излучения t : $D = PLt$. Очевидно, что если параметры Lt – не меняются, то плотность потока $P \sim N_{(E)}$, следовательно, и $D \sim N_{(E)}$. Учитывая принятое нами ранее $N_{(E)} \sim E^{-d}$, где $1 < d < 2$, то и доза $D \sim B^{-d}$. Т.о. мы получили зависимость, показывающую, что *уменьшение величины геомагнитного поля приводит к росту дозы ионизирующего излучения*. Речь идет пока только об эффекте уменьшения отклонения заряженных частиц при уменьшении величины магнитной индукции Земли. Если учесть, что при этом будут разрушаться радиационные пояса, то поток заряженных частиц на Землю возрастет ещё больше, что приведет к ещё большему возрастанию дозы ионизирующего излучения. С другой стороны, в наших оценках пока не учитывается защитная роль атмосферы. Как отмечалось, быстрые частицы, даже частицы ГКЛ, не достигают поверхности Земли, но образующиеся медленные нейтроны и ионизирующее излучение, возникающее при рассеянии ГКЛ на атомах атмосферы, являются причиной увеличения дозы.

Фрактальная размерность d , согласно нашей модели, может меняться от 1 до 2. При этом радиационная доза D , в зависимости от величины B , может меняться от $D \sim B$ (линия 1 – 3 на рис. 9-14) до $D \sim B^{-2}$ (линия 2 – 4). На этом рисунке, на шкале $\lg D$ (в зивертах/год) отмечены три характерных значения дозы: *фон* $\approx 2 - 3$ мЗв; *доза риска* ≈ 60 мЗв; *доза летального исхода* $\approx 6 - 8$ зиверт/год.

Обратимся к опубликованным данным и выясним, изменяется ли доза при вариации геомагнитного поля. В одной из первых работ на эту тему (Harrison 1968) утверждается, что такая зависимость действительно существует, причем фрактальная размерность $d \approx 1$ (точки 5 на рис. 9-14). Этот результат можно подкрепить данными, полученными на спутниках при изучении радиации в районе Бразильской (Южно-Атлантической - SAA) магнитной аномалии. Как известно, в эпицентре SAA вертикальная

компонента геомагнитного поля меньше её нормального значения примерно в 3 раза. Радиационный фон (доза) в районе SAA примерно в 7 раз больше, чем в её окрестности (Heirtzler, 2002). Отсюда следует, что доза ионизирующего облучения: $D \sim H^{-1.7}$, где H - горизонтальная компонента геомагнитного поля. Если учесть только эффект отклонения космических лучей геомагнитным полем, то можно считать: $B \approx H$, тогда, $d \approx 1.7$, соответствуют точке б. Такая замена логична, т.к. именно горизонтальная компонента обеспечивает поворот заряженных частиц, направляющихся к Земле.

Приведем ещё один пример, в котором авторы (Gosse, Phillios, 2001) ссылаются на зафиксированное десятикратное увеличение относительной интенсивности геомагнитного поля после ее понижения, обусловленной инверсией.

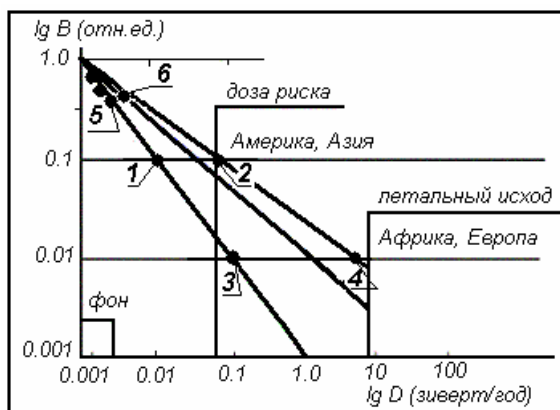


Рис. 9-14. Увеличение радиационной дозы на Земле (D) при уменьшении модуля поля (B).

Сравним величину дозы, приходящейся на два различных региона, в одном из которых модуль геомагнитного поля в период инверсии уменьшился в 10 раз (Америка, Азия), с другим (Африка, Европа), в котором поле уменьшилось в 100 раз. Предположим, что величина фрактальной размерности $d \approx 1.4$. Надо сказать, что такое значение величины d характерно для природных процессов, имеющих фрактальный характер (средняя линия). Будем рассматривать область значений, при которых радиационная доза больше дозы риска. При этом оказывается, что в Америке и Азии доза риска (начало генетических мутаций) вообще не будет достигнута, в то время как в Африке доза может быть ~ 1 зв/год. Известно, что при дозе, большей, чем 200 мЗв/год, преобладает массовая гибель клеток. Приведенные оценки показывают, что радиационная доза может сильно отличаться для различных регионов мира при едином, общем для Земли, явлении инверсии или экскурса.

IX. 5. Электрические явления в атмосфере и унитарная вариация.

Общие замечания. В.И.Герасименко (1976) приводит высказывание знаменитого английского физика Томсона (Лорда Кельвина) о том, что в будущем предсказание погоды будет осуществляться посредством электрометра. Это будущее еще не наступило, но предвидению классика (как будет следовать из нашей модели взаимосвязи атмосферы и электричества) нельзя не удивляться. В середине века проблема атмосферного электричества была очень популярна среди физиков, именно тогда вышли в свет хорошо известные книги по атмосферному электричеству: Я.И.Френкеля (1949) и П.Н.Тверского (1949). Казалось, что проблема атмосферного электричества вот-вот будет решена, однако, надежды так и не оправдались. Ни в России, ни за рубежом, не нашлось автора, который сумел бы убедить коллег в том, что его модель наиболее адекватна явлению атмосферного электричества. В последнее время интерес к этой проблеме значительно уменьшился, книг и статей по атмосферному электричеству встречается всё меньше и меньше, и в связи с

этим следует напомнить некоторые идеи и наиболее достоверные экспериментальные факты, имеющие отношение к атмосферному электричеству. Заметим, что ослабление интереса к атмосферному электричеству происходит на фоне настоящего бума, связанного с такими «электрическими» явлениями как спрайты. Спрайты – недавно обнаруженное физиками явление светящихся “электрических разрядов”, возникающих между верхней частью грозового облака и ионосферой.

Данные: Электрические параметры. Известно, что Земля заряжена отрицательно относительно окружающего её пространства. Принято считать, что положительный заряд сосредоточен в т.н. электросфере, часто отождествляемой с ионосферой. Напряженность электрического поля у поверхности Земли практически постоянна вдоль её поверхности, весьма незначительно меняется во времени и составляет (при выполнении условий “хорошей погоды”: т.е. при отсутствии грозовой и интенсивной кучевой облачности, осадков, метели, поземки и других атмосферных явлений): $E \approx 120 - 150$ В/м над океаном и $75 - 125$ В/м над материками. По сравнению с окружающим Землю воздухом, вещество Земли можно считать хорошим проводником. Это допущение позволяет рассчитать величину электрического заряда Земли: $Q = \epsilon_0 R^2 E$, где ϵ_0 – диэлектрическая постоянная, R – земной радиус, а величина заряда оказывается равной: $Q \approx 6 \times 10^5$ кулон. Величина электрического поля $E = j/S$ достаточно быстро уменьшается с высотой (см. рис. 9-15), что связано с возрастанием проводимости атмосферы S , в то время как ток проводимости (j – плотность тока: $j \approx 10^{-12}$ А/м²) от высоты практически не зависит. Интегрируя j по поверхности Земли, можно подсчитать полный “ток утечки” Земли: $I \approx 10^3$ А. Полное сопротивление атмосферы $R \approx 230$ Ом. Используя известную формулу $Q = It$, можно оценить t – “время разрядки” конденсатора “Земля-ионосфера”, оно оказывается равным 10 минутам (!). Каков же должен быть источник атмосферного электрического поля, чтобы поддерживать поле практически постоянным? Ответ на этот вопрос, несмотря на многочисленные попытки, до сих пор так и не получен.

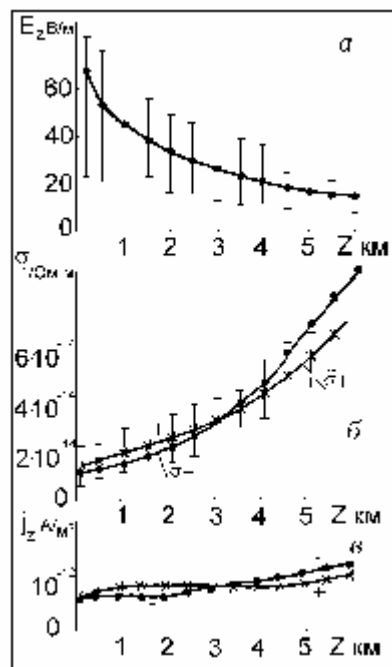


Рис. 9-15. Изменение поля E , проводимости атмосферы σ и плотности тока j с высотой z . (Рокитянский, 1981).

Проблема сохранения Земли электрического заряда считалась 100 лет тому назад одной из основных проблем геофизики (Швейдлер, 1936). За прошедшие годы приоритеты

физики Земли значительно изменились, но уровень решения этой проблемы остался таким же, близким к нулевому, такому же, как и в прошлом веке.

Потенциал между поверхностью Земли и ионосферой (электросферой) – V определяется выражением:

$$V = \int_0^z E(z) dz, \quad (9.12)$$

где $E(z)$ – высотный профиль напряженности атмосферного электрического поля, полученный с помощью радиозондовых, аэростатных и ракетных измерений. Величина V составляет примерно 300 кВ, практически синхронно меняется на очень больших расстояниях и испытывает суточную и унитарную вариации.

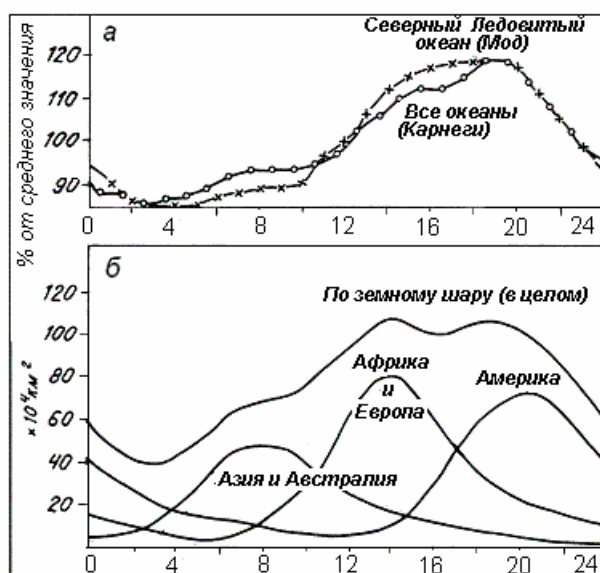


Рис. 9-16. Унитарная вариация E – а; общепринятое распределение гроз по поверхности Земли – б.

Унитарная вариация. Наиболее интересным свойством атмосферного электричества является её т.н. унитарная вариация. Явление унитарной (УТ) вариации заключается в том, что величина E на всей Земле одновременно возрастает на 20% в тот момент, когда в Лондоне (УТ-мировое время) 19 часов (см. рис. 9-16-а). Общепринятое объяснение этого явления состоит в том, что именно в это время на Земле происходит максимальное количество гроз, представляется малоубедительным. Тем более что количество гроз максимально летом, а величина E летом – уменьшается (см. рис. 9-16-б). Грозы, как известно, чаще происходят ближе к экватору, в то время как наибольшие значения E наблюдаются на широтах авроральной зоны; к полюсам и к экватору величина E убывает (Апсен и др., 1988). Известна реакция гроз на солнечную активность, в частности, на вспышки. Частота гроз увеличивается на 20-70% на третьи-четвертые сутки после вспышки. Однако солнечные вспышки оказывают влияние и на атмосферное электричество. Значительное понижение величины E , наблюдавшиеся в условиях хорошей погоды, как правило, совпадает с начальной стадией Форбуш понижения интенсивности космических лучей, непосредственно следующего за солнечной вспышкой (Marcz, 1997). Принято считать, что величина E , через несколько дней после Форбуш понижения, - возрастает и восстанавливается. Таким образом, реакция гроз на вспышки проявляется с большим запаздыванием, чем реакция самого электрического поля. Аналогичные результаты наблюдений за поведением атмосферного электричества в момент разряда молнии приведены в известном популярном учебнике (Фейнман и др., 1966). Там

говорится, что каждый удар молнии переносит примерно 20-30 кулон. Как быстро туча может восстановить потерю своего заряда? Измерения электрического поля, проведенные вдали от тучи, показали, что при разряде молнии наблюдается внезапный спад величины E , которая восстанавливается в течение примерно 5 секунд. Следовательно, в грозовой “машине” течет ток разделения зарядов порядка 4-6 ампер. (В такой ситуации модель генерации E за счет разрядов молний представляется сомнительной).

Вариации E . Во временной зависимости E обнаружена 27-дневная вариация, связанная, по мнению авторов (ссылки в Апсен и др., 1988), со скоростью вращения Солнца и прохождением группы пятен через центральный солнечный меридиан. Там же отмечается, что по данным среднеширотной обсерватории, расположенной в Японии, корреляция E с потоком солнечного радиоизлучения не обнаружена. Другой результат был получен нашей группой (Кузнецов и др., 1991), когда была зафиксирована корреляция между E и показаниями риометра (радиоприемника, настроенного на фиксированную частоту 32 МГц), направленного на Солнце. Примерно за год наблюдений нами было зарегистрировано 19 таких событий. К сожалению, эта работа не получила дальнейшего развития и результаты наблюдений так и не были подтверждены. Если признать этот результат, то он предполагает два возможных механизма: либо есть связь между E и прозрачностью ионосферы, либо связь между E и радиоизлучением Солнца, что противоречит результатам японской группы. Кроме этого, нами была выделена реакция атмосферного электричества на солнечные вспышки. На следующие сутки после вспышки, величина E возросла примерно на 20%, а затем в последующие 6-7 суток уменьшалась (относительно “нормы”) более чем на 25%.

Более детальные исследования корреляции между поведением E и магнитосферными возмущениями, проведенные на Камчатке, показали, что E синхронно понижается во время Форбуш понижений ГКЛ. Этот результат является подтверждением результатов изучения Форбуш понижения величины E (Marcz, 1997). Он так же служит подтверждением того, что ГКЛ играют решающую роль в формировании атмосферного электричества.

E в океане. Обратим внимание на наблюдения за поведением атмосферного электричества в океане. Во-первых, в отличие от среднеширотных станций, зафиксировать четкую унитарную вариацию практически не удастся, т.к. “мешает” т.н. обменный слой высотой 2-3 км. Как известно, этот слой не оказывает такого сильного влияния на УТ-вариацию E в океане (Гончаренко и др., 1992). Во-вторых, авторы обнаружили зависимость напряженности электрического поля атмосферы от глубины океана: Величина E уменьшалась с глубиной. Кроме этого, в этой работе было обнаружено еще одно явление, связанное с атмосферным электричеством. Величина E уменьшалась на закате и увеличивалась на восходе. Авторы объясняют его образованием объемного заряда в процессе испарения воды с морской поверхности.

УТ-вариация в мезосфере. Задорожным и Тютиным (Zadorozhny, Tyutin, 1997) проведен анализ измерений электрического поля на мезосферных высотах (50-70 км), выполненных с помощью ракет в течение почти 20 лет. По мнению авторов, электрическое поле на этих высотах (≈ 1 В/м) испытывает УТ-вариацию, аналогичную той, которая обнаружена у приземного E . Этот результат согласуется с обнаруженной нами УТ-вариацией в ионосфере.

УТ-вариация в ионосфере и магнитосфере. Отметим особенности обнаруженной нами корреляции УТ-вариации атмосферного электричества с ионосферой и магнитосферой. Нам удалось выделить в F-слое ионосферы унитарную вариацию, аналогичную УТ-вариации поля E . Для этого использовались данные 26-ти ионосферных станций

вертикального зондирования ионосферы, расположенных в средней широте северного полушария. После отбора суточных вариаций на мировой сети станций, выяснилось, что при сравнительно простой обработке этих данных, критическая частота F-слоя ионосферы (foF_2) при изменении мирового (универсального –UT) времени ведет себя аналогично величине атмосферного электрического поля E_z .

Методы получения унитарной вариации описаны в (Кузнецов и др., 1988; Kuznetsov et al., 1990; Плоткин и др., 1992; Kuznetsov et al., 1993-a; 1993-b; Kuznetsov et al., 1995-a; 1995-b). Первый метод основан на наблюдаемом малом отличии ежесуточных зависимостей foF_2 на станциях с приблизительно одинаковой широтой. Входные данные исследуемой величины обычно представлены в зависимости от местного времени (LT) того часового пояса, где находится станция наблюдения. Станции расположены крайне неравномерно: в одних часовых поясах имеется несколько таких станций, в других, - их нет совсем. Поэтому, прежде всего, необходимо сопоставить каждому часовому поясу типичную для него зависимость исследуемой величины от LT. В тех часовых поясах, где было несколько станций, применялось обычное усреднение суточных зависимостей по станциям. Если в каком-либо часовом поясе станций наблюдения не оказывалось, использовалась линейная интерполяция зависимостей от LT, полученных в ближайших соседних часовых поясах. Справедливость подобной операции обусловлена небольшой величиной наблюдаемого долготного эффекта. Последний этап заключается в усреднении найденных зависимостей по часовым поясам для каждого момента мирового времени UT. Вследствие долготных вариаций и UT-изменений суточного хода, вычисляемая на данной широте величина, не будет постоянной. Она имеет простой смысл: это мгновенное среднее значение частоты foF_2 на данной широте. Описанный метод был использован впервые для получения унитарной вариации вертикального атмосферного электрического поля вблизи поверхности Земли (Парамонов, 1950), чем и объясняется использование нами термина, - унитарная вариация foF_2 .

