

УДК 551.594

ДИНАМИКА ЭЛЕКТРИЧЕСТВА НЕВОЗМУЩЁННОЙ АТМОСФЕРЫ СРЕДНИХ ШИРОТ: ОТ НАБЛЮДЕНИЙ К СКЕЙЛИНГУ

С. В. Анисимов^{1,2}, *К. В. Афиногенов*¹, *Н. М. Шихова*¹

¹ Геофизическая обсерватория «Борок» — филиал Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, пос. Борок Ярославской обл.;

² Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

По данным многолетних обсерваторских и сезонных полевых наблюдений проанализирована динамика электрического поля приземной атмосферы средних широт в широком диапазоне временных масштабов. Обнаружено, что суточный ход аэроэлектрического поля в средних широтах наиболее точно соответствует унитарной вариации в зимнее время года. Утверждается, что короткопериодные пульсации электрического поля имеют самоподобный степенной спектр. Оценены пространственно-временные масштабы интервала самоподобия и определён характер обобщённого диффузионного процесса генерации аэроэлектрических пульсаций. Проанализированы характеристики турбулентных пульсаций ΔE . Получены оценки взаимосвязи динамических (фрактальные размерности, показатели перемежаемости) и энергетических (показатели наклона спектра и структурной функции) характеристик ΔE . Исследованы взаимные корреляции вариаций напряжённости атмосферного электрического поля, плотности вертикального атмосферного электрического тока, плотности объёмного заряда и электрической проводимости атмосферы. Показано, что вариации концентраций лёгких атмосферных ионов и плотности объёмного заряда связаны с вариациями эманаций радона-222. Проведён спектральный анализ вариаций плотности объёмного заряда. Показано, что электродинамическое состояние приземной атмосферы зависит от конвективного состояния атмосферного пограничного слоя.

ВВЕДЕНИЕ

Принято считать, что квазистационарное состояние атмосферного участка глобальной электрической цепи обусловлено действием грозových генераторов, которые поддерживают разность потенциалов между обкладками сферического конденсатора, образованного проводящими слоями нижней ионосферы, верхнего слоя океана и земной коры. При этом электрическое состояние атмосферы определяется потенциалом ионосферы, сопротивлением столба атмосферы, плотностью вертикального электрического тока, напряжённостью электрического поля, полярными проводимостями, временем жизни грозовой электрической энергии, а также высотными профилями указанных аэроэлектрических параметров [1–7]. Совокупность атмосферных электродинамических процессов включает в себя электрическое взаимодействие как глобальных, так и региональных токовых систем, сосредоточенных в приземном и пограничном слоях, тропосфере, средней атмосфере, а также в различных областях ионосферы и магнитосферы [1, 8]. Электродинамика среднеширотной приземной атмосферы формируется совокупностью физических процессов разделения, генерации и переноса электрических зарядов, проходящих в широком диапазоне пространственно-временных масштабов.

Цель настоящей работы заключалась в изучении динамики электрического поля и электрической проводимости приземной атмосферы в широком временном диапазоне, включая турбулентные аэроэлектрические пульсации, характеристики самоподобия и перемежаемость. Основой исследований служили многолетние цифровые амплитудно-временные ряды, полученные в результате обсерваторских и полевых наземных среднеширотных аэроэлектрических наблюдений с высоким временным разрешением [9].

