

**Генерация электрических полей
в атмосфере.
Глобальная электрическая цепь.**

Формирование слоев заряда в атмосферах планет

Е.А.Мареев

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

В последнее время существенно возрос интерес к электрическим явлениям в планетных атмосферах. Это обусловлено исследованием возможной роли атмосферного электричества в климатических процессах, формировании биосфер, взаимосвязи «планетарной» и «космической» погоды. В значительной мере интерес этот стимулируется новыми экспериментальными данными по изучению атмосферного электричества в земной атмосфере, а также новыми данными, полученными с помощью межпланетных космических аппаратов (в частности, Cassini, Mars Express и Venus Express).

Общая проблема, лежащая в основе анализа электрических явлений в атмосферах планет — это проблема генерации крупномасштабного электрического поля в слабопроводящей среде (электрическое динамо). Наиболее яркие проявления электрического динамо связаны с многофазными дисперсными системами, содержащими аэрозоли или гидрометеоры, которые могут обмениваться зарядом при столкновениях. Именно в таких условиях, как известно, формируются наиболее сильные поля в земной атмосфере (грозовые облака, вулканические извержения, пылевые и снежные бури). Эксперименты указывают также на важную роль турбулентности для атмосферного электричества. В условиях грозового или пылевого облака турбулентное перемешивание частиц приводит к многопотоковости, а возможность обмена зарядом при столкновениях частиц, чрезвычайно усложняя задачу, делает ее особенно разнообразной и интересной.

Лекция посвящена обзору экспериментальных данных и теоретических моделей, касающихся формирования слоев электрического поля и заряда в атмосферах планет. Одномерное приближение позволяет, с одной стороны, сосредоточить внимание на основных физических механизмах формирования поля и заряда, а с другой — проверив соответствующие модели в условиях земной атмосферы, попытаться построить их обобщения для атмосфер других планет.

Интенсивные зарядовые слои формируются в земной атмосфере и в условиях грозы, и в условиях хорошей погоды. Для грозового электричества, в частности, важной проблемой является формирование долгоживущих (до 6–12 часов) слоев электрического заряда в стратифицированных областях мезомасштабных конвективных систем. В слоисто-дождевых облаках, где наблюдается достаточно высокая электрическая активность, зачастую также формируются высокие электрические поля вблизи нулевой изотермы. Большую роль в динамике грозы могут играть слои экранирующих зарядов в окрестности грозового облака, последовательный учет которых до сих пор не проводился. В условиях хорошей погоды формируются и крупно-

масштабные слои электрического заряда, связанные с профилем проводимости атмосферы, так и возмущения поля и заряда вблизи относительно резких границ (электродный эффект, туман, слои аэрозольных частиц в атмосфере).

В данной лекции затронута также проблема турбулентного электрического динамо применительно к грозовым облакам, обладающим обычно высокой молниевой активностью. Дан обзор различных механизмов разделения заряда. Проанализированы общие критерии роста среднего поля, роль сжимаемости среды и спиральности турбулентности в реализации динамо. По сравнению с магнитным динамо, которое принципиально имеет трехмерный характер, квазистатическое электрическое поле (т.е. градиент потенциала) фактически скалярно, поэтому «центр тяжести» в данной задаче переносится на усложнение структуры среды и учет ее неоднородности. Кратко обсуждается вопрос о роли турбулентного электрического динамо в функционировании глобальной электрической цепи в атмосфере.

Моделирование крупномасштабных электрических полей и токов грозового облака

С.С.Давыденко, А.С.Сергеев

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Наличие сложной многослойной электрической структуры у развитых грозовых облаков [1] и крупномасштабных грозовых конгломератов (мезомасштабных конвективных систем) [2] требует разработки новых моделей электродинамики гроз с учётом как квазистационарных процессов разделения зарядов в облачной среде, так и молниевых разрядов.

