

АТМОСФЕРНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ: ФАКТЫ, НАБЛЮДЕНИЯ, КОРРЕЛЯЦИИ, МОДЕЛИ

В. В. Кузнецов^{1,2}

¹ИГФ СО РАН (г.Новосибирск),

²ИКИР ДВО РАН (с.Паратунка, Камчатская обл.)

Представлены и обсуждаются данные по регистрации величины вертикальной компоненты атмосферного электрического поля E и унитарная вариация E . Обсуждаются различные модели атмосферного электрического поля. Представлена информация о корреляции E вариаций с данными риометра, направленного на Солнце. Обсуждаются полученные результаты. Сообщается о результатах исследований унитарной вариации (UT) в мезосфере, ионосфере и магнитосфере. Показано, что UT-вариация в ионосфере (f_oF2) проявляется в периоды минимума солнечной активности. Представлены данные по регистрации спрайтов (sprite - эльф) и синих струй (blue jets) – электрических разрядов между грозовым облаком и ионосферой, и обсуждаются физические модели явлений. Обсуждается проблема шаровой молнии. Рассматриваются вопросы физики возможной связи вариаций E с сейсмичностью и физикой землетрясения. Сообщается о наблюдениях изменений E в эпицентре Чуйского землетрясения, а так же об измерениях величины поля вблизи работающего мощного сейсмодвижителя. Обсуждается зависимость E от изменения интенсивности инфразвука.

Data resulted from detection of the atmospheric electric field (E) vertical component, the universal diurnal variation E is among them, are presented and discussed. Different models of the atmospheric electric field and of the Earth electric charge retention, as one of the main geophysical problems 100 years ago, are under consideration. The correlation between E_z variation and the Solar directed riometer data, obtained at Novosibirsk geophysical observatory “Klyuchi”, is reported. The results of mesosphere, ionosphere and magnetosphere universal diurnal variation (UT) research are submitted. The ionosphere UT-variation (f_oF2) is confirmed to develop throughout periods of the Solar minimum activity. Displays of sprites and blue jets, consisting in electric discharges from a thunderstorm cloud to ionosphere, are presented with following consideration of the phenomena physical models. Plausible connection of E variations with seismicity and the earthquake physics is discussed. E_z measurements in Chuiysky earthquake epicenter and at the powerful operating seismovibrator are reported. Plausible E_z relationship to infrasound intensity variation is discussed.

Введение

Известно, что в атмосфере Земли существует электрическое поле, причем полярность поля такова, что Земля практически всегда отрицательна, т.е. земная поверхность несет на себе довольно значительный отрицательный заряд. Верхние слои атмосферы (электросфера, ионосфера) заряжены относительно Земли положительно.

Исследования явлений атмосферного электричества были начаты Франклином, Далибаром, Ломоносовым и Рихтером в середине 18 века. Основное внимание было сосредоточено вокруг изучения молний и гроз: эти явления природы, естественно, привлекали внимание многих ученых. Ломоносов и Лемонье, практически одновременно и независимо друг от друга, обнаружили, что электрические явления в атмосфере происходят и в отсутствие грозовых облаков. С начала 19 века интерес к изучению молний и гроз сильно уменьшился. Основное внимание исследователей было сосредоточено на изучении электрических полей хорошей погоды [Имянитов, Шифрин, 1962]. В 20-х годах прошлого века Симпсон, Маучли и Свердруп обнаружили так называемую унитарную вариацию поля, т.е. синхронные изменения напряженности поля величины E , - в целом по Земле [Имянитов, Шифрин, 1962]. Вильсон высказал предположение, что унитарная вариация E вызвана грозами, которые приводят к зарядению Земли и высоких слоев атмосферы зарядами разных знаков. Эти идеи были развиты Уипплом и Скрейзом, которые установили, что суточный ход поля подобен

суточному ходу площади поверхности материков Земли, занятой грозами. Так 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. На континентах унитарная вариация вообще не наблюдалась. Это обстоятельство связывалось с тем, что возможной причиной её отсутствия могло быть, например, влияние хорошей проводимости поверхности Земли (т.н. электродный эффект), либо наличие горизонтальных неоднородностей земной поверхности, либо – неравномерное распределение электрических зарядов по высоте и т.п. Возникла ситуация, при которой наблюдаемые противоречия полностью заслонили ясность представления о природе атмосферного электричества. Один из основных исследователей в области атмосферного электричества Х. Израэль в 1939 г. отметил, что выход из создавшегося тупика можно найти, перестроив способы регистрации величины E , проведя непрерывные наземные измерения в течение, по крайней мере, 50 лет.

За время, прошедшее с тех пор, в мире созданы приборы и организована сеть наземных станций (которая в России, к настоящему моменту, практически прекратила существование). Несмотря на некоторый прогресс в техническом плане, проблема атмосферного электричества в понимании физики этого явления, по большому счету, далеко не продвинулась. Изучение атмосферного электричества показало взаимосвязь его с другими, в частности, атмосферными процессами. Так, например, 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. Известны многие другие, не всегда явные и далеко не всегда ясные взаимосвязи электрического поля с такими геофизическими параметрами как сейсмичность, вулканизм, явления в ионосфере и магнитосфере и пр.

В середине прошлого века проблема атмосферного электричества была очень популярна среди физиков. Именно в то время были сделаны ряд фундаментальных работ и, в частности, вышли в свет известные книги П.Н.Тверского (1949) и Я.И.Френкеля (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 явлениям атмосферного электричества. В последнее время интерес к этой проблеме значительно уменьшился, книг и статей по атмосферному электричеству встречается всё меньше и меньше, и поэтому имеет смысл, напомнить некоторые идеи и наиболее достоверные экспериментальные факты, имеющие отношение к обсуждаемой теме. Ослабление интереса к атмосферному электричеству происходит на фоне настоящего бума, связанного с недавно обнаруженным физиками явлением образования светящихся электрических разрядов между верхней частью грозового облака и ионосферой - т.н. спрайтов и синих струй (sprite, blue jet). Шаровая молния, несомненно, имеющая непосредственное отношение к атмосферному электричеству, - до сих пор возбуждает интерес исследователей. Возможно, ключом к пониманию физики таких феноменов как, шаровая молния, спрайты, унитарная вариация и прочие явления, присущие атмосферному электричеству, может быть генерация некоторой общей физически непротиворечивой идеи, охватывающей все стороны явления с единой позиции.

Атмосферное электрическое поле. Основные формулы.

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. уровенной, 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 формировании атмосферного электрического поля, т.к. в приземном слое, за счет имеющихся вблизи земной поверхности повышенной концентрации объемных зарядов, величина E резко возрастает. Это явление в атмосферном электричестве получило название электродный эффект.

При наличии в атмосфере объемных зарядов с плотностью ρ , должно выполняться соотношение Пуассона: $\partial^2 V/\partial x^2 + \partial^2 V/\partial y^2 + \partial^2 V/\partial z^2 = -4\pi\rho$.

Рассматривая только одну координату поля x , заменяя x на h , и полагая $\partial^2 V/\partial y^2 + \partial^2 V/\partial z^2 = 0$, градиент электрического поля:

$$E = -dV/dh, \quad \partial^2 V/\partial h^2 = -4\pi\rho. \quad (2)$$

Наблюдения за величиной E , проведенные у земной поверхности, дают в среднем для градиента потенциала значение порядка 130 В/м. Это позволяет вычислить величину поверхностной плотности заряда Земли (1): $\sigma \approx 7 \cdot 10^5$ элементарных зарядов/см². Общий заряд Земли $Q = 5.7 \cdot 10^5$ кулон. Общий потенциал положительно заряженной ионосферы относительно отрицательной Земли $U = 300$ кВ, плотность тока в «конденсаторе» Земля-ионосфера $j = 10^{-12}$ А/м². Полное сопротивление атмосферы $R \approx 230$ Ом. Сопротивление R можно представить как параллельное соединение цепочек сопротивлений между Землей и ионосферой, расположенных равномерно по поверхности Земли, соединенных между собой сопротивлениями в точках, между которыми возможно возникновение горизонтального E и возможны горизонтальные перетоки 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.

Способы измерений и аппаратура

Методы и аппаратура, предназначенные для измерения напряженности (градиента потенциала) электрического поля, условно делятся на две группы [Тверской, 1947].

Первая группа: методы, основанные на использовании соотношения: $E = -dV/dh$.

Метод разности потенциалов. Измеряются потенциалы V на разных высотах h .

Метод Пельтье. Проводник в виде шара, на высоте h , соединенный с электрометром. На проводнике за счет индукции происходит разделение и накопление зарядов Q . Зная емкость шара C , и измерив Q , определяется потенциал V : $Q = -CV$.

Метод коллекторов. Состоит в автоматическом измерении потенциала электрометрами одновременно в нескольких местах. *Коллектора:* механические, распылительные, пламенные, радиоактивные. *Характеризуются:* емкостью, кажущимся сопротивлением, временем релаксации, степенью изоляции и пр.

Вторая группа: методы, основанные на использовании уравнения: $E = \partial V/\partial n = 4\pi\sigma$.

Метод Вильсона. Действие метода Вильсона отражено на схеме [Тверской, 1949]. Изолированная пластина P соединена с электрометром E и окружена охранным кольцом D . Сверху пластина закрыта заземленной крышкой S , которая отодвигается во время измерений. После этого на верхней части пластины появится отрицательный заряд плотностью σ . На остальной части прибора распределится положительный заряд и электрометр даст отклонение, являющейся относительной мерой плотности σ , а тем самым и напряженности поля $E = 4\pi\sigma$. Метод Вильсона может быть применен для

непрерывной регистрации. Для этого крышка S приводится во вращение, тогда сигнал приобретает пульсирующий характер и может быть зарегистрирован.

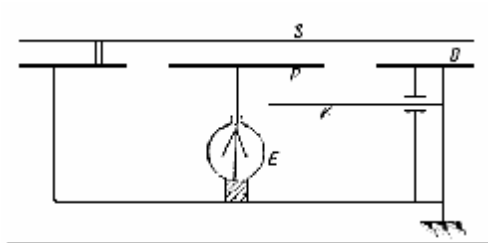


Схема измерения E , по методу Вильсона [Тверской, 1949]

Датчики напряженности электрического поля. Получившие в практике измерения величины E широкое применение датчики, основаны на использовании метода Вильсона.

Датчик напряженности электрического поля Градиент-М2'. Величина E измеряется в двух диапазонах: ± 500 В/м и ± 5000 В/м. Датчик состоит из дифференциального электростатического генератора, усилителей, генераторов, щеточного узла и пр.

Электростатический генератор (основной узел датчика поля) представляет собой дифференциальную пару измерительных пластин и модулирующей пластины, изготовленных из нержавеющей стали. Измерительные пластины установлены на фторопластовых изоляторах, защищенных сверху от натекания воды металлическими колпачками. Модулирующая пластина закреплена на конце вала привода, другой конец которого заземлен посредством щеточного узла. Крепление модулирующей пластины не позволяет установить ее в произвольное положение. Щеточный узел состоит из торцевой щетки, расположенной на фланце крепления электродвигателя, и закрепленной в держателе щетки, и торцевого контакта, расположенного на торце вала модулятора, посредством которого пластины модулятора ЭСГ электрически соединяются с шиной нулевого потенциала.

Датчик напряженности электрического поля конструкции Струминского. Основой датчика является вибрирующая стальная ленточка. Вибрация осуществляется с помощью автогенератора. По обе стороны ленточки расположены две проволоочки – приемники сигнала. Проволочки хорошо изолированы от корпуса датчика. При вибрации ленточка, приподнявшись над проволочками, частично экранирует проволоки, при опускании – экранировка нарушается, в результате чего на входе усилителя появляется сигнал, который, после дополнительного усиления, поступает на вход синхронного детектора и усиливается.

Щелевой струнный электрометр. Принцип работы такой же, как у датчика Струминского, но вместо ленточки используется стальная проволока диаметром около 1 мм, которая расположена в щели. Конструкция датчика симметрична относительно плоскости, перпендикулярной направлению вибрации проволоки. Конструкция имеет диаграмму направленности типа "восьмерки", как у диполя Герца, что позволяет производить векторные измерения.

Особенности поведения E и унитарная вариация

Данные: Электрические параметры. Известно, что Земля заряжена отрицательно относительно окружающего её пространства. Принято считать, что положительный заряд сосредоточен в т.н. электросфере. Эту область пространства часто отождествляют 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. Величина электрического поля $E = j/S$ достаточно быстро уменьшается с высотой (см. рис. 1), 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. Используя известную формулу $Q = It$, можно оценить t - “время разрядки” конденсатора “Земля-ионосфера”. Это время не превышает 10 минут. 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.