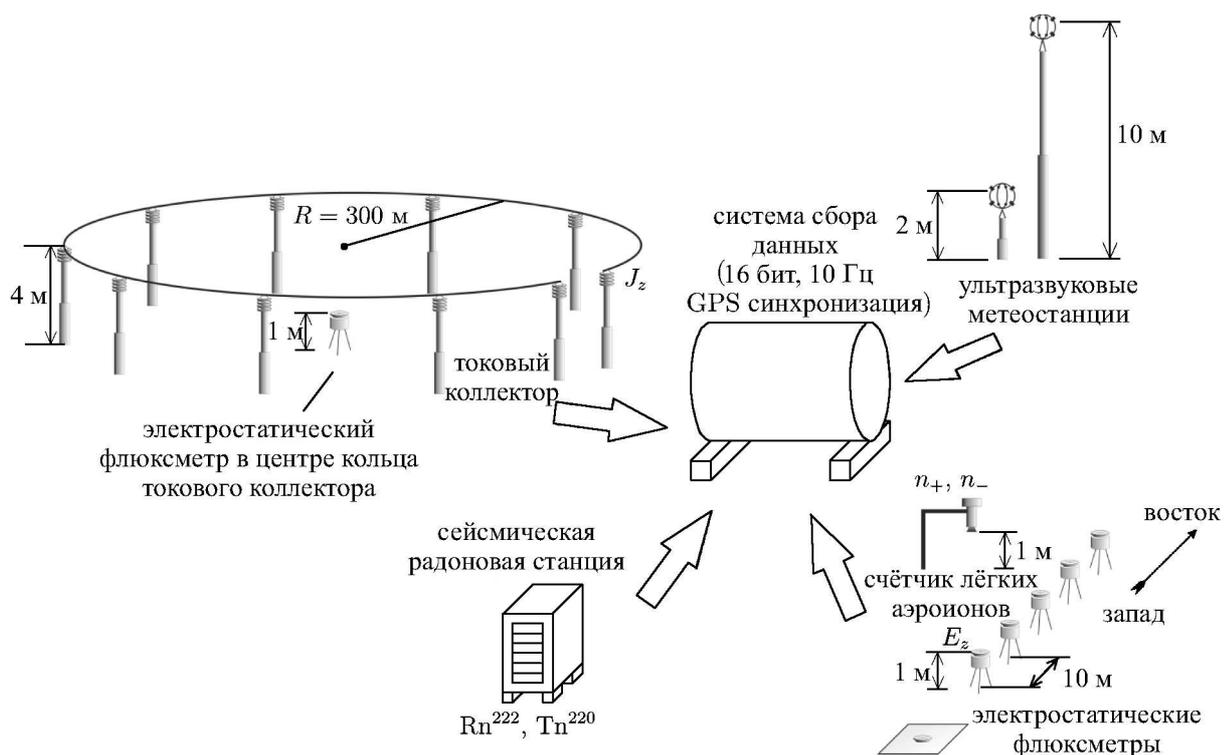


Рис. 1. Схема летнего эксперимента 2012 года

1. НАТУРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Прецизионные измерения электрических характеристик нижней атмосферы составляют необходимый базис исследования электрического окружения Земли. Долгосрочные наземные наблюдения атмосферного электричества, начатые, например, в английской обсерватории Кью (Kew) в 1861 году У. Томсоном, позволили получить значимые результаты о свойствах природных и антропогенных долгосрочных вариаций электрического поля [10]. Геофизическая обсерватория «Борок» с 1985 года проводит стационарные аэроэлектрические наблюдения, направленные как на решение традиционных задач атмосферного электричества (изучение годовых, сезонных и суточных вариаций), так и на развитие новых направлений, связанных с изучением глобальной электрической цепи, взаимодействия геосферных оболочек, динамики аэроэлектрических пульсаций, структуры поля геомагнитных пульсаций.

На рис. 1 в качестве одного из примеров представлена схема эксперимента летнего сезона наблюдений 2012 года. Электродинамическое состояние приземной атмосферы исследовалось методом разнесённого синхронного приёма вариаций аэроэлектрического поля с использованием электростатических флюксометров («field mill») в районе полевого измерительного полигона Геофизической обсерватории «Борок» ИФЗ РАН ($58^{\circ}04'$ с. ш., $38^{\circ}14'$ в. д.). Пять датчиков аэроэлектрического поля устанавливались в линию на расстоянии 10 м друг от друга. Высота установки 1 м. Для определения коэффициента редукции, необходимого для пересчёта наблюдаемой величины напряжённости поля на высоте 1 м к значению на земной поверхности, один датчик устанавливался на уровне земли в центре некоторой эквипотенциальной поверхности. Плотность вертикального атмосферного электрического тока измерялась антенной типа «токовый коллектор». Токовый коллектор представляет собой кольцо с диаметром 300 м, выполненное из проводника, закреплённое на изоляторах. Чувствительность токового коллектора не хуже $0,1$ пА/м².