Однако не всегда можно подобрать обсерватории на фиксированной широте с долготным распределением, позволяющим применить линейную интерполяцию суточного хода по долготе. Был предложен другой метод (Плоткин и др., 1992; Kuznetsov et al., 1993) получения унитарной вариации с более слабыми требованиями к долготному распределению станций. При малом количестве станций будем исходить из представления суточных зависимостей в виде суммы двух вариаций, одна из которых контролируется местным временем LT, а вторая, - мировым UT. Применяя для спокойных регулярных вариаций foF_2 спектральное представление данных в виде рядов Фурье, легко разделить методом наименьших квадратов наблюдаемые на станциях спектральные составляющие на части, контролируемые местным и мировым временем. Одновременное использование описанных методов повышает надежность определения унитарной вариации foF_2 .

Приведем результаты обработки ионосферных и геомагнитных данных по схеме, применявшейся для выделения унитарной вариации атмосферного электрического поля на континентах. Нами использовались данные мировой сети станций вертикального зондирования ионосферы в диапазоне широт 40° - 50° N за сентябрь 1964 г. Оказалось, что суточные пространственно-временные изменения критической частоты foF_2 -слоя среднеширотной ионосферы содержат поле унитарной вариации. Унитарная вариация характеризуется в географической системе координат синхронным изменением foF_2 по мировому времени в течение суток на всех долготах круга заданной широты. Основное наше внимание было направлено на изучение интегральных характеристик суточной унитарной вариации foF_2 . В качестве такой характеристики рассматривалось мгновенное средне долготное значение этой величины. Результаты расчетов показали наличие устойчивой вариации, зависящей от мирового времени с максимумом в 19 UT, и сходство унитарных вариаций ионосферного параметра foF_2 и атмосферного электрического поля E_z , по данным большинства месяцев 1964 года. Расчеты были

выполнены и по данным 1963 и 1965 годов. Они показали близкие результаты. Полученная в средних широтах амплитуда унитарной вариации foF₂ имеет величину 0,5 МГц. Она невелика и ее удается выделить лишь при общем спокойном состоянии ионосферы. Это обстоятельство позволяет предложить использовать данную величину как некоторую количественную характеристику глобального поведения ионосферы.

По методикам, пригодным для определения унитарных вариаций различных геофизических параметров, испытывающих суточные колебания, были обработаны данные среднеширотных станций (20°-60° N) мировой геомагнитной сети. Использовались усредненные обычным образом по спокойным дням вариации X-компоненты геомагнитного поля для нескольких месяцев 1964 года. Нами установлено, что существует унитарная вариация суточного изменения северной компоненты геомагнитного поля с величиной вариации в единицы нТл. К сожалению, в сравнении с ионосферной ситуацией, точность используемых в мировой геомагнитной сети станций наблюдения не столь велика, чтобы можно было достаточно надежно выделять обсуждаемую вариацию указанной амплитуды, но полученные результаты указывают на ее существование.

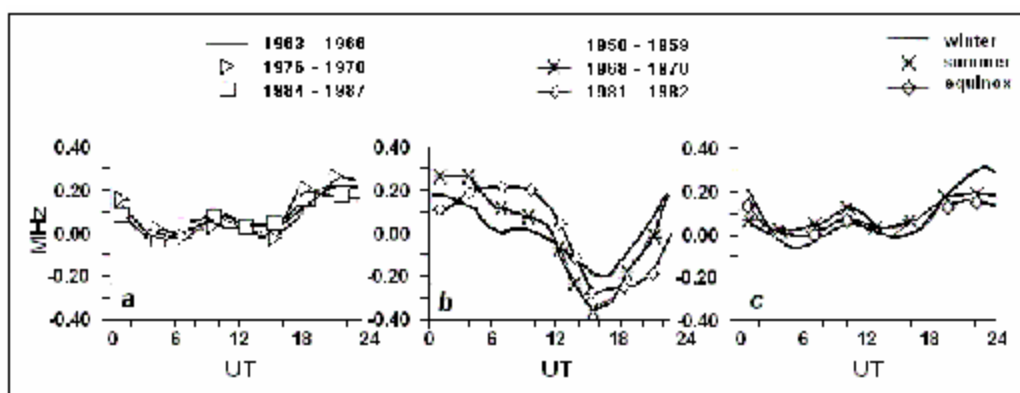


Рис. 9-17. Унитарная вариация foF₂, усредненная за годы минимумов (а), максимумов (б) для трех циклов солнечной активности и в зависимости от сезона (с) (Кузнецов и др., 1998; Kuznetsov et al., 1998).

В работах (Кузнецов и др. 1998; Kuznetsov et al., 1998) исследовалась УТ-вариация частоты foF₂, в зависимости от солнечной активности. Установлено, что вид унитарной вариации foF₂ в годы минимумов и максимумов солнечной активности существенно отличается. В годы минимумов она имеет вид, похожий на унитарную вариацию атмосферного электрического поля с максимумом в 19 UT. Сезонные изменения унитарной вариации foF₂ в годы минимума практически отсутствуют. В годы максимума солнечной активности вид унитарной вариации foF₂ существенно изменяется (рис. 9-17-б). Можно предположить, что в спокойных условиях в годы минимума солнечной активности электрическое поле способно проникать из нижних слоев атмосферы на высоты F₂-слоя ионосферы. Возможна так же и другая причина, состоящая, например, в том, что УТ-вариация в магнитосфере, ионосфере, мезосфере и атмосфере вызывается одним явлением. Как будет показано ниже, это могут быть космические лучи, пронизывающие все эти оболочки.

Молнии и спайты. Обсуждая проблему атмосферного электричества и связи его с разрядами молний, нельзя не остановиться на недавно обнаруженном явлении электрических разрядов, аналогичных разрядам молний, но направленных не между облаками, и не с облаков на Землю, а вверх, по направлению к ионосфере (электросфере).

Эти разряды получили название спрайтов (sprite, в переводе, - эльф). Первая информация о спрайтах относится к 1993 г. С тех пор наблюдается нарастающая лавина результатов их наблюдений. Например, летом 1996 г. 50 специалистов по атмосферному электричеству из США, Японии и Новой Зеландии провели наблюдения на метеостанциях, расположенных в Скалистых горах (США), и зарегистрировали 1127 случаев появления высотных молний. Кроме спрайтов, обнаруженных на высотах между 50 и 90 км и обладающих длительностью 0.001 с, похожие явления возникали на больших высотах и, более короткие, чем спрайты. Кроме этого, на существенно меньших высотах обнаружены светящиеся разряды, получившие название Blue Jets (синие струи). Синие струи, в отличие от спрайтов, исходят прямо из верхней части облака. Эти наблюдения были продолжены в 1997 и 1998 гг. с помощью специально изготовленного прибора, содержащего 10 фотоумножителей, направленных в различные участки неба. Были обнаружены очень короткие спрайты, длительностью не более 30 мкс, следующие через 150 мкс после разряда обычной молнии. Специалисты считают, что возникновение спрайта обязано возбуждению среды мощными радиоволнами, сопровождающими разряд молнии. Не исключено влияние частиц высокой энергии космического излучения на возникновение высотных молний. Рассмотрим основные характеристики спрайтов и синих струй немного подробнее.

Как выглядят спрайты и синие струи. Спрайт, это оптическое явление в мезосфере, развивающееся над грозовым облаком и обычно достигающее высоты 90 км. Иногда влияние спрайта ощущается значительно выше 90 км, в E области ионосферы. Спрайты преимущественно красные, наиболее яркая часть – «голова», выше – тонкие светящиеся линии – «волосы». Под «головой» спрайта выделяют темную полосу – «воротник». Ниже воротника – «усы», которые простираются до 40-50 км. Усы меняют цвет от красного (вверху), до – голубого (внизу). Спрайты бывают одиночные, однако, чаще бывают двойные и тройные. В поперечнике они достигают 40 км. Время жизни спрайтов порядка нескольких миллисекунд (Rairden, Mende, 1995), хотя наблюдаются и более короткоживущие разряды. Оптическая энергия спрайта составляет несколько килоджоулей, для серии спрайтов она, соответственно, больше (Sentman, Wescott, 1993; Sentman et al., 1995).

Синяя струя движется вверх со скоростью примерно 100 км/с, как хорошо сфокусированный пучок синего цвета, от вершины грозового облака до высоты порядка 50 км. Принято считать синие струи аналогом стримера, в виде ряда плазменных волокон, возникающих при электрическом пробое газового промежутка (Pasko et al., 1996; Sukhorukov et al., 1996). Материнское облако несёт, как правило, на своей верхней кромке (6) – положительный, а на нижней, - отрицательный заряды. В верхней части (голове) синей струи (4) знак заряда положительный. Считается, что в струе происходит сепарирование зарядов таким образом, чтобы образовалось электрическое поле обратного знака атмосферному электрическому полю. Суммарный заряд синей струи составляет 300-400 кулон, размер по высоте – порядка 20 км, толщина струи порядка одного км, время существования струи около одной секунды.

Спрайты как часть атмосферного электрического контура. Сотрудники лаборатории Стенфордского Университета США считают, что спрайты могут изменять параметры электрического контура верхней атмосферы (Pasko et al., 1998). Согласно их модели, спрайт, движущийся вверх, как бы расположен между двумя «обкладками конденсатора» h_i и h_b , которые движутся вместе со спрайтом. Атмосферная проводимость $s(h_i)$ увеличивается монотонно с высотой. Время процесса оценивается по формуле: $t = e_0/s(h_i)$, где e_0 – электрическая постоянная. Спрайт возникает примерно через 2-3 мсек после основного разряда. В зависимости от силы тока основного разряда, изменяющегося от 25 кА до 150 кА, меняется вклад спрайта в общую картину магнитного поля разряда молнии.

Оптические характеристики спрайтов и струй. Зарегистрированное свечение спрайта соответствует спектру возбуждения молекулярного азота N_2 1P в диапазоне длин волн: 650-700 нм и 750, 770 нм. Выявлены все разрешенные переходы молекулярного азота, а также спектры N_2^+ . Аналогичная ситуация наблюдалась и при исследовании оптических характеристик синих струй. Здесь, так же как и в случае со спрайтами, основное излучение с длиной волны 391 нм соответствует возбуждению линий 1N и 2P молекулярного азота и иона азота N_2^+ (Hampton et al., 1996; Mende et al., 1995; Yukhimuk et al., 1998). Таким образом, различия в цвете между спрайтами и струями состоит в различии энергии электронов, участвующих в возбуждении свечения этих явлений.

Спрайты и источники низкочастотных радиоволн. Спрайты связаны с источниками радиоволн, сопутствующих разряду молнии. Эти выводы базируются на серии экспериментов, проводимых различными группами физиков в различное время года, в различных районах США. Наблюдения за электромагнитным излучением, сопровождавшим спрайты, велось с помощью вертикально установленной антенны в виде токовой петли общей площадью 1.7 кв. м. Регистрировалась магнитная компонента колебаний в частотном диапазоне 24 кГц с помощью радиоприемника. Одновременно с борта самолета регистрировались спрайты и интенсивности световых вспышек молний (в кА). (Inan et al., 1995; Inan et al., 1996; Pasko et al., 1998). Физика генерации и распространения естественных электромагнитных импульсов (единицы Гц – десятки кГц), в резонаторе Земля-ионосфера, применительно к проблеме выяснения роли электромагнитного излучения в физике спрайтов, изучалась в статье (Nickolaenko, Naayakawa, 1998). Авторы показали, что на расстояниях “источник-приемник” в 1, 5, 10, 15 и 20 тыс. км, спектры сигналов заметно различаются в частотном диапазоне, большем 40 Гц. На частотах т.н. Шумановского резонанса (4-20 Гц), эти различия не столь значительны. Изучалось изменение величины и формы импульса вертикального электрического поля на тех же расстояниях. Эти данные использовались при интерпретации явления спрайтов и струй.

Обзор моделей атмосферного электричества. Практически все модели атмосферного электричества, начиная от Френкеля, связывают его с облаками и, в частности, с грозами и разрядами молний. Рассмотрим некоторые из них, наиболее, на наш взгляд, приемлемые:

Модель Френкеля. Френкель полагал, что крупные капли воды обладают отрицательным зарядом ($-q$), а мелкие – положительным ($+q$). Электрическое поле E образуется за счет разделения зарядов в облаке. Поле E , когда известны: величина ускорения силы тяжести (g), масса (m) и подвижность (u) капель, будет равно:

$$E = [(u_1 m_1 - u_2 m_2)/(u_1 q_1 + u_2 q_2)] g. \quad (9.13)$$

Подвижность капель $u = 1/6\pi\eta r$, определяется вязкостью среды η и размером капли r . Френкель заменяет: $u_1 \sim 1/r_1$; $u_2 \sim 1/r_2$, и получает:

$$E = (4\pi r g/3) \times (r_1^2 - r_2^2)/(q_1/r_1 + q_2/r_2) = 4\pi r g r^2/3j, \quad (9.14)$$

что для воды, при $r = 1$ г/см³, $g = 1000$ Гал, $j = 0.1$ эВ, $r = 10$ мкм, $E = 3000$ В/м.

Суть идеи Френкеля состоит в том, что разделение зарядов происходит благодаря конденсации, хотя он рассматривал и другие способы электризации. Он полагал, что при распылении малых частиц воды происходит разрушение двойного электрического слоя (ДЭС), возникающего в водяной капле. Размеры отделяющихся частиц, соизмеримых с эффективной толщиной ДЭС, приобретают положительный заряд, остальная масса – отрицательный.

Модель испарения Идея генерации электрических зарядов при испарении, оживленно обсуждалась во второй половине прошлого столетия Томсоном, Пельтье и др. Тогда же

было установлено экспериментально, что струя пара несет значительный положительный заряд (Герасименко, 1976).

Модель Никандрова. Электрические процессы, обусловленные фазовым переходом “вода-пар”, рассмотрены в книге Никандрова (1981). Автором делается попытка найти объяснение образованию электрических полей в облаке. Взаимодействие молекул воды с собственным паром во многом обязаны их электрическим свойствам. Полная энергия взаимодействия двух молекул водяного пара равна:

$$W = B/L^{12} - \Gamma/L^6, \quad (9.15)$$

где B/L^{12} – энергия отталкивания; Γ/L^6 – энергия притяжения; L – расстояние между центрами молекул. В состоянии равновесия энергия взаимодействия принимает минимальное значение, равное $W_0 = kT_{кр}$ ($T_{кр}$ – критическая температура). Энергия притяжения, в свою очередь, суммируется (по мере убывания эффекта) из:

- потенциальной энергии ориентационного взаимодействия:

$$W = 2/3 \cdot m^2/kT L^6 \quad (m - \text{дипольный момент молекулы}), \quad (9.16)$$

- поляризационной энергии:

$$W = 2am^2/L^6 \quad (a - \text{коэффициент поляризации}), \quad (9.17)$$

- энергии, обусловленной дисперсионным эффектом:

$$W = 3/4 \cdot hna/L^6, \quad (9.18)$$

hn – квант энергии, n – частота колебаний внешних электронов.

Для N -молекул энергия притяжения определяется их числом:

$$W = Nr/2L^6. \quad (9.19)$$

Таким образом, видно, что взаимодействие молекул определяется их электрическими свойствами. Эти свойства особо проявляются при фазовых переходах, когда возникают некомпенсированные электрические поля.

В подтверждение идеи Френкеля, считавшего, что большая капля заряжена отрицательно, а маленькая – положительно, приведем пример из книги Никандрова. Конденсация паров воды происходит достаточно быстро при четырехкратном пересыщении для отрицательных ионов и шестикратном, – для положительных ионов. Отсюда следует, что капли, выросшие до больших размеров, могут сохранять отрицательный заряд, в то время как капли меньших размеров – положительный. Единичный заряд капли составляет примерно 10^{-14} кулон. Размер капли варьируется от малого (7-8 Å), к среднему (100 Å) и большому (> 550 Å).

Электризация капель. Приведем результат эксперимента, проведенного в аэрозольной камере Института экспериментальной метеорологии. Авторами сообщения (Гирс, Шварц, 1976) было показано, что в камере, при образовании адиабатического тумана, накапливался некоторый положительный объемный заряд. Анализ знака зарядов, образующихся в камере капель, показал, что они имели отрицательный заряд. Авторы пришли к выводу, что рост капель на отрицательных зародышах эффективнее, чем – на положительных.

Вращение плазмосферы. Авторы модели базируются на идее Ландау и Лифшица относительно того, что вокруг вращающегося намагниченного шара существует не только магнитное дипольное поле, но и квадрупольное электрическое. Развивая эту идею, Беспалов и Чугунов (1994) обсуждают модель возникновения атмосферного электричества в результате трения плазмосферы, вращающейся со скоростью, меньшей, чем скорость суточного вращения Земли w_0 , о “магнитосферную периферию”. Разность потенциалов, приложенная к атмосферному промежутку, $U = w_0 M/cr_0$, где M – магнитный момент Земли, r_0 – её радиус, c – скорость света. Данная модель, по мнению авторов, дает правильный знак заряда планеты и величину плотности атмосферного тока.

Электрическая машина Рише. Рише (1997) обращает внимание на роль космического излучения в формировании “электрической машины Земли” (ЭМЗ). Автор предполагает, что атмосферное электрическое поле распределено вдоль высоты атмосферы весьма неравномерно: около Земли E принимает самое большое значение, затем довольно резко спадает, и затем, в районе т.н. электросферы, E вновь сравнительно велико (?). В принципе, в атмосфере может находиться область, где $E \approx 0$. По мнению Рише, эта “поверхность” делит ЭМЗ на две части, одна из них, это, собственно, атмосферное электрическое поле (АЭП), другая часть – внешнее электрическое поле (ВЭП), имеющее другую причину возникновения. В области $E = 0$ космический ток компенсируется рассеивающимися с поверхности зарядами. В электрической машине Рише происходит перераспределение электрических зарядов между АЭП и ВЭП, так, что суммарный заряд Земли остается постоянным. При этом “поверхность $E = 0$ ” меняет свою высоту, а “зарядный” (от космических лучей) и “разрядный” (от Земли вверх) токи компенсируют друг друга. Автор полагает, что учет космического тока позволяет естественным образом, без привлечения сторонних идей и предположений, расширить представления о глобальной токовой цепи, электрическом поле Земли и работе ЭМЗ, а также понять причину сохранения квазистационарных зарядов атмосферы и Земли.