Проблема сохранения Землей 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, как это было и в прошлом веке.

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

$$V = \int_0^z E(h) dh, \quad (3)$$

где $E(h)$ - 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.

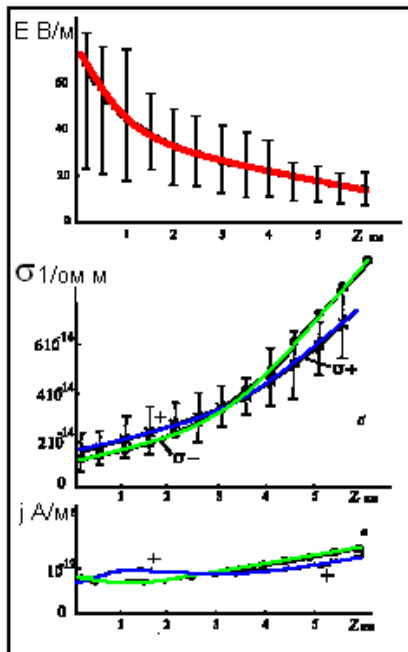


Рис.1. Изменение поля E , проводимости атмосферы σ и плотности тока j с высотой z . [Рокитянский, 1981].

Унитарная вариация. Наиболее интересным свойством атмосферного электричества является её т.н. унитарная вариация. Явление унитарной (UT) вариации заключается в том, что величина E по всей Земле одновременно возрастает на 20% в тот момент, когда в Лондоне (UT-мировое время) 19 часов (см. рис. 2-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. 2-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 [Ансен 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. Аномально большие среднесуточные значения E , наблюдавшиеся в условиях хорошей погоды, как правило, совпадают с начальной стадией форбуш-понижения интенсивности космических лучей, непосредственно следующего за солнечной вспышкой. 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.

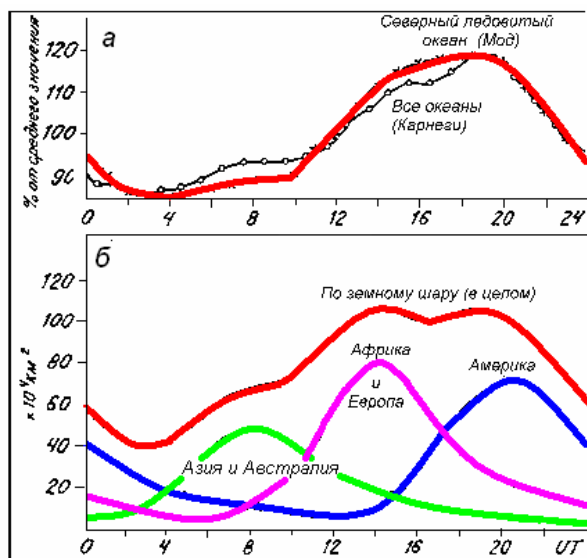


Рис. 2. Унитарная вариация E – а; распределение гроз по поверхности Земли – б.

Вариации E . Во временной зависимости E обнаружена 27-дневная вариация, связанная, по мнению авторов [Ансен 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.

E в океане. Интересный результат получен при измерении атмосферного электрического поля в океане. На среднеширотных станциях атмосферного электричества зафиксировать четкую унитарную вариацию практически не удастся, т.к. “мешает” т.н. обменный слой высотой 2-3 км. Этот слой не оказывает такого сильного влияния на УТ-вариацию E в океане [Гончаренко и др., 1992]. Авторы сообщения обнаружили зависимость напряженности электрического поля атмосферы от глубины океана. Величина E уменьшалась с глубиной. Кроме этого, здесь же, 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.

Корреляции показаний риометра и величины E . В [Marcz, 1976] исследована связь между вариациями вертикальной компоненты атмосферного электричества $E(t)$ и ионосферным поглощением $\alpha(t)$ (в ночное время). Показано, что ионосферное поглощение резко возрастало после солнечных вспышек. Было установлено, что значительное увеличение E наблюдается на первые – четвертые сутки после максимума ионосферного поглощения. Существенным недостатком этих исследований является то, что анализ реакции атмосферного электричества и поглощения проводился по среднесуточным значениям. Такой подход не позволяет с точностью, меньшей, чем сутки, оценить время запаздывания реакции глобальной атмосферно-электрической цепи на солнечную вспышку.

Аналогичные исследования с декабря 1988 по апрель 1989 г.г. были проведены в Сибири на среднеширотной станции «Ключи» (Новосибирск). В [Кузнецов и др. 1991] сообщается о случаях корреляции между вариациями величины E и показаниями (R) риометра (радиоприемника, настроенного на фиксированную частоту 32 МГц), направленного на Солнце. В течение времени совместных наблюдений E и R было зарегистрировано 19 событий корреляции. Пример такой корреляции приведен на рис. 3 (в левой части рисунка) и отсутствие корреляции – в его правой части. Корреляция

наблюдалась в те часы, когда Солнце находилось в пределах диаграммы направленности риометра. Значение нормированной функции взаимной корреляции в максимуме достигало 0.7. Максимум функции сдвинут по времени таким образом, что показания риометра опережают данные по электрическому полю на 10 и более минут. Практически все случаи корреляции происходили в моменты повышения геомагнитной активности. Прямой взаимосвязи этих событий со вспышками на Солнце не обнаружено.

К сожалению, эта работа не получила дальнейшего развития и результаты наблюдений не были подтверждены. Тем не менее, полученные данные можно интерпретировать в контексте одного из возможных механизмов: либо существует связь между E и прозрачностью ионосферы, либо – связь между E и радиоизлучением Солнца, что противоречит результатам [Sao, 1967]. В работе [Sao, 1967] исследовалась корреляция градиента потенциала с солнечным излучением на частоте 1 ГГц. Наличие корреляции отмечалось только в полярном регионе и в усредненных суточных данных. На среднеширотной магнитной обсерватории корреляции не обнаружено. Этот результат, по-видимому, может говорить в пользу первого из названных механизмов, о возможной связи между E и прозрачностью ионосферы

При проведении цикла наблюдений, нами была выделена реакция атмосферного электричества на солнечные вспышки. На следующие сутки после вспышки, величина E возрастала примерно на 20%, а затем в последующие 6-7 суток уменьшалась (относительно “нормы”) более чем на 25%. Корреляции между поведением E и магнитосферными возмущениями не обнаружено. Подобные исследования проводились ранее другими группами ученых. Например, одно из первых экспериментальных свидетельств, влияния магнитосферных возмущений на величину E , было получено [Freir, 1967] в высокоширотной зоне аномальных возмущений. Детальный анализ [Бендилет и др., 1985] показал, что знак и величина E зависят от местного магнитного времени и расположения станции наблюдений относительно авральной зоны.

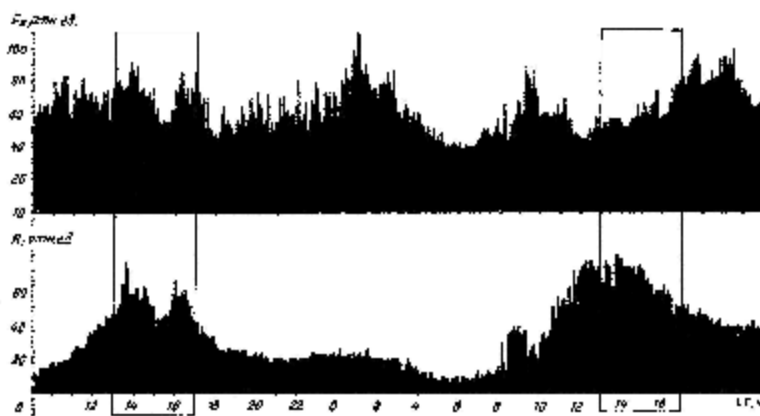


Рис. 3. Вариации величин вертикальной компоненты атмосферного электрического поля (E , в отн. ед.) и поглощением солнечного радиоизлучения (R , отн. ед.) 1 и 2 декабря 1988 г. Прямоугольниками выделены моменты, когда Солнце находилось в пределах диаграммы направленности антенны риометра. Произведено 5-ти минутное усреднение данных.

Вариации E в окрестности сейсмодатчика. Измерения вертикальной составляющей атмосферного электрического поля вблизи работающего сейсмодатчика проводились сотрудниками обсерватории «Ключи» с помощью датчика поля струнного типа, с порогом чувствительности порядка 1 В/м. Датчик предназначен для регулярных обсерваторских наблюдений больших изменений электрического поля, что ограничило его применение лишь незначительными расстояниями от сейсмодатчика (первые сотни метров). В некоторых случаях использовался электрометр с чувствительностью порядка 1 мВ/м, реализованный в виде приемника с вертикальной штыревой антенной длиной около 30 см [Кузнецов и др. 1999].

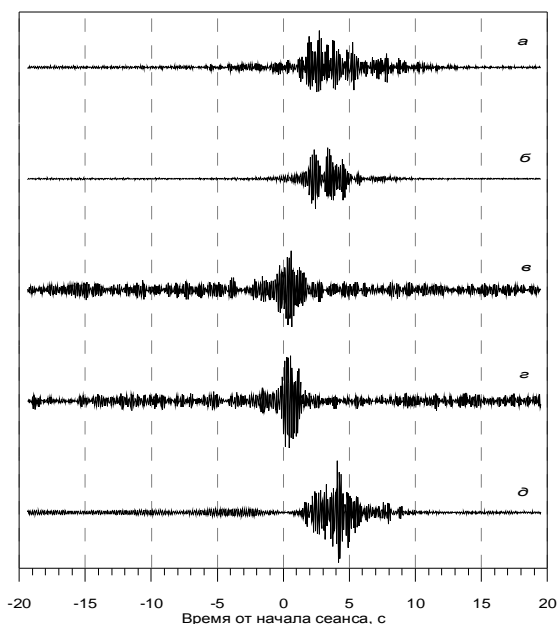


Рис. 4. Корреляционные функции между опорным свип-сигналом и физическими сигналами: сейсмическим (а), акустическим (б), электрическим (в – электрометр с антенной, г – электрометр струнного типа) и магнитным (д) [Кузнецов и др., 1999].

Возмущения электрического поля на частоте сейсмодвижителя (полезный сигнал) обнаружены как при работе электромеханических вибраторов, так и вибратора с пневматическим приводом. Последнее указывает на геофизическое происхождение этих возмущений, а не на связь его с работой сейсмодвижителя как технического устройства.

В июне 1998 г. измерения электрического поля были выполнены двумя электрометрами в свип-режиме сейсмодвижителя ЦВ-100 на расстоянии около 700 м (рис. 4), где также представлены корреляционные функции между опорным сигналом и данными других датчиков. Оба электрометра зарегистрировали единственную моду с практически нулевым запаздыванием. Это позволяет предположить, что возмущения электрического поля не связаны с акустическими или сейсмическими колебаниями в окрестности датчиков, а возбуждаются процессами, происходящими вблизи сейсмодвижителя.

Вариации E в эпицентре землетрясения. Измерения атмосферного электрического поля проводились на сейсмостанции "Акташ" в ноябре 2003г, примерно через месяц после сильного (с магнитудой 7.5, по оценке ГС СО РАН) Чуйского землетрясения, произошедшего на юге Горного Алтая на территории Кош-Агачского района 27 сентября 2003 г. в 11 час. 33 мин. по Гринвичу. Погодные условия во время измерения E были далеки от нормальных. Кроме этого, из-за ограниченной длины кабеля, датчик поля был установлен очень близко к зданию станции, недалеко от датчика находились высокие деревья, что также могло оказывать влияние на измерения (для нормальной работы электрометр рекомендуется устанавливать на открытой ровной местности). Низкая температура воздуха (в особенности ночью) и большой ее суточный перепад приводили к периодическим отказам датчика – за весь период измерений достоверная запись вариации электрического поля получена только для двух землетрясений 5 ноября.

На рис. 5 представлен 25-минутный фрагмент записи акустического датчика и электрометра, на котором землетрясения обозначены как "N2" и "N3". Кривая E получена из исходных данных фильтрацией низкочастотных составляющих (частоты ниже 5 Гц). Как видно на рис. 6, оба землетрясения достаточно уверенно проявляются как в записи электрического поля, так и в инфразвуке.