Концентрации положительных и отрицательных атмосферных ионов с подвижностью, превышающей $1 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, измерялись модифицированными счётчиками «Борт-2». В счётчиках лёгких атмосферных ионов в составе измерительного комплекса реализован принцип аспирационного конденсатора. Для непрерывной работы в условиях полевых наблюдений датчик был модернизирован в биполярный счётчик лёгких атмосферных ионов. Данные полевых наблюдений собирались цифровой автоматизированной системой с частотой дискретизации 10 Гц.

Высотные профили направления и скорости ветра в диапазоне высот от 60 до 800 м с разрешением 5 м регистрировались при помощи акустического доплеровского локатора (содара) «Волна-3», работающего в непрерывном режиме в составе информационно-измерительного комплекса обсерватории. Метеорологические наблюдения осуществлялись с тактовой частотой 10 Гц двумя ультразвуковыми метеостанциями «Метео-2Н», расположенными на высотах 2 и 10 м. Для измерения плотности потока солнечного излучения в интервале длин волн от 300 до 2800 нм использовался пиранометр «СМР3». Чувствительность пиранометра составляла $5 \div 20 \text{ мкВ}/(\text{Вт}/\text{м}^2)$, диапазон измерений $0 \div 2000 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Мониторинг объёмной активности продуктов распада радона и торона проводился при помощи сейсмической радоновой станции «СРС-05». Чувствительность радоновой станции не хуже $0,5 \cdot 10^{-4} \text{ Бк} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-3}$, диапазон измерений $20 \div 5 \cdot 10^4 \text{ Бк}/\text{м}^3$, время усреднения 30 мин.

Амплитудно-временные ряды, полученные в результате непрерывных обсерваторских и полевых сезонных наблюдений 1998–2013 годов, были использованы для определения основных динамических закономерностей поведения электрических полей и электрической проводимости невозмущённой среднеширотной атмосферы. Анализируемые далее результаты получены для данных хорошей погоды. Под условиями хорошей погоды при проведении атмосферных электрических наблюдений подразумевается отсутствие осадков, в том числе тумана и дымки, скорость ветра не более 4 м/с, облачность не более 5 баллов.

2. ВАРИАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НЕВОЗМУЩЁННОЙ АТМОСФЕРЫ СРЕДНИХ ШИРОТ

Подобно широкому классу природных геофизических полей, вариации электричества свободной атмосферы на временном промежутке с достаточно большой протяжённостью можно пред

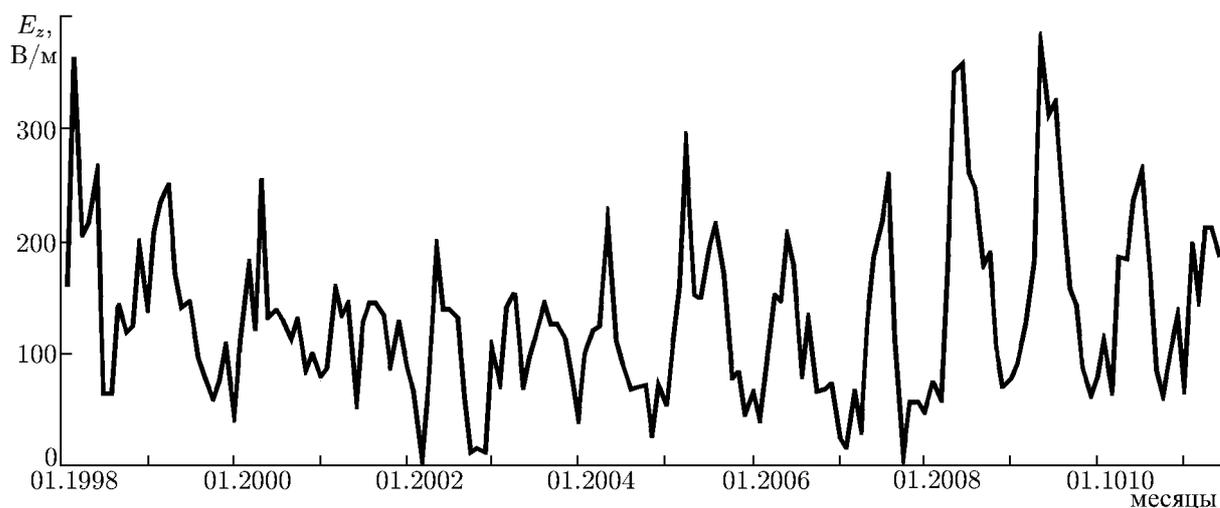


Рис. 2. Вариации напряжённости аэроэлектрического поля по данным наблюдений обсерватории «Борок» 1998–2011 годов (среднемесячные значения)