Грозовая модель атмосферного электричества. Модель, развиваемая Хайсом и Рабле (Hays, Roble, 1979; Roble, Hays, 1979), основана на электрическом взаимодействии между верхней и нижней атмосферой. Главным источником электрического тока является грозовое облако, вверху которого скапливается положительный заряд, а внизу – отрицательный. Грозы распределены по поверхности Земли неравномерно, однако, именно их пространственное размещение обеспечивает возможность унитарной вариации атмосферного электричества. Электрический потенциал на поверхности Земли равен нулю и также равен нулю вдоль её орографической поверхности. Авторы делают расчеты величины E , учитывая орографию, так и без её учета. Электрическая проводимость экспоненциально возрастает с высотой до тех пор, пока на атмосферные электрические эффекты не начнет оказывать влияние магнитосфера и космические лучи, обладающие, как известно, широтной зависимостью. Авторы рассчитали электростатическую модель в зависимости от распределения грозовых источников тока. Результаты расчетов показывают, что величина E максимальна в окрестности источников, а потенциал может достигать ионосферных высот. Согласно расчетам в ионосфере величина E может достигать 0.25-0.5 мВ/м. Заметную роль в этой модели играют эффекты, связанные с ионизацией атмосферы космическими лучами. По мнению авторов, в этой модели находят объяснение явления, связанные с т.н. Форбуш эффектом космических лучей.

Сделаем дополнительное замечание. Анализируя ситуацию и учитывая хорошо известные факты, можно показать, что грозовая модель атмосферного электричества Hays и Roble находится в противоречии с достоверными данными. Действительно, известно, что грозовая деятельность имеет 11-летний цикл, совпадающий по фазе с циклом солнечной активности. Известно так же, что интенсивность потока ГКЛ так же изменяется с 11-летней периодичностью, но в противофазе с Солнцем. Более того, известно, что долговременное, в течение последних 50 лет наблюдений, изменение величины E так же уменьшается, как и интенсивность потока ГКЛ, в то время как температура Земли, как известно, - возрастает. Эти факты находят непротиворечивое объяснение в нашей модели.

Наша модель. Особенности E . Прежде чем излагать нашу модель, которая, в принципе, за небольшими, но важными деталями, не отличается от модели Френкеля, уточним, что же известно об атмосферном электричестве, что является, бесспорно, полезным в предыдущих моделях, и в чем могут быть их ошибки. Первая удивительная особенность атмосферного электричества состоит в том, что многолетние наблюдения показывают ее высокую стабильность и неизменность знака: Земля всегда отрицательна. Может ли

измениться знак E ? Этот вопрос практически не обсуждается в моделях. Хотя постановка такого вопроса вполне правомерна: если источник E – гроза, а грозовые облака приобретают заряды разного знака и пробой молнии происходит не только на Землю (и ионосферу), но и между облаками, то почему знак заряда в целом по Земле никогда не меняется? Напряженность E практически, на сравнительно небольшом интервале времени – постоянна. Каков механизм, поддерживающий поле E – неизменным? В обсуждаемых нами моделях об этом ничего не говорится. Вторая, не менее удивительная особенность атмосферного электричества, это его унитарная вариация. Заметим, далеко не каждое из еще не нашедших объяснения природных явлений, нашло отражение в фейнмановских лекциях по физике, – учебнике, признанном во всем мире. А это – нашло. Более того, этому загадочному явлению посвящено несколько страниц 5-го тома. Тем не менее, объяснение его тем, что частота гроз и их пространственное распределение именно таково, что они обеспечивают день ото дня изменение E во всем мире синхронно, мягко говоря, не внушает доверия. Как показано, например, в (Marsh, Svensmark, 2003) существует корреляция между облачностью и космическими лучами, причем максимальное количество облаков в период наблюдений (1983-1994) находится в Тихом океане. Более того, как отмечалось выше, годовая вариация количества гроз и величины E , – антикоррелируют. Это так же ставит под сомнение принятую модель. Можно еще добавить, что разряд молнии приводит к уменьшению величины E и т.п.

Электрические заряды в атмосфере. Атмосферное электрическое поле можно определить в любой его точке, зная его потенциал V , величина которого обусловлена суммой всех электрических зарядов на Земле и в атмосфере. Каждая точка пространства обладает вполне определенным потенциалом. Соединение всех точек, обладающих одним значением потенциала, приводит к построению т.н. уровня, изопотенциальной поверхности. Эти поверхности, в силу свойств, присущих потенциалу, не могут ни пересекаться, ни касаться друг с друга. Беря производную от потенциала по нормали (n), получаем напряженность поля $E = \partial V / \partial n$. У земной поверхности, считая её проводником, напряженность поля:

$$E = \partial V / \partial n = 4\pi\sigma, \quad (9.20)$$

где σ – поверхностная плотность заряда Земли в данной точке. Выражение (1) играет важную роль в физике АЭП, т.к. в приземном слое величина E резко возрастает. Это явление в атмосферном электричестве получило название электродный эффект. Наблюдения за величиной E , проведенные у земной поверхности, дают в среднем для градиента потенциала значение порядка 130 В/м, что позволяет вычислить величину поверхностной плотности заряда Земли: $\sigma^* \approx 7 \cdot 10^5$ элементарных зарядов/см² и общий заряд Земли: $Q = \varepsilon_0 R^2 E = 5.7 \cdot 10^5$ кулон, R_E – радиус Земли ε_0 – электрическая постоянная. Учитывая сказанное, по-видимому, правильнее говорить не о постоянстве E во времени и пространстве, а о том, что электрический заряд Земли – суть константа (Швейдлер, 1936).

Общий потенциал положительно заряженной электросферы (ионосферы) относительно отрицательной Земли $V = 300$ кВ, плотность тока в «конденсаторе» Земля-ионосфера $j \approx 10^{-12}$ А/м², полный ток «разрядки» $I \approx 1$ кА. Зная V и Q , можно оценить емкость «конденсатора» Земля – электросфера: $C = Q/V \approx 1$ фарада. Ёмкость сферического конденсатора можно оценить по формуле: $C \approx 4\pi\varepsilon_0\varepsilon S/d$, подставляя площадь поверхности Земли S и величину электрической постоянной ε_0 , получаем высоту электросферы: $d \approx 60$ км. Полное сопротивление проводящей атмосферы $R \approx 230$ Ом. Сопротивление R можно представить как параллельное соединение цепочек сопротивлений между Землей и электросферой, расположенных равномерно по поверхности Земли, соединенных между собой сопротивлениями в точках, между которыми возможно возникновение горизонтального E и возможен горизонтальный ток электрического заряда, как, например, в облаках или ионосфере. В таких цепочках

включены источники напряжения, которые создают необходимый потенциал на обкладках сферического конденсатора. В качестве такого генератора принято считать грозы.

Суть развиваемой нами идеи состоит в том, что грозы и разряды молний оказывают влияние на АЭП, но они не являются основными его источниками. Согласно модели, образование (за счет ионизации атмосферы ГКЛ) и разделение зарядов (за счет различия в скоростях падения заряженных аэрозолей) происходит в атмосфере «хорошей погоды». Для того, чтобы доказать правоту этой идеи, необходимо, во-первых, найти убедительные доказательства, что ГКЛ могут принести Земле электрический заряд, по величине не меньший, чем она теряет в единицу времени $I = dQ/dt = 10^3$ кулон/с. Скорость образования ионов q связана с плотностью потока космических лучей P соотношением: $q = PsN_o$, s – эффективное сечение ионизации воздуха космическими лучами, N_o – концентрация молекул воздуха.

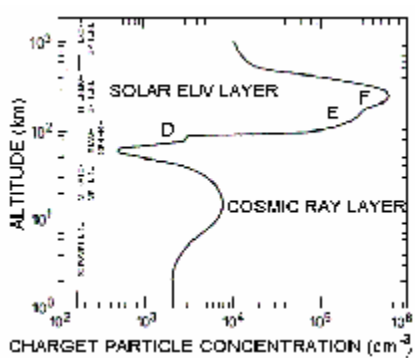


Рис. 9-18. Вертикальный профиль плотности ионизированных частиц в атмосфере (Marsh, Svensmark, 2000).

Распределение плотности электрических зарядов по высоте атмосферы представлено на рис. 9-18 (Marsh, Svensmark, 2000). Как следует из рисунка, ионизация воздуха той части атмосферы, которая причастна к генерации АЭП, происходит за счет ГКЛ. Оценим величину dQ/dt – скорость образования ионов, приняв величину плотности зарядов $N = 2 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$, для чего воспользуемся равенством: $dN/dt = \alpha N^2$. Положим, что $N^+ = N^-$, тогда, зная коэффициент рекомбинации ионов α , можно оценить скорость образования зарядов в атмосфере dN/dt . Подставив в формулу величину элементарного заряда e , получим скорость накопления зарядов: $dQ/dt = eV \cdot dN/dt$, где V – объем атмосферы Земли ($\sim 5 \cdot 10^{18} \text{ м}^3$). Отсюда величина: $dQ/dt = \alpha \cdot 4 \cdot 10^{18}$ кулон/с. Таким образом, если бы скорость рекомбинации α была бы: $\alpha \geq 2.5 \cdot 10^{-16} (\text{м}^3 \text{ с}^{-1})$, проблема создания плотности зарядов в атмосфере за счет ионизации её ГКЛ – решалась бы элементарно.

Обратимся к справочным данным по величине коэффициента объемной рекомбинации α . Величина α изменяется в пределах: $10^{-16} - 10^{-12} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$. Требуемое для нашей модели ограничение величины α находится в этом диапазоне величин, тем не менее, эта оценка не дает однозначного ответа на поставленный выше вопрос. Для того чтобы ответить на него, необходимо точно знать, на каких ионах происходит рекомбинация зарядов, и какова роль электронов в этом процессе. Согласно данным, приведенным в (Боярчук и др. 2000) скорость рекомбинации положительных ионов с электронами $\alpha \approx 10^{-12} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$, в то время как коэффициент рекомбинации между ионами намного меньше $\alpha \approx 10^{-16} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$ (что несколько меньше нашей оценки). Если процесс ион-ионной рекомбинации превалирует над ион-электронной, то ГКЛ, в данной модели объемной рекомбинации, по-видимому, не могут обеспечить необходимый приток зарядов. В этом случае задача усложняется, необходимо привлечение дополнительных источников ионизации.

Наша оценка показывает, что ГКЛ вносят существенный вклад в транспортировку электрического заряда к Земле, но пока нельзя считать, что это единственный источник зарядов. Существует и другой способ оценить роль ГКЛ в ионизации атмосферы.

В работах (Ermakov et al., 1997; Ермаков, Стожков, 2004) экспериментально установлено, что ионизация атмосферного воздуха космическими лучами q происходит в соответствии с линейным уравнением баланса ионов: $q = \beta N$, а не в состоянии с обычно используемым квадратичным уравнением: $q = \alpha N^2$. Здесь α – коэффициент объемной рекомбинации, β – коэффициент линейной рекомбинации, эти коэффициенты различны по величине и по размерности. Обнаруженная зависимость указывает на то, что в действительности связь между концентрацией ионов в атмосфере и потоком космических лучей является более сильной ($N \sim P$), чем предполагалось ранее ($N \sim P^{1/2}$). Этот подход укрепляет уверенность в том, что ГКЛ оказывают решающее влияние на АЭП и ток проводимости атмосферы j . В качестве иллюстрации сказанному приведем рис. 9-19, на котором можно видеть устойчивую корреляцию между потоком ГКЛ - N и током j (dQ/dt).

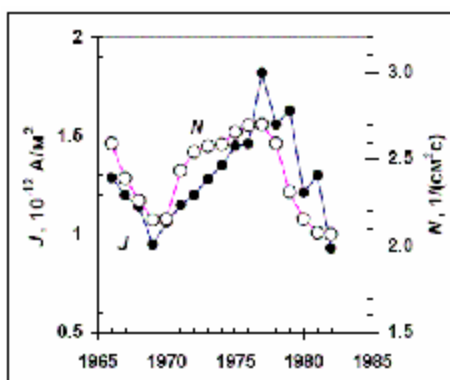


Рис. 9-19. Зависимости величины плотности атмосферного тока j (темные кружки) (Roble, 1985) и потока космических лучей N на средних широтах на высоте $h \approx 22$ км; светлые кружки (Stozhkov, 2003; Ермаков, Стожков, 2004).

Обратим внимание на то, что уменьшение плотности потока ГКЛ и тока проводимости j соответствуют периодам максимальной активности Солнца (69-70 и 80-82 гг.), а их синхронное увеличение - минимальной (76-77 гг.). Таким образом, рис. 9-19 подтверждает однозначную связь АЭП с ГКЛ. Однако пока речь шла только о том, что ГКЛ в атмосфере могут обеспечить необходимую плотность электрических зарядов. Теперь, во-вторых, необходимо определить, имеется ли в атмосфере достаточное количество мелких капель, водных аэрозолей или тяжелых ионов, которые смогли бы принять участие в разделении образовавшиеся за счет ионизации атмосферы ГКЛ заряженных частиц в поле силы тяжести таким образом, чтобы Земля оказалась отрицательной, а ионосфера – положительной.

Образование водных аэрозолей. Размер частиц. В спокойной атмосфере всегда существуют аэрозольные частицы размером от нескольких сотен ангстрем до нескольких микрон. В глобальном масштабе выделяют три типа распределения частиц по размерам в тропосфере: «фоновый», «океанический» и «континентальный». Идеализированные кривые, демонстрирующие существенные черты этих распределений, изображены на рис. 9-20 (Ивлев, Довгалюк, 1999). Фоновый тип распределения аэрозоля по размерам предполагается репрезентативным для средней и верхней тропосферы. Кривые рисунка соответствуют ситуации существования и отсутствия непрерывной генерации мелкодисперсной фракции. Фоновая концентрация (кривые 1, 5) типична для очень чистого воздуха и предполагается равной 700 см^{-3} . Самый нижний слой воздуха над океанами, высотой 2 км, содержит морские частицы. Океанический тип распределения частиц по размерам (кривые 2, 4) отличается от фонового в интервале радиусов от 0.5 до

20 мкм, в котором концентрация частиц океанического типа увеличивается по сравнению с фоновой концентрацией - за счет частиц, возникающих из морских брызг. Общая концентрация частиц морского происхождения не велика: $< 10^3 \text{ см}^{-3}$. В нижней тропосфере над сушей предполагается репрезентативным третий тип распределения частиц по размерам – континентальный (кривая 3). Счетная концентрация частиц в этом случае возрастает до 10^4 см^{-3} . Распределение частиц с $r < 0.1 \text{ мкм}$ считается неопределенным. Как следует из рис. 9-20, максимальная концентрация аэрозолей соответствует размеру: $r \geq 0.1 \text{ мкм}$. (В дальнейшем нас будут интересовать частицы именно такого размера). Распределение частиц по размеру, представленное на рис. 3, касается не только водных аэрозолей. Разделение электрических зарядов происходит на водных каплях и тяжелых ионах, поэтому необходимо выяснить, имеются ли в атмосфере подходящие условия, необходимые для конденсации и коагуляции капель радиусом $r \geq 0.1 \text{ мкм}$.

Приведем данные по концентрации в атмосфере и подвижности легких и тяжелых ионов (Тверской, 1949), полученные при изменении влажности воздуха. Распределение ионов по концентрациям, подвижностям и скоростям (при влажности воздуха 2 – 3 мм Нг) приведено в Таблице 1:

Таблица 1.

Легкие ионы	$n = 200 \text{ см}^{-3}$	$u = 1.1 \text{ см}^2 \text{ с}^{-1} \text{ В}^{-1}$	$v \approx 10^{-2} \text{ м/с}$, для $E = 100 \text{ В/м}$
Средние ионы	$n = 700 \text{ см}^{-3}$	$u = 0.05 \text{ см}^2 \text{ с}^{-1} \text{ В}^{-1}$	$v \approx 5 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$
Тяжелые ионы	$n = 1600 \text{ см}^{-3}$	$u = 0.008 \text{ см}^2 \text{ с}^{-1} \text{ В}^{-1}$	$v \approx 8 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$

При увеличении влажности воздуха от 2-3 мм Нг до 12-13 мм Нг, концентрации легких и средних ионов практически не изменяется, в то время как концентрация тяжелых – возрастает почти в 5 раз. Обратим внимание на то, что скорость дрейфа тяжелых ионов в поле E может быть соизмерима и даже меньше (как будет показано ниже) их стоксовой скорости падения в поле силы тяжести.

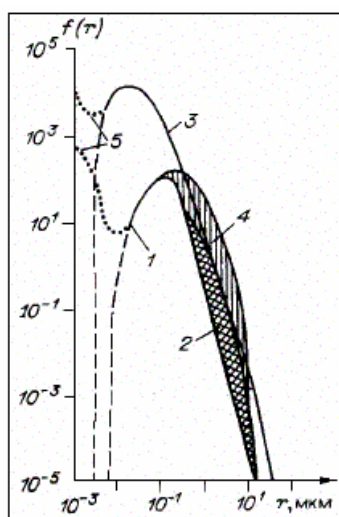


Рис.9-20. Распределение атмосферных аэрозолей по размерам (Ивлев, Довгалюк, 1999).

Заряженные водные аэрозоли и тяжелые ионы падают на поверхность Земли и передают ей свой заряд. Аэрозоли во время падения на Землю - испаряются. Критический размер, при котором они начинают испаряться, был оценен в (Harrison, 2001), где показано, что наиболее оптимальный размер водного аэрозоля составляет 0.13 мкм (рис. 9-21). Меньшие частицы – испаряются, частицы крупнее критического размера – растут.

