

Новые модели в атмосферном электричестве и ионосфере

Введение.

В 20-х годах прошлого века возникло представление о том, что электричество ясных дней связано с грозовой деятельностью облаков, т.е. с тем фактором, который в исследованиях поля «хорошей погоды» исключался как аномальный. Надо сказать, что на этот очевидный парадокс мало кто обращает внимание, тем не менее, именно нелепость этой ситуации послужила основанием для разработки новой модели атмосферного электричества и его унитарной вариации, суть которой изложена в настоящей статье.

Большинство исследователей сходятся во мнении, что атмосферное электричество взаимосвязано с разделением электрических зарядов в грозовом облаке. Принято считать, что возникновение электрических зарядов в атмосфере может быть связано одним из трех источников, возможно так же их сочетание. К ним относятся: ГКЛ и солнечные космические лучи (СКЛ), естественные радиоактивные источники почвы (радон, ^{40}K , радионуклиды ториевого и уранового рядов) и возникновение зарядов за счет фазовых переходов в воде. По-видимому, это правильное предположение. В дальнейшем, при построении модели атмосферного электричества, будем использовать все известные идеи. Принципиально новым моментом нашей модели является то, что электрическое поле может возникнуть не только за счет грозовых разрядов, как это принято в подавляющем большинстве моделей, а за счет разделения зарядов в атмосфере «хорошей погоды». По-видимому, под это определение попадают и те облачные дни, в течение которых наблюдаются все особенности АЭП. В такой ситуации мы избегаем парадокса, о котором шла речь выше: свойства АЭП получены в ситуации «хорошей погоды», в то время как источником поля являются грозы, что «хорошей погодой» считать не принято. Отметим, что в ряде работ принимается идея о генерации АЭП в «мировом центре грозовой активности», якобы размещающемся в Африке. Это предположение возникло 100 лет назад, когда проверить его не было возможности. С появлением контроля погоды со спутников, и создания международной сети контроля гроз (<http://flash.ess.washington.edu/>), стало очевидно, что это предположение ошибочно. Тем не менее, и в наше время появляются модели АЭП, ориентированные на существование этого гипотетического «мирового центра».

Новая модель атмосферного электрического поля. 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:

$$E = \partial V / \partial n = 4\pi\sigma, \quad (1)$$

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 (1): $\sigma^* \approx 7 \cdot 10^5$ элементарных зарядов/см² и общий заряд Земли: $Q = \varepsilon_0 R_E^2 E = 5.7 \cdot 10^5$ 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: $C \approx 4\pi\epsilon_0\epsilon S/d$, 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: $q = PsN_0$, s – эффективное сечение ионизации воздуха космическими лучами, N_0 – концентрация молекул воздуха.

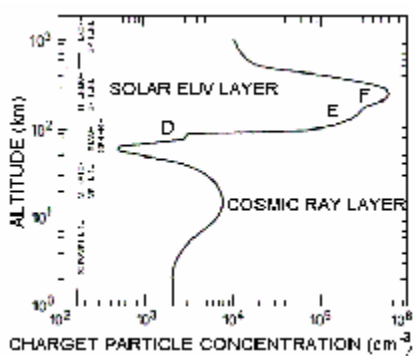


Рис. 1. Вертикальный профиль плотности ионизированных частиц в атмосфере.

Распределение плотности электрических зарядов по высоте атмосферы представлено на рис. 1. 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 $N = 2 \cdot 10^9$ 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 ($\sim 5 \cdot 10^{18}$ м³). Отсюда величина: $dQ/dt = \alpha \cdot 4 \cdot 10^{18}$ кулон/с. Таким образом, если бы скорость рекомбинации α была бы: $\alpha \geq 2.5 \cdot 10^{-16}$ (м³ 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: $10^{-16} - 10^{-12}$ м³ 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. 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.

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. 2, на котором можно видеть устойчивую корреляцию между потоком ГКЛ - N и током j (dQ/dt).