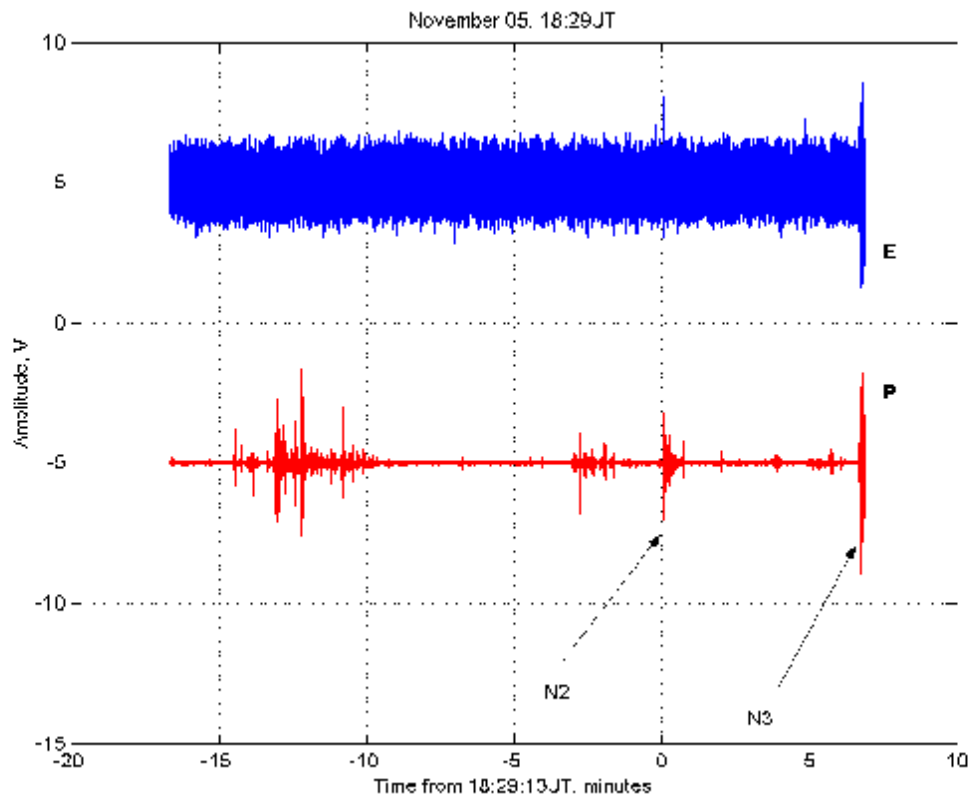


Рис. 5. Записи вариаций атмосферного электрического поля (E) и инфразвука (P) во время двух землетрясений 5 ноября (N2 и N3). Время по оси абсцисс отсчитывается в минутах от момента первого землетрясения (N2). Амплитуда сигналов дана в вольтах; к сигналу (E) применен множитель 10^3 ; кривые для наглядности смещены.

Основная проблема при идентификации сигналов, генерируемых при землетрясении в различных геофизических полях, состоит в доказательстве того, что датчики не регистрируют собственные механические колебания при толчке, т.е. не работают как сейсмографы. В случае на рис. 6 таким доказательством в определенной степени может быть отсутствие сигналов в E во время достаточно сильных сигналов в акустике, например, видимые за 10-13 мин. до землетрясения, хотя сильный инфразвуковой сигнал не обязательно должен сопровождаться значительными механическими колебаниями почвы, а значит и электрометра. Но, с другой стороны, датчик "E" не реагировал на заведомо сильные вибрации, возникающие при передвижении по территории станции автомобиля. Еще одним фактором является существенное различие спектров акустических сигналов от землетрясения и спектров помех (скорее всего связанных с перемещениями сотрудников по территории станции). В спектрах акустических сигналов от землетрясения, большая часть энергии лежит в высокочастотной области, в то время как в спектрах помех, – в низкочастотной. При большей чувствительности электрометра на высоких частотах это может приводить к селективности воздействия. Однако спектры сигнала E , вычисленные для временных интервалов, охватывающих период землетрясения и вне его, представляют собой спектр "белого" шума и различаются только амплитудой во всей полосе частот (больше 5 Гц).

Изложенное выше позволяет предположить, что наблюдаемые во время землетрясений сигналы в электрическом поле (рис. 5) представляют собой действительные вариации электрического поля. На рис. 6 показаны взаимные корреляционные функции (ВКФ) между акустическим и электрическим сигналами. ВКФ определены по фрагментам записей, полученных во время землетрясений (№ 2 и № 3), и

фрагментам фоновых записей, как без сильной акустической помехи, так и с сильной помехой. ВКФ для наглядности смещены по вертикали. Как видно из рис. 6, фоновые сигналы не коррелируют, тогда как ВКФ(Р,Е) во время землетрясений достигает $-0.2 \dots -0.4$ при нулевом сдвиге. Более детальный анализ позволяет выделить сдвиг примерно на $1/3$ интервала дискретизации, который связан с задержкой между последовательно опрашиваемыми каналами АЦП и равный 6 мс для датчиков "Р" и "Е".

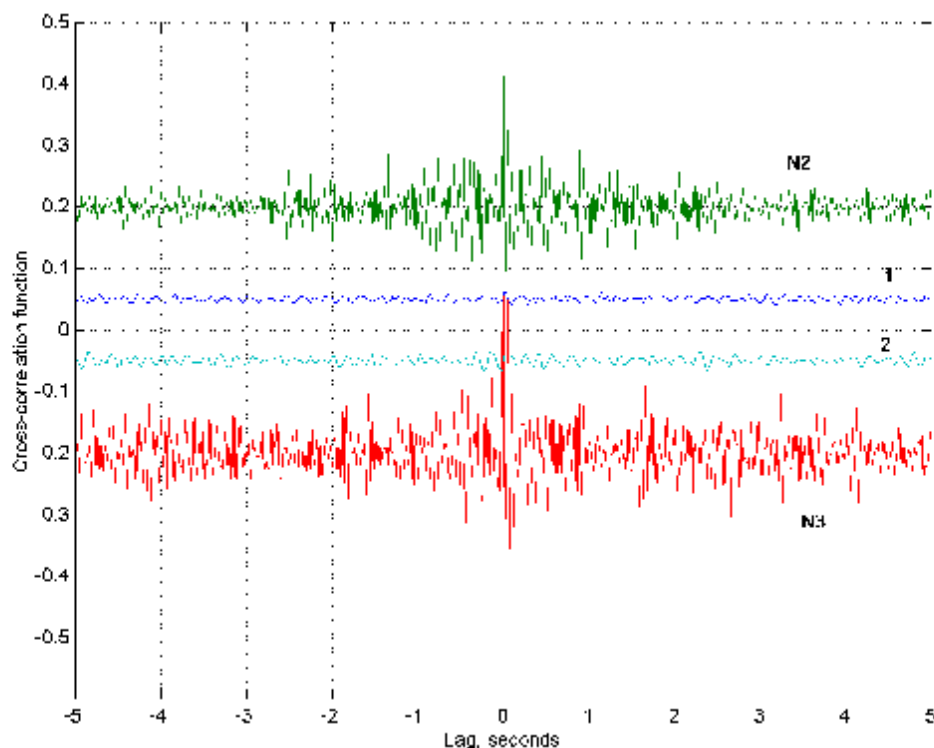


Рис. 6. Взаимные корреляционные функции между инфразвуковым (P) и электрическим (E) сигналами. "N2", "N3" - ВКФ вычислены по фрагментам записей во время землетрясений 5 ноября (см. №2 и №3 в таблице), "1" и "2" - ВКФ вычислены по записи фона и записи, содержащей сильную помеху в акустике. По оси абсцисс - запаздывание в секундах. Кривые для наглядности смещены по вертикали.

Синхронные по времени вариации электрического поля E и инфразвука P позволяют предположить, что сигнал E во время землетрясения может быть генерирован при колебании во время толчка электрических зарядов в районе сейсмостанции (при этом ожидается, что колебания будут синфазны на значительной площади).

Унитарная вариация в ионосфере

УТ-вариация в мезосфере. Авторы [Zadorozhny, Tyutin, 1997] анализировали измерения электрического поля на мезосферных высотах, которые проводились с использованием ракет в течение почти 20 лет. По мнению авторов, электрическое поле на высотах 50 – 70 км (величина $E \approx 1$ В/м) испытывает УТ-вариацию, аналогичную той, которая обнаружена у приземного E . Этот результат находится в согласии с обнаруженной нами УТ-вариацией в ионосфере.

УТ-вариация в ионосфере и магнитосфере. Корреляция УТ-вариации атмосферного электричества с ионосферой и магнитосферой обнаружена нами впервые. Как было показано нашими исследованиями, унитарную вариацию, аналогичную УТ-вариации поля E , удалось выделить в F-слое ионосферы. Нами использовались данные 26 ионосферных станций вертикального зондирования ионосферы, расположенных в средней широте

северного полушария. После отбора суточных вариаций на мировой сети станций, выяснилось, что после сравнительно простой обработки этих данных, критическая частота F-слоя ионосферы ($foF2$) при изменении мирового (универсального -UT) времени ведет себя аналогично величине атмосферного электрического поля E .

Методы получения унитарной вариации описаны в [Kuznetsov et al., 1990; Плоткин и др., 1992; Kuznetsov et al., 1993]. Первый метод основан на наблюдаемом малом отличии ежесуточных зависимостей $foF2$ 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 местного времени 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 и UT-изменений суточного хода, вычисляемая на данной широте величина не будет постоянной. Она имеет простой смысл: это мгновенное среднее значение частоты $foF2$ 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 $foF2$.

Однако не всегда можно подобрать обсерватории на фиксированной широте с долготным распределением, позволяющим применить линейную интерполяцию суточного хода по долготе. Можно предложить 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 $foF2$ 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 $foF2$.

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 (рис. 7-а). Оказалось, что суточные пространственно временные изменения критической частоты $foF2$ -слоя среднеширотной ионосферы содержат поле унитарной вариации. Унитарная вариация характеризуется в географической системе координат синхронным изменением $foF2$ по мировому времени в течение суток на всех долготах круга заданной широты. Основное наше внимание было направлено на изучение интегральных характеристик суточной унитарной вариации $foF2$. В качестве такой характеристики рассматривалось мгновенное среднедолготное значение этой величины. Результаты расчетов показали наличие устойчивой вариации, зависящей от мирового времени с максимумом в 19 UT, и сходство унитарных вариаций ионосферного параметра $foF2$ и атмосферного электрического поля E , 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.

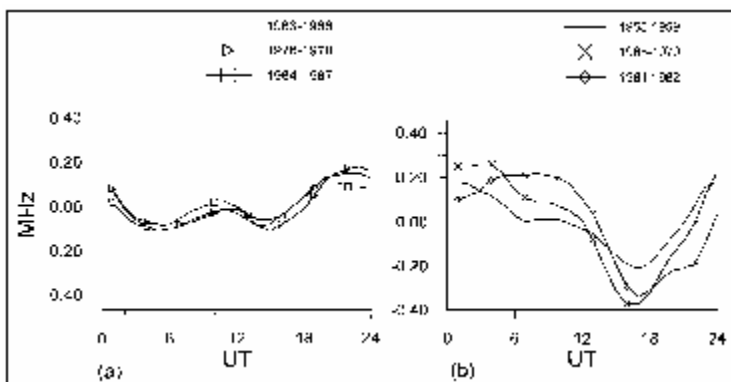


Рис. 7. Унитарная вариация $foF2$ усредненная за годы минимумов а: 1963-1966; 1976-1978; 1984-1987; и максимумов б: 1958-1959; 1968-1970; 1981-1982 гг. для трех циклов солнечной активности [Кузнецов и др. 1998].

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 нТ. 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.

Исследована зависимость UT-вариации $foF2$ от солнечной активности [Кузнецов и др. 1998]. 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. 7-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.

Θ-аврора и унитарная вариация

Известно, что полярные сияния чаще происходят в районе Северного полюса, причем, даже не в районе геомагнитного полюса. Они сосредоточены в так называемом овале полярных сияний, расположенном в районе Северного полярного круга (67° с.ш.). В Канаде овал проходит несколько южнее и приурочен району Канадской магнитной аномалии. В Сибири овал располагается несколько северней 67° , и так же приурочен к местоположению Сибирской магнитной аномалии. Авроральная зона в южном полушарии проходит вдоль побережья Антарктиды, и так же как в северном полушарии, «касается» Антарктической глобальной аномалии.