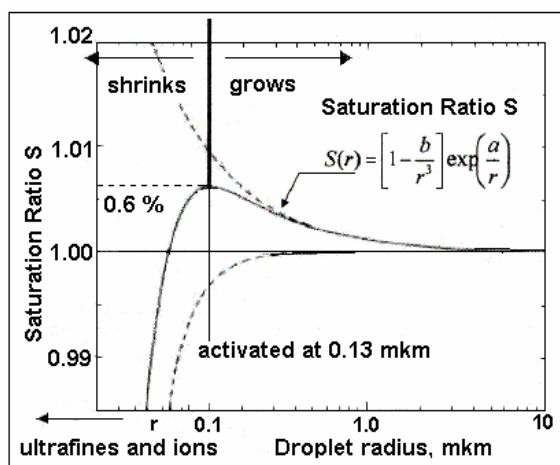


Рис. 9-21. Зависимость размера водного аэрозоля от степени насыщения (Harrison, 2001). Капли размером, $r < 0.13$ мкм будут испаряться, большим – расти.

Как показано на рис. 4, величина пересыщения в оптимальном случае $S_c \approx 1.006$ (0.6%). Зависимость критического пересыщения паров воды от температуры $S_c(T)$ приведенная на рис. 9-22, получена Артюхиным А.С. (2001). Расчеты проводились как по классической теории (1), так и по квантово-статистической (2). В последнем случае, результаты расчетов близки с экспериментальными точками, определенными при сверхзвуковом течении воздуха, в камере Вильсона, и в диффузионной камере. Автор считал пересыщение критическим, при котором отношение числовой плотности димеров к числовой плотности мономеров в системе составляет 3% (критерий Кало). Автором показано, что при температуре $T = 250$ К, $S_c = 1.5$ и оно плавно убывает по мере роста температуры: $T = 275$ К, $S_c = 1.0$; $T = 290$ К, $S_c = 0.5$ и т.д., отсюда для $S_c = 1.06$, $T = 265$ К.

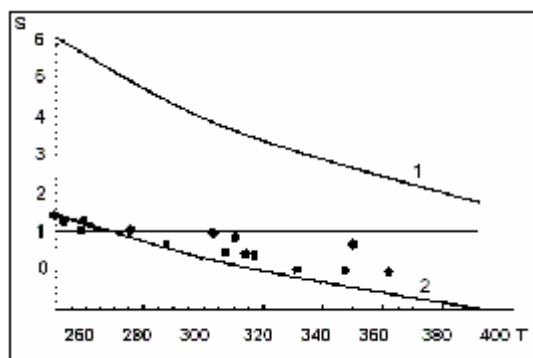


Рис. 9-22. Зависимость критического пересыщения паров воды от температуры $S_c(T)$ (Артюхин, 2001).

Полагая среднюю по Земле температуру $T_E = 15$ °С, а температуру $T_c = -10$ °С, используя эмпирическую формулу для убывания температуры тропосферы с высотой H : $T_c = T_E - 6.5 H$ (км), получим, что степень пересыщения $S_c = 1.06$ будет достигнута на высоте ≈ 4 км. Полученный результат показывает, что область формирования водных аэрозолей с характерным размером $r \geq 0.1$ мкм совпадает с областью максимальной концентрации ионов, образующихся при торможении ГКЛ.

Разделение зарядов в поле силы тяжести. Величину атмосферного электрического поля E_Z , можно оценить по формуле, полученной Френкелем при учете эффекта разделения зарядов на водных каплях, радиусом r (Френкель, 1949):

$$E_Z = (4\pi r g / 3\epsilon_0) \times (r_1^2 - r_2^2) / (q_1/r_1 + q_2/r_2) = 4\pi r g r^2 / 3\epsilon_0 \zeta \quad (9.21)$$

Здесь: r - плотность воды, g - ускорение силы тяжести, ϵ_0 - электрическая постоянная, r_1 и r_2 - радиусы больших и малых капель, q_1 и q_2 - их заряды, соответственно, ζ - электрокинетический потенциал воды. Френкель выражает величину E_Z внутри облака через его водность M :

$$E_Z = \epsilon_0 M g \zeta / 6\pi \eta \sigma_e \quad (9.22)$$

где: M - водность облака (в грозовом облаке считается величина $M \approx 1$ г/м³), g - ускорение силы тяжести, ζ - электрокинетический потенциал воды ($\zeta \approx 0.25$ В), η - вязкость воздуха ($\eta \approx 10^{-5}$ Па с), σ_e - электропроводность ($\sigma_e \approx 10^{-14}$ Ом⁻¹ м⁻¹); $E_Z \approx 10^4$ В/м.

Следуя логике рассуждений Френкеля, для оценки величины E , возникающей при разделении зарядов в насыщенной влагой атмосфере «хорошей погоды», будем использовать формулу (9.22). Известно, что в такой атмосфере концентрация молекул «сухого» пара воды ≈ 12 г/м³. Водность атмосферы (в виде водного аэрозоля) M для $E_Z = 100$ В/м должна быть в сто раз меньше, чем в кучевом облаке, т.е. $M = 0.01$ г/м³. Как показано в предыдущем разделе, для того чтобы в атмосфере образовался мелкий аэрозоль, необходимо выполнение определенных рТ условий. Важно, чтобы температура и давление водяного пара были бы близкими к давлению насыщенного пара при заданной температуре. Это означает, что пересыщение должно быть чуть больше единицы. Второе условие образования мелких капель состоит в том, что для их образования необходимы ядра конденсации. Согласно нашей модели, это могут быть электрические заряды.

Оценим размер капелек воды в этом случае. Очевидно, что это должны быть очень мелкие, не видимые глазом капли, размером, меньше 0.5 мкм. Если капли будут видимые и их будет много, то это уже не атмосфера «хорошей погоды», а грозовое облако или туман. Условие падения капель на Землю, при выполнении которого они могут принять участие в разделении зарядов, можно получить из формулы Стокса для скорости падения капли:

$$v = (mg - \epsilon_0 qE) / 6\pi \eta r, \quad (9.23)$$

где m - масса капли, а $q = \epsilon_0 \zeta r$ - её заряд. В облаке принято считать: $mg \gg qE$. В нашем случае, для оценки минимального размера капли, можно остановиться на условии: $mg \geq qE$. Отсюда получаем минимальный радиус капли из условия: $(4\pi/3) r^2 g \rho \geq \epsilon_0 \zeta E$, или $r \geq 0.1$ мкм. Наша оценка соответствует очевидному условию «невидимости» капли: $r < 0.5$ мкм, или: 0.5 мкм $> r \geq 0.1$ мкм. Масса капли такого размера $m \approx 10^{-14}$ г.

Используя формулу (9.22), мы получили, что поле $E_Z = 100$ В/м возникает при водности атмосферы $M = 10^{-2}$ г/м³. При этом в кубическом метре воздуха может находиться до $n \approx 10^{12}$ заряженных капель.

Оценим концентрацию электрических зарядов, принимающих участие в атмосферном токе «утечки». Однако прежде отметим, что в атмосферном токе участие принимают лишь легкие ионы. Ни средние, ни, тем более, тяжелые ионы, в силу своей малой подвижности, участие в формировании атмосферного тока утечки не принимают. (Это важный момент модели). Плотность атмосферного тока «хорошей погоды» $j = 10^{-12}$ А/м², подвижность легких ионов, носителей тока (по справочным данным): $u = 10^{-4}$ м²/с·В, отсюда скорость переноса для $E_Z = 100$ В/м. $v_e = uE \approx 10^{-2}$ м/с. Мы можем оценить плотность переносчиков зарядов: $n_e = 10^9$ м⁻³. Как известно, величина $E_Z \sim 1/h$, а проводимость: $\sigma \sim h$, h - высота. Известно так же, что плотность тока j от h практически не зависит. Эти данные позволяют получить примерное распределение плотности электрических зарядов n_e , участвующих в формировании тока утечки: $n_e \sim 1/E^2$ или: $n_e \sim h^2$. Плотность зарядов тока утечки возрастает с высотой квадратично.

Представим себе атмосферную электрическую цепь как глобальный контур, состоящий из внутреннего генератора и нагрузки. В нашей модели, генератором АЭП является атмосфера «хорошей погоды», в которой происходит образование и разделение

зарядов в поле силы тяжести. Образование аэрозоля на отрицательном заряде требует значительно меньшего пересыщения и капля образуется значительно быстрее, чем на положительном заряде. Источником зарядов являются ГКЛ, которые, попадая в атмосферу, тормозятся, генерируя при этом каскад вторичных заряженных частиц dN/dt . Принципиальным моментом модели является величина скорости падения капли, в сравнении её со скоростью дрейфа в АЭП. Оценим величину стоксовой скорости капли радиусом 0.1 мкм, для чего воспользуемся формулой (4): $v \approx mg/6\pi\eta r = 10^{-4}$ м/с. Сравним полученную оценку с известными экспериментальными данными. Принято считать, что средняя скорость оседания стратосферного аэрозоля радиусом 0.1 мкм примерно 40 м за сутки, или $\approx 5 \cdot 10^{-4}$ м/с, что близко к стоксовой скорости.

Скорость «падения» аэрозольных слоев, измеренная с помощью лидара на полигоне Томского института оптики атмосферы СО РАН, составляет около 5 км/сутки $\approx 5 \cdot 10^{-2}$ м/с (Маричев и др. 2004). Размер аэрозоля, по оценкам авторов, порядка 1 мкм. Так как стоксова скорость $v \sim r^2$, то для капель такого размера, эта скорость, оцененная по формуле (4): $v \approx 10^{-2}$ м/с, что примерно соответствует измерениям в Томске. Эти оценки показывают применимость формулы (9.23).

Полярность E. Роль процессов конденсации и испарения. Рассматриваемая нами модель АЭП, как и модель Френкеля, определяет полярность заряда Земли тем, что капли, несущие отрицательный заряд, оказываются тяжелее капель, несущих заряд положительный. Мы вправе задать вопрос: всегда ли было так, и может ли заряд Земли знак изменить? Как следует из всего ранее сказанного, модель АЭП базируется на процессах конденсации и коагуляции капель. Процессы испарения практически не рассматривались, а ведь они в физике атмосферы играют не меньшую роль, чем процессы конденсации. Рассмотрим оба этих процесса чуть подробнее, и с общих позиций. Выясним, в частности, роль фазовых переходов в объяснении физической картины электрических процессов, иначе, попытаемся разобраться в физике, связанной с конкуренцией между процессами конденсации и испарения в атмосфере.

Скорость конденсации K ($\text{с}^{-1} \text{см}^{-3}$), согласно формуле Френкеля (1975), упрощенной и модифицированной:

$$K \sim \exp(-3/\ln^2 S_C + \ln S_C), \quad (9.24)$$

здесь S_C - пересыщение пара, равное отношению давления пара в системе к давлению насыщенного пара при той же температуре. Величина S_C определяется, кроме ряда других параметров температурой пара T :

$$\ln S_C \sim \alpha/kTg^{1/3},$$

его термодинамическим потенциалом, размером зародышей капель, величиной поверхностного натяжения жидкости α и т.п. Скорость конденсации K можно выразить через температуру пара:

$$\begin{aligned} K &\sim \exp(-2T + 1/T), \text{ а, с учетом того, что } S_C > 1, \\ K &\sim \exp(-T) \end{aligned} \quad (9.25)$$

Скорость конденсации K показывает количество элементарных процессов слияния частиц, которое происходит в единицу времени в единичном объеме. Величина K определяет скорость образования и роста капель.

В режиме испарения (кипения) в системе разрушаются капли и, им на смену, образуются «пузыри» пара, скорость образования которых J ($\text{с}^{-1} \text{см}^{-3}$):

$$J \sim \exp(-W/kT), \quad (9.26)$$

где W - энергия, необходимая для образования пузыря критического размера. Качественная зависимость K и J от температуры T изображена на рис. 9-23. При температуре T'' , когда выполняется ($K \approx J$), казалось бы, система должна достичь термодинамического равновесия. На самом деле всё обстоит совсем не так: такая ситуация ближе к критическому, крайне неустойчивому состоянию.

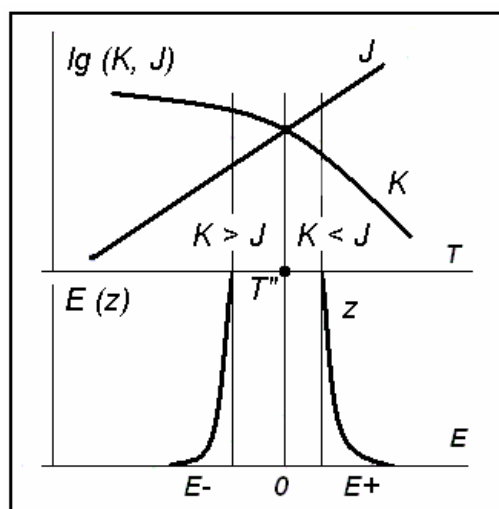


Рис. 9-23. Изменение \lg скоростей конденсации (K) и испарения (J) в зависимости от температуры T – вверху. Внизу – полярность электрического поля E , как функция отношения J и K : $E +$, когда $J > K$, и $E -$, когда $J < K$.

Для процессов, происходящих в атмосфере, температура поверхности океана $T'' \approx 26.5^\circ \text{C}$ считается критической, при которой возникает неустойчивость, результатом развития которой является, в частности, возникновение тайфунов. Считается, что именно при этой температуре процессы испарения начинают превалировать над конденсацией. Как известно, средняя температура Земли, усредненная по земному шару и времени года: $T \approx 15^\circ \text{C}$, что ниже T'' . Таким образом, на Земле, в её атмосфере, согласно нашей феноменологической модели, процессы конденсации имеют преимущество перед испарением. Средняя температура Земли величина очень стабильная. Как правило, речь идет о возможных вариациях её от года к году не более единиц процентов. Возможно, постоянство T является одной из причин того, что и величина E поддерживается постоянной. Вторая причина стабильности E - это стабильность потока ГКЛ.

Как мы отмечали выше, разделение электрических зарядов в атмосфере обязано тому, что капли заряжаются, в зависимости от их размеров: маленькие – приобретают положительный заряд и «всплывают», большие заряжаются отрицательно и «падают» на Землю. При постоянных параметрах: температуре, давлении и влажности атмосферы, это очень стабильный во времени процесс. Электрические заряды приносят в атмосферу ГКЛ, плотность потока которых так же очень стабильный во времени процесс. Взаимодействие этих двух стабильных процессов поддерживает уровень E_z - стабильным. Тем не менее, зададимся вопросом, может ли, в принципе, возникнуть такая ситуация, при которой Земля может оказаться заряженной положительно, а ионосфера – отрицательно?

В современной атмосфере скорость конденсации воды выше скорости испарения. Представим обратную ситуацию: скорость испарения воды превалирует над скоростью её конденсации. В нашей постановке задачи, это означает, что в непосредственной близости над поверхностью испарения скапливается положительный заряд. В это время в более высоких, и более холодных слоях атмосферы водяные пары конденсируются, и при этом образуются капли, обладающие отрицательным зарядом, Капли выносятся потоком пара в верхние слои атмосферы. При этом восходящий поток с каплями, несущими отрицательный заряд, преодолевает земное притяжение, т.е. градиент давления в потоке оказывается больше силы тяжести. Полярность атмосферного электрического поля при этом изменится - на обратную. Эта ситуация отражена в правой части рис. 9-23. На практике эта ситуация возникает при образовании тайфунов, когда на большие высоты

восходящими потоками выносятся огромное количество водяных капель, заряженных отрицательно.

Поле E_z и температура поверхности Земли. Температура поверхности Земли в течение 100 последних лет возрастает. В этой связи, величина АЭП, согласно нашей модели, должна - уменьшаться. Действительно, как было недавно показано по наблюдениям в Шотландии и Шетланде, ежегодное снижение АЭП с 1920 до 1980, когда измерения прекратились (Harrison, 2002; Märcz, Harrison, 2003), было зарегистрировано. Автор пытается связать уменьшение величины АЭП с якобы наблюдаемым уменьшением интенсивности ГКЛ, подчеркивая, тем не менее, существование отрицательной корреляции с глобальной температурой, как и следует из нашей модели (рис. 9-24).

Уместно вспомнить слова знаменитого английского физика Томсона о том, что в будущем предсказание погоды будет осуществляться посредством электрометра. Если наши рассуждения о связи E с температурой, давлением и влажностью атмосферы Земли верны, то Томсон был очень близок к истине.