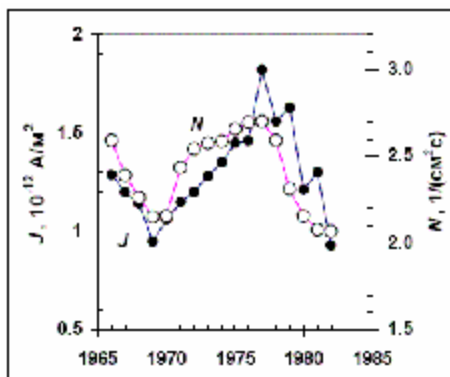


Рис. 2. Зависимости величины плотности атмосферного тока j (темные кружки) и потока космических лучей N на средних широтах на высоте $h \approx 22$ км; светлые кружки.

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. 2. 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. 3. 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. 3, 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 $r \geq 0.1 \text{ мкм}$.

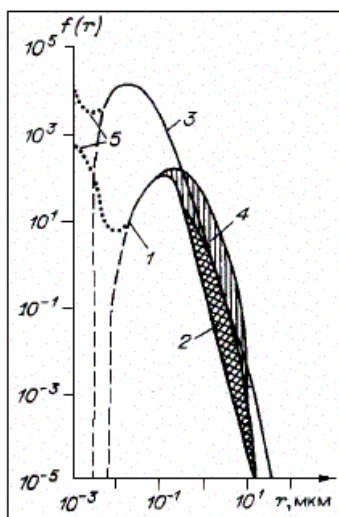


Рис. 3. Распределение атмосферных аэрозолей по размерам.

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.

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. Показано, что наиболее оптимальный размер водного аэрозоля составляет 0.13 мкм (рис. 4). Меньшие частицы - испаряются, частицы крупнее критического размера - растут.

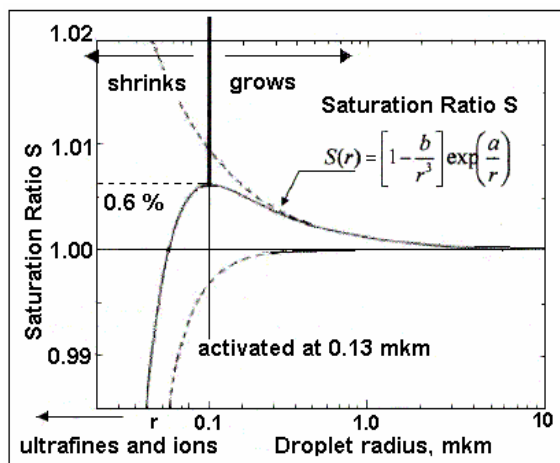


Рис. 4. Зависимость размера водного аэрозоля от степени насыщения. Капли размером, $r < 0.13$ мкм будут испаряться, большим – расти.

Как показано на рис. 4, величина пересыщения в оптимальном случае $S_c \approx 1.006$ (0.6%). Зависимость критического пересыщения паров воды от температуры $S_c(T)$ приведена на рис. 5. 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. Считалось пересыщение критическим, при котором отношение числовой плотности димеров к числовой плотности мономеров в системе составляет 3% (критерий Кало). 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.

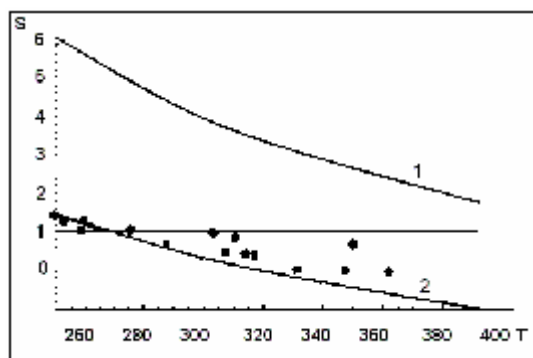


Рис. 5. Зависимость критического пересыщения паров воды от температуры $S_c(T)$.