До недавнего времени исследователей устраивало объяснение возможной причины появления овала полярных сияний (ПО), предложенное С. И. Акасофу [Акасофу, Чепмен, 1974]. Однако к настоящему моменту имеются основания полагать, что результаты наблюдений полярного овала с помощью двух спутников Dynamics Explorer: DE-1 и DE-2, скорее не подтверждают модель Акасофу. Во время проведения эксперимента, спутник DE-1 производил комплекс наблюдений ПО с высоты 3-4 земных радиусов, в то время как

спутник DE-2, одновременно с первым, вел аналогичные наблюдения с высоты 500 – 800 км.

Спутник DE-1 фотографировал северный ПО с помощью специально разработанного для этой цели визуализатора изображения. Регистрировалось излучение возбужденных атомов кислорода с длинами волн 130.4 и 135.6 нм. Одновременно выполнялось измерение компонент геомагнитного поля, определялось направление движения частиц солнечного ветра. Производилась регистрация интенсивности и направления потока ионов.

На спутнике DE-2 были установлены измеритель электрического поля, анализаторы спектров энергий электронов и ионов, счетчики протонов, приборы, регистрирующие параметры плазмы ПО и солнечного ветра, магнитометры.

В одной из первых публикаций о результатах регистрации ультрафиолетовых изображений ПО сообщается об обнаружении нового явления, никогда ранее не отмечавшегося. Суть его заключается в «поразительной авроральной морфологии» [Frank et al., 1982], состоящей в том, что кроме хорошо известного аврорального овала была обнаружена полярная дуга, простирающаяся от полуденной авроры к полуночной зоне эмиссии. Изображения обнаруженной авроральной формы выглядят как греческая буква «тэта», что позволило авторам назвать это пространственное распределение авроральных эмиссий Θ -аврора (рис. 8).

Анализ опубликованных кадров Θ -авроры показал, что это явление, т.е. наличие перемычки в авроральном овале, возникает не всегда. Оказалось, что наличие перемычки в Θ -авроре соответствует «горбам» на кривой UT-вариации атмосферного электрического поля. Практически на всех опубликованных фотографиях Θ -авроры места соединения аврорального овала с полярной дугой обычно подсвечены ярче, чем сама дуга. Более того, практически во всех случаях местоположения ярких точек совпадают с глобальными магнитными аномалиями: Канадской и Сибирской в северном овале и Антарктической – в южном.

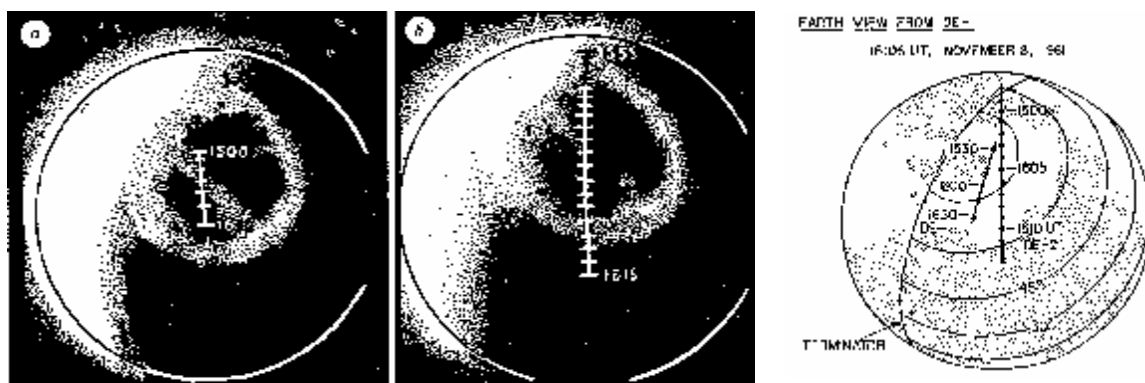


Рис. 8. Вид Θ -авроры: а – траектория движения спутника DE-1; б - спутника DE-2; в – схема проведения эксперимента [Frank et al., 1982; Frank et al., 1986].

Результаты, по одновременному наблюдению за полярными овалами северного и южного полушарий, полученные в 2001 г. [Østgaard, et al., 2003], подтвердили наши предположения. Как следует из работы [Østgaard, et al., 2003], наблюдения проводились в течение времени от 16 до 20 UT, т.е. соответствовали максимальному значению E во время UT-вариации (19 UT). При этом в северном секторе авроральной зоны перемычка Θ -авроры наблюдалась, а в южном – нет. Перемычка возникает в южном полярном овале в момент времени, когда на Земле ~ 12 LT. На картинке полдень приходится примерно на 120° E, что соответствует ~ 8 UT. Этот факт ещё раз подтверждает, что атмосферное электрическое поле Земли связано с явлениями, происходящими в авроральных зонах.

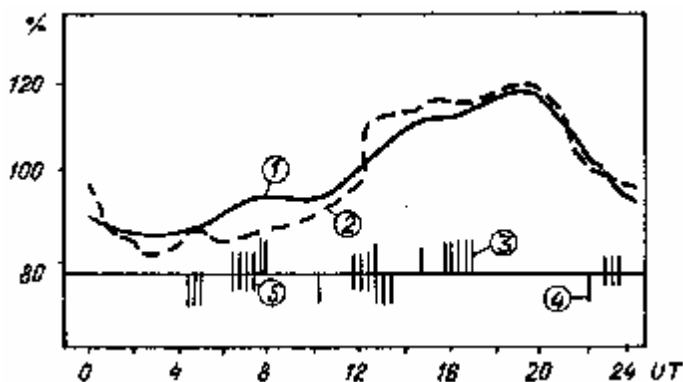


Рис. 9. Унитарная вариация E (1), изменение ионосферного потенциала (2) [Марксон, 1982], поведение полярной перемычки (дуги) Θ -авроры: 3 — устойчивая дуга, 4 — дуга отсутствует, 5 — наличие дуги неоднозначно [Кузнецов и др., 1989].

Молнии и спрайты

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, к ионосфере и 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 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.

Авторы [Sato, Fukunishi, 2003] провели наблюдение (регистрации ОНЧ, 1 – 100 Гц) за частотой появления спрайтов в период с 19.06.01 г. по 20.01.02 г. на двух обсерваториях Syowa в Антарктиде и Onagawa в Японии. Зарегистрировано 715 500 событий. Средняя частота появления спрайтов 720 событий в день. Спрайты локализованы в Северной и Южной Америке, Африке и Юго-восточной Азии.

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 (рис. 10). Спрайты преимущественно красные, наиболее яркая часть — голова (66 - 74 км), выше — тонкие светящиеся линии — волосы. Под головой — темная полоска — воротник (ожерелье), ниже — усы, которые простираются до 40-50 км и меняют цвет от красного, 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].

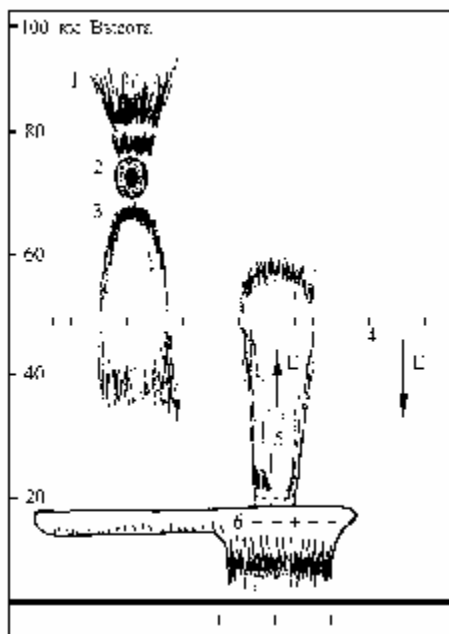


Рис. 10. Внешний вид спрайтов и голубых струй. Слева схема: спрайта (1 - 3) и голубой струи (5), грозовое облако (6) [Rairden, Mende, 1995]. Справа – рисунок.

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 (см. рис. 10), возникающих при электрическом пробое газового промежутка [Pasko et al., 1996; Sukhorukov et al., 1996]. Материнское облако имеет, как правило, на верхней кромке положительный, а на нижней, – отрицательный заряды (см. рис. 10). В верхней части (голове) синей струи то же 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 STAR Стенфордского Университета (научный руководитель U. Inan) считают, что наличие спрайтов изменяет параметры электрического контура верхней атмосферы [Pasko, et al., 1998]. Согласно их модели, движущийся вверх спрайт, как бы расположен между двумя “обкладками конденсатора” h_i и h_r , которые движутся вместе со спрайтом (рис. 11-а). 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. Рис. 11-б показывает, как искажается атмосферное электрическое поле E_k в присутствии дополнительного заряда в 1000 кулон, расположенного на высоте 10 км в свободном пространстве между двумя проводящими пластинами: Землей и ионосферой. Рисунок иллюстрирует распределение поля после разряда: на высоте ниже 50 км, $E < E_k$, а на больших высотах за счет влияния спрайта величина поля оказывается больше начальной E_k . Аналогичная ситуация наблюдается и с проводимостью. Кроме этого, в модели спрайта [Pasko, et al., 1998] рассмотрен возможный механизм генерации интенсивных радиоволн в диапазоне килогерц, связанный с разрядом молнии. 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.

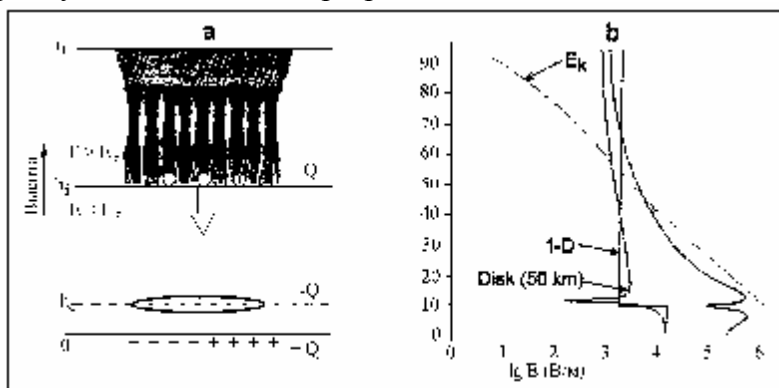


Рис.11. Влияние спрайта на параметры электрического контура «Земля-ионосфера».

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, различие 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]. Природа возбуждения и распространения естественных электромагнитных импульсов в диапазоне единиц Гц - десятков килогерц, распространяющихся в резонаторе Земля-ионосфера, применительно к проблеме выяснения роли электромагнитного излучения в физике спрайтов, изучалась в [Nickolaenko, Hayakawa, 1998]. Авторы показали, что на расстояниях от источника до приемника 1, 5, 10, 15 и 20 тыс. км, спектры сигналов в частотном диапазоне выше 40 Гц заметно различаются. 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.

Шаровая молния

Литература, касающаяся различных моделей шаровой молнии (ШМ) огромна. Авторы работ, посвященных этой проблеме, предложили колоссальное количество всевозможных вариантов моделей и идей. Среди множества работ, опубликованных за последние годы, можно отметить широкое разнообразие вариантов внутреннего устройства шаровой молнии: от самых нелепых [Торчигин, 2003], до вполне правдоподобных [Аланиян, 2002; Григорян, 2002; Натяганов, 2003]. Недавно появилось сообщение, что шаровую молнию устойчиво получают в результате импульсного электрического разряда в воде [Егоров и др. 2004]. Этой проблемой занимались многие известные физики, в том числе и Нобелевский лауреат П.Л. Капица (1955), Б.В.Войцеховский (1974), Б.М. Смирнов (1988), С. Сингер (1973) и др. Однако все авторы работ, особенно опубликованных в последнее время, признают, что наиболее адекватная модель шаровой молнии предложена Стахановым (1973, 1996).

Преобладающее большинство авторов разнообразных идей, касающихся природы ШМ полагали её как объект электрический, состоящий из низкотемпературной плазмы, однако мало кто из них рассматривал физику ШМ в контексте природы атмосферного электричества и, более того, как один из её элементов.

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 Эльстера и Гейтеля. В основе модели авторов положена предложенная ими т.н. «индукционная теория». Суть идеи состоит в том, что «большая» капля воды поляризуется в электрическом поле таким образом, что в верхней части капли скапливается отрицательный заряд, а в нижней – отрицательный. Эта большая капля взаимодействует с более мелкими, на которых индуцируется заряд того или иного знака, который распределяется в пространстве за счет разных скоростей падения капель.