Рассмотрим подробнее, в контексте нашей модели, почему и каким образом, АЭП понижается с ростом температуры поверхности Земли. Согласно нашей модели величина E_z пропорциональна массе водного конденсата облака, размеру частиц - капель воды, которые участвуют в разделении зарядов. Причем, чем больше размер частиц и их больше, тем эффективнее происходит разделение зарядов. Очевидна так же и высказанная выше идея относительно того, что чем скорость конденсации больше скорости испарения, тем больше размер частиц, капель, аэрозолей, т.е. тех частиц, которые переносят отрицательный заряд Земле. Сейчас нашей задачей будет оценить, почему АЭП уменьшается именно настолько, как это следует из данных наблюдений, приведенных на рис. 9-24. Из этого рисунка следует, что, начиная с 1920 г. До настоящего времени (в течение 80 лет; $dt = 80$), величина E_z уменьшилась примерно вдвое: dE_z / dt (E_z') ≈ 2 (со скоростью ≈ 1 В/м $\approx 1\%$ в год), в то время как температура поверхности Земли в этот же период времени выросла на $0.7 - 0.8$ градуса ($0.01^\circ \text{ год}^{-1}$), что составляет, примерно, dT/dt (T') = 0.06, или 6 %. (где среднегодовая температура Земли $T = 15^\circ \text{C}$). Отношение скоростей изменения параметров $T'/E' = 0.03$

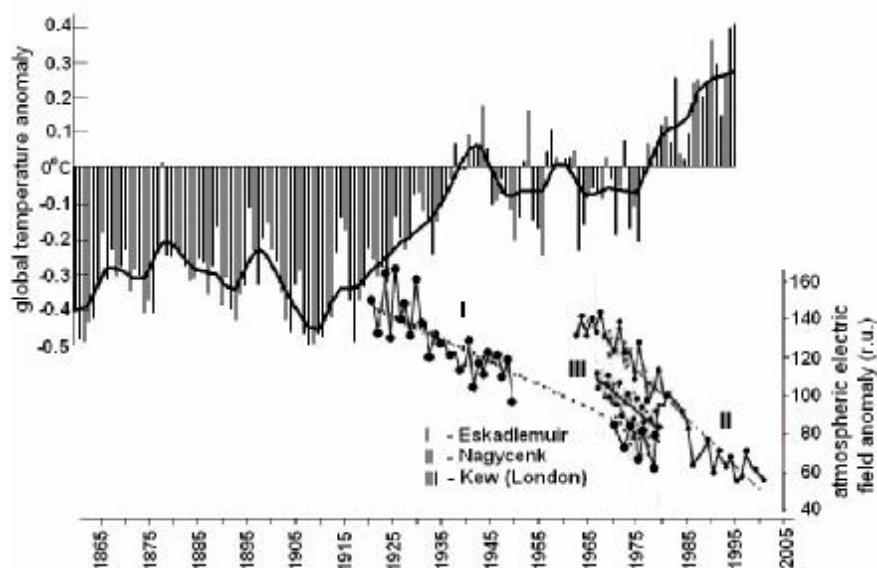


Рис. 9-24. Изменение глобальной температуры Земли. Уменьшение величины E_z на обсерваториях Венгрии и Великобритании (Märcz, Harrison, 2003)

Для подтверждения модели нам следует получить теоретическую зависимость E_Z от температуры T , типа: $E_Z \sim \exp(-T)$, или: $M \sim \exp(-T)$, т.к. $E_Z \sim M$.

Водность M , иначе, интегральная масса образующихся в атмосфере капель, определяется скоростью нуклеации, т.е. скоростью роста капли. Для оценки скорости нуклеации воспользуемся формулой, полученной Зельдовичем (1942):

$$M \sim nZ (4\pi rPK)/(2\pi m kT)^{1/2},$$

n – концентрация, r – радиус, m – масса ядер конденсации, т.е. «зародышей» капель, Z – фактор Зельдовича, P – давление, K – скорость конденсации $K \sim \exp(-T)$, k – постоянная Больцмана. Учитывая зависимость E_Z только от температуры, получаем:

$$M \sim T^{1/2} \exp(-T), \text{ или, иначе:}$$

$$E_Z \sim T^{1/2} \exp(-T).$$

Температура поверхности Земли возрастала в течение времени наблюдения t более или менее линейно со временем: $T = at$, тогда $T' = dT/dt = a$. Подставим это выражение в формулу для E_Z' и получим: $E_Z' \approx \exp(-at)(1 + 2at)/a (at)^{3/2}$, а отношение $T'/E' \approx 2a^{3/2}$, полагая $t = 1$. Как отмечалось, величина a , из наблюдений: $a = 0.06$, получаем отношение: $T'/E' = 0.03$, что можно рассматривать как подтверждение справедливости нашей модели.

Предположим, что глобальное потепление будет продолжаться с той же скоростью, что и сейчас, т.е. $\sim 1^\circ/100$ лет, тогда Земля, «нагреваясь», может достичь критической температуры $T = 26,5^\circ \text{C}$ примерно за 1000 лет. В этом случае поле E_Z уменьшится, примерно в 10 раз, так что его можно считать практически равным нулю ($\approx 10 - 15 \text{ В}$), что ниже величины флуктуаций E_Z .

Рассмотрим альтернативную модель, в которой уменьшение величины АЭП может быть, например, связано с вековым уменьшением интенсивности потока ГКЛ. Как мы показали, при Форбуш понижениях, уменьшение E_Z происходит примерно в 10 раз больше (10 %), чем ГКЛ (1 %). Однако в этом случае понижение величины E_Z связано с уменьшением самой низкоэнергетической частью общего потока ГКЛ, не принимающих участия в ионизации атмосферы. Принято считать, что максимум ионизации атмосферы приходится на область высот порядка 5 км., где наблюдается максимум ионизации атмосферы потоком ГКЛ, его вариации в процентах примерно соответствуют вариациям E_Z , что составляет ≈ 1 %. С другой стороны, 11-летние солнечные вариации ГКЛ составляют примерно 1 - 2 % в год. Наблюдения ГКЛ на нейтронных мониторах ведется около 50 лет, т.е. имеются данные по 5 циклам солнечной активности. Этих данных недостаточно для того, чтобы утвердительно ответить на вопрос существует ли тенденция векового уменьшения интенсивности потока ГКЛ. В такой ситуации нет возможности ни принять альтернативную модель, ни её опровергнуть.

Поле E_Z и грозы. Неоднократные наблюдения АЭП показывают, что во время гроз его величина – уменьшается, в то время принято считать, что гроза – источник атмосферного электричества. В работе (Франк-Каменецкий и др. 2006) показано, что вклад грозовых разрядов в АЭП ничтожен и не превышает 0.1 %. Обнаружено, что увеличение числа грозовых разрядов ведет к уменьшению величины АЭП.

Ежедневное количество гроз в целом, и их распределение по поверхности Земли значительно изменяется. Это говорит о том, что мирового центра гроз не существует. Можно выделить три региона грозовой активности (по убыванию интенсивности): 1 – Индонезийский, 2 – Бразильский, 3 – Африканский. Кроме этого, большое количество гроз происходит и в экваториальных областях мирового океана.

Итак, изменения количества гроз в году антикоррелирует с изменениями АЭП, в то время как, ещё А.Л. Чижевским и многими другими показано, что многолетний ход кривой частоты гроз и ход кривой числа солнечных пятен совпадают достаточно хорошо.

Например, в качестве иллюстрации приведем Таблицу 9-3, в которой сравниваются числа Вольфа - W с годовым количеством гроз на Горном Алтае – N (Дмитриев и др., 2002).

Таблица 9-3

годы:	1956	1964	1968	1976	1979	1987	1990	1998
W	142.6	27.6	91.4	36.5	114.0	41.3	118.9	28.6
N	340	218	341	270	349	184	231	147
$k = N/W$	2.38	7.89	3.73	7.39	3.06	4.45	1.95	5.13

Из таблицы следует, что в годы максимума солнечной активности, отношение числа гроз (N) к числу Вольфа (W) k принимает значения: $k(\max) = 2.7 \pm 1$, в годы минимума $k(\min) = 6.2 \pm 1.5$. Видно, что всегда: $N \sim W$, и никогда не наблюдается: $N \sim 1/W$. Отношения $W/W = 142.6/27.6 = 5.16$, $N/N = 349/147 = 2.37$. (Жирным цветом выделены годы солнечной активности). Зависимость интенсивности ГКЛ и чисел Вольфа от времени: $I(t) \sim 1/W(t)$, хорошо известна. Имеется достаточно много доказательств зависимости: $E(t) \sim I(t)$. Эти факты противоречат модели грозового источника АЭП.

* Согласно данным по частоте гроз, представленным на карте, отображенной на сайте: http://flash.ess.washington.edu/TOGA_network_global_maps.htm Африка вовсе не является мировым центром гроз. Частота появления гроз значительно выше в Индонезии и Южной Америке. Постоянный мониторинг данных, приводимых на этом сайте, убедительно показывает, что вообще нет смысла говорить о каком-либо мировом центре гроз.

Унитарная вариация АЭП (Carnegie curve). Как отмечалось, обсуждаемая модель АЭП основана на том, что разделение зарядов происходит не столько в грозовом облаке, что очевидно, но и в атмосфере «хорошей погоды». Подтверждением правомерности модели атмосферного электричества могло бы служить объяснение природы Carnegie curve (CC) АЭП, называемую - Universal diurnal variation (UD-variation, иногда её называют UT). Предложим модель UD-вариации АЭП без привлечения механизма, связанного с частотой гроз*, якобы максимальной на Африканском материке. Напомним, что суть Carnegie curve АЭП состоит в том, что величина поля возрастает примерно на 20 % одновременно, на всей Земле, в период времени, когда в Лондоне 19 часов (UT = 19). Заметим, что в это время Земля ориентирована относительно Солнца таким образом, что полдень приходится в район Канады, точнее, Канадской магнитной аномалии, т.е. области, в которой горизонтальная компонента геомагнитного поля H - минимальна. Второй максимум кривой CC приходится на другой минимум величины компоненты H , который соответствует другой глобальной магнитной аномалии (ГМА) – Восточно-Сибирской.

Нашу модель CC АЭП иллюстрируем рис. 9-25-а, где показана плотность распределения ГКЛ, измеренная с помощью космического аппарата UoSAT, в период с 09.1988 по 05.1992 (Glassmeier et al., 2002). Для удобства представления, карта, показывающая плотность ГКЛ, перевернута таким образом, что северный полюс находится внизу, а восточная часть карты слева, - по ходу вращения Земли. Северное полушарие на рис. 9-25-а выбрано потому, что здесь наблюдается наибольшая долготная анизотропия ГКЛ. Несмотря на то, что в южном полушарии расположена Бразильская (Южно-Атлантическая) магнитная аномалия, в зоне влияния которой регистрируется огромная плотность заряженных частиц. Однако принято считать, что в районе БМА заряженные частицы «высыпаются» из радиационного пояса. Спектр этих частиц значительно «мягче» спектра тех ГКЛ, которые проникают в нижнюю атмосферу и там определяют концентрацию электрических зарядов. Частицы высокой энергии, регистрируемые в районе Бразильской ГМА, участия в притоке зарядов в нижнюю атмосферу не принимают и нами не учитываются. Распределение плотности ГКЛ в области южных полярных широт не имеет такой ярко выраженной анизотропии, как это

наблюдается в северных широтах. На этом основании нами используется только северная часть карты. На рис. 9-25-b приведена карта горизонтальной, Н-компоненты геомагнитного поля, расположенная аналогично карте рис. 9-25-а. Можно наблюдать пространственную корреляцию: области понижения величины Н соответствуют областям, где наблюдается наибольшая концентрация ГКЛ, что очевидно.

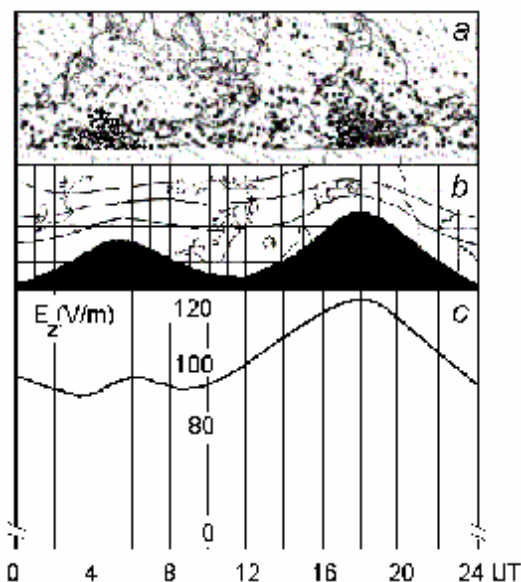


Рис. 9-25. а – Распределение интенсивности космических лучей, полученное с помощью космического аппарата UoSAT в период с 09.1988 по 05.1992 (Glassmeier et al., 2002) в северном полушарии (север – внизу); б - Изолиния величины Н-компоненты геомагнитного поля 10 мкТл (выделена черным цветом, север – внизу); с – СС АЭП.

Определим шкалу времени в нашей модели. Будем полагать, что ноль часов (0 UT) соответствует 180° меридиану, причем именно тогда, когда здесь полдень по местному времени. В такой шкале 19 UT соответствует полуденному времени в районе Канадской ГМА, региону Земли, в котором в атмосферу попадает максимальное количество ГКЛ, модифицированных солнечным ветром. Так как, когда в Лондоне 19 часов, как показано на рис. 9-25-с, Земля ориентирована таким образом, что линия 10 мкТл Н-компоненты геомагнитного поля занимает самые низкие широты, а это означает, что на Землю попадает максимальное количество ГКЛ, обладающих минимально возможной энергией (самая низкая энергия обрезания). Очевидно, что при этом количество заряженных частиц в нижней атмосфере заметно возрастает, что собственно и приводит к увеличению атмосферного электрического поля. На рис. 9-25-с показана унитарная вариация электрического поля. Можно видеть, что изолиния Н-компоненты геомагнитного поля 10 мкТл (выделена черным цветом, север – внизу) и UT-вариация атмосферного электрического поля E_z – практически совпадают. Эти факты положены в основу нашей модели.

Надо сказать, что эта идея совсем не нова. Аналогичную мысль высказал много лет тому назад Э. Швейдлер, который писал: « .. время вступления в максимум (19 часов по Гринвичу) совпадает приблизительно с полуднем меридиана (96° з.д.), проходящего через магнитный полюс северного полушария» (Швейдлер, 1936). Северный магнитный полюс близок к Канадской глобальной магнитной аномалии.

Зададимся вопросом, существуют ли экспериментальные факты, касающиеся UT-вариации, свидетельствующие в пользу нашей модели? Действительно, такие факты известны, сошлемся, например, на результаты наблюдений сезонного хода E_z в Антарктиде, на станции Восток, в течение 1998 г. (Corney, et al., 2003). Результаты, полученные авторами этого сообщения (данные представлены в относительных

единицах), приведены на рис. 9-26 (1). Авторы измеряли унитарную вариацию в течение 1998 года спокойного Солнца и отобрали всего 127 дней «хорошей погоды»: зимой (ноябрь, декабрь, январь и февраль) - 44; летом (май, июнь, июль и август) - 33 и 50 - в равноденствие (март, апрель, сентябрь и октябрь). Как и следовало ожидать, электрическое поле в дни равноденствий (equinox) вело себя таким же образом, что и в среднем в году. Максимальные значения поля E_z были примерно одинаковы и от сезона особенно не зависели. Кривые (рис. 9-26.1) удобнее различать по относительным величинам поля в периоды второго максимума: летом, это 0.9, в дни равноденствия – 0.8, зимой – 0.7.

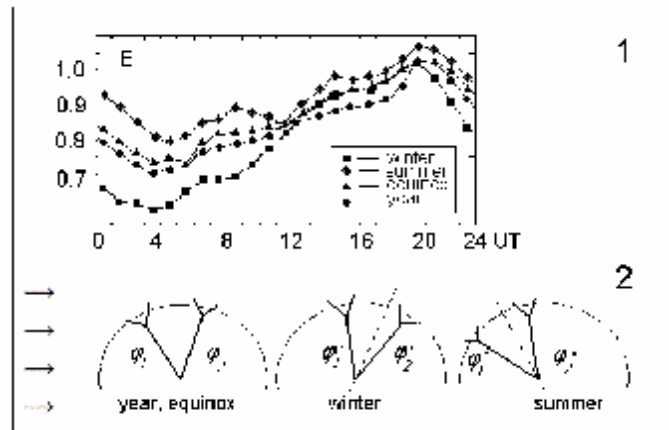


Рис. 9-26. Усредненная величина атмосферного электрического поля (в отн. ед.), зарегистрированная на станции Восток (Антарктида) в течение 1998 г. (Corney, et al., 2003) [1]. Ориентация Земли относительно направления СКЛ (стрелки) в равноденствие, зимой и летом. Углы и «воронки» соответствуют ГМА [2]: Канадская ГМА находится на широте $\varphi_1 \approx 55^\circ$ N, Сибирская - $\varphi_2 \approx 63^\circ$ N.

Рассмотрим модель взаимодействия ГКЛ (на рис. 9-26.2 - показаны стрелками), с магнитным полем Земли. В дипольном геомагнитном поле ГКЛ, модифицированное Солнцем, достигнут Земли преимущественно на её геомагнитных полюсах, где горизонтальная компонента равна нулю. Именно в районах полюсов должна наблюдаться самая высокая концентрация электрических зарядов.

Четыре глобальных магнитных аномалии Земли оказывают существенное влияние на структуру геомагнитного поля, две из них расположены в северном полушарии: это Канадская и Сибирская магнитные аномалии. Координаты Канадской ГМА: широта $\varphi_1 \approx 55^\circ$ N, долгота $\lambda \approx -100^\circ$; координаты Сибирской аномалии: $\varphi_2 \approx 63^\circ$ N, долгота $\lambda \approx 120^\circ$. Эти ГМА определяют конфигурацию геомагнитного поля в северном полушарии, в частности, - «провал» к югу изолинии Н-компоненты, изображенный в верхней части рис. 7. Представим себе схему, в которой высокоэнергичные протоны ГКЛ попадают в атмосферу Земли через ГМА, как своеобразные стоки - «воронки» (рис. 9-26.2). Обозначим широту Канадской ГМА - φ_1 , Сибирской - φ_2 . Плотность потока частиц ГКЛ, попадающих в геомагнитную «воронку», пропорциональна широте положения ГМА: $\sim \cos \varphi$, где φ - широта. Повторим, что наибольшее количество ГКЛ попадает в атмосферу Земли в районах полярных широт, где $\varphi \rightarrow 90^\circ$. Пользуясь принятым правилом, оценим соотношение интенсивностей потоков ГКЛ (обозначим его A) в районе Канадской ГМА, соответствующей 19 UT и Сибирской ГМА, соответствующей 7 UT.

Учтем, что положение Земли относительно Солнца в течение года меняется на угол $\pm 23^\circ$. Среднегодовое значение A равно отношению интенсивностей потоков ГКЛ в периоды весеннего и осеннего равноденствий, величина $A \sim \cos \varphi_1 / \cos \varphi_2 = E = 0.8$, для зимы $A \sim \cos (\varphi_1 + 23) / \cos (\varphi_2 + 23) = E = 0.7$, и лета $A \sim \cos (\varphi_1 - 23) / \cos (\varphi_2 - 23) = E =$

0.9, Полученные значения практически совпадают с данными, по отношению E , приведенными на рис. 9-26.1, что может говорить об адекватности модели.