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 :

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

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 :

$$E_Z = \epsilon_0 M g \zeta / 6\pi \eta \sigma_e. \quad (3)$$

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 (3). 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:

$$v = (mg - \epsilon_0 qE) / 6\pi \eta r, \quad (4)$$

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 (3), 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 вторичный 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 составляет около 5 км/сутки $\approx 5 \cdot 10^{-2}$ м/с. 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. Эти оценки показывают применимость формулы (4).

Полярность Е. 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:

$$K \sim \exp(-3/\ln^2 S_C + \ln S_C), \quad (5)$$

здесь S_C - пересыщение пара, равное отношению давления пара в системе к давлению насыщенного пара при той же температуре. Величина S_C определяется температурой пара T : ($\ln S_C \sim 1/T$), его термодинамическим потенциалом, размером зародышей капель, величиной поверхностного натяжения жидкости и т.п. Скорость конденсации K можно выразить через температуру пара:

$$K \sim \exp(-T^2 + 1/T), \quad (6)$$

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 ($\text{с}^{-1} \text{см}^{-3}$):

$$J \sim \exp(-W/kT), \quad (7)$$

где W - энергия, необходимая для образования пузыря критического размера. Качественная зависимость K и J от температуры T изображена на рис. 6. При температуре T'' , когда выполняется ($K \approx J$), казалось бы, система должна достичь термодинамического равновесия. На самом деле всё обстоит в точности наоборот: такая ситуация ближе к критическому, крайне неустойчивому состоянию.

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.

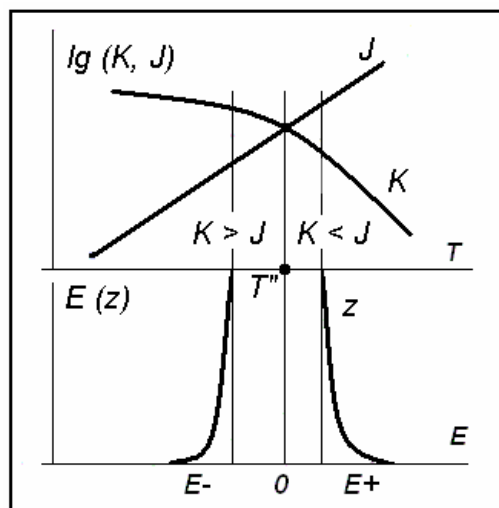


Рис. 6. Изменение \lg скоростей конденсации (K) и испарения (J) в зависимости от температуры T – вверху. Внизу – полярность электрического поля E , как функция отношения J и K : $E+$, когда $J > K$, и $E-$, когда $J < K$.

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. 6. На практике эта ситуация возникает при образовании тайфунов, когда на большие высоты восходящими потоками выносятся огромное количество водяных капель, заряженных отрицательно.

Всем известно, что в течение 100 последних лет температура поверхности Земли увеличивается. Согласно нашей модели, величина АЭП должна была бы уменьшаться. Действительно, как было недавно показано по наблюдениям в Шотландии и Шетланде,

ежегодное снижение АЭП с 1920 до 1980, когда измерения прекратились (Harrison, 2002), 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. 6).

Уместно ещё раз 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.

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. Авторы пытаются 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. 6) В последней обобщающей работе приведены уточненные данные по скорости уменьшения величины АЭП (Williams et al., 2005). Анализируя эти данные, приходим к заключению, что они противоречат идее грозового источника АЭП, согласно которому грозы происходят в регионах, близких к экватору с наиболее жарким климатом.