Модель Вильсона. Отличается от предыдущей только тем, что в этой теории дополнительно учитывается взаимодействие капли с ионами.

Модель Симпсона. Теория Симпсона построена на использовании эффекта Ленарда электризации при разбрызгивании воды, причем мелкие капельки оказываются заряженными отрицательно, а крупные – положительно.

Модель испарения. Идея генерации заряда при испарении обсуждалась во второй половине прошлого столетия Томсоном, Пельтье и др. очень оживленно. Тогда же было установлено экспериментально, что струя пара несет значительный положительный заряд [Герасименко, 1976].

Электризация капель. По данным экспериментов, проведенных 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.

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 в поле силы тяжести (g). При заданных величинах массы (m) и подвижности (u) капель, поле E будет равно:

$$E = [(u_1 m_1 - u_2 m_2) / (u_1 q_1 + u_2 q_2)] g \quad (4)$$

Так как величина подвижности частицы (капли) $u = 1/(6\pi\eta r)$ в значительной степени определяется вязкостью среды η и размером капли, Френкель заменяет: $u_1 \sim 1/r_1$; $u_2 \sim 1/r_2$, и получает:

$$E = (4\pi r g / 3) \cdot (r_1^2 - r_2^2) / (q_1/r_1 + q_2/r_2) = 4\pi r g r^2 / 3j, \quad (5)$$

что для воды дает: $r = 1$, $g = 1000$, $j = 0.1$ В, $r = 10$ мкм, $E = 10$ CGSE = 3000 В/см.

Полученную оценку Френкель сравнивает с напряженностью электрического поля на земной поверхности при безоблачной погоде $E = 1$ В/см и $E = 150$ В/см - в облаках. Сомнение у него вызывает принятое им значение $r = 10$ мкм. Действительно, сомнение Френкеля, как будет показано ниже, вполне справедливо, т.к. реальный размер капель, принимающих участие в процессах электризации атмосферы, значительно меньше.

Тверской (1949), сравнивая различные модели образования и разделения зарядов в электрическом поле, отметил, что Френкель, в отличие от других авторов, рассматривает электрическое поле в атмосфере не как следствие наличия отрицательного заряда Земли и положительного заряда атмосферы, а как причину возникновения этих зарядов.

Согласно развиваемым здесь представлениям, 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 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:

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

где V/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:

1) потенциальной энергии ориентационного взаимодействия:

$$W = 2/3 \cdot m^2/kT L^6 \quad (m – дипольный момент), \quad (7)$$

2) поляризационной энергии:

$$W = 2am^2/L^6 \quad (a – коэффициент поляризации), \quad (8)$$

3) энергии, обусловленной дисперсионным эффектом:

$$W = 3/4 \cdot hna/L^6, \quad (9)$$

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

Для N -молекул энергия притяжения определяется их числом:

$$W = Nr/2L^6. \quad (10)$$

Таким образом, видно, что взаимодействие молекул определяется их электрическими свойствами. Эти свойства проявляются особо при фазовых переходах, когда возникают не скомпенсированные 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 (100Å) и большому (> 550 Å).

Вращение плазмосферы. Авторы модели базируются на идее Ландау и Лифшица, 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 ω_0 , о “магнитосферную периферию”. Разность потенциалов, приложенная к атмосферному промежутку, $U = w_0M/cr_0$, 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. Автор этой (1997) и ряда предыдущих работ обращает внимание на роль космического излучения в формировании “электрической машины Земли” (ЭМЗ). Он учитывает то обстоятельство, что величина атмосферного электрического поля распределена вдоль высоты атмосферы весьма неравномерно (см. рис. 1): около Земли E принимает самое большое значение, затем довольно резко спадает и затем, в районе т.н. электросферы, – E вновь велико. В принципе, в атмосфере есть 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.

Электрическая машина Рише “работает” таким образом, что 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 в [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 , как 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. Находят объяснение явления, связанные с т.н. Форбуш-эффектом.

Конденсационно-испарительная модель электрического поля

Особенности E . Прежде чем приступить к изложению сути нашей конденсационно-испарительной модели поля E (КИМ- E), уточним, что же достаточно хорошо известно об атмосферном электричестве, что является, бесспорно, полезным в предыдущих моделях, и что в них может быть ошибочным. Первая уникальная особенность атмосферного электричества состоит в том, что многолетние наблюдения показывают ее высокую стабильность и неизменность знака: Земля всегда отрицательна, а величина $E = 120$ В/м. Может ли измениться знак E в целом по Земле? 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 пробои молнии происходят не только на Землю (и ионосферу), но и между облаками, то почему знак заряда в целом по Земле никогда не меняется? Напряженность поля E всегда 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 (УТ) 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 этому загадочному явлению посвящено несколько страниц 5-го тома учебника. Тем не менее, объяснение УТ-вариации 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 отмечалось, годовая вариация количества гроз и величины E , – антикоррелируют. Это одно ставит под сомнение принятую модель. Можно еще добавить, что разряд молнии приводит к уменьшению величины E и т.п.

Роль конденсации и испарения. Обратим внимание на одно обстоятельство, подчеркнутое нами выше: часть моделей атмосферного электричества и моделей разделения зарядов базируются на идее конденсации, другие модели – на использовании механизма испарения. Рассмотрим оба этих процесса чуть подробнее и с общих позиций. Выясним, в частности, роль фазовых переходов в объяснении физической картины электрических процессов, иначе, постараемся разобраться в физике, связанной с конкуренцией между конденсацией и испарением в атмосфере.

Скорость конденсации K ($\text{с}^{-1} \text{см}^{-3}$), согласно формуле Френкеля (1949), упрощенной и модифицированной в [Кузнецов, 1985]:

$$K \sim \exp(-3/\ln S_{\Pi} + \ln S_{\Pi}), \quad (11)$$

здесь S_{Π} – пересыщение пара, равное отношению давления пара в системе к давлению насыщенного пара при той же температуре. Величина S_{Π} определяется температурой пара, его термодинамическим потенциалом, размером зародышей капель, величиной поверхностного натяжения жидкости и т.п.

Можно считать, $S_{\Pi} \sim T$, тогда:

$$K \sim \exp(-1/\ln T + \ln T) \quad (12)$$

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.

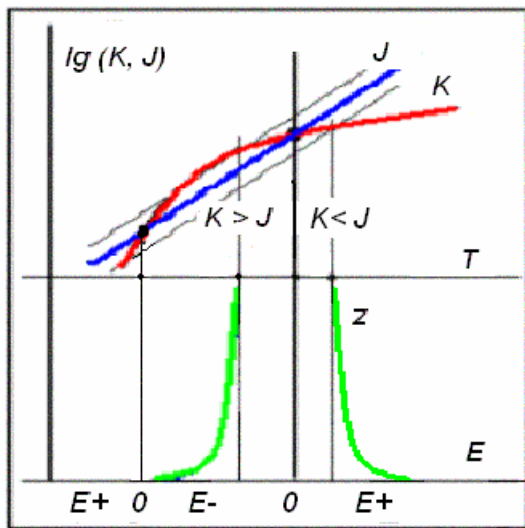


Рис. 12. Изменение lg скоростей конденсации (K) и испарения (J) в зависимости от температуры T – вверх. Внизу – полярность электрического поля E , как функция отношения J и K : $E +$, когда $J > K$, и $E -$, когда $J < K$.

В режиме испарения (кипения) в системе преимущественно рождаются пузыри пара, скорость образования которых J ($\text{с}^{-1} \text{см}^{-3}$):

$$J \sim \exp(-W/kT), \quad (13)$$

где W – энергия, необходимая для образования пузыря критического размера. Зависимость K и J от температуры среды T изображена на рисунке 12, из которого следует, что смена

преимущества одного режима над другим происходит дважды. Пока нас будет интересовать правая точка, в которой выше температура и скорости процессов. При температуре T_2 скорости процессов становятся равными, это, казалось бы, должно означать, что система достигает термодинамического равновесия. На самом деле всё обстоит в точности наоборот: такая ситуация ближе к критическому, крайне неустойчивому состоянию. В атмосфере температура $T_2 \approx 26.5^\circ \text{C}$ считается критической для возникновения неустойчивости, результатом развития которой является, в частности, возникновение тайфунов над поверхностью океанов. Принято считать, что именно при этой температуре процессы испарения начинают превалировать над конденсацией. Как известно, среднюю температуру Земли, усредненную по земному шару и времени года, принято считать: $T \approx 15^\circ \text{C}$, что значительно ниже T_2 . Таким образом, на Земле, в её атмосфере, согласно нашей феноменологической модели, процессы конденсации имеют преимущество перед испарением. В такой постановке нет предмета спора о

преимущественной роли испарения или конденсации в электрических явлениях. Преимущество однозначно остается за конденсацией. Так как средняя температура Земли величина очень стабильная и, как правило, речь идет о возможных вариациях её от года к году не более единиц процентов, то и величина E обязана поддерживаться всей атмосферой на том же уровне.

Обратимся к формуле Френкеля (5):

$$E = (4\pi r g / 3) \cdot (r_1^2 - r_2^2) / (q_1 / r_1 + q_2 / r_2) = 4\pi r g r^2 / 3j.$$

Френкель полагал, что величина E определяется разностью размеров между большими и малыми каплями ($r_1^2 - r_2^2$). Выскажем достаточно очевидное утверждение: рост капли обязан процессу конденсации (скорость конденсации K), а уменьшение её размера – процессу испарения (скорость испарения J), в этом случае поле E будет определяться разностью скоростей: $E \sim (K - J)$. Будем полагать поле отрицательным (E^-), когда $K > J$, и положительным (E^+), - в обратной ситуации: $K < J$. Современное поле (E^-) направлено к Земле, на поверхности которой скапливаются отрицательные заряды, в то время как в ионосфере – положительные. Значительная роль процессов конденсации и испарения в рассматриваемой модели атмосферного электричества позволяет обозначить её как конденсационно-испарительную модель атмосферного электрического поля E (КИМ- E).

Распространяя модель на другие планеты, можно попытаться выяснить вопрос, существует ли электрическое поле в атмосферах Марса и Венеры, у которых, по всей вероятности, выполняются условия: $T < T_1$ – у Марса, и $T > T_2$ – у Венеры? Если действительно, поле E на этих планетах существует, то соответствует ли его полярность обратной земной? Заметим, что атмосферное электричество, практически в любой из рассмотренных нами моделей, однозначно связано с наличием воды в атмосфере Земли. Это обстоятельство необходимо учитывать при обсуждении проблемы электрического поля в атмосферах других планет. Кроме этого, известно, что на Венере воды, скорее всего, нет, однако, при посадке спускаемых аппаратов на поверхность Венеры были зарегистрированы явления, напоминающие разряды молний. Эти и некоторые другие обстоятельства, дают основание полагать, что физика атмосферного электричества может оказаться сложнее, чем в любой из обсуждаемых здесь моделей.

Источник зарядов. Следуя нашей модели, процессы конденсации, т.е. процессы образования и роста капель, приводят к разделению электрических зарядов. Откуда же берутся заряды? По всей видимости, так же как и в ионосфере, основной источник зарядов в атмосфере, – это Солнце. По-видимому, образование электрических зарядов происходит и в самой атмосфере, например, при испарении и разрушении двойных электрических слоев, возникающих в каплях воды за счет её поляризационных свойств, но главную роль в любом случае играет Солнце. Обычно обсуждаются два “агента”: жесткое излучение и заряженные частицы. Принято считать, что на атмосферных высотах, в облаках, где, собственно, и происходит разделение зарядов, преимущество остается за излучением. Тем не менее, роль частиц в образовании зарядов в атмосфере, по всей видимости, не нулевая. Можно ли показать это на конкретном примере? Из наблюдений, проведенных на спутниках известно, что заряженные частицы достигают высоты, по крайней мере, порядка 150 - 300 км. В любом случае, заряженные частицы, попадающие на Землю, должны “контролироваться” геомагнитным полем.

Унитарная вариация. С целью выяснения роли заряженных частиц (скорее, роли геомагнитного поля) в формировании поля E и её унитарной вариации, построим кривую, показывающую степень отклонения геомагнитного экватора относительно экватора географического (см. рис. 13).