Предлагаемая модель основана на численном решении уравнений Максвелла методом FDTD в предположении аксиальной симметрии системы и позволяет в рамках единого подхода описывать как стационарные, так и переменные электрические поля и токи в окрестности грозового облака. Роль стационарных источников в модели аналогично [3] играют процессы разделения зарядов силами неэлектрической природы, описываемые распределёнными вертикальными сторонними токами. Параметры слоёв и амплитуда тока подбираются таким образом, чтобы модельный профиль электрического поля соответствовал результатам измерений. Нестационарные источники связаны с быстрым переносом заряда при молниевой вспышке и описываются импульсным сторонним током с близким к наблюдаемому временным профилем амплитуды и пространственным распределением, зависящим от вида вспышки. Важной особенностью модели является учёт возмущения проводимости внутри облака по сравнению с профилем проводимости в областях «хорошей погоды» и влияния остальной атмосферы на формирование распределения полей и токов.

Предложенный подход позволяет построить динамическую картину электрических полей и токов как внутри, так и снаружи грозового облака, восстановить структуру электрических источников в облаке, вычислить запасённую в нём электрическую энергию и оценить полный ток, текущий от грозы к верхним слоям атмосферы. Кроме того, в рамках модели возможно исследование влияния возмущения проводимости внутри облака на его эффективность как источника в глобальной цепи.

Литература

1. Stolzenburg, M., W.D. Rust, B.F. Smull, and T.C. Marshall, Electrical structure in thunder-storm convective regions. 2. Isolated storms. *J.Geophys.Res.*, 103(D12), p.14075, 1998.
2. Marshall, T.C., and W.D. Rust, Two types of vertical electrical structures in stratiform pre-cipitation regions of mesoscale convective regions, *Bull.Amer.Meteorol.Soc.*, 78(11), p.2159, 1993.
3. Davydenko, S.S., E.A. Mareev, T.C. Marshall, and M. Stolzenburg, On the calculation of electric fields and currents of mesoscale convective systems, *J. Geophys. Res.*, 109(D11), 2004. DOI: 10.1029/2003JD003832

Вариации атмосферного электрического поля хорошей погоды по данным Обсерватории «Борок»

С.В.Анисимов, Н.М.Шихова

Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

Электрическое поле приземного слоя обладает уникальной чувствительностью к различным геофизическим и метеорологическим явлениям с разнообразными пространственно-временными масштабами. Непрерывная регистрация аэроэлектрических параметров приземного слоя (напряженности электрического поля E_z и плотности вертикального электрического тока j_z) проводилась в 1998–2007 гг. в Геофизической обсерватории «Борок» ИФЗ РАН [58°04' N; 38°14' E] на цифровую систему сбора с тактовой частотой 10 Гц.

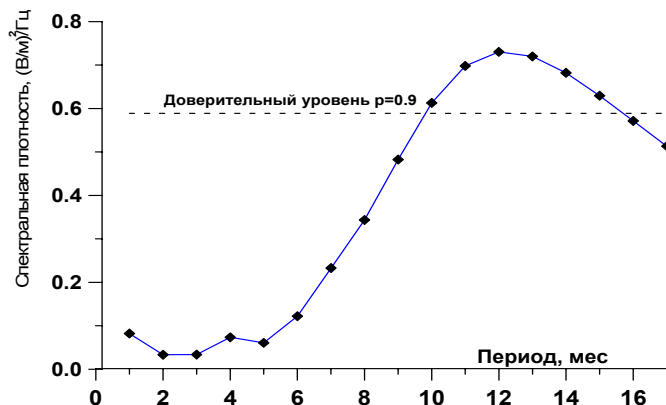


Рис. 1. Спектр ряда среднемесячных значений E_z по данным 1998–2007 гг.

По результатам измерений и обработки E_z установлено, что ряд среднемесячных значений напряженности электрического поля стационарен относительно среднего значения, значимый линейный тренд ряда в пределах 1998–2007 гг. не выявлен; наибольшие среднемесячные значения напряженности поля достигает в феврале–апреле, наименьшие — в октябре–ноябре; в изменениях электрического поля обнаружены достоверные вариации с периодами 12 месяцев (рис.1), 24 ч, 12.5 ч, 1 ч, внутрисуточные вариации с периодами в интервале 25–40 мин. Спектр аэроэлектрических пульсаций в диапазоне частот 0.01–1 Гц — степенной с показателями наклона от -2.2 до -3.4 . Показано, что унитарная вариация E_z (с минимумом в утренние часы и максимумом в вечерние по UT) наиболее часто воспроизводится в зимние месяцы — декабрь, январь, февраль.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 06-05-65066).