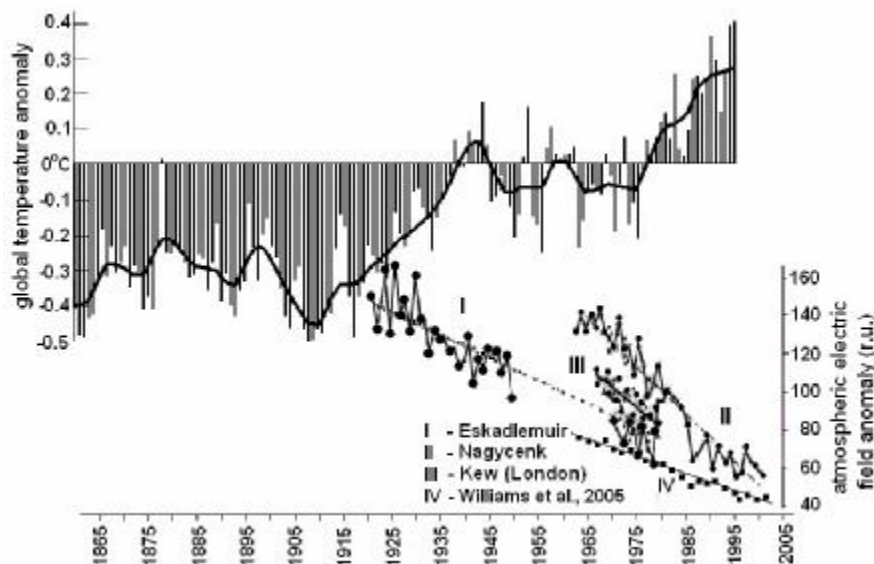


Рис. 6. Изменение глобальной температуры Земли. Уменьшение величины E_z на обсерваториях Венгрии и Великобритании (Märcz, Harrison, 2003; Williams et al., 2005).

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 больше их концентрация, 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. 6. 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° 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 $T'/E' = 0.03$

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 атмосферы, иначе, интегральная масса образующихся в атмосфере капель, M 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 возрасла 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: $E_Z' \approx [\exp(-at)(1 + 2at)/a] \times (at)^{3/2}$, 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 ($\approx 10 - 15$ 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 количества частиц 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 $\approx 1\%$. 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 грозových

разрядов в АЭП ничтожен и не превышает 0.1 %. Обнаружено, что увеличение числа грозных 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 2, в которой сравниваются числа Вольфа - W с годовым количеством гроз на Горном Алтае – N (Дмитриев и др., 2002).

Таблица 2

| 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 ± 1 , в годы минимума k (min) = 6.2 ± 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.

Кривая Карнеги в АЭП.

Как отмечалось, обсуждаемая модель АЭП основана на том, что разделение зарядов происходит не столько в грозном 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). 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 = UD = 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.

* 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.

Нашу модель CC АЭП иллюстрируем рис. 7-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. 7-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. 7-б приведена карта горизонтальной, Н-компоненты геомагнитного поля, расположенная аналогично карте рис. 7-а. Можно наблюдать пространственную корреляцию: области понижения величины Н соответствуют областям, где наблюдается наибольшая концентрация ГКЛ, что очевидно.

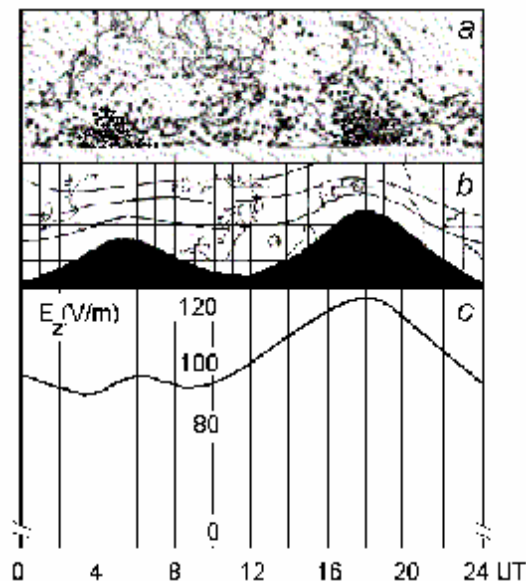


Рис. 7. а – Распределение интенсивности космических лучей, полученное с помощью космического аппарата UoSAT в период с 09.1988 по 05.1992 (Glassmeier et al., 2002) в северном полушарии (север – внизу); б - Изолиния величины Н-компоненты геомагнитного поля 10 мкТл (выделена черным цветом, север – внизу); 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. 7-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. 7-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 – 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 УТ-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. 8 (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. 8.1) удобнее различать по относительным величинам поля в периоды второго максимума: летом, это 0.9, в дни равноденствия – 0.8, зимой – 0.7.