В поддержку модели можно сослаться на результаты работы (Tinsley, 2000), где показано, что в моменты Форбуш понижения потока ГКЛ синхронно уменьшается и величина E_z . Этот вопрос подробнее будет рассмотрен ниже.

Модель унитарной вариации в ионосфере. Необычное поведение слоя F_2 на высоких широтах, в частности, образование широтной зоны пониженной ионизации («провала»), идущей параллельно зоне полярных сияний, где наблюдается более высокая степень ионизации, хорошо известно и изучено. Всё это говорит о том, что помимо солнечного излучения изменения электронной концентрации, а, следовательно, и критической частоты f_0 в F_2 -слое определяются рядом геофизических факторов. Одним из таких факторов может быть и наличие ГМА, являющихся причиной, по нашей модели, возникновения УТ-вариации E_z . В общепринятой интерпретации, это явление адекватно факту несовпадения полюсов: географического и магнитного.

В качестве примера на рис. 9-27 приведены результаты расчетов унитарной вариации f_0F_2 в зависимости от УТ для значений местного времени 00, 06, 12 18 часов. Расчеты проводились для «станций», расположенных на широте 53 градуса северного полушария для равноденствия, магнитоспокойных условий ($K_p=1$) и низкой солнечной активности ($F10.7=70$).

В.В.Бычковым на модельных расчетах получена унитарная вариация слоя F_2 ионосферы (рис. 9-27). Она определяется несовпадением географической и геомагнитной осей, вращением магнитного поля Земли и, связанной с ним, - системы конвекции плазмы относительно географической оси и основного источника ионизации – Солнца. Схожесть поведения унитарной вариации в ионосфере и в постоянном электрическом поле Земли подтверждает гипотезу о том, что источником электрического поля скорее могут быть особенности взаимодействия ГКЛ с геомагнитным полем Земли, чем неравномерное распределение гроз по континентам.

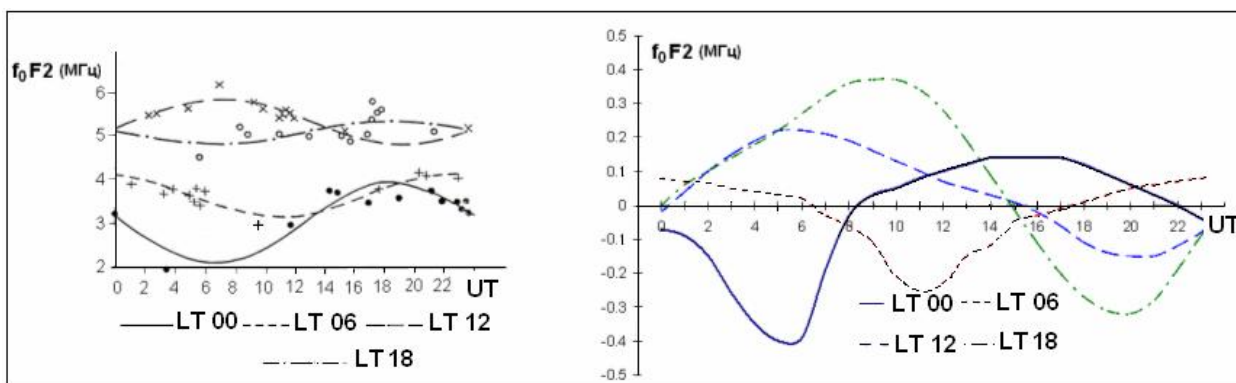


Рис.9-27. Аппроксимация хода критической частоты F_2 -слоя ионосферы от мирового времени УТ в солнечно-ионосферной системе координат по 13 станциям (слева). УТ - вариация f_0F_2 ионосферы для местного времени $LT= 00, 06, 12$ и 18 часов для условий равноденствия и солнечной активности $F10.7 = 150$ (модель - справа).

Атмосферное электрическое поле и геомагнитные бури. Магнитные бури и ионосферные возмущения находят отражение в поведении атмосферного электричества «хорошей погоды». Эта проблема интенсивно изучается, однако, она выходит из круга обсуждаемых нами здесь вопросов. Остановимся лишь на эффектах, демонстрирующих влияние на атмосферное электричество - ГКЛ и других заряженных частиц, попадающих в атмосферу Земли во время геомагнитных бурь. Как отмечалось выше, основной вопрос,

рассматриваемый в этой работе, состоит в выяснении причины, почему и каким образом Земля сохраняет свой заряд неизменным? В контексте с этой темой, нас интересует, какое влияние на заряд Земли оказывают заряженные частицы, попадающие в атмосферу. Казалось бы, присутствие таких частиц приводит к дополнительной ионизации, иначе, к увеличению электропроводности σ и, т.к. $E \sim 1/\sigma$, - к уменьшению величины АЭП. С другой стороны, как следует из нашей модели, ГКЛ вносят в атмосферу Земли электрический заряд, который, разделяясь падающими на Землю каплями, является источником поля E . Таким образом, должно наблюдаться увеличение поля E при увеличении потока ГКЛ.

Исследованию этого явления посвящена работа (Märzcz, 1997), в которой автор в течение 1962-1994 гг. регистрировал поведение АЭП в моменты Форбуш понижений ГКЛ. Наблюдения велись на венгерской обсерватории Nagycenk. Оказалось, что в моменты сильных Форбуш понижений, электрическое поле уменьшалось на $\sim 5 - 10 \%$, а затем восстанавливалось до прежнего уровня в течение 5 – 10 дней. Полученные автором результаты отличались от всех предшествующих, но, как можно понять из статьи (Märzcz, 1997), исследования проведены очень тщательно и вполне заслуживают доверия. Автор приходит к выводу, что в рамках существующих представлений о глобальном атмосферном электрическом контуре (ГАЭК), объяснить поведение E не удастся: «маловероятно, что изменения проводимости и потока солнечных частиц одни могут объяснить глобальные изменения электрического поля». Кроме этого, автор приходит к важному для нашей модели выводу: «электрическое поле может одновременно находиться под влиянием других факторов, которые более эффективны в другом месте в атмосфере, и действуют посредством изменения параметров ГАЭК. Таким образом, реакция АЭП к солнечно-земным событиям не всегда однозначна».

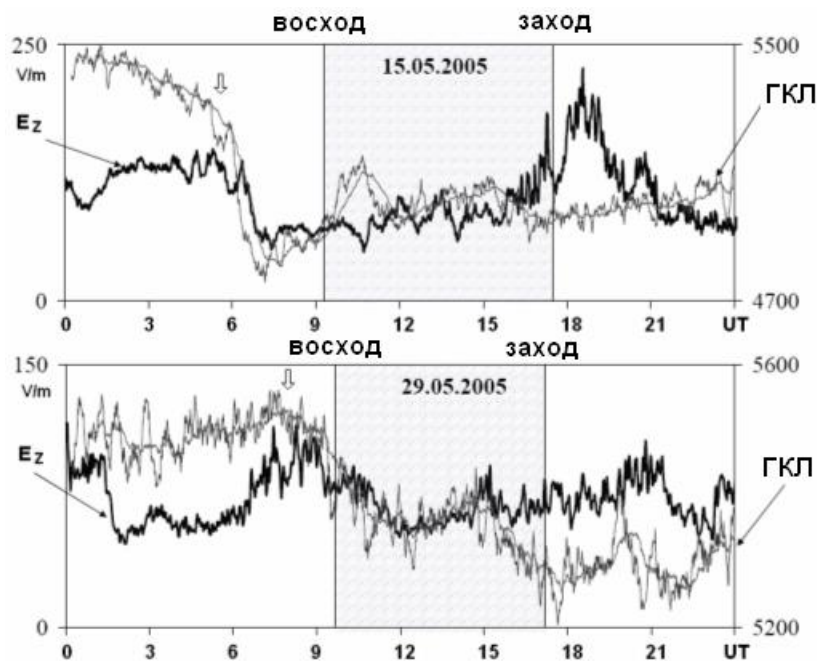


Рис.9-28. Изменение атмосферного электрического поля E в момент Форбуш понижения и восстановления величины E в последующие дни (Чернева, Кузнецов, 2005).

Форбуш-эффект исследовался на Камчатке (Чернева, Кузнецов, 2005). Результаты приведены на рис. 9-28. Принципиальное отличие от результата (Märzcz, 1997) состоит в том, что АЭП сначала, уменьшалось примерно в 10 раз больше, чем ГКЛ: на 70%, по сравнению с уменьшением ГКЛ на 7%. Затем АЭП возрастало быстрее, чем восстанавливался сигнал ГКЛ. Возможно, в атмосфере происходят одновременно два

процесса: один из них, это возникновение электрического поля за счет разделения заряда падающими каплями, а другой, состоит в том, что присутствующие в атмосфере легкие ионы, не захваченные каплями, являются носителями атмосферного электрического тока j за счет собственной подвижности u : $j = n^+ eu$. В первом процессе тоже «течет ток», обозначим его j_i . Этот «ток» представляет собой перемещение отрицательных зарядов к Земле и положительных – к ионосфере. Будем считать его внутренним током источника. Заметим, что наша модель в высокой степени согласована: внутреннее сопротивление источника равно сопротивлению внешней цепи атмосферного тока. Это условие соответствует, как мы отмечали выше: $I = I_i$ (I - ток утечки, I_i – внутренний ток источника), однако, это совсем не означает, что $j = j_i$, т.е. должно соблюдаться равенство плотностей тока.

В такой ситуации, естественно, возникает вопрос, известно ли что-нибудь о внутреннем токе источника, т.е., иначе, имеются ли данные о наличии «другого тока» в атмосфере, кроме $j = n^+ eu$? Это принципиальный момент нашей модели. Оговоримся, что современные методы регистрации АЭП и проводимости σ обнаружить I_i не смогут, т.к. тяжелых ионов и заряженных аэрозолей не регистрируют. Принято считать, что ток утечки I , - это дрейф легких ионов в поле E . Модель АЭП окажется правдоподобной в том случае, если удастся выявить ток источника, привлекая любые, в том числе не прямые методы обнаружения.

Один из таких методов, - это прямая регистрация падающих заряженных аэрозолей на поверхность Земли из верхних слоев атмосферы, второй, - обнаружение тока источника по производимому им магнитному полю.

Эксперименты и наблюдения, подтверждающие нашу модель АЭП. Изменения величины и полярности АЭП могут быть вызваны рядом причин. В первую очередь. К ним относится воздействие на поле гроз, грозовых туч, циклонов и т.п. Известны случаи изменения величины АЭП в моменты сильных землетрясений. Так, например, в Италии было зафиксирован факт изменения поля в момент сильнейшего землетрясения на Суматре 24.12.04. Электрическое поле начало возрастать практически в момент начала землетрясения (возможно, чуть раньше), значительно раньше, чем пришел сейсмический сигнал в обсерваторию, где проводились измерения поля. Аналогичные результаты были получены в Новосибирске при проведении наблюдений АЭП во время работы сейсмовибраторов и при изучении афтершоков Чуйского землетрясения 27.09.03 на Алтае. И в том, и в другом случаях АЭП реагировало на процесс, происходящий с непосредственной близости от объекта возмущения. Либо в непосредственной близости от сейсмовибратора, либо в гипоцентре землетрясения.

Сошлемся на два наблюдения АЭП, имевших место на Камчатке. Первый – наблюдение за приближающимися к Камчатке циклонами. Исследованы эффекты влияния циклонов Камчатки на величину вертикальной компоненты атмосферного электрического поля (АЭП) E_z . Циклоны регистрировались по электромагнитному излучению грозовых разрядов с помощью ОНЧ пеленгатора, разработанного в ИКИР (Кузнецов и др., 2007-а). Максимальное расстояние до грозовых очагов, регистрируемое пеленгатором, - достигает четырех тысяч километров. Приведены азимутальные распределения источников ОНЧ излучения и распределения эпицентров циклонов, определяемых на основе синоптических карт гидрометеослужбы Камчатки. Показаны азимутальные перемещения грозовых источников, находящихся в прилегающих к Камчатке областях. Мониторинг E_z проводился на Камчатской обсерватории Паратунка с применением прибора «Поле-2». Величина E_z понижается синхронно с атмосферным давлением по мере приближения циклонов к обсерватории. Приводятся оценки величины электрического заряда циклона, максимального понижения атмосферного давления в центре циклона и др. Показано, что АЭП реагирует на перемещение циклона на расстоянии большем 1.5 тыс. км.

Второй эпизод включает результаты экспериментов по исследованию влияния на атмосферное электрическое поле искусственного пароводяного облака. Эксперименты проводились на Камчатском месторождении теплоэнергетических вод в районе Мутновской электростанции. Измерялась напряженность АЭП тремя датчиками, электропроводность воздуха, потенциал скважины и метеопараметры, одновременно в непосредственной близости от геотермальных скважин, открываемых и закрываемых на время наблюдений. Обнаружено различное поведение напряженности электрического поля в зависимости от «сухости» скважины в течение существования облака: чем выше его влажность, тем ниже АЭП и, наоборот, по мере того, как водяной пар становился суше – величина АЭП возрастала и превышала начальное значение в несколько раз (Кузнецов и др., 2007-б).

Существуют ли «токи Шмидта-Бауэра»? Мы отмечали, что ни заряженные отрицательные аэрозоли, ни «тяжелые» ионы, - не регистрируются аппаратурой, предназначенной для измерения АЭП и проводимости атмосферы. Постулированный нами внутренний «ток» источника АЭП представляет собой сумму падающих на Землю отрицательно заряженных тяжелых ионов и капель, и подъем положительно заряженных мелких частиц восходящими потоками в верхние слои атмосферы, вплоть до ионосферы. Движение заряженных частиц положительных в одном направлении, а отрицательных - в другом, это, собственно, и есть ток - внутренний ток источника. Очевидно, что этот ток не может быть обнаружен стандартной аппаратурой.

Естественно, возникает вопрос, если это ток источника, то где же он должен «протекать»? В каком регионе Земли? Как отмечалось, ГКЛ в основном попадают на Землю в полярных регионах. Там должна быть максимальная концентрация зарядов. По-видимому, там должны быть и токи источника, причем направление тока должно быть противоположным току утечки: снизу-вверх. Известно ли что-нибудь о таких токах? Вполне возможно, что «ток», требующийся согласно модели, есть ни что иное, как тот самый, уже давно забытый ток Шмидта-Бауэра, который вызывал огромный интерес у физиков более 100 лет тому назад (Швейдлер, 1936). Так как наблюдения велись с помощью аппаратуры, предназначенной для измерения атмосферного тока j , токи Шмидта-Бауэра никогда не были обнаружены экспериментально. Наличие на Земле таких вертикальных токов в атмосфере, решало бы ещё одну важную проблему физики Земли - проблему потенциальности источника генерации геомагнитного поля, с одной стороны, и, с другой, служило бы поддержкой нашей модели АЭП.

В чем же состоит природа токов Шмидта-Бауэра? Напомним, что А. Шмидт, анализируя результаты наблюдений геомагнитных данных 1885 г., обнаружил, что, если интегрировать величины Н-компонент геомагнитного поля по замкнутой кривой на поверхности Земли, то интеграл оказывается не равным нулю. Это может означать только то, что внутри этого контура имеется вертикальный ток, плотность которого (по оценкам Шмидта) в 10 000 раз больше плотности тока j . Вычисления Шмидта по материалам, полученным на сети станций, местами недостаточно густой, признали не вполне надёжными. Однако, Л.А. Бауэр, опираясь на значительно более плотную сеть магнитных станций и на более точные наблюдения, повторил расчеты Шмидта для данных 1897, 1904, 1908, 1920 гг. Практически во всех случаях он находил подтверждение результата Шмидта. Проведенные им оценки погрешностей измерения поля и его интерполяции показали, что даже при отклонении ошибок в одном направлении во всех пунктах измерения и при примитивном линейном методе интерполяции, не получается и половины среднего значения циркуляции поля, что, в частности, послужило основанием для Швейдлера (1936) высказаться в пользу реальности данного явления.

В результате расчетов, проведенных Шмидтом и Бауэром, было обнаружено, что в полярных регионах "ток" действительно направлен вверх (как и следует из нашей модели), в то время как «ток» экваториального пояса в целом имеет противоположную

направленность. Согласно модели, этот «ток» обязан интенсивному испарению в районе экватора с выносом восходящих потоков большого количества отрицательно заряженных водных аэрозолей. Расчеты показали, что плотность обнаруженного таким методом "тока" на 4 порядка превышает плотность атмосферных токов проводимости.

Некоторые, дополнительные результаты экспериментов. Приведем некоторые результаты исследований, в значительной мере связанных с наблюдением на спутниках за высыпанием заряженных частиц (их плотности потока и энергии) в районах глобальных магнитных аномалий (ГМА). Первые спутниковые наблюдения показали, что в пяти районах Земли наблюдаются их значительные отличия по сравнению с другими областями земной магнитосферы (Вернов, 1961). Интенсивность выпадения и энергетический спектр частиц резко менялся в Восточной Сибири (1), на Севере Америки (2), Юге Тихого Океана (3), Юге Индийского Океана (4) и Центральной части Атлантики (5). Как выяснили авторы этой работы, 4-я зона является не самостоятельным образованием магнитосферы, а сопряжена по магнитному полю с 1-ой. Таким образом, авторы фактически выделили четыре самостоятельные зоны, в которых наблюдаются особенности поведения высыпающихся в магнитосферу высокоэнергичных частиц. Выделенные зоны пространственно совпадают с рассматриваемыми нами четырьмя ГМА. Эти данные подтверждаются работой (Марков, Мустель, 1983), в которой показано, что высыпание заряженных частиц высоких энергий из земной магнитосферы в нижнюю ионосферу, происходит преимущественно в областях магнитных аномалий. Это явление – проникновение высокоэнергетических частиц солнечного ветра в области магнитных аномалий, было признано в России открытием.