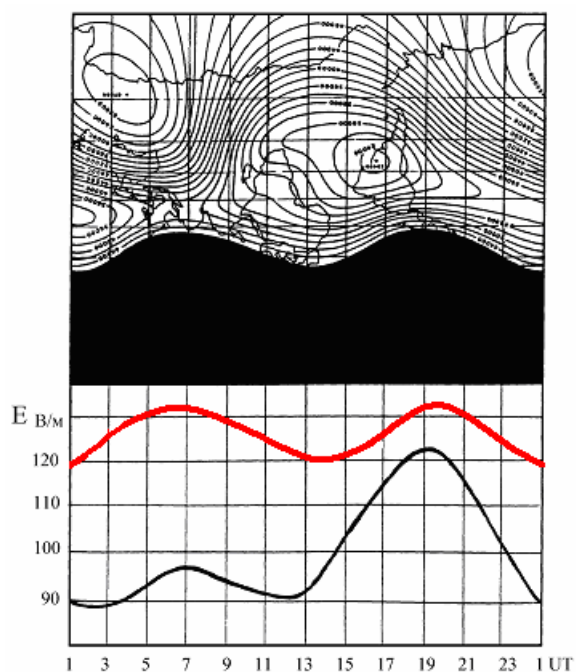


Рис. 13. График отклонения экватора геомагнитного поля относительно географического экватора и UT-вариация E .

По идее, такая кривая должна характеризовать собой отклонение формы геомагнитного поля от поля осе-симметричного диполя. На этом же рисунке, для сравнения, приведена унитарная вариация атмосферного электричества. Легко видеть хорошее совпадение двух кривых. Привязка UT-времени к географическим координатам производилась из очевидного условия: величина максимального отклонения соответствует местному времени 12 LT. В этом случае, т.к. максимальное отклонение формы геомагнитного поля относительно плоскости экватора соответствует 105° з.д., кривая имеет

первый максимум в то время, когда в Лондоне 19 часов, а второй – примерно на 12 часов ранее. Два максимума можно выделить и на кривой UT-вариации в атмосферном электрическом поле (см. рис. 2).

В такой ситуации нам необходимо найти естественное объяснение эффекта преимущественного проникания заряженных частиц от Солнца к атмосфере сквозь магнитосферу, причем, чем больше величина поля, тем больше проникание, больше концентрация зарядов, больше величина электрического поля. Это не простая задача, т.к. общепринятая точка зрения относительно механизма проникания заряженных частиц из ближнего космоса в атмосферу, говорит о том, что они попадают на Землю через “хвост” магнитосферы в область полярного каспа (полярных сияний). Тем не менее, ряд экспериментов говорит в пользу нашей модели.

Результаты наблюдений. В подтверждение правомерности такого подхода, 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 магнитосопряжена 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. Авторы этих работ обнаружили, что овал полярных сияний представляет собой, при наблюдении со спутников, замкнутое кольцо с перемычкой в виде буквы Θ . Тщательный анализ географических мест присоединения перемычки с кольцом [Кузнецов и др., 1989] показал, что эти места не случайны. Оказывается, во всех известных случаях полярная дуга и ее "перемычка" совмещаются друг с другом 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) рассмотрены 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. Авторы [Pinto, Gonzalez, 1989; Pinto et al., 1992] исследовали эффекты, связанные с проникновением высокоэнергичных частиц в магнитосферу Земли. Эксперименты проводились в районе Бразильской магнитной аномалии 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). 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 может приводить к возникновению унитарной вариации в атмосфере и ионосфере. Причем т.к. в ионосфере UT-вариация заметно слабее, чем в атмосферном электричестве, это может говорить, например, о том, что процессы ионизации в ионосфере в большей степени (в отношении плотностей нейтралов раз), чем в атмосфере, определяются жестким излучением, в то время как в атмосфере – заряженными частицами.

Электрическая схема модели. На основании изложенного, можно представить электрическую схему модели атмосферного электричества. На рис. (14) показано распределение скорости звука и температуры в промежутке Земля-ионосфера. Как мы отмечали, такой ход скорости звука характерен для двухфазной среды, что и представляет собой атмосфера, учитывая, что собственно двухфазная среда, это капли воды и ее пар. В той области, где находится минимум температуры, процессы конденсации, а, следовательно, и разделения зарядов, происходят наиболее интенсивно. Крупные капли с отрицательным зарядом падают на поверхность Земли, а водяные пары, поднимаясь выше, несут к электросфере положительный заряд. В определенном смысле такая схема напоминает генератор Ван де-Граафа, используемый в ускорителях. В этом генераторе источник зарядов, обладающий сравнительно невысоким потенциалом, за счет транспортировки зарядов с помощью диэлектрической ленты транспортера к источнику, создает очень высокое напряжение, большее нескольких МэВ. Роль транспортера в нашей схеме играет выпадение дождя и испарение воды. В этой схеме пробои между её

элементами на Землю, или на электросферу, это широкий набор явлений молний в различных ситуациях. В нашей схеме пробой молнии всегда приводит к уменьшению величины E . Причем, это явление должно наблюдаться и для отдельного разряда молнии (пробоя), и для большого количества молний, происходящих преимущественно летом.

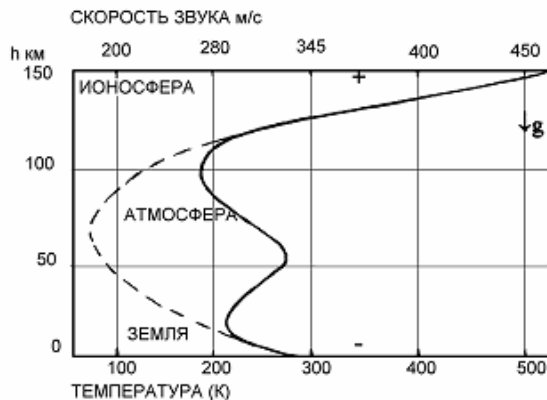


Рис. 14. Распределение температуры и скорости звука в ионосфере.

Воспользуемся формулами, показывающими распределение скоростей звука в двухфазной среде [Ландау, Лифшиц, 1986]. Скорость звука, как известно, в области фазового перехода, на границе жидкость-пар всегда меньше скорости звука в жидкости (1-я фаза) и меньше скорости звука в газе (2-я фаза):

Скорость звука в жидкости с небольшим количеством пара в виде пузырьков ($v_{жс}$):

$$v_{жс} = UmpV_1/R_gT(c_{p1}T)^{1/2}, \quad (14)$$

V_1 – удельный объем первой фазы. Скорость звука в паре (газе) с незначительным количеством жидкости в виде капелек (v_2):

$$1/v_2^2 = m/RT - 2/U + c_{p2}T/U^2. \quad (15)$$

Можно видеть, что скорости звука в двухфазной среде ($v_{жс}$ и v_2) действительно меньше, чем скорости звука в газе и жидкости, отдельно. В [Кутателадзе, Накоряков, 1984] показано, что подобное распределение скоростей звука в смеси жидкости и газа может говорить о некоторых особенностях системы с фазовым переходом (ФП). В частности, на величины скоростей звука в двухфазной среде существенное влияние оказывает характер процессов ФП и особенности тепломассообмена между фазами.

Рассмотрим особенности распределения скоростей звука в промежутке Земля – ионосфера с позиции двухфазной среды. Изменение скорости звука с высотой, в этом случае, должно было бы соответствовать пунктирной кривой (рис. 14). Реально, на этой кривой наблюдается два минимума. Оставаясь в рамках нашей модели, наличие двух минимумов на кривой может показывать, например, что минимальные значения $v_{жс}$ и v_2 пространственно не совпадают и, тем самым, обеспечивают наличие двух минимумов.

Зависимость атмосферного давления (p) от высоты (h) в поле силы тяжести определяется барометрической формулой:

$$p = p_0 \exp(-h/H), \quad (16)$$

где H – шкала высот: $H = kT/\mu mg$, μ – молекулярный вес, m – масса протона, g – сила тяжести.

Полагая атмосферу Земли двухфазной средой жидкость (вода) – пар, воспользуемся уравнением Клапейрона-Клаузиуса для оценки распределения температуры от давления:

$$dT/dp = (V_n - V_{жс})T/U, \quad (17)$$

здесь V_n , $V_{жс}$ – удельные объемы пара и жидкости, U – теплота испарения воды. Известно, что фазовые превращения веществ сопровождаются разделением электрических зарядов вблизи границы превращения фаз и возникновением т.н. двойного электрического слоя (ДЭС) (Тамм, 1966; Качурин, Бекряев, 1960). Из уравнения Гиббса-Гельмгольца для изобарно-изотермического процесса, ЭДС образовавшегося слоя (E):

$$E = e + T(\partial E/\partial T)_p, \quad (18)$$

где e – тепловой эффект, отнесенный к единице перенесенного заряда. Как следует из формул (1, 2) и рис. 14, производная dT/dp может менять знак по высоте h , следовательно, может менять знак и ЭДС образовавшегося слоя (E).

Экспериментальный материал, приведенный нами выше, позволяет утверждать, что УТ-вариация ионизации атмосферы солнечными заряженными частицами обусловлена, в

годы спокойного Солнца, формой геомагнитного поля и его асимметрией относительно оси вращения Земли. Возможно, присутствие ГМА в магнитосфере Земли играет решающую роль. В этом случае связь между геооболочками – внешняя, обязанная прониканию заряженных частиц. Однако не исключено, что геооболочки электрически связаны между собой внутренне, - путем проникания E из атмосферы на ионосферные высоты.

Электродный эффект. Отрицательные капли падают на Землю, из почвы поднимается воздух, несущий положительный заряд, в том числе и радон. Поверхность Земли заряжена отрицательно, ионосфера – положительно. Плотность положительных зарядов в атмосфере распределена неравномерно, около поверхности Земли она больше и убывает с высотой. Это явление принято называть электродным эффектом. Чем выше концентрация приземного, положительного заряда, тем выше градиент поля, выше величина E . Одной из причин уменьшения величины E относительно нормального значения может быть уменьшение концентрации положительных зарядов, или, соответственно, увеличение плотности зарядов отрицательных. Как мы отмечали, превалирование процессов конденсации над испарением, и, соответственно, рост капель, приводят к увеличению объемного отрицательного заряда. Это автоматически приводит к уменьшению величины поля E . Скорость конденсации тем больше, чем больше величина пересыщения. К аналогичному результату приводит и наличие ядер конденсации. Поэтому, снижение температуры поверхности или «вспрыскивание» в пространство электродного слоя газов, паров, заряженных частиц и других объектов, приводящих к увеличению скорости конденсации, вызывает понижение величины поля и даже его локальную смену знака.

Молнии и спрайты. Молнии очень давно известны человечеству и наверно столько же времени они вызывают интерес у исследователей, природа молний более или менее понятна. Спрайты и голубые струи обнаружены совсем недавно, однако за короткий промежуток времени построены многие модели спрайтов. С точки зрения общего подхода к проблеме атмосферного электричества и роли в этой проблеме молний и спрайтов, то причина их возникновения одна. Что касается частоты наблюдений молний и спрайтов и их возможной взаимозависимости, то здесь пока полной ясности ещё не достигнуто. Если рассматривать молнии и спрайты как способ сбросить лишний, накопившийся в грозовом облаке электрический разряд, то для этого имеются две возможности – электрический пробой либо промежутка земля-облако, либо промежутка облако-ионосфера. Причем, если эту проблему рассматривать как разряд в газе между двумя электродами, то условия для разряда в атмосферу, т.е. путем образования спрайта, – предпочтительней, чем разряд на землю. Если такая аналогия возможна, то можно воспользоваться хорошо известным экспериментальным «законом» (правилом) Пашена. Суть его состоит в том, что напряжение зажигания разряда (U) в газе линейно связано с произведением давления газа на расстояние между электродами pd . Чем меньше это произведение, тем ниже величина U (правая ветвь кривой Пашена). Величина d для спрайта больше, чем для молнии, примерно в 10 и более раз. Если принять величину давления в области формирования и распространения спрайта меньше атмосферного давления примерно в 100 – 1000 раз меньше, то pd для спрайта оказывается в 10 – 100 раз меньше, чем для молнии. Это означает, что для формирования спрайта необходимо меньшее значение U . Иначе, спрайты должны происходить чаще, чем молнии. Очевидно, что как молнии, так и спрайты являются «равноправными участниками» формирования глобальной атмосферной электрической системы. В этом плане роль гроз и молний, как основных источников формирования атмосферного электричества, становится ещё более проблематичной.