Рассмотрим модель взаимодействия ГКЛ (на рис. 8.2 - ГКЛ показаны стрелками), с магнитным полем Земли. В дипольном геомагнитном поле ГКЛ, модифицированные Солнцем, достигнут Земли преимущественно на её геомагнитных полюсах, где горизонтальная компонента равна нулю. Именно в районах полюсов должна наблюдаться самая высокая концентрация электрических зарядов.

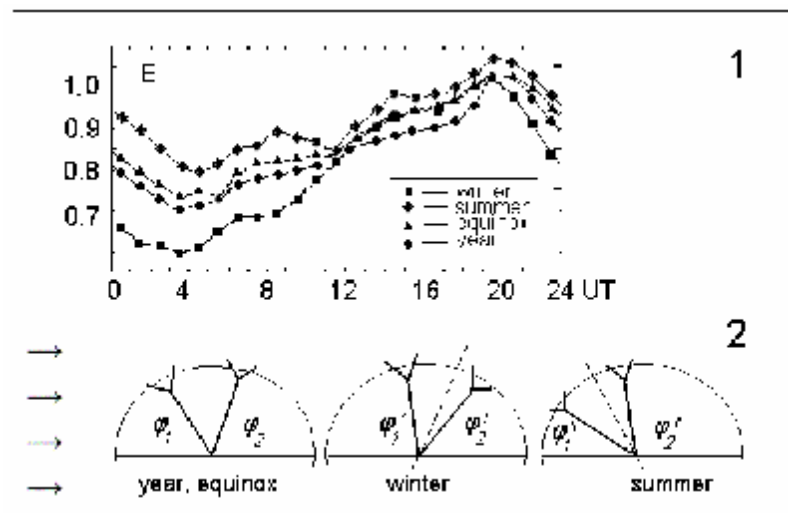


Рис. 8. Усредненная величина атмосферного электрического поля (в отн. ед.), зарегистрированная на станции Восток (Антарктида) в течение 1998 г. Ориентация Земли относительно направления СКЛ (стрелки) в равноденствие, зимой и летом. Углы и «воронки» соответствуют ГМА [2]: Канадская ГМА находится на широте $\varphi_1 \approx 55^\circ$ N, Сибирская - $\varphi_2 \approx 63^\circ$ N.

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. 8.2). 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 отношениям E , приведенными на рис. 8.1, 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.

Кривая Карнеги в мезосфере, ионосфере и магнитосфере.

Измерения электрического поля на мезосферных высотах проводились с использованием ракет в течение почти 20 лет. Электрическое поле на высотах 50 – 70 км (величина $E \approx 1$ В/м) испытывает UT-вариацию, аналогичную той, которая обнаружена у приземного E_z .

Унитарная вариация была обнаружена в F-слое ионосферы при обработке данных 26-ти ионосферных станций вертикального зондирования, расположенных в средней широте северного полушария. После отбора суточных вариаций на мировой сети станций, выяснилось, что при сравнительно простой их обработке, критическая частота F-слоя ионосферы (foF_2) при изменении мирового (универсального -UT) времени ведет себя аналогично величине атмосферного электрического поля E .

Результаты обработки ионосферных и геомагнитных данных по схеме, применявшейся для выделения унитарной вариации атмосферного электрического поля на континентах, показаны на рис. 9-а. Оказалось, что суточные пространственно-временные изменения критической частоты foF_2 -слоя ($fo \approx 9 \cdot 10^3 n_e^{1/2}$, n_e - концентрация электронов, $см^{-3}$) среднеширотной ионосферы, содержат поле унитарной вариации. UT вариация характеризуется в географической системе координат синхронным изменением foF_2 по мировому времени в течение суток на всех долготах круга заданной широты. Основное 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 по данным 1963 и 1965 годов. Они показали близкие результаты. Полученная в средних широтах амплитуда унитарной вариации foF_2 имеет величину 0,5 МГц ($\Delta n_e / n_e \approx 10\%$) Она невелика и ее удается выделить лишь при общем спокойном состоянии ионосферы. Это обстоятельство позволяет предложить использовать данную величину как количественную характеристику глобального поведения ионосферы.