Результаты экспериментов, проведенных на американских спутниках DE-1 и DE-2 по изучению явления « Θ -авроры» (Frank et al., 1982; Frank et al., 1986), можно интерпретировать не совсем так, как это делают авторы. В нашей модели овал полярных сияний представим как кольцо с перемычкой, - в виде буквы Θ . Тщательный анализ мест присоединения перемычки с кольцом (Кузнецов и др., 1989) показал, что эти места не случайны, а полярная дуга и ее «перемычка» совмещаются друг с другом практически всегда в районах Канадской и Сибирской магнитных аномалий. Это явление, проявляющееся уже значительно ниже, на ионосферных высотах, в области полярных сияний, так же служит подтверждением правомерности рассматриваемого подхода к ГМА.

Особенности поведения ионосферы в области Бразильской магнитной аномалии (БМА) рассмотрено в работе (Kane, 1982), где показано, что концентрация ионов в ионосфере этого региона значительно выше, чем в окружающем БМА пространстве ионосферы.

Аппаратура, установленная на японском спутнике EXOS-A позволяла регистрировать частицы, обладающие температурой порядка 1000 К. Авторы (Oyama, Schlegel, 1984) сообщают о том, что ими в районе Бразильской аномалии, в верхней части F-слоя ионосферы, была зарегистрирована значительно более высокая концентрация и энергия частиц, чем в окрестности аномалии. В эксперименте регистрировалась эмиссия электромагнитного излучения в диапазонах 45 кГц, 2 МГц и 3 МГц.

Эффекты проникновения частиц высокой энергии в атмосферу Земли в районе Бразильской магнитной аномалии исследованы в (Pinto, Gonzalez, 1989; Pinto et al., 1992). Наблюдения проводились с помощью космического Hubble – телескопа на орбите 600 км при регистрации потока протонов с энергией большей 10 МэВ. Область пространства, где наблюдалась наибольшая плотность протонов на высоте 600 км, совпадала с местоположением БМА. Измеренная «фоновая» плотность потока протонов, меньшая в 30

раз, чем максимальная, охватывала область пространства вплоть до юга Африки (с востока) и экватора (с севера).

Итак, результаты этих наблюдений демонстрируют очевидную зависимость прохождения заряженных частиц сквозь магнитосферу от её конфигурации. По-видимому, есть основания считать, что асимметрия магнитного поля относительно оси вращения Земли может служить причиной того, что Земля “получает” суммарный электрический заряд от Солнца неравномерно в течение своего оборота вокруг оси. Это явление приводит к появлению унитарной вариации в атмосфере и ионосфере.

В ионосфере известно необычное поведение слоя F_2 на высоких широтах, в частности, образование широтной зоны пониженной ионизации («провала»), идущей параллельно зоне полярных сияний, где наблюдается более высокая степень ионизации. Это говорит о том, что помимо солнечного излучения изменения электронной концентрации, а, следовательно, и критической частоты f_o в F_2 -слое определяются рядом геофизических факторов. Одним из таких факторов может быть и наличие ГМА, являющихся причиной, по нашей модели, возникновения УТ-вариации E_z . В общепринятой интерпретации, это явление адекватно факту несовпадения полюсов: географического и магнитного. Известно (гл. VI) распределение магнитных силовых линий в районе северного полюса. Можно видеть, что в области изучения вариаций ионосферы на широте $\sim 50^\circ N$ плотность магнитных силовых линий возрастает в районах ГМА, что в принятой нами шкале соответствует ~ 7 и 19 УТ. Как известно, ионосферная плазма в приполярных районах дрейфует вдоль магнитных силовых линий, и чем гуще силовые линии, тем выше плотность плазмы.

Выводы, следующие из материала Главы IX.

Процессы, происходящие в пространстве между Солнцем и поверхностью Земли, значительно доступнее для изучения, чем те, которые находятся на громадных глубинах. Однако и здесь видна масса нерешенных проблем. Заметим, что некоторые моменты взаимосвязи геооболочек очевидны, как правило, в них громадная роль отводится Солнцу. Действительно, Земля находится в гелиосфере и мы далеко не всегда учитываем этот тривиальный момент. Проблема климата беспокоит жителей Земли много веков, но до сих пор нет глубокого понимания причин его изменения.

Проблема климатических изменений, происходящих в течение последних 400 тысяч лет привлекает огромное внимание исследователей. Впервые в их руки попали достоверные материалы. Возможно, идея об определяющей роли экскурсов и инверсий, связанных с ними понижений уровня магнитного поля Земли и, как следствие, повышение температуры поверхности Земли и повышение уровня радиации в некоторых регионах, окажется продуктивной и поможет, при её дальнейшем развитии, решить ряд важных для человечества проблем эволюции климата и эволюции жизни.

Проблема атмосферного электричества, несмотря на 200-летний интерес к ней, по-видимому, ещё далека от решения. Возможно, развиваемый здесь подход к проблеме физики атмосферного электрического поля, как к разделению зарядов в атмосфере хорошей погоды, когда особое значение приобретают процессы «конкуренции» конденсации и испарения, может оказаться продуктивным. Будущие исследования могут показать, что роль атмосферного электричества в формировании погоды и климата будет заметно выше, чем принято считать в настоящее время.

Заключая, следует отметить, что, как и физика твердой Земли, физика взаимосвязи геооболочек и солнечно-земных связей, остается ещё очень далёкой до её ясного

понимания. Эта область науки настоятельно требует новых идей и подключения молодых энтузиастов-исследователей.

Литература

- Адушкин В.В., Кудрявцев В.П., Турунтаев С.Б. Глобальный поток метана в межгеосферном газообмене. ДАН. 2003. Т. 391. № 6. С. 813-816.
- Апсен А.Г., Канониди Х.Д., Чернышева С.П. и др. Магнитосферные эффекты в атмосферном электричестве. М.: Наука. 1988. 150 с.
- Артюхин А.С. Численный расчет критического пересыщения паров воды. 2001. http://www.fizteh.ru/nich/conf_mipt/conf2001/falt/section8/artuhin.html
- 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. 2000. Т. 372. С. 204-207.
- Асатуров М.Л., Будыко М.И., Винников К.Я. и др. Вулканы, стратосферный аэрозоль и климат Земли. Л.: Гидрометеиздат. 1986.
- Атмосфера. Справочник. Л.: Гидрометеиздат. 1991.
- Беспалов П.А., Чугунов Ю.В. Вращение плазмосферы и природа атмосферного электричества. ДАН. 1994. Т. 337. № 4. С. 467-469.
- Боярчук К.А., Карелин А.В., Ломоносов А.М. Особенности ионизации атмосферного воздуха при радиоактивном загрязнении. Ж. тех. физ. 2000. Т. 70. №. 1. С. 139-142.
- Вернов С.Н., Савенко И.А., Шеврин И.И. и др. Внешний радиационный пояс Земли на высоте 320 км. ДАН СССР. 1961. Т. 140. N.4. С. 787-790.
- Герасименко В.И. Электрические и метеорологические поля нижней тропосферы. В кн. Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеиздат. 1976. С. 25-31.
- Гирс С.П., Шварц Я.М. Вопросы начальной стадии электризации капель. В кн. Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеиздат. 1976. С 127-129.
- Головкин В.А. Современный энергетический дисбаланс Земли: доказательства существования и возможные последствия // Конференция ИКИ. Москва. 2006.
- Гончаренко А.Н., Копвиллем У.Х., Никитин А.Ю. Особенности изменения вертикальной компоненты электрического поля атмосферы над океаном. Изв. АН. Физика атм. и океана. 1992. Т. 28. № 12. С. 1216-1218.
- Гончаренко Ю.В., Кивва Ф.В. О размерах частиц атмосферного аэрозоля в отражающих слоях, появляющихся после сильных солнечных вспышек. Радиотехника и электроника. 2002. Т. 7. № 3. С. 509-512.
- Ермаков В.И., Стожков Ю.И. Физика грозových облаков. М.: Препринт ФИАН. № 2. 2004. <http://ellphi.lebedev.ru/6/pdf2.pdf>
- Дмитриев А.Н., Кочева Н.А., Шитов А.В. Анализ грозовой активности Горного Алтая за 1958-1999 годы. Новосибирск – Горно-Алтайск. ИМ СОРАН-ГАГУ. 2002. 40 с.
- Ивлев Л.С., Довгалюк Ю.А. Физика атмосферных аэрозольных систем. СПб: НИИХ СПбГУ. 1999. 194 с.
- Изаков М.Н. Самоорганизация и информация на планетах и в экосистемах. УФН. 1997. Т. 167. № 10. С.1087-1094.
- Казимировский Э.С., Матафонов Г.К. Континентальные и орографические “структуры” в глобальном распределении общего содержания озона. ДАН. 1998. Т. 361. С. 544-546.
- Кашкин В.Б., Ромасько В.Ю., Сальникова О.Е., Сухинин А.И. Озоновый слой в Сибири по данным спутника NOAA в ИК-диапазоне летом 1995 г. Исследование Земли из Космоса. 1997. №5. С. 23-26.
- Кузнецов В.В., Плоткин В.В., Нестерова И.И., Поздеева М.С. Унитарная вариация ионосферных параметров. Препринт ИГиГ. Новосибирск. 1988. 30 с.
- Кузнецов В.В., Семаков Н.Н., Доровский В.Н., Котляр П.Е. Физика Земли. Новый взгляд на некоторые проблемы. Новосибирск: Наука. 1989. 128 с.

- Кузнецов В.В., Павлов А.А., Павлов А.Ф. Результаты наблюдений атмосферного электрического поля на равнинной среднеширотной обсерватории “Ключи” (Новосибирск). Препринт № 14. Новосибирск: ОИГГиМ. 1991. 13 с.
- Кузнецов В.В. Физика земных катастрофических явлений. Новосибирск: Наука. 1992. 92 с.
- Кузнецов В.В., Плоткин В.В., Нестерова Г.В., Нестерова И.И. Унитарная вариация foF2 и солнечная активность. Геомагнетизм и Аэрономия. 1998. Т. 38. № 2. С. 107-111.
- Кузнецов В.В., Чернева Н.В., Дружин Г.И. О влиянии циклонов на атмосферное электрическое поле Камчатки // ДАН. 2007-а. Т. 412. № 4.
- Кузнецов В.В., Чернева Н.В., Бабаханов И.Ю. Исследование влияния искусственного облака на атмосферное электрическое поле // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2007-б. Т. 43. № 2. С. 1-7.
- Маричев В.Н., Богданов В.В., Живетьев И.В., Шевцов Б.М. Влияние геомагнитных возмущений на образование аэрозольных слоев в стратосфере. Геомагнетизм и аэрономия. 2004. Т. 44. № 6. С. 841-848.
- Марков М.Н., Мустель Е.П. Пространственно-временные эффекты солнечно - земных связей в тропосфере и термосфере. Астрономический журнал. 1983 Т. 60. С. 417-421.
- Мёрнер Н.А., Петрова Г.И. и др. Появление экскурсов на фоне изменения магнитного момента Земли. Физика Земли 2001. № 10 С. 24-32.
- Монин А.С. Прогноз погоды, как проблема физики. М.: Наука. 1969. 184 с.
- Монин А.С., Шишков Ю.А. О пятилетней цикличности глобальной погоды. ДАН. 1998. Т. 358. С. 395-398.
- Монин А.С., Шишков Ю.А. Климат как проблема физики. УФН. 2000. Т. 170. С. 419-445.
- Незлин М.В., Снежкин Е.Н. Вихри Россби и спиральные структуры. М.: Наука. 1990.
- Никандров В.Я. Метеорологический аспект электризации конвективного облака. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 41 с.
- Парамонов Н.А. Об унитарной вариации градиента атмосферного электрического потенциала. Докл. АН СССР. 1950. Т. 70. N 1. С. 37.
- Петрова Г.И., Распопов О.М. Связь изменений магнитного момента Земли и палеоклимата за последние 12 тысяч лет. Геомагнетизм и Аэрономия. 1998. Т. 38. № 5. С. 141-150.
- Плоткин В.В., Нестерова И.И., Израйлева Н.И. Унитарная вариация foF2 как характеристика глобального состояния ионосферы. Геомагнетизм и Аэрономия. 1992. Т. 32. N 5. С. 195-199.
- Прокопенко А.А., Карабанов Е. Б., Кузьмин М.И. и др. Кратковременные климатические события 130-70 тыс. лет назад в осадочной записи озера Байкал. Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 7. С. 623-637.
- Пудовкин М.И., Распопов О.М. Механизм воздействия солнечной активности на состояние нижней атмосферы и метеопараметры. Геомагнетизм и Аэрономия. 1992. Т. 32. № 5. С. 1-22.
- Распопов О.М., Дергачев В.А., Шумилов О.И., и др. Воздействие вариаций потока космических лучей, вызванных изменениями геомагнитного дипольного момента, на изменение климата. Геомагнетизм и Аэрономия. 2000. Т. 40. № 1. С. 97-108.
- Рис Ф., Вальдфогель А. Анализ фрактальной размерности облаков с мощными конвективными токами. В кн. Фракталы в физике М.: Мир. 1988. С. 644-649.
- Рише Л.Е. Концептуальная схема электрической машины Земли. ДАН. 1997. Т. 356. № 4. С. 538-540.
- Рокитянский И.И. Индукционные зондирования Земли. Киев: Наукова думка. 1981. 296 с.
- Селиверстов Н.И. Гидросферные процессы и четвертичный вулканизм // Вестник КРАУНЦ, 2004. № 3. С. 5-17.
- Тверской П.Н. Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеиздат. 1949. 252 с.
- Урицкий В.М., Пудовкин М.И. Фрактальная динамика АЕ-индекса геомагнитной активности как возможное проявление самоорганизованной критичности в магнитосфере. Геомагнетизм и Аэрономия. 1998. Т. 38. № 3. С. 17-28.

- Федер Г. Фракталы М.: Мир. 1991. 260 с.
- Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Т.5. Электричество и магнетизм. М.: Мир. 1966. 296 с.
- Франк-Каменецкий А.В., Трошичев О.А., Морозов В.Н., Барнс Г., Корней Р. Связь приземного электрического поля в высоких широтах с интенсивными молниевыми разрядами облако-Земля, дающими всплески ОНЧ-излучения. Геомagnetизм и Аэрoномия. 2006. Т. 46. № 3. С. 402-408.
- Френкель Я.И. Теория явлений атмосферного электричества. Л-М.: Гостехиздат. 1949.
- Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкости. Л.: Наука. 1975. 592 с.
- Хомутов С.Ю. Взаимосвязь нерегулярных вариаций скорости вращения Земли и глобальных геофизических параметров. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.ф.-м.н. Новосибирск: 1997. 17 с.
- Чернева Н.В., Кузнецов В.В. Форбуш-понижения и эффекты терминатора в атмосферном электричестве Камчатки//Астрофизика и физика околоземного космического пространства: Тр. 8-ой конференции молодых ученых. Иркутск. 2005. Стр. 37-40.
- Швейдлер Э. Сохранение электрического заряда Земли. М, Л.: ОТЛ. 1936. 75 с.
- Aldahan A., Possnert G. Geomagnetic and climatic variability reflected by ¹⁰Be during the Quaternary and late Pliocene. *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. doi: 10.1029/2002GL016077.
- Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-organized criticality: An explanation of 1/f noise. *Phys. Rev. Lett.* 1987. V. 59. P. 381-384.
- Bard E. Climatic shock: abrupt changes over millennial time scales. *Phys. Today.* XII. 2002.
- Barracough D.R., De Santis A. Chaos in the present geomagnetic field. Abstracts 8-th scientific Assembly of IAGA Symposia. Uppsala. 1997. P. 13.
- Bassinot F.C., Labeyrie L.D., et al. The astronomical theory of climate and the age of the Brunhes-Matuyama magnetic reversal. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1994. V. 93. P. 11667-11680.
- Blunier T., Chappellaz J., Schwander, et al., Asynchrony of Antarctic and Greenland climate change during the last glacial period. *Nature.* 1998. V. 394. P. 739-743.
- Bohnel H., Molina-Garza R. Secular variation in Mexico during the last 40,000 years, *Phys. Earth Planet. Inter.* 2002. V. 133. P. 99-109.
- Boteler D.H. The relation between magnetic range values and spectral power. *Geophys. J. Int.* 1998. V. 134. P. 613-616.
- Brook E.J., Sowers T., Orchado J. Rapid variations in atmospheric methane concentration during the past 110,000 years. *Science.* 1996. V. 273. P. 1087-1091.
- Brunet M, Guy F., Pealbeam D., et al. A new hominid from upper Miocene of Chad, Central Africa. *Nature.* 2002. V. 418 P.145-151.
- Cann R.L., Stoneking M., Wilson A.C. Mitochondrial DNA and human evolution. *Nature.* 1987. V. 325. P. 31-36.
- Cavalli-Sforza L.L., Feldman M.W. The application of molecular genetic approaches to the study of human evolution. *Nature Genetics.* 2003. V. 33. P. 266-275.
- 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.* 1979. V. 44. P. 150-152.
- Chen J., Carlson B.E., Del Genio A.D. Evidence for strengthening of the tropical general circulation in the 1990s. *Science.* 2002. V. 295. P. 838-841.
- Chou H.H., Hayakawa T., Diaz S., et al. Inactivation of CMP-N-acetylneuraminic acid hydroxylase occurred prior to brain expansion during human evolution. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2002. V. 99(18). P. 11736-11741.
- Clement B.M. Dependence of the duration of geomagnetic polarity reversals on site latitude. *Nature.* 2004. V. 428. P. 637-640.
- Corney R.C., Burns G.B., Michael K., et al., The influence of polar-cap convection on the geoelectric field at Vostok, Antarctica. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2003. V. 65. P. 345-354.

