

ЭФФЕКТ ФОРБУШ ПОНИЖЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

В.В.Кузнецов

Наблюдения атмосферного электрического поля (АЭП), проведенные в обсерватории «Паратунка» на Камчатке показали, что эффект Форбуш понижения АЭП достигал 80 % от средней величины поля, что примерно в 10 раз больше процента хорошо известного Форбуш понижения интенсивности галактических космических лучей (ГКЛ). Предлагается модель, объясняющая полученный результат.

Введение

Природа атмосферного электрического поля остается до сих пор не совсем ясной, несмотря на большое количество исследований проводимых в течение многих лет в различных странах. Многие авторы до сих пор полагают, что возникновение АЭП в значительной степени определяется грозовой деятельностью (Harrison, 2005). Такой подход, несмотря на то, что идея источника АЭП общепринята и, за редким исключением, (например, Kasemir, 1956, 1977), практически не подвергается сомнению, приводит к очевидному недоразумению. Суть его состоит в следующем: Хорошо известно, что 11-летняя периодичность солнечной активности четко коррелирует, совпадая по фазе, с частотой гроз и, в тоже время, находится в противофазе с временным ходом интенсивности потока ГКЛ. Известны работы, в которых отмечается корреляция между плотностями потока ГКЛ и атмосферного тока (Roble, 1985; Stozhkov, 2003; Ермаков, Стожков, 2004). В работе (Märcz, 1997) показано, что корреляция ГКЛ - АЭП имеет место в моменты Форбуш понижений на интервалах $\approx 2 - 5$ дней. Возникает очевидное противоречие: если АЭП обязано грозам, то временная зависимость её должна находиться в противофазе с потоком ГКЛ. Это может означать только то, что грозы не могут быть основным источником АЭП. Кроме этого, согласно общепринятой модели АЭП, уменьшение потока ГКЛ в моменты Форбуш понижений должно соответствовать увеличению АЭП (Апсен и др., 1988). Однако, как показано в (Märcz, 1997), величина АЭП (E_z), в моменты Форбуш понижений плотности потока ГКЛ, не увеличивается, а, наоборот, понижается. Этот факт так же противоречит общепринятым представлениям об АЭП.

Форбуш-понижения в АЭП.

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. Важный вопрос, рассматриваемый в работах по АЭП, 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. И, соответственно, наоборот, - в моменты Форбуш понижений ГКЛ, АЭП должно было бы возрастать (Ruscroft, et al., 2000; Ogawa, 1985).

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 $\sim 5 - 10\%$ (рис. 1-а), а затем восстанавливалось до прежнего уровня в течение 5 – 10 дней. Полученные автором результаты отличались от всех предшествующих, но, как можно понять из статьи (März, 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».

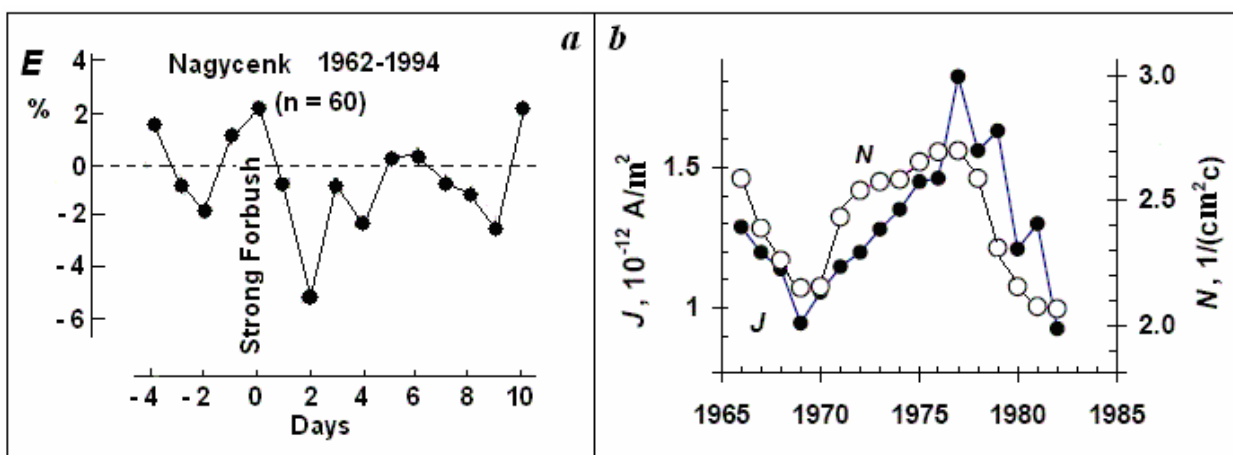


Рис. 1-а. Изменение атмосферного электрического поля E_Z в момент Форбуш понижения и восстановление величины E_Z в последующие дни (März, 1997). Рис. 1-б. Зависимости величины плотности атмосферного тока J (темные кружки) (Roble, 1985) и потока космических лучей N на средних широтах на высоте $h \approx 22$ км; светлые кружки (Stozhkov, 2003; Ермаков, Стожков, 2004).