ставить как стохастический процесс, описываемый суммой трёх компонент:

$$W(t) = W_1(t) + W_2(t) + W_3(t), \quad (1)$$

где $W_1(t)$ — длиннопериодная составляющая, $W_2(t)$ — периодическая компонента, $W_3(t)$ — случайная шумовая составляющая. Причины вариаций глобальных составляющих аэроэлектрического поля и тока связаны с изменением потенциала ионосферы, волновыми геофизическими процессами, изменением сопротивления столба атмосферы, вызванного космическими лучами или радиоактивными эманациями, глобальной грозовой активностью. Напряжённость аэроэлектрического поля и электрическая проводимость в пограничном слое атмосферы отражает интенсивность континентальной радиоактивности, ионообразование при коронировании, концентрацию аэрозолей, сумму площадей, занятых туманами, осадками, облачностью [11–15]. Электрическое состояние атмосферного пограничного слоя зависит от конкретных метеорологических и климатических условий [6, 16–19]. Динамика аэроэлектрического поля атмосферного пограничного слоя обусловлена турбулентностью и конвекцией, а также изменениями электрической проводимости, на которые прямое воздействие оказывают радиоактивные эманации земной поверхности, приповерхностные дымки и аэрозоли [11, 14, 17]. В условиях хорошей погоды основным факто-