- 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.* 1990. V. 64. P. 314-341.
- Cuffey K.M., Vimeux F. Covariation of carbon dioxide and temperature from the Vostok ice core after deuterium-excess correction. *Nature.* 2001. V. 412. P. 523-527.
- 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.* 2000. V. 27. P. 1005-1008.
- Doake C.S.M. A possible effect of ice ages on the Earth's magnetic field. *Nature.* 1977. V. 267. P. 415-417.
- Doake C.S.M. Climatic change and geomagnetic field reversals: a statistical correlation. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1978. V. 38. P. 313-318.
- Ermakov V.I., Bazilevskaya G.A., Pokrevsky P.E., Stozhkov Y.I. Ion balance equation in the atmosphere. *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. D19. P. 23413-24420.
- Fairbridge R.W. Global climate change during the 13,500-b.p. Gothenburg geomagnetic excursion. *Nature.* 1977. V. 265 P. 430.
- Frank L.A., Craven J.D., Burch J.L. and Winningham J.D., Polar views of the Earth's aurora with Dynamics Explorer. *Geoph. Res. Lett.* 1982. V. 9. N. 9. P. 1001-1004.
- Frank L.A., Craven J. D., Gurnett D. A. et al. The Theta Aurora. *J. Geophys. Res.* 1986. V. 91. P. 3177-3224.
- 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.* 1997. V. 149. P. 121-129.
- Gagneux P., Wills C, Gerloff U., et al. Mitochondrial sequences show diverse evolutionary histories of African hominoids. *Proc. Natl. Acad. Sci. U S A.* 1999. V. 96(9). P. 5077-5082.
- Glassmeier K.-H., Neuhaus A., Vogt J. Space Climatology. Invited presentation. Alpach Summer School. 2002.
- Glazko G.V., Nei M. Estimation of Divergence Times for Major Lineages of Primate Species. *Mol. Biol. Evol.* 2003. V. 20(3). P. 424-434.
- Gosse J.C., Phillios F.M. Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application. *Quanter. Sci. Rev.* 2001. V. 20. P. 1475-1560.
- Guyodo Y., Valet J.-P. Relative variations in geomagnetic intensity from sedimentary records: the past 200,000 years. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1996. V. 143. P. 23-36.
- Hampton D.L., Heavner M.J., Wescott E.M., Sentman D.D. Optical spectral characteristics of sprites. *Geoph. Res. Lett.* 1996. V. 23. P. 89-92.
- 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.* 1998. P. 303-318.
- Harrison C.G. Evolutionary processes and reversals of the Earth's magnetic field. *Nature.* 1968. V. 217. P. 46-47.
- Harrison C.G.A., Prospero J.M. Reversals of the Earth's magnetic field and climatic changes. *Nature.* 1974. V. 250 P. 563-565.
- Harrison R.G. Atmospheric electricity and cloud microphysics. CERN. Geneva. 2001.
- Harrison R.G. Twentieth century secular decrease in the atmospheric potential gradient // *Geoph. Res. Lett.*, V. 29, NO. 14, 1660, doi:10.1029/2002GL014878, 2002.
- Hartl P., Tauxe L. A precursor to the Matuyama/Brunhes transition-field instability as recorded in pelagic sediments. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1996. V. 138. P. 121-135.
- Hawks J., Hunley K., Lee S-H., Wolpoff M. Population Bottlenecks and Pleistocene Human Evolution. *Molecular Biology and Evolution.* 2000. V. 17. P. 2-22.
- Hays P.B., Roble R.G. A Quasi-Static Model of Global Atmospheric Electricity. 1. The Lower Atmosphere. *J. Geophys. Res.* 1979. V. 84. N. A7. P. 3291-3305.
- Hecht A.D. Geomagnetism and climate (and replies Fairbridge). *Nature.* 1977. V. 268. P. 669.

- Heider F., Hufenbecher F., Draeger U., Hayashida A. The Brunhes-Matuyama and upper Jaramillo transitions recorded in sediments from the California margin. *Proceedings of the Ocean Drilling Program Scientific Results*. Ed. Lyle M. et al. 2000. V. 167. P. 311-318.
- Heitzler J.R. The future of the South Atlantic anomaly and implications for radiation damage in space. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2002. V. 64. P. 1701-1708.
- Horai S., Hayasaka K., Kondo R., et al. Recent African Origin of modern humans revealed by complete sequences of hominoid mitochondrial DNAs. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 1995. V. 92. P. 532-536.
- 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.* 1996. V. 101. P. 11655-11663.
- Huelsenbeck J.P., Imennov N.S. Geographic origin of human mitochondrial DNA: accommodating phylogenetic uncertainty and model comparison. *Syst. Biol.* 2002. V. 51(1). P. 155-165.
- Inan U.S., Bell T.F., Pasko V.P., Sentman D.D., Wescott E.M., Lyons W.A. VLF signatures of ionospheric disturbances associated with sprites. *Geoph. Res. Lett.* 1995. V. 22. P. 3461-3464.
- Inan U.S., Slingeland A., Pasko V.P., Rodrigues J.V. VLF and LF signatures of mesospheric/lower ionospheric response to lightning discharges. *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. P. 5219-5238.
- Jacobs J.A. *Reversals of the Earth's magnetic field*. Cambridge Univ. Press. 1994.
- Imbrie J., Imbrie J.Z. Modeling the climatic response to orbital variations. *Science*. 1980. V. 207. P. 943-953.
- Jorde L.B., Bamshad M., Rogers A.R. Using mitochondrial and nuclear DNA markers to reconstruct human evolution. *Bio Essays*. 1998. V. 20(2). P. 126-136.
- Juozel J., Barkov N.I., Barnola J.M., et al. Vostok Ice Core Methane Data for 420,000 Years // *Nature*. 1993. V. 364. P.407- 412.
- Jouzel J., Masson V., Cattani O., et al., A new 27 ky high resolution East Antarctic climate record. *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28. P. 3199-3202.
- Kalnay E., Cai M. Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature*. 2003. V. 423. P. 528-531.
- Kane, R.P. Particle precipitation in the ionospheric F-2 region at location in vicinity of the south atlantic magnetic anomaly. *Ann. Geophys.* 1982. V.38. N. 6. P. 841-848.
- Kent D.V., Carlut J. A negative test of orbital control of geomagnetic reversal and excursions. *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28. P. 3561-3564.
- Kent D.V., Hemming S.R., Turrin B.D. Laschamp excursion at Mono Lake? *Earth Planet. Sci. Lett.* 2002. V. 197. P. 151-164.
- Kostitzin V.A. *Evolution de l'atmosphere. Circulation organique epoques glaciaires*. Paris.: Hermann. 1935.
- Kuznetsov V.V., Plotkin V.V., Nesterova I.I., Pozdeeva M.S. Universal diurnal variation of F2-layer critical frequency. *J. Geomagn. Geoelectr.* 1990. V. 42. N 10. P. 1237.
- Kuznetsov V.V., Plotkin V.V., Nesterova I.I., Izraileva N.I. Universal Diurnal Variation of F₂-Layer Critical Frequency as Characteristic of Global Ionosphere Condition. *J. Geomagn. Geoelectr.* 1993-a. V. 45. P. 1175-1179.
- Kuznetsov V.V., Plotkin V.V., Nesterova I.I., Izraileva N.I. Universal variations of ionospheric parameters and the geomagnetic field: theoretical view and evaluations. *J. Atm. Terr. Physics*. 1993-b. V. 55. N. 11/12. P. 1575-1582.
- Kuznetsov V.V., Plotkin V.V., Izraileva N.I. and Nesterova I.I., The investigation of electromagnetic interactions between regions surrounding the Earth - 1. Initial equations, the boundary conditions, the distribution of external currents and the methods of numerical solution. *J. Atm. Terr. Physics*. 1995-a. V. 57 N. 13. P. 1639-1646.
- Kuznetsov V.V., Plotkin V.V., Izraileva N.I. and Nesterova I.I., The investigation of electromagnetic interactions between regions surrounding the Earth - 2. Results of the numerical simulation *J. Atm. Terr. Physics*. 1995-b. V. 57 N. 13. P. 1647-1660.

- Kuznetsov V.V., Plotkin V.V., Nesterova I.I and Nesterova G.V., Universal variation of F₂-layer critical frequency and solar activity. *Earth Planets Space*. 1998. V. 50. P. 57-61.
- Kuznetsov V.V. A model of virtual geomagnetic pole motion during reversals. *Phys. Earth Planet. Int.* 1999. V. 115. P. 173-179.
- Liddicoat J.C., Coe R.S. Mono Lake geomagnetic excursion, *J. Geophys. Res.* 1979. V. 64. P. 261-280.
- Lovejoy S. Area-perimeter relation for rain and cloud areas. *Science*. 1982. V. 216. P. 185-187.
- Mende S.B., Rairden R.L., Swenson G.R. Sprite spectra; N₂ 1 PG band identification. *Geophys. Res. Lett.* 1995. V. 22. P. 2633-2636.
- März F. Short-term changes in atmospheric electricity associated with Forbush decreases. *J. Atm. Terr. Physics*. 1997. V. 59. N. 9. P. 975-982.
- März F., Harrison R.G. Long-term changes in atmospheric electrical parameters observed at Nagycenk (Hungary) and the UK observatories at Eskdalemuir and Kew // *Ann. Geophys.* 2003. V. 21. P. 2193-2200.
- Marsh N., Svensmark H. Solar influence on Earth's climate. *Space Sci. Rev.* 2003. V. 107. P. 317-325.
- Nickolaenko A.P., Hayakawa M. Natural electromagnetic pulses in the ELF range. *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. P. 3103-3106.
- 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.* 2000. V. 142. P. 319-338.
- Oyama, K.I., Schlegel K. Anomalous electron temperatures above the South American Magnetic Field Anomaly. *Plan. Space Sci.* 1984. V. 32. N. 12. P. 1513-1522.
- Palle E., Goode P.R., Montanes-Rodriguez P., Koonin S.E. Can Earth's albedo and surface temperature increase together? // *Eos*, 2006. V. 87, N 4, P. 37, 43.
- Pasko V.T., Inan U.S., Bell T.F. Blue jets produced by quasi-electrostatic pre-discharge thundercloud fields. *Geophys. Res. Lett.* 1996. V. 23. P. 301-304.
- Pasko V.P., Inan U.S., Bell T.F., Reising S.C. Mechanism of ELF radiation from sprites. *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. P. 3493-3496.
- 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*. 1999. V. 399. P. 429-436.
- Petrova G.N., Pospelova G.A. Excursions of the magnetic field during the Brunhes chron, *Phys. Earth Planet. Inter.* 1990. V. 63. P. 135-143.
- Pinto, Ir. O., Gonzalez W.D. Energetic electron precipitation at the South Atlantic Magnetic Anomaly: a review. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1989. V.51. P. 351-365.
- Pinto, Ir., O., W. D. Gonzalez, I.R.C. Pinto, et al. The South Atlantic Magnetic Anomaly: three decades of research. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1992. V. 54. P. 1129-1134.
- Rairgen R.L., Mende S.B. Time resolved sprite imagery. *Geophys. Res. Lett.* 1995. V. 22. P. 3465-3468.
- Raisbeck G.M., Yiou F., Bourles D., Kent D.V. Evidence for an increase in cosmogenic ¹⁰Be during a geomagnetic reversal. *Nature*. 1985. V. 315. P. 315-317.
- Rahmstorf S. Timing of abrupt climate change: a precise clock. *Geophys. Res. Lett.* V. 30. doi: 10.1029/2003GL017115, 2003.
- Rampino M.R. Possible relationships between changes in global ice volume, geomagnetic excursions, and the eccentricity of the Earth's orbit. *Geology*. 1979. V. 7. N.12. P. 584-587.
- Rampino M.R., Stothers R.B.. Climatic effects of volcanic eruptions. *Nature*. 1985. V. 313. P. 272.
- Rampino M.R., Self S., Stothers R.B. Volcanic winters. // *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 1988. V. 16. P. 73-99.
- Rampino M.R., Ambrose S.H. Volcanic winter in the Garden of Eden: The Toba supereruption and the late Pleistocene human population crash. *Geological Society of America. Special paper* 345. 2000. P. 71-82.
- Rampino, M.R., 2002: Supereruptions as a threat to civilizations on Earth-like planets. *Icarus* , 156, 562-569, doi:10.1006/icar.2001.6808.

- Robinson C., Raisbeck G.M., Yiou F., et al. The relationship between ^{10}Be and geomagnetic field strength records in central North Atlantic sediments during the last 80 ka. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1995. V. 136. P. 551-557.
- Roble R.G., Hays P.B. A Quasi-Static Model of Global Atmospheric Electricity. 2. Electrical coupling between the upper and lower atmosphere. *J. Geophys. Res.* 1979. V. 84. P. 7247-7256.
- Roca A.L., Georgiadis N., Pecon-Slatery J., O'Brien S.J. Genetic evidence for two species of Elephant in Africa. *Science*. 2001. V. 293. P. 1473-1477.
- 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.* 2002. V. 29. P. 24-1-4.
- Rozzi F.V., Castro J.B. Surprisingly rapid growth in Neanderthals. *Nature*. 2004. V. 428. P. 936-939.
- Satta Y., Takahata N. Ancestral haplotype distribution in finite stepping-stone models. *Molecular ecology*. 2004. V. 13. P. 877-886.
- Serre D., Langaney A., Chech M., et al. No evidence of Neandertail mtDNA contribution to Early Modern Humans. *PLoS Biology*. 2004. V. 2(3).
[URL:http://www.plosbiology.org/archive/1545-7885/2/3/pdf/10.1371_journal.pbio.0020057-S.pdf](http://www.plosbiology.org/archive/1545-7885/2/3/pdf/10.1371_journal.pbio.0020057-S.pdf)
- Sentman D.D., Wescott E.M. Observations of upper atmospheric optical flashes recorded from an aircraft. *Geophys. Res. Lett.* 1993. V. 20. P. 2857-2860.
- Sentman D.D., Wescott E.M., Osborn D.L., Hampton D.L., Heavner M.J. Preliminary results from the Sprite-94 campaign: red sprite. *Geophys. Res. Lett.* 1995. V. 22. P. 1205-1208.
- Schulz H., von Rad U., Erinkeuser H. Correlation between Arabian Sea and Greenland climate oscillations of the past 110,000 years. *Nature*. 1998. V. 393. P. 54-57.
- Sloan, Jr E.D. 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
- Stedman H.H., Kozyak B.W. et al. Myosin gene mutation correlates with anatomical changes in the human lineage. *Nature*. 2004. V. 428. P. 415-418.
- Steig E. J., Brook E. J., White J. W. C., et al., Synchronous climate changes in Antarctica and the North Atlantic. *Science*. 1998. V. 275. P. 92-95.
- Sukhorukov A.I., Mishin E.V., Stubbe P. On blue jet dynamics. *Geophys. Res. Lett.* 1996. V. 23. P. 1625-1628.
- Takahata N., Satta Y., Klein J. Divergence time and population size in the Lineage leading to modern Humans. *Theoretical population biology*. 1995. V. 48(2). P. 198-221.
- Takahata N., Satta Y. Evolution of the primate lineage leading to modern humans: Phylogenetic and demographic inferences from DNA sequences *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 1997. V. 94(9). P. 4811-4815.
- Takahata N., Lee S., Satta Y. Testing Multiregionality of Modern Human Origins. *Molecular Biology and Evolution*. 2001. V. 18. P. 172-183.
- Thejll P., Christiansen Bo, Gleisner H. On correlations between the North Atlantic Oscillation, geopotential heights, and geomagnetic activity. *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. doi: 10.1029/2002GL016598.
- Tinsley B.A. Influence of solar wind on the global electric circuit, and inferred effects on cloud microphysics, temperature, and dynamics in the troposphere. *Space Sci. Rev.* 2000. V. 94. P. 231-258.
- Tric E., Laj C., Valet J.-P., et al. The Blake geomagnetic event: transition geometry, dynamical characteristics and geomagnetic significance, *Earth Planet. Sci. Lett.* 1991. V. 102. P. 1-13.
- Uffen R.J. Influence of the Earth's core on origin of life. *Nature*. 1963. V. 198. P. 143-144.
- Valet J.-P. Meynadler L. Geomagnetic field intensity and reversals during the past four million years. *Nature*. 1993. V. 366. P. 234-238.

- Vanhellemont F., Fussen D., Bingen C. Cosmic rays and stratospheric aerosols: Evidence for a connection? *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29. P. 10-1 – 10-4.
- Vimeux F., Masson V., Jouzel J. et al., Glacial-interglacial changes in ocean surface conditions in the Southern Hemisphere. *Nature.* 1999. V. 398. P. 410-413.
- 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.* 2002. V. 203. P. 829-843.
- Waddington C.J. Paleomagnetic field reversals and cosmic radiation. *Science.* 1967. V. 158. P. 913-915.
- Watanabe O., Jouzel J., Johnsen S., et al. Homogeneous climate variability across East Antarctica over the past three glacial cycles. *Nature.* 2003. V. 422. P. 509-512.
- Wollin G., Ericson D.B., Ryan W.B.F. Magnetism of the Earth and climatic changes, *Earth Planet. Sci. Lett.* 1971. V. 12. P. 175-183.
- 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.* 1978. V. 41. P. 395-397.
- Wood B. Palaeoanthropology: Hominid revelation from Chad. *Nature.* 2002. V. 418. P. 133-135.
- Worm H.-U. A link between geomagnetic reversals and events and glaciations. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1997. V. 147. P. 55-67.
- 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.* 2001. V. 53. P. 817-827.
- YANG Taibao, YU Yongtao, LI Jijun et al. Paleomagnetic excursions recorded in Yanci Playa in Middle Hexi Corridor, NW China since the last interglacial. *J. of Mountain Science.* 2004. V. 1. N. 2. P. 128-142.
- Yukhimuk V., Roussel-Dupre R.A., Symbalisky E.M.D. Optical characteristics of Blue Jets produced by runaway air breakdown, simulation results. *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. P. 3289-3292.
- Zadorozhny A.M., Tyutin A.A. Universal diurnal variation of mesospheric electric fields. *Adv. Space Res.* 1997. V. 20. P. 2177-2180.
- 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.* 2002. V. 202. P. 637-643.
- Zielinski G.A., Mayewski P.A., Meeker L.D., et al., Record of volcanism since 7000 B.C. from GISP2 Greenland ice core and implications for the volcano-climate system // *Science.* 1994. V. 264. P. 948-952.