Ионизация космическими лучами

В работах (Ермаков 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 ($N \sim P^{1/2}$) (рис.1-б). 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).

Детальный временной анализ начала Форбуш понижения интенсивности ГКЛ и зависимости уменьшения интенсивности потока нейтронов с явлениями в АЭП показал (Кузнецов, Чернева, 2008), что действительно Форбуш понижения интенсивности потока ГКЛ совпадает по времени с началом понижения величины E_Z . Анализу были

подвергнуты данные записи E_Z , с минутным осреднением, полученные на обсерватории "Паратунка" с 1998 по 2007 гг. Сначала, по данным супермониторов Москвы и Магадана отбирались дни, когда происходили Форбуш понижения интенсивности ГКЛ. Затем из данных E_Z выделялись дни «хорошей погоды» для АЭП, совпадающие с датами Форбуш понижения интенсивности ГКЛ, и дни, когда регистратор E_Z работал нормально. Из данных, полученных в течение семи лет регистрации E_Z на станции "Паратунка", таких совпадений оказалось чуть больше 20 (рис. 2). К сожалению, практически во всех отобранных случаях время «хорошей погоды» на Камчатке оказалось меньше времени восстановления E_Z , которое, как было показано в обсерватории Nagysenk, составляло не менее пяти дней. Наиболее характерные кривые, показывающие, что Форбуш понижения интенсивности ГКЛ, зарегистрированные на станции космических лучей (Магадан), происходили одновременно с понижениями величины E_Z , показаны на рис. 2. Анализ данных, представленных на рис. 2, показывает, что уменьшение величины E_Z начинается практически одновременно с началом Форбуш понижения, задержка вариации сигнала E_Z относительно Форбуш понижения не превышает двух часов. Скорости понижения величин интенсивности потока ГКЛ и АЭП практически совпадают.

Несомненный интерес представляет выяснить, насколько связаны понижения E_Z и ГКЛ по амплитуде, т.е., иначе, пропорционально ли изменяется величина E_Z с понижением интенсивности потока ГКЛ? Этот вопрос был специально исследован; отобраны 18 событий, на которых понижения ГКЛ и E_Z фиксировались очень четко. Данные приведены на рис. 3, в левой части которого видно, что наблюдается линейная зависимость понижений ГКЛ и АЭП, причем, относительное уменьшение величины E_Z примерно в 10 раз превышает соответствующее изменение интенсивности ГКЛ. Модель АЭП, в которой предполагается взаимосвязь E_Z с ГКЛ, должна учитывать и находить объяснение этому факту. Изменения E (атмосферное электрическое поле) в момент Фобуш понижений к вариациям P (интенсивность потока КЛ): $dE/E \approx 10 dP/P$, т.к. $E \sim N$, то $dN/N \approx 10 dP/P$,

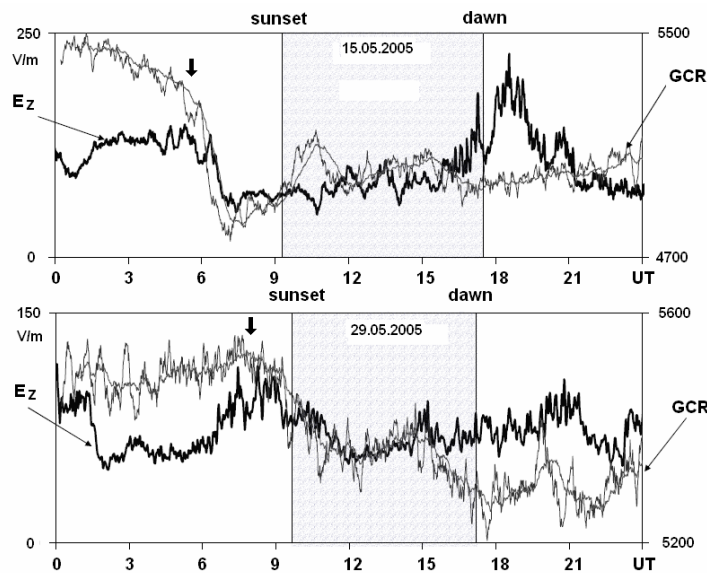


Рис. 2. Изменение атмосферного электрического поля E в момент Форбуш понижения и восстановление величины E в последующие дни.