По методикам, пригодным для определения унитарных вариаций различных геофизических параметров, испытывающих суточные колебания, были обработаны данные среднеширотных станций (20° - $60^\circ N$) мировой геомагнитной сети.

Использовались усредненные обычным образом по спокойным дням вариации X -компоненты геомагнитного поля для нескольких месяцев 1964 года. Установлено, что существует унитарная вариация суточного изменения северной компоненты геомагнитного поля с величиной вариации ~ 1 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.

Установлено, что вид унитарной вариации foF_2 в годы минимумов и максимумов (рис. 9-б) солнечной активности существенно отличается. В годы минимумов она имеет вид, похожий на унитарную вариацию атмосферного электрического поля с максимумом в 19 UT (рис. 9-а). Сезонные изменения унитарной вариации foF_2 в годы минимума очень незначительны (рис. 9-с), тем не менее, они повторяют аналогичные кривые, полученные для UT E_z . В годы максимума солнечной активности вид унитарной вариации foF_2 существенно изменяется (рис. 9-б). Можно предположить, что в спокойных условиях, в годы минимума солнечной активности UT E_z и UT – вариация ионосферы и магнитосферы имеют общую природу.

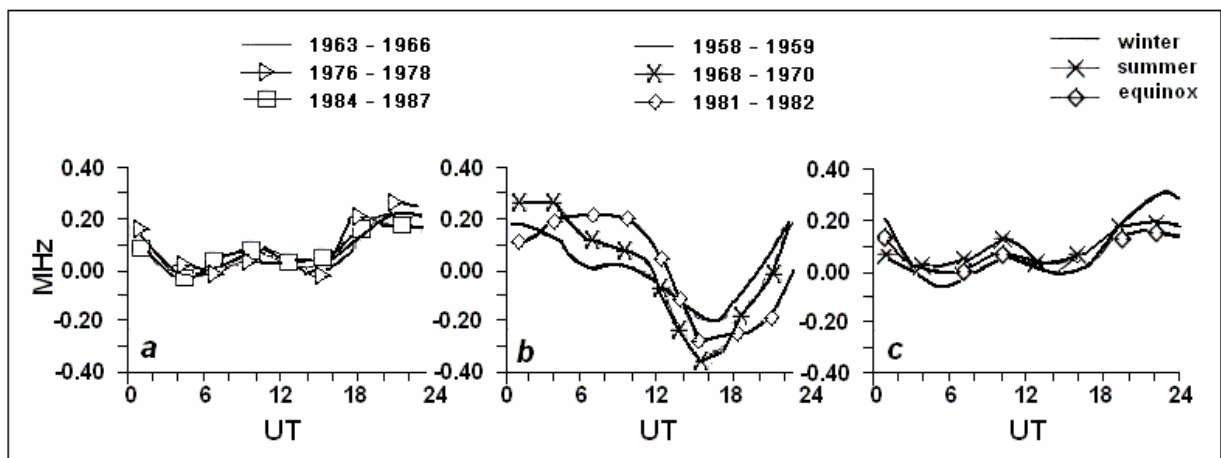


Рис. 9. Унитарная вариация foF_2 , усредненная за годы минимумов (а), максимумов (б) для трех циклов солнечной активности, и в зависимости от сезона (с).

Модель.

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 fo в F_2 -слое определяются рядом геофизических факторов. Одним из таких факторов может быть и наличие ГМА, являющихся причиной, по нашей модели, возникновения UT-вариации E_z . В общепринятой интерпретации, это явление адекватно факту несовпадения полюсов: географического и магнитного.