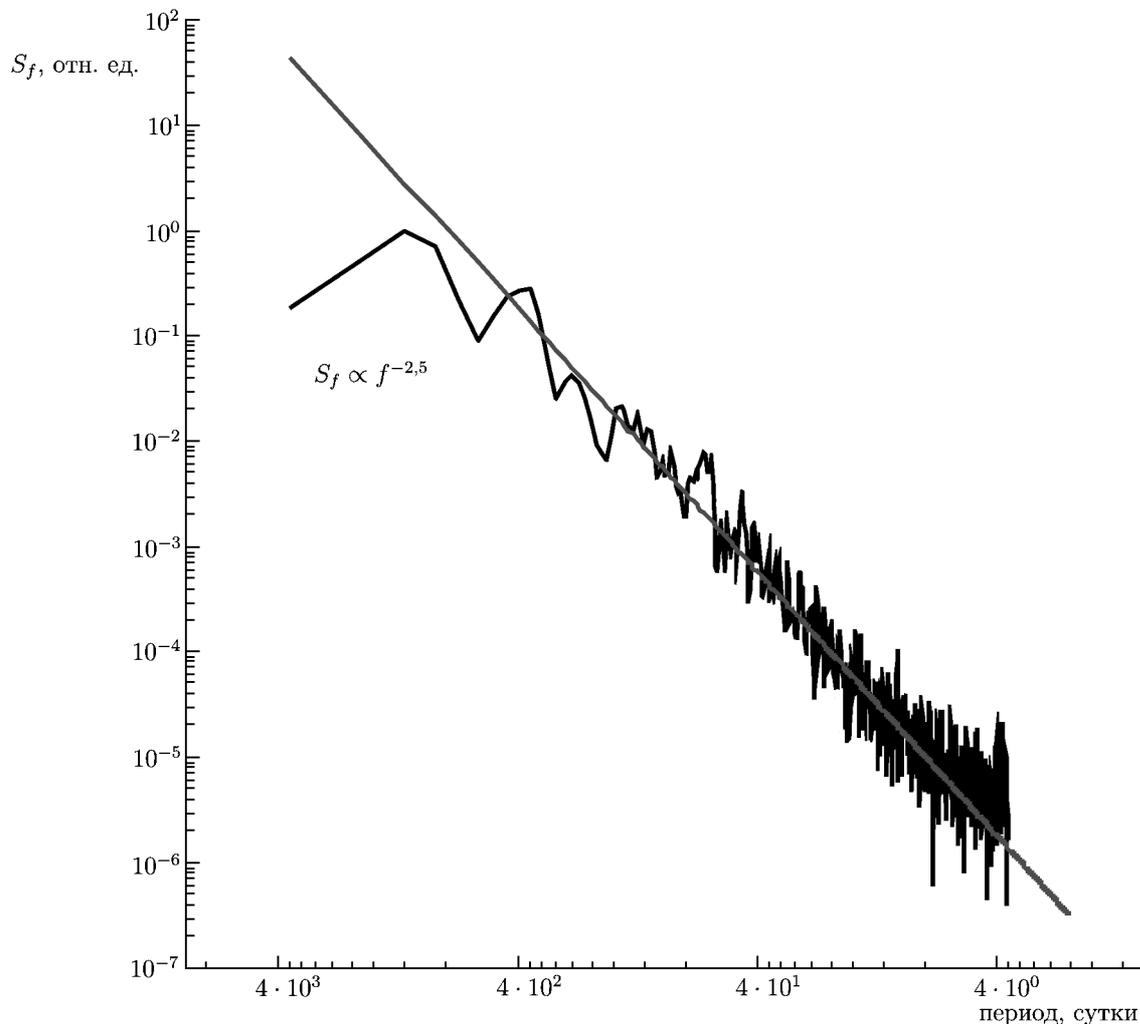


Рис. 3. Нормированная спектральная плотность S_f суточных значений аэроэлектрического поля по данным наблюдений обсерватории «Борок» 01.01.1999–31.07.2012

ром, определяющим динамику электрического состояния приземного слоя атмосферы, служит турбулентное перемешивание аэроионов, заряженных аэрозолей, торона и радона, которое формирует распределение плотности объёмного заряда и напряжённости аэроэлектрического поля вблизи земной поверхности [11, 15, 17].

С учётом продолжительности амплитудно-временного ряда, сформированного по результатам наблюдений 1998–2012 годов, исследовалась годовая вариация средних значений вертикальной составляющей напряжённости аэроэлектрического поля E_z . На рис. 2 приведена регистраграмма напряжённости аэроэлектрического поля, построенная по результатам наблюдений среднеширотной геофизической обсерватории в 1998–2011 годах (среднемесячные значения). Подчеркнём, что анализируемый ряд среднесуточных значений E_z стационарен относительно среднего и характеризуется самоподобным степенным спектром с показателем наклона $-2,5$ (рис. 3). На рис. 4 представлен годовой ход среднемесячной напряжённости E_z , построенный за четырнадцатилетний период наблюдений. Следует особо подчеркнуть значимость обнаруженного апрельского максимума среднего значения напряжённости электрического поля приземной атмосферы.

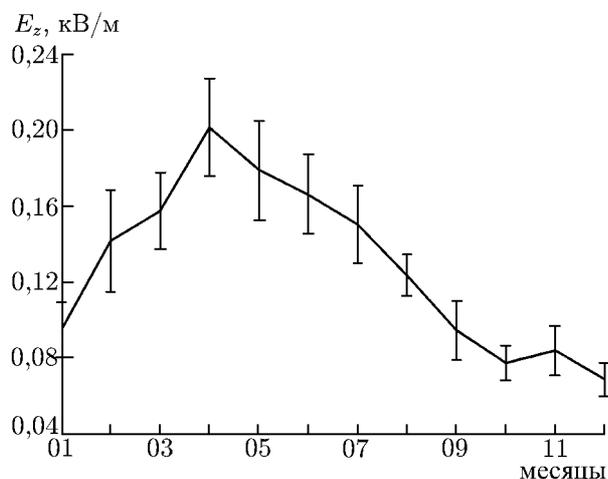


Рис. 4. Годовая вариация напряжённости электрического поля атмосферы по данным наблюдений обсерватории «Борок» 1998–2011 годов. Вертикальными отрезками здесь и далее на рисунках показана стандартная ошибка среднего значения