Вариации концентрации легких атмосферных ионов в приземном слое

С.В.Анисимов, К.В.Афиногенов

Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

Наличие полярных ионов в атмосфере составляет одно из необходимых условий формирования атмосферного электрического окружения Земли. Изучению полярных проводимостей λ_{\pm} и концентраций легких ионов n_{\pm} , а также их пространственно-временной динамики, которая определяется как глобальными, так и локальными геофизическими и метеорологическими процессами, посвящено значительное количество публикаций [1–3]. Цель работы заключалась в исследовании механизмов формирования аэроэлектрической проводимости в реальных условиях приземного слоя атмосферы. В апреле–мае и июле–августе 2007 г. на среднеширотной геофизической обсерватории «Борок» (58°04'N 38°14'E) проводились полевые многоточечные наблюдения вариаций электрической проводимости приземного слоя методом разнесенного приема. Схема наблюдений включала семь датчиков концентрации легких атмосферных ионов, электростатические флюксометры (типа «field-mill») и ультразвуковой метеорологический комплекс.

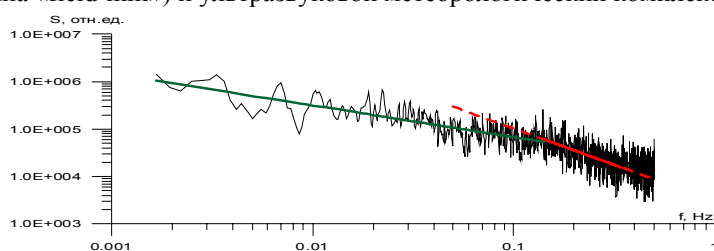


Рис. 1. Спектр вариаций концентрации легких положительных ионов.

В результате обработки данных, полученных при наблюдениях, определено, что в условиях «хорошей погоды» спектр изменений концентрации легких ионов имеет степенную зависимость. Значение показателя наклона спектра концентрации легких ионов в диапазоне частот 0.001 – 0.15 Гц равно $(-0.89) \pm 0.35$, а в диапазоне частот 0.15 – 0.5 Гц — $(-1.5) \pm 0.23$.

Работа проводится при поддержке РФФИ (грант № 06-05-65066).

Литература

1. Чалмерс Дж. Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 420 с.
2. Имянитов И. М. Приборы и методы для изучения электричества атмосферы, М., 1957.
3. Israelson S., Knudsen E., Anisimov S.V. Vertical profiles of electrical conductivity in the lowermost part of the turbulent layer over flat ground // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. Vol. 56, No.12, 1994, P. 1545-1550

Вариации амплитуды электромагнитного поля на частоте 1-го Шумановского резонанса: Кольский полуостров

О.И.Ахметов, М.И.Белоглазов, А.Н.Васильев
Полярный геофизический институт КНЦ РАН, Апатиты

В настоящее время изучению грозообразования уделяется большое внимание (см., например, [1]). Считается, что своего рода индикатором глобальной молниевой активности может служить интенсивность фонового электромагнитного поля в атмосфере Земли на частотах шумановских резонансов [2].

В обсерватории «Ловозеро» (центральная часть Кольского полуострова) Полярного геофизического института на протяжении ряда лет ведутся измерения электромагнитного КНЧ-поля в диапазоне частот 0.1–10 Гц. В качестве датчиков используются многovitковые (около 200 тыс. витков) соленоиды с ферритовыми сердечниками, ориентированные по магнитным меридиану и параллели. Запись производится в цифровом виде с дискретностью 40 Гц.

В докладе анализируются суточные вариации амплитуды КНЧ-поля на частоте 1-го Шумановского резонанса (ШР-1). Вычисление амплитуды проводилось в следующем образом [3]. По пятиминутным интервалам для обеих компонент строились спектры с помощью БПФ в диапазоне частот ШР-1, от 5.3 до 9.8 Гц. Затем полученные спектры аппроксимировались функцией Лоренца с тремя неизвестными параметрами: частотой максимума f_{\max} , амплитудой лоренцевского колокола B , его полушириной Δf , и двумя параметрами c_1 и c_2 , аппроксимирующими линейное уменьшение с частотой f интенсивности шумового фона. В дальнейшем анализе величина B считалась амплитудой КНЧ-поля на частоте ШР-1.