В качестве примера на рис. 10 приведены результаты расчетов унитарной вариации foF_2 в зависимости от UT 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 ($F_{10.7}=70$).

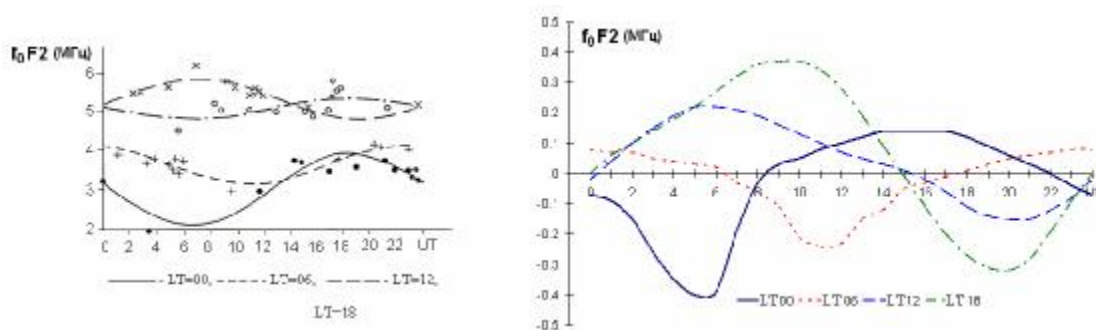


Рис. 10. Аппроксимация хода критической частоты F2-слоя ионосферы от мирового времени UT в солнечно-ионосферной системе координат по 13 станциям (слева). UT - вариация f_0F_2 ионосферы для местного времени LT= 00, 06, 12 и 18 часов для условий равноденствия и солнечной активности $F_{10.7} = 150$ (модель - справа).

Полученная на модельных расчетах унитарная вариация слоя F2 ионосферы 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.

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 (Märcz, 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. Аналогичные наблюдения проводились на Камчатке. В отличие от результатов (Märcz, 1997), нами получено, что АЭП понижалась одновременно с понижением ГКЛ, но на значительно большую относительную величину: 70% в АЭП относительно 7% в ГКЛ. Кроме этого, АЭП значительно быстрее восстанавливало своё прежнее значение, чем это происходило у ГКЛ.

Обсудим полученный результат в контексте нашей модели. Как отсюда следует, 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.

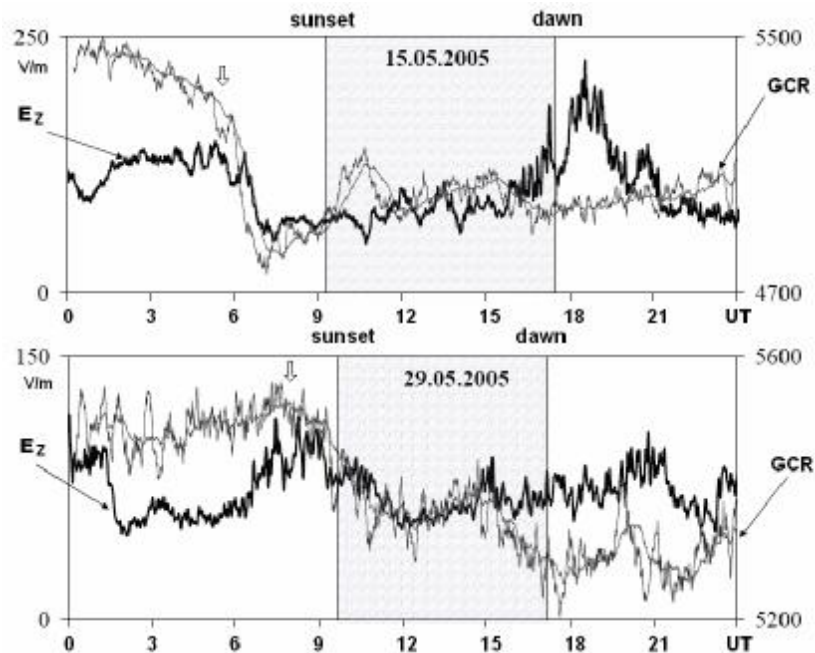


Рис. 11. Изменение атмосферного электрического поля E в момент Форбуш понижения и восстановление величины E в последующие дни (Kuznetsov, Cherneva, 2004).