Модель шаровой молнии. Как отмечалось выше, на сегодня предложено огромное количество моделей шаровой молнии. По мнению большинства ученых, интересующихся этой проблемой, наиболее адекватная из всех предлагаемых, это кластерная модель Стаханова. Надо сказать, что из всех известных моделей ШМ, кластерная модель Стаханова, по сути, наиболее близка к развиваемому автором подходу к физике явлений атмосферного электричества, изложенному в этой и ряде предыдущих работ [Кузнецов и др., 1989; Кузнецов, 1990]. Как следует из сказанного выше, и в модели Стаханова, и в КИМ-Е используются эффекты электрической поляризации водных кластеров (аэрозоль, капелек). В нашем случае, в отличие от идей Стаханова, более подробно рассмотрены процессы конденсации и испарения, и оценена их роль в процессах электризации капель при их росте и уменьшении размеров. Наш подход, в определенном смысле, можно считать некоторым развитием идей Френкеля, как в физике атмосферного электричества [Френкель, 1949], так и, вообще, его идей в области кинетической теории жидкости [Френкель, 1975].

ШМ – пылевой кристалл? Основной элемент атмосферного электричества, это водяной кластер (капля), размером порядка сотни \AA и зарядом $\sim 10^{-14}$ кулон. Заряд кластера, как правило, отрицательный. Положительные заряды несут либо ионы, либо очень мелкие кластеры. Присутствуют и отрицательные – ионы. По-видимому, можно считать весь этот конгломерат слабо ионизированной плазмой. В такой ситуации крупные капли конденсированного вещества (воды), это своеобразные «пылинки», а сама среда – «пылевая плазма». Такие системы относятся к классу, называемому «плазмой с конденсированной дисперсной фазой» [Фортон и др. 2004].

Отнести атмосферу к плазме, пусть даже пылевой, при наличии в её составе заряженных водных кластеров, оснований нет. Слишком мала концентрация кластеров, иначе, слишком мала степень ионизации воздуха и водяного пара. Совсем другое дело, когда в силу некоторых событий, например, разряда молнии, концентрация водных кластеров резко повышается очень значительно. Если в такой ситуации находятся силы, удерживающие заряженные кластеры от кулоновского расталкивания и рекомбинации, то существование пылевой плазмы может оказаться вполне реальным делом. Возможно, реализация такой ситуации и является шаровой молнией. Некоторым плазменным образованием, имеющим довольно четкую границу и не слишком изменяемую со временем форму. Такой подход к ШМ как к конденсированному телу позволяет из общих принципов оценить величину поверхностного натяжения.

Поверхностное натяжение ШМ. Оценим величину поверхностного натяжения (α) ШМ, исходя из представлений о ней как о шаре, имеющем некоторую, достаточно четкую фазовую границу с окружающим пространством. Оценим величину α по формуле Лапласова давления ($\Delta p = \alpha/r$) из следующих соображений. Как известно, давление в одну атмосферу (1 бар) соответствует столбу воздуха равному примерно 10 км (10 км \sim 1 бар = 10^6 дин/см²). Из наблюдений ШМ известно, что она в течение времени существования сохраняет свою форму. Иначе, локальные отклонения шаровой молнии от сферической формы не превышают 1 см, что составляет одну миллионную часть от высоты атмосферного «столба». Тогда, величина Δp (\sim 1 см) \approx 1 дин/см². При выполнении этих условий поверхностное натяжение ШМ $\alpha \approx \Delta p \cdot r = 1$ дин/см. Для сравнения, у воды: $\alpha \approx 70$ дин/см.

Одна из самых сложных проблем в физике ШМ состоит в попытках объяснить феномен проникания ШМ через мельчайшие отверстия. Представим, что отверстие соизмеримо с размером кластера $r \sim 100 \text{\AA}$, тогда величина Лапласова давления $\Delta p = \alpha/r = 10^6$ дин/см² равна атмосферному давлению. Эта оценка показывает некоторую реальность обсуждаемой модели.

Силу поверхностного натяжения ШМ (F) можно оценить, умножив величину α на характерное расстояние (R) между кластерами (каплями). Полагая это расстояние равным, примерно, размеру капли ($r \sim 100 \text{ \AA}$), сила $F \approx 10^{-6}$ дин. В качестве силы, которая противодействует кулоновскому расталкиванию и заставляет одноименно заряженные капли притягиваться, может быть, например, сила Казимира.

Сила Казимира связанная с нулевыми колебаниями электромагнитного поля, по существу совпадает с запаздывающими силами Ван-дер-Ваальса [Мостепаненко, Трунов, 1990; Plunien et al., 1986]. Эта сила должна быть не меньше кулоновской силы расталкивания $F_e = Ze^2/R^2$. Здесь e – заряд электрона, R – расстояние между каплями.

Суть эффекта Казимира состоит в следующем. На единицу площади двух проводящих металлических (в пределе, – идеальной проводимости) плоскопараллельных пластин, расположенных в вакууме на расстоянии R друг от друга, действует сила притяжения F_C . Эта сила описывается формулой: $F_C = - (p^2/240) (hcS/R^4)$, где h – постоянная Планка, c – скорость света, S – площадь поверхности пластин. Сила Казимира уникальна, т.к. она не зависит ни от масс, ни от зарядов, ни от каких-либо констант связи.

Причина появления силы Казимира интерпретируется как изменение спектра нулевых колебаний электромагнитного вакуума из-за обращения в нуль тангенциальной составляющей электромагнитного поля на пластинах. На начальной стадии экспериментов было обнаружено, как это и предсказывал Казимир, притяжение между металлическими пластинами в вакууме. В последствии экспериментаторы стали испытывать притяжение между различными объектами. В частности, этот эффект экспериментально наблюдался не только в глубоком вакууме, и не при очень низкой температуре, и не между металлами, а и в других возможных ситуациях, в частности, между диэлектриками различной формы [Дерягин и др., 1985]. Экспериментально исследованы далеко не все возможные ситуации и способы измерения силы Казимира. Эти исследования продолжаются в различных научных центрах [Lamoreaux, 1997; Mohideen, Roy, 1998].

Подставим принятые нами ранее значения r в формулу $F_C = - (p^2/240) (hc/r^2)$, получим: $F_C \approx 10^{-17}/r^2$, полагая: $S = r^2$, $r = 100 \text{ \AA} = 10^{-6}$ см, сила F_C оказывается равной оцененной нами силы поверхностного натяжения $\sim 10^{-5}$ дин. Полученные нами оценки показывают, что предлагаемый механизм возникновения поверхностного натяжения ШМ, возможно, имеет место в реальной ситуации.

Зная размер водяного кластера (r) и его нескомпенсированное поле (~ 0.1 В), а так же воспользовавшись оценкой величины заряда одной капли в кулонах ($q = 10^{-14}$ кулон), можно оценить предельную величину плотности энергии: $E = qe/r^3 \approx 1$ кДж/см³. Это очень большая величина, однако, по порядку величины она приближается к верхним оценкам энергии ШМ.

Время формирования ШМ. Оценим время формирования ШМ, исходя из возможной аналогии между образованием ШМ и коагуляцией дождевой капли. Обозначим характерное время столкновения частицы водяного пара, несущей электрический заряд, с ШМ (“каплей”), через t . Время $t = (s n v)^{-1}$, где $s = p r^2$ – сечение “капли”, $n = r/m$ – концентрация частиц в газе, m – масса частицы, v – её скорость, $R = (V_k)^{1/3}$ – радиус капли (радиус ШМ), $V_k = V_q k$ – объем капли, V_q – объем электрически заряженной частицы, k – число частиц в капле.

Время роста капли:

$$t = \partial dk / s n v, \quad (19)$$

т.к. $s = p(V_q k)^{2/3}$, то $t = k^{1/3} / (V_q^{2/3} n v)$, или $t \gg R / (V_q n v)$. Подставляя значение n и заменяя: $m/V_q = r_n$ – плотность воды, получаем выражение для t :

$$t = (r_n / r_o)^{1/3} (r/v), \quad (20)$$

здесь r_o – плотность заряженных частиц водяного пара

Из формулы 20 следует, что время формирования ШМ пропорционально его размеру, обратно пропорционально исходной плотности вещества и скорости дрейфа

молекул воды. Подставляя выражение для $v = u(mg - qE)$, формулу Стокса для подвижности:

$$u = 1/6\pi\eta r,$$

где η – вязкость воздуха, получаем формулу:

$$t_{min} \gg 6\pi\eta R / r^2 n(mg - eE). \quad (21)$$

Если не учитывать вклада атмосферного поля E в процесс образования ШМ ($mg \gg eE$), и учитывая, что n – плотность водяного пара, насыщенного электрическими зарядами g_0 , получаем:

$$t_{min} \gg 6\pi\eta R / r^2 g_0. \quad (22)$$

Вязкость воздуха η при давлении 1 атм. и т-ре $25^\circ \text{C} = 18.37 \cdot 10^{-6}$ Па с, размер ШМ заметно не варьируется (~ 10 см), сила тяжести постоянна и размер r , и масса водного кластера m , - не меняются значительно, время образования ШМ полностью определяется концентрацией водных кластеров, несущих электрический заряд n :

$$t_{min} \sim 1/n$$

Эта формула подтверждает очевидное условие для возникновения ШМ: введение источника электрических зарядов, дополнительного, к источнику, постоянно существующему в атмосфере. Очевидно, введение такого дополнительного источника ионизации водных кластеров приведет к усилению процессов рекомбинации электрических зарядов. Формула (22) позволяет оценить величину необходимой концентрации зарядов n :

$$n = 6\pi\eta R / r^2 g_0 t$$

Примем: $t = 10^{-3}$ с; $r = 1000 \text{ \AA} = 10^{-7}$ м; $m = 10^{-18}$ кг; концентрация зарядов n оказывается порядка $10^{25} \text{ м}^{-3} = 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Учитывая то, что одна капля воды несет заряд $\sim 10^{-14}$ кулон, концентрация заряженных капель будет составлять 10^{14} см^{-3} . Несмотря на то, что оценка n явно завышена, она показывает, что степень ионизации (число свободных зарядов) водяного пара, пригодного для возникновения ШМ, должна быть очень высокой. Для сравнения приводим число Лошмидта (концентрация атомов идеального газа при нормальной температуре и атмосферном давлении): $3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Насколько известно, нет ни одного наблюдения за временем образования ШМ. В природе получить данные по времени образования ШМ по-видимому вообще бесперспективно. Казалось бы, в лабораторных экспериментах по созданию образа ШМ можно было бы это время измерить. Среди опубликованных результатов по лабораторному моделированию процесса формирования ШМ [Степанов и др., 2003; Егоров и др., 2004; Кунин, 2003]; Фуров, 2003], – таких данных нет. А ведь знание характерного времени формирования ШМ позволило бы сделать оценки требуемой концентрации заряженных кластеров.

Заключение

В заключение ещё раз отметим особенности атмосферного электричества:

- Постоянство электрического поля по величине и знаку.
- УТ-вариации в: – атмосфере; – мезосфере; – ионосфере: – магнитосфере.
- Связь УТ-вариации E с Θ -авророй.
- Наличие «электродного эффекта».
- Связь с прозрачностью ионосферы.
- Связь с инфразвуком.
- Связь с молниями и спрайтами.

Многочисленные модели атмосферного электрического поля:

– Эльстера и Гейтеля; Вильсона; Симпсона; Томсона и Пельтье; электризации капель.

– Френкеля и Никандрова.

– Вращения плазмосферы; Рише; грозового электричества; Электродного эффекта и др. не дают полного понимания физики этого явления. Это требует создания более

совершенных моделей. Одной из таких попыток можно считать конденсационно-испарительную модель атмосферного электричества (КИМ-Е).

КИМ-Е устанавливает некоторые новые взаимосвязи явлений в атмосфере:

1. Соотношение между скоростями конденсации и испарения – определяет знак E .
2. Поступление зарядов в атмосферу определяется конфигурацией магнитосферы.
3. UT-вариация в атмосфере и магнитосфере обязана неравномерному по пространству поступлению зарядов.
4. Испарение и конденсация, дожди, грозы, молнии (в том числе и ШМ), спрайты – звенья единой цепи атмосферного электричества.

В таком, казалось бы, близком к нам явлении атмосферного электричества, в поле которого человечество существует постоянно с момента его зарождения, остается очень много нерешенных вопросов. Перечислять их нет необходимости. Многие из них обсуждались в тексте статьи.