Изучение суточной динамики аэроэлектрического поля по данным наземных наблюдений среднеширотной обсерватории представляет особый интерес. Известно, что обнаруженная при наблюдениях над океаном унитарная вариация атмосферного электрического поля и тока считается важнейшим признаком действия глобальной электрической цепи и служит непосредственным прямым доказательством существования единого глобального генератора атмосферного электрического поля. В соответствии с классическими представлениями, для суточной вариации атмосферного электрического поля на континентальных станциях характерно наличие одного (в вечерние часы всемирного времени) или двух (в вечерние часы всемирного времени и локальный полдень) максимумов [2, 8]. По данным наземных аэроэлектрических наблюдений обнаружение унитарной вариации затруднено действием множества локальных источников, интенсивно меняющих проводимость и формирующих объёмные заряды, перенос которых определяет суточную динамику аэроэлектрического поля [17, 19, 20]. Однако наличие долгосрочных цифровых данных аэроэлектрических наблюдений и предварительная выборка амплитудно-временных рядов с учётом условий хорошей погоды позволяют обнаружить сходство суточного тренда аэроэлектрического поля и унитарной вариации на континентальных среднеширотных станциях [3].

С целью получения статистически значимого результата при исследовании формы суточной вариации во временном интервале 1998–2012 годов для каждого месяца были построены среднесуточные вариации E_z . В качестве примера на рис. 5 приведены суточные вариации среднечасовых значений напряжённости аэроэлектрического поля, выделенные как средние за зимние месяцы по данным наблюдений в условиях хорошей погоды. Отчётливо прослеживается характерный для унитарной вариации суточный ход напряжённости аэроэлектрического поля с значимым максимумом около 19:00 UT. Результаты статистического анализа полученного материала показывают, что унитарная вариация (с минимумом в утренние и максимумом в вечерние часы всемирного

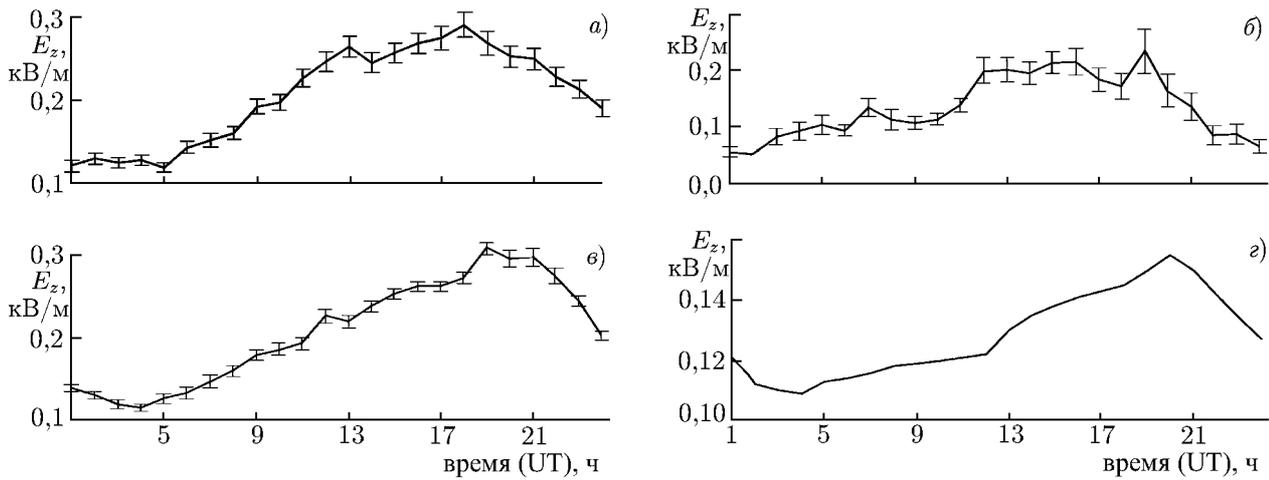


Рис. 5. Суточная вариация аэроэлектрического поля по данным обсерватории «Борок» (а — январь 2008 года, б — февраль 2007 года, в — декабрь 1998 года) и экспедиции «Карнеги»; N — число дней хорошей погоды