Модель Форбуш эффекта в АЭП.

Основной вопрос, который мы задаем в этой работе, состоит в выяснении физики АЭП, в частности, сохранения величины поля практически постоянной на всей Земле, или переформулировав проблему, 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.

Наблюдения АЭП проведенные на Камчатке показали, что если Форбуш понижения в ГКЛ выделяются очень наглядно, то эти же эффекты в АЭП наблюдать значительно сложнее (см. рис. 2). Дело в том, что на атмосферное электричество, т.е. на поведение E_Z во времени оказывают процессы, происходящие в т.н. обменном слое атмосферы и, в частности, большую роль играют резкие порывы ветра и другие метеопараметры. Фазу восстановления поля E_Z на Камчатке проследить не всегда удается, т.к. ситуация, когда 5 дней «хорошей погоды» идут подряд, - бывает довольно редко. Тем не менее, как следует из рис. 2, понижение величины E_Z синхронно с Форбуш понижением ГКЛ наблюдается достаточно однозначно. Задержка начала понижения величины АЭП в (Märcz, 1997) связана, по всей видимости, со временем осреднения данных. Возможной причиной неполного совпадения наших данных с венгерскими состоит в особенности камчатского климата, весьма отличного от европейского.

Детальный анализ совпадений времени начала Форбуш понижения интенсивности ГКЛ и временной зависимости уменьшения интенсивности потока нейтронов с явлениями в АЭП показал, что действительно Форбуш понижение интенсивности потока ГКЛ совпадает по времени с началом понижения величины E_Z . Анализу были подвергнуты данные записи E_Z , с минутным осреднением, полученные на обсерватории Паратунка с 1998 г. по 2006 г. Сначала, по данным супермониторов Москвы и Магадана отбирались дни, когда происходили Форбуш понижения интенсивности ГКЛ. Затем из данных E_Z выделялись дни «хорошей погоды» для АЭП, совпадающие с датами Форбуш понижений интенсивности ГКЛ, и дни, когда регистратор E_Z работал нормально. Из данных, полученных в течение семи лет регистрации E_Z на станции Паратунка, таких совпадений оказалось чуть больше 20. Анализ данных приведенных на рис. 2 показывает, что уменьшение величины E_Z начинается практически одновременно с началом Форбуш понижения, задержка сигнала E_Z относительно Форбуш понижения не более двух часов. Скорости понижения величин интенсивности потока ГКЛ и АЭП практически совпадают.

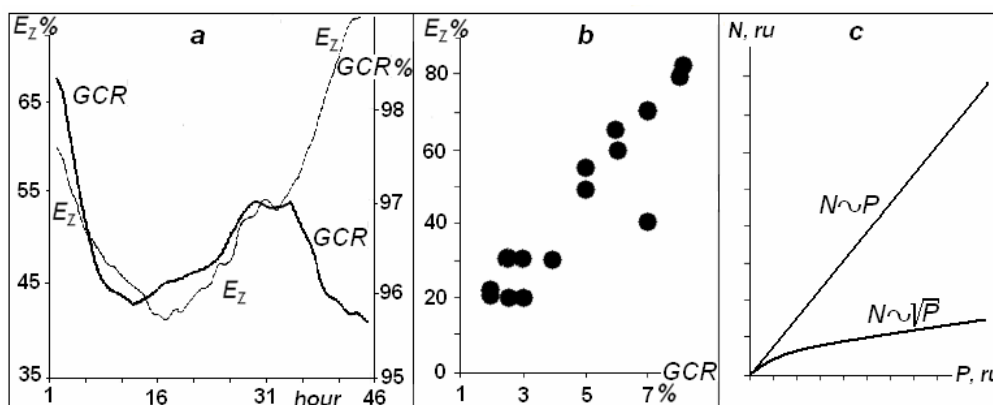


Рис. 3. Время Форбуш понижений в ГКЛ и E_Z (из наших наблюдений) - a; Соотношение величин понижений - b; Зависимости между N и P - c.