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 модель.

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 сейсмодатчиков 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 сейсмодатчика, 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. 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». Показано, что 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.

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 H -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.

Выводы.

Основное отличие нашей модели атмосферного электричества от общепринятых представлений о сущности АЭП, состоит в том, что грозы, которые без сомнения оказывают влияние на поле E , - не являются главным его источником. При этом исчезает одно из противоречий АЭП, состоящее в том, что атмосферное электричество хорошей погоды связано с грозовой деятельностью облаков, т.е. с тем фактором, который в исследованиях АЭП исключался как аномальный. Вторым важным моментом модели является логичное обоснование постоянства величины АЭП. Оно обязано двум факторам: стабильности среднегодовой температуры поверхности Земли и стабильности потока ГКЛ, которые доставляют Земле электрический заряд. Этот фактор очевиден, так как стабильность среднегодовой температуры определяет стабильное соотношение между скоростями испарения и конденсации, что, в свою очередь, обеспечивает стабильность процесса образования и роста аэрозолей.

В заключение вернемся к причинам разработки принципиально новой модели АЭП и её основным положениям. Они заключаются в том, что:

- Неоднократные наблюдения АЭП показывают, что во время гроз его величина – уменьшается, в то время принято считать, что гроза – источник атмосферного электричества.

- В формировании тока утечки j принимают участие только легкие ионы. Именно они определяют характер профиля зависимости E от высоты. Изменение концентрации и соотношения легких ионов различного знака фиксируется измерительными приборами. Тяжелые ионы и мелкодисперсный аэрозоль - не принимают участие в формировании регистрируемого приборами тока утечки. Эти частицы несут на себе преимущественно отрицательный заряд. Они осаждаются на земную поверхность и поддерживают

постоянным отрицательный заряд Земли, который и формирует в атмосфере «хорошей погоды» поле $E = 130$ В/м.

- Максимальная концентрация электрических зарядов, производимых космическими лучами, приходится на высоты порядка 3.5 – 4 км. Именно здесь происходит процесс разделения зарядов наиболее эффективно. Когда зарядов много и влажность атмосферы возрастает, на этих высотах конденсируются и коагулируют большие водяные капли. Образуется облачность, интенсивность которой коррелирует с интенсивностью космических лучей.

- В атмосферу Земли ГКЛ поступают преимущественно в полярных широтах. Заметную роль в их распределении по поверхности Земли играет особенности геомагнитного поля, в частности, глобальные магнитные аномалии, в зоне влияния которых горизонтальная компонента поля меньше, в то время как модуль поля выше, чем в зоне, где влияние аномалий не сказывается. Из наблюдений на спутниках известно, что самое большое количество частиц высокой энергии попадают на Землю в зоне влияния Бразильской аномалии. Казалось бы, наблюдается противоречие, т.к. эта аномалия заметного влияния на АЭП не оказывает. Противоречия здесь нет, т.к. в зону влияния Бразильской аномалии попадают частицы из радиационного пояса, энергия которых значительно ниже энергии ГКЛ. Можно сказать, что ГКЛ Бразильскую аномалию «не замечают», в то время как влияние глобальных магнитных аномалий: Канадской и Сибирской проявляется в таком уникальном свойстве АЭП как УТ-вариация.

- Наличие УТ-вариации во всех оболочках Земли от поверхности до мезосферы, ионосферы и магнитосферы является реальным результатом солнечно-земных связей. В предлагаемой модели АЭП связь геооболочек реализуется на Земле без участия сомнительного «мирового источника гроз».

- Эксперименты по регистрации падающих слоев аэрозолей и расчеты «токовых» систем в полярных областях (токи Шмидта-Бауэра) свидетельствуют в пользу предлагаемой модели АЭП.