Литература

- Аланакян Ю.Р. Водородная шаровая молния // ДАН 2002. Т. 385, № 6. С. 747-749.
- Магнитосферные эффекты в атмосферном электричестве / Ансен А.Г., Канониди Х.Д., Чернышева С.П. и др. – М.: Наука, 1988. 150 с.
- Бендилет О.И., Чернышева С.П., Шефтель В.М. Вариации атмосферного электрического поля в высокоширотной зоне во время магнитных возмущений // Геомагнетизм и Аэронавигация. 1985. Т. 25. С. 628-632.
- Беспалов П.А., Чугунов Ю.В. Вращение плазмосферы и природа атмосферного электричества // ДАН. 1994. Т. 337, № 4. С. 467-469.
- Брагин Ю.А., Коненко А.Ф. и др. О связи напряженности электрического поля в атмосфере с солнечными вспышками и геомагнитными явлениями // Вопросы исследования нижней ионосферы. Новосибирск. 1972. С. 135-139.
- Вернов С.Н., Савенко И.А., Шеврин И.И. и др. Внешний радиационный пояс Земли на высоте 320 км // ДАН СССР. 1961. Т. 140, №4. С. 787-790.
- Войцеховский Б.В., Войцеховский Б.Б. Природа шаровой молнии // ДАН СССР. 1974. Т. 218, № 1. С. 77-80.
- Герасименко В.И. Электрические и метеорологические поля нижней тропосферы // Атмосферное электричество. –Л.: Гидрометеиздат. 1976. С. 25-31.
- Гирс С.П., Шварц Я.М. Вопросы начальной стадии электризации капель // Атмосферное электричество. –Л.: Гидрометеиздат. 1976. С. 127-129.
- 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.
- Григорян С.С. О механизме возникновения шаровой молнии // ДАН. 2002. Т. 385, № 6. С. 750-753.
- Егоров А.И., Степанов С.И., Шабанов Г.Д. Демонстрация шаровой молнии в лаборатории // УФН. 2004. Т. 174, №. 1. С. 107-109.
- Иманкулов А.Ч., Струминский В.И., Татаринцев С.П., Токтомышев С.Ж. О возможности прогнозирования землетрясений по измерениям напряженности электрического поля атмосферы // Электрическое взаимодействие геосферных оболочек. –М.: ОИФЗ РАН. 2000. С. 119-121.
- Электричество свободной атмосферы / Имянитов И.М., Чубарина Е.В. –Л.: Гидрометеиздат, 1965. С. 240.
- Электричество облаков / Имянитов И.М., Чубарина Е.В., Шварц Я.И. –Л.: Гидрометеиздат, 1971. С. 94.
- Имянитов И.М., Шифрин К.С. Современное состояние исследований атмосферного электричества // УФН. 1962. Т. 76, № 4. С. 593-641.
- Катица П.Л. О природе шаровой молнии // ДАН СССР. 1955. Т. 101, № 2. С. 245-248.
- Качурин Л.Г., Бекряев В.И. Исследование процесса электризации кристаллизующейся воды // ДАН СССР. 1960. Т. 130, № 1. С. 57-60.

- Проблемы атмосферного электричества / *Колясников Ю.А.* Препринт. –Магадан. СВКНИИ ДВО, 1992. 30 с.
- *Кунин В.Н.* Экспериментальные исследования лабораторного аналога шаровой молнии // Тезисы конференции по атмосферному электричеству. –Владимир. 2003.
- Эффекты фазовых переходов при воздействии на вещество энергии высокой плотности. / *Кузнецов В.В.* –Новосибирск. ИГиГ. 1985. С. 72.
- Унитарная вариация ионосферных параметров / *Кузнецов В.В., Плоткин В.В., Нестерова И.И., Поздеева М.С.* Препринт ИГиГ. –Новосибирск. 1988. С. 30.
- Физика Земли. Новый взгляд на некоторые проблемы / *Кузнецов В. В. и др.* – Новосибирск: Наука, 1989. 128с.
- Физика Земли и Солнечной системы / *Кузнецов В.В.* Новосибирск. ИГиГ. 1990. 216с.
- Результаты наблюдений атмосферного электрического поля на равнинной среднеширотной обсерватории «Ключи» (Новосибирск) / *Кузнецов В.В., Павлов А.А., Павлов А.Ф.* – Новосибирск. ОИГГиМ. 1991. Препринт № 14. 13 с.
- *Кузнецов В. В., Плоткин В. В., Нестерова Г. В., Нестерова И. И.* Унитарная вариация foF2 и солнечная активность // Геомагнетизм и Аэронавигация. 1998. Т. 38, № 2. С. 107-111.
- *Кузнецов В.В., Плоткин В.В., Хомутов С.Ю. и др.* Исследование геофизических возмущений при вибросейсмическом зондировании // Геология и геофизика. 1999. Т. 40, № 3. С. 442-456.
- Тепломассообмен и волны в газо-жидкостных системах / *Кутателадзе С.С., Накоряков В.Е.* –Новосибирск: Наука, 1984. С. 301.
- Гидродинамика / *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* –М.: Физматлит, 2001. С. 732.
- *Марков М.Н., Мустель Е.П.* Пространственно-временные эффекты солнечно-земных связей в тропосфере и термосфере // *Астрономический журнал.* 1983. Т. 60. С. 417-421.
- *Марксон Р.М.* Атмосферное электричество и проблемы связи между солнечной активностью и погодой // *Солнечно-земные связи, погода и климат.* –М.:Мир, 1982. С. 242-264.
- *Моргунов В.А.* Пространственные неоднородности электрического поля как фактор лито-ионосферных связей // *Электрическое взаимодействие геосферных оболочек.* –М.: ОИФЗ РАН. 2000. С. 106-113.
- *Натяганов В.Л.* Электрокапиллярно-вихревая модель шаровой молнии // *ДАН.* 2003. Т. 390, № 6. С. 769-772.
- *Парамонов Н.А.* Об унитарной вариации градиента атмосферного электрического потенциала // *ДАН СССР.* 1950. Т. 70, № 1. С. 37.
- *Плоткин В.В., Нестерова И.И., Израйлева Н.И.* Унитарная вариация foF2 как характеристика глобального состояния ионосферы // *Геомагнетизм и Аэронавигация.* 1992. Т. 32, № 5. С. 195-199.
- *Пулинец С.А., Хегай В.В., Боярчук К.А., Ломоносов А.М.* Атмосферное электрическое поле как источник изменчивости ионосферы // *УФН.* 1998. Т. 168, № 5. С. 582-589.
- *Рише Л.Е.* Концептуальная схема электрической машины Земли // *ДАН.* 1997. Т. 356, № 4. С. 538-540.
- Индукционные зондирования Земли / *Рокитянский И.И.* –Киев: Наукова Думка, 1981.
- Природа шаровой молнии / *Сингер С.* –М.: Мир, 1973. С. 240.
- Проблема шаровой молнии / *Смирнов Б.М.* –М.: Наука, 1988.
- *Стаханов И.П.* О природе шаровой молнии // *Письма в ЖЭТФ.* 1973. Т. 18, № 3. С. 193-196.
- О физической природе шаровой молнии / *Стаханов И.П.* –М.: Научный мир, 1996. 264 с.
- *Степанов С.И., Егоров А.И., Шабанов Г.Д.* Долгоживущие светящиеся плазмоиды, возникающие при электрическом разряде во влажном воздухе // Тезисы конференции по атмосферному электричеству. –Владимир. 2003.
- *Струминский В.И., Татаринев С.П.* Струнный электростатический флюксометр // *Труды II Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству.* –Л.: 1984. С. 86.
- Основы теории электричества / *Тамм И.Е.* –М.: Наука, 1966. С. 623.
- Атмосферное электричество / *Тверской П.Н.* –Л.: Гидрометеиздат, 1949. С. 252.
- *Торчигин В.П.* О природе шаровой молнии // *ДАН.* 2003. Т. 389, № 1. С. 41-44.

- Фейнмановские лекции по физике / *Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.* –М.: Мир, 1966. Т. 5.
- *Фортвов В.Е., Храпак А.Г., Храпак С.А. и др.* Пылевая плазма // УФН. 2004. Т. 174, № 5. С. 495-544.
- Теория явлений атмосферного электричества / *Френкель Я.И.* –Л-М.: Гостехиздат, 1949. С. 155.
- Кинетическая теория жидкости / *Френкель Я.И.* –Л.: Наука, 1975. С. 345.
- *Фуров Д.В.* Получение и параметры долгоживущих плазменных образований в свободной атмосфере // Тезисы конференции по атмосферному электричеству. –Владимир. 2003.
- Сохранение электрического заряда Земли / *Швейдлер Э.М.* –Л.: ОТЛ, 1936. С. 75.
- *Frank L.A., Craven J.D., Burch J.L., Winningham J D.* Polar views of the Earth's aurora with Dynamics Explorer // *Geoph. Res. Lett.* 1982. V. 9, № 9. P. 1001-1004.
- *Frank L.A. et al.* The Theta Aurora // *J. Geoph. Res.* 1986. V. 91. P. 3177-3224.
- *Freir G. D.* Auroral effects on the Earth electric field // *J. Geophys. Res.* 1967. V. 66. P. 2695-2702.
- *Hays P.B., Roble R.G.* A Quasi-Static Model of Global Atmospheric Electricity. 1. The Lower Atmosphere // *J. Geoph. Res.* 1979. V. 84, №. A7. P. 3291-3305.
- *Inan U.S., Bell T.F., Pasko V.P. et al.* 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.
- *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, № 6. P. 841-848.
- *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, № 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. V. 45. P. 1175-1179.
- *Kuznetsov V.V., Plotkin V.V., Khomutov S.Y.* Acoustic, electromagnetic and ionospheric disturbances during the vibroseismic sounding // *Geophys. Res. Lett.* 1999. V. 26. P. 2017-2020.
- *Kuznetsov V.V., Plotkin V.V., Khomutov S.Y. et al.* Powerful seismovibrators as a possible source of acoustic and electromagnetic disturbances // *Phys. Chem. Earth (A).* 2000. V. 25, № 3. P. 325-328.
- *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.
- *Mende S.B., Rairden R.L., Swenson G.R.* Sprite spectra; N2 1 PG band identification // *Geoph. Res. Lett.* 1995. V. 22. P. 2633-2636.
- *Nickolaenko A.P., Hayakawa M.* Natural electromagnetic pulses in the ELF range // *Geoph. Res. Lett.* 1998. V. 25. P. 3103-3106.
- *Mareev E.A., Israelsson S., Knudsen E. et al.* Studies of an artificially generated electrode effect at ground level // *Ann. Geophysical.* 1996. V. 14. P. 1095-1101.
- *Østgaard N., Mende S.B., Frey H.U. et al.* Observation of non-conjugate theta aurora // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30, №. 21. 2125, doi: 10.1029/2003GL017914.
- *Oyama, K.I., Schlegel K.* Anomalous electron temperatures above the South American Magnetic Field Anomaly // *Plan. Space Sci.* 1984. V. 32. №, 12. P. 1513-1522.
- *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 sprite // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. P. 3493-3496.
- *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.

- *Roble R.G., Hays P.B.* A Quasi-Static Model of Global Atmospheric Electricity. 2. Electrical coupling between the upper and lower atmosphere // *J. Geoph. Res.* 1979. V. 84. P. 7247-7256.
- *Roble R.G.* On Solar-Terrestrial relationships in atmospheric electricity // *J. Geophys. Res.* 1985. V. 90, № 4. P. 6000-6012.
- *Sato M., Fukunishi H.* Global sprite occurrence locations and rates derived from triangulation of transient Schumann resonance events // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30, №. 16. P. 1859, doi:10.1029/2003GL017291.
- *Sao K.* Correlation between solar activity and the atmospheric potential gradient at the Earth's surface in the polar regions // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1967. V. 29. P. 213-215.
- *Sentman D.D., Wescott E.M.* Observations of upper atmospheric optical flashes recorded from an aircraft // *Geoph. Res. Lett.* 1993. V. 20. P. 2857-2860.
- *Sentman D.D., Wescott E.M., Osborn D.L. et al.* Preliminary results from the Sprite-94 campaign: red sprite // *Geoph. Res. Lett.* 1995. V. 22. P. 1205-1208.
- *Sukhorukov A.I., Mishin E.V., Stubbe P.* On blue jet dynamics // *Geoph. Res. Lett.* 1996. V. 23. P. 1625-1628.
- *Yukhimuk V., Roussel-Dupre R.A., Symbalisty E.M.D.* Optical characteristics of Blue Jets produced by runaway air breakdown, simulation results // *Geoph. 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.