Несомненный интерес представляет выяснить, насколько связаны понижения E_Z и ГКЛ по амплитуде, т. е. иначе, пропорционально ли изменяется величина E_Z с

понижением интенсивности потока ГКЛ? Этот вопрос был специально исследован; отобраны 18 событий, на которых понижения ГКЛ и E_z фиксировались очень четко. Данные приведены на рис. 3-а, где показан усредненный временной ход ГКЛ и E_z во время Форбуш понижения, рис. 3-б показывает, что наблюдается линейная зависимость понижений ГКЛ и АЭП, причем, процент понижения величины E_z примерно в 10 раз превышает процент понижения интенсивности ГКЛ. Модель АЭП, в которой предполагается взаимосвязь E_z с ГКЛ, должна учитывать и находить объяснение этому факту.

Объяснение будем искать в нашей модели АЭП. Вспомним, что 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 ($N \sim P^{1/2}$) (см. рис. 3-с). Этот подход укрепляет уверенность в том, что ГКЛ оказывают решающее влияние на АЭП и ток проводимости атмосферы J . В качестве иллюстрации сказанному приведем рис. 3-б, на котором можно видеть устойчивую корреляцию между потоком ГКЛ - N и током $J (dQ/dt)$.

Из наблюдений мы получили: изменения E (атмосферное электрическое поле) в момент Фобуш понижений к вариациям P (интенсивность потока КЛ): $dE/E \approx 10 dP/P$, т.к. $E \sim N$, то $dN/N \approx 10 dP/P$, иначе $N \sim P$.

Обсуждение

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 (или меньше) 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.

В заключение заметим, что авторы работы (Svensmark et al., 2009) связывают с Форбуш понижением ГКЛ уменьшение количества воды в нижних облаках, иначе, уменьшением концентрации аэрозоля. Данные по уменьшению концентрации аэрозоля в момент Форбуш понижений получены в ходе выполнения проектов: MODIS, ISCCP и AERONET. Период убывания и последующего восстановления концентрации аэрозоля составляет около 7 дней. Эта информация находится в соответствии с нашей моделью

АЭП, согласно которой разделение зарядов водных аэрозолей в гравитационном поле Земли – является основным механизмом формирования АЭП, а ГКЛ играют роль основного ионизирующего фактора. Отсюда с очевидностью следует прямая корреляция $N \sim P$. Факт наблюдения $dN/N \approx 10 dP/P$ скорее всего, специфичен для Камчатки с её очень влажным климатом. Этот вопрос целесообразно в дальнейшем исследовать более подробно.

Литература

- Апсен А.Г., Канониди Х.Д., Чернышева С.П. и др. Магнитосферные эффекты в атмосферном электричестве. М.: Наука. 1988. 150 с
- Ермаков В.И., Стожков Ю.И. Физика грозных облаков. М.: Препринт ФИАН. № 2. 2004. <http://ellphi.lebedev.ru/6/pdf2.pdf>
- Кузнецов В.В., Чернева Н.В. Исследование Форбуш понижений и эффектов терминатора в атмосферном электрическом поле на обсерватории «Паратунка» (Камчатка) // Вестник КРАУНЦ, Науки о Земле. 2008. № 1. Вып. 11. С. 89-97.
- 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.
- Harrison R.G. The global atmospheric electrical circuit and climate // Surveys in Geophys. 2005. V. 25. 5-6. P. 441-484.
- Kasemir H.W. Zur Strömungstheorie des luftelektrischen Felds III: Der Austauschgenerator. Archives for meteorology // Geophysics and Bioclimatology. 1956. Ser. A. 9. N 3. P. 357-370
- Kasemir H.W. Theoretical problems of the global atmospheric electric circuit. In Electrical Processes in Atmospheres, eds. H. Dolezalic, R. Reiter. 1977. Pp. 423-38. Darmstadt Steinkopff.
- Märcz F. Short-term changes in atmospheric electricity associated with Forbush decreases // J. Atm. Solar-Terr. Physics. 1997. V. 59. N. 9. P. 975-982.
- Ogawa T. Fair-weather electricity // J. Geophys. Res. 1985. V. 90. P. 5951-5960
- Roble R.G. On Solar-Terrestrial relationships in atmospheric electricity. J. Geophys. Res. 1985. V. 90. D4. P. 6000-6012.
- Rycroft M.J., Israelsson S., Price C. The global electric circuit, solar activity and climate change // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2000. V. 62. P. 1563-1576.
- Stozhkov Y.I. The role of cosmic ray in the atmospheric processes // J. Physics G: Nuclear and Particle Physics. 2003. V. 29. N. 5. P. 913-923.
- Svensmark H., Bondo T., Svensmark J. Cosmic ray decreases affect atmospheric aerosols and clouds // Geoph. Res. Lett. 2009. V. 36. Iss 15. DOI: 10.1029/2009GL038429