Обсуждаются изменения амплитуды ШР-1 в зависимости от гелиогеомагнитных условий, сезона, локализации источников КНЧ-излучений.

Работа выполняется при поддержке Программы ОФН РАН №12 «Физика атмосферы: электрические процессы, радиофизические методы исследований» (проект 4.5).

Литература

1. *Фесенков В.Г.* О строении атмосферы (фотометрический анализ сумерек) // Труды Главной российской астрофизической обсерватории. 1923. Т.2. С.7
2. *Розенберг Г.В.* Сумерки. Москва, Изд-во физ.-мат. лит-ры. 1963

О развитии электрической структуры грозового облака

А.А.Евтушенко

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

В работе предложена система уравнений квазигидродинамики для электрического поля, зарядов и концентраций облачных частиц и легких аэроионов воздуха применительно к мезомасштабным конвективным системам, которая при разумных предположениях о характере электризации при столкновениях и таянии облачных частиц имеет достаточно простые решения, описывающие структуру и динамику пространственно разделенных областей электрического заряда в облаке.

Электрическое поле значительно влияет на скорость движения легких аэроионов в потоке воздуха, а при больших полях практически полностью определяет его. При индукционном механизме электризации электрическое поле определяет также величину заряда, разделяемого при таянии гидрометеоров. Поэтому учет нелинейных эффектов приводит к формированию сложной структуры электрических слоев.

Рассмотрены детально две области генерации электрических зарядов: область в районе нулевой изотермы, связанная с таянием ледяных агрегатов, и область в верхней части грозового облака, связанная со столкновительными механизмами разделения заряда. Показана возможность образования экранирующих слоев из легких аэроионов при определенных скоростях воздушных потоков. За времена порядка 30 минут достигаются электрические поля напряженностью до 100 кВ/м, что соответствует экспериментальным данным.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 07-02-01342 и Программы фундаментальных исследований ОФН РАН «Физика атмосферы: электрические процессы, радиофизические методы исследования».

Поиск статистически значимых критериев для определения «нормальных значений» величин атмосферного электричества

И.Б. Попов

Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Санкт-Петербург

В настоящее время наблюдение за электрическими характеристиками атмосферы приземного слоя – градиентом потенциала электрического поля и удельными полярными электрическими проводимостями воздуха — проводится на четырех пунктах сети Росгидромета. При обработке данных рассчитываются среднечасовые значения измеряемых величин; для определения качества наблюдений, в частности, выявления нормальных значений, привлекается метеорологическая информация. Цель введения критерия нормальных условий заключается в выявлении таких периодов наблюдений, когда влияние локальных источников электрического возмущения можно считать минимальным, позволяя тем самым, с большей надежностью выделять вариации атмосферного электричества, обусловленные процессами региональных и глобальных масштабов.

Задача исследований заключалась в формировании допустимых метеорологических условий, при которых результаты измерений градиента потенциала электрического поля можно относить к нормальным значениям. Исходной информацией являлись данные измерений на пункте наблюдения за приземным атмосферным электричеством в Воейково (пригород Санкт-Петербурга) и данные метеорологических наблюдений за продолжительный период времени. Метод исследований основывался на статистической обработке исходной информации, в том числе, с применением факторного и дисперсионного анализа.

В докладе представлены результаты проведенных исследований, сделаны выводы о целесообразности уточнения критериев «нормальные значения» при обработке данных сетевых наблюдений.

Влияние атмосферной турбулентности и содержания аэрозолей на приземное электрическое поле атмосферы

В.В.Чукин, О.А.Аврамова, Л.В.Гонак

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

Результаты численного моделирования параметров электрического поля показывают, что при слабом турбулентном перемешивании у поверхности Земли существует максимум положительного объемного заряда, а выше уровня максимума вертикального распределения коэффициента турбулентности появляется слой с отрицательным объемным зарядом. В дневное время, при увеличении турбулентного обмена, максимум положительного объемного заряда смещается вверх, а слой отрицательного объемного заряда исчезает и наблюдается экспоненциальное уменьшение объемного заряда с высотой.

Аналогичная картина наблюдается при анализе результатов моделирования параметров электрического поля при наличии аэрозолей. Так, ниже слоя с максимальной концентрацией частиц аэрозоля происходит формирование слоя с отрицательным объемным зарядом, а выше — с положительным объемным зарядом.

Поскольку атмосферные ионы двигаются в электрическом поле Земли, создавая электрический ток проводимости, то изменения вертикального распределения объемного заряда сопровождаются изменениями плотности электрического тока. Наличие суточного хода интенсивности атмосферной турбулентности приводит к появлению суточного хода плотности тока проводимости.

Динамические размерности турбулентных аэроэлектрических пульсаций

Н.М.Шихова, С.В.Анисимов

Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

По данным натурных измерений аэроэлектрического (E_z) и метеорологических полей (температура, относительная влажность воздуха, скорость ветра) исследованы внутрисуточные вариации динамических показателей наблюдаемых пульсаций. Анализ состояния приземной атмосферы проводился с использованием комплекса показателей динамических размерностей.

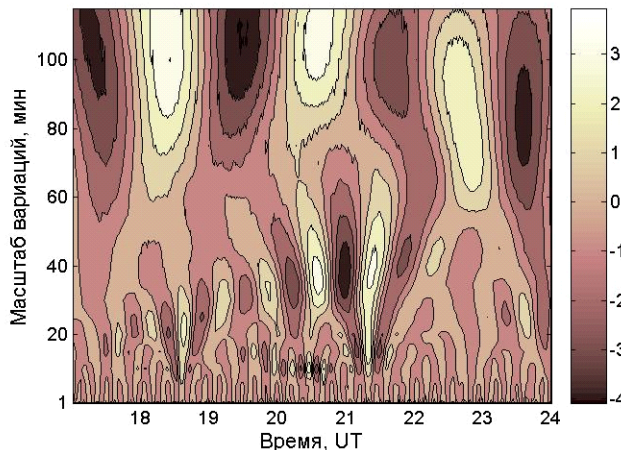


Рис. 1. Вейвлет-спектр E_z по данным обс. Борок 13 августа 2007 г.

В качестве динамических характеристик были выбраны: показатель структурной функции α ; показатель Херста H , как показатель самоподобия или меры степени турбулентности аэроэлектрических пульсаций; показатель наклона спектра β турбулентных аэроэлектрических пульсаций. Из фрактальных размерностей вычислялись регуляризационная размерность (Rd) — показатель, характеризующий степенное поведение напряженности поля, и корреляционная размерность (Cd). Показано: 1) временным интервалам, в которых $0.6 < \alpha < 1$ и $2 < \beta < 3$, соответствует полимодальность периодов короткопериодных пульсаций аэроэлектрического поля (рис. 1), сопровождаемая наличием аэроэлектрических структур; 2) значения показателей Rd и Cd вариаций электрического поля принадлежат интервалу (2–3); 3) в метеорологических полях значения показателей β , Rd , Cd соответствуют значениям показателей самоподобия для слабой турбулентности, причём степенной закон спада спектра распространяется на широкий диапазон частот.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 06-05-65066)

Влияние пространственно-временной динамики молниевых каналов на инициацию спрайтов

С.А. Яшунин, Е.А. Мареев

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Как показывают последние наблюдения, спрайты довольно часто наблюдаются в условиях зимних гроз. Характерной особенностью зимних гроз является сильно анизотропное распределение электрического заряда, переносимого молниевой вспышкой, с горизонтальной протяженностью до 30 км. Для адекватного описания таких вспышек двумерные численные модели не подходят.

В данной работе представлена трёхмерная численная электродинамическая модель, позволяющая рассчитывать квазистатическое электрическое поле молниевых вспышек с учётом проводимости атмосферы. Рассматриваются молниевые вспышки различной геометрии.

Установлено, что некоторые пространственно-временные особенности спрайтов могут быть объяснены геометрией и динамикой молниевой вспышки. В частности, в условиях зимних гроз удаление спрайтов от оси канала молниевой вспышки может определяться геометрией молниевой вспышки.