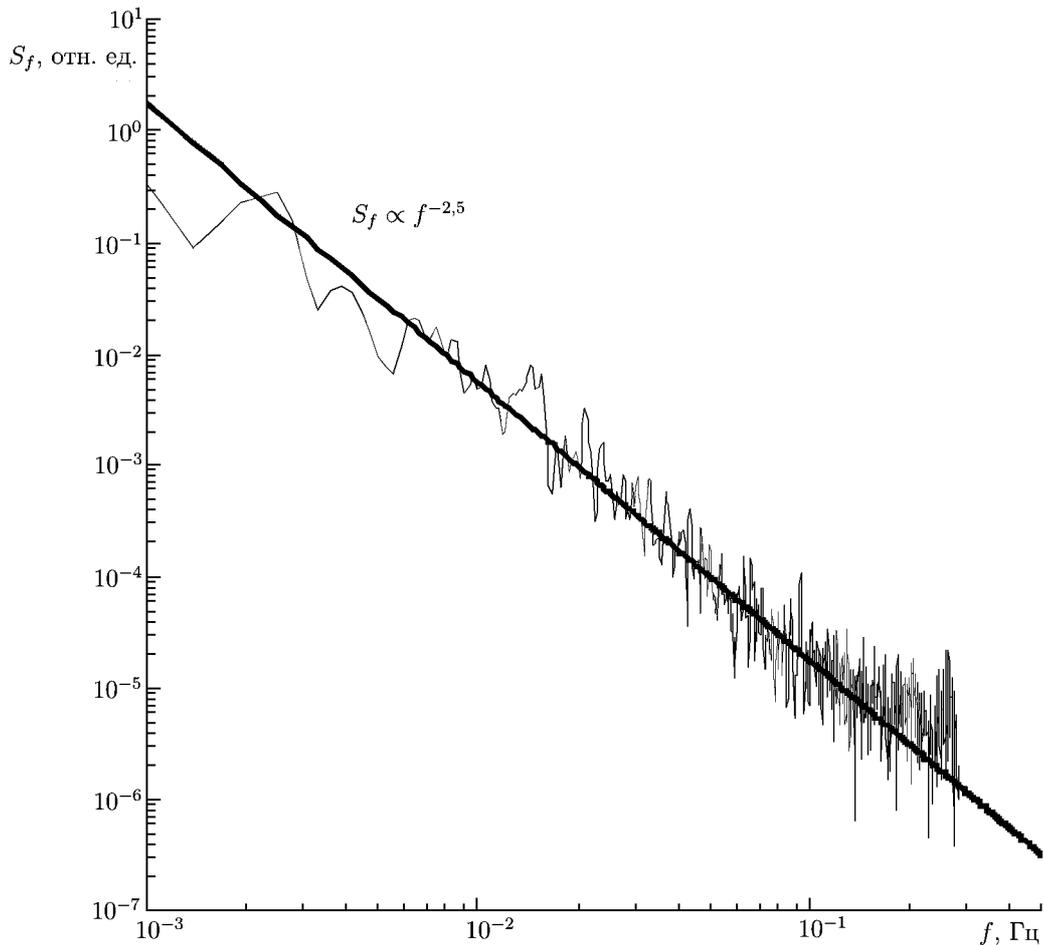


Рис. 6. Нормированная спектральная плотность мощности аэроэлектрического поля по наблюдениям обсерватории «Борок» 30 июля 2012 года в период 12:00÷13:00 UT

времени) наиболее значимо воспроизводится в условиях невозмущённой атмосферы средних широт северного полушария в зимние месяцы (декабрь, январь, февраль). Этот вывод согласуется с результатами, полученными на среднеширотной обсерватории Марста (Marsta), расположенной в Швеции [$59^{\circ}56'$ с. ш., $17^{\circ}35'$ в. д.]. Суточные вариаций E_z , зарегистрированные на обсерватории Марста в зимние месяцы, также повторяют кривую экспедиции «Карнеги» [21]. По данным наземных наблюдений среднеширотной обсерватории Нагиценк (Nagycenk), расположенной в Венгрии ($47^{\circ}38'$ с. ш., $16^{\circ}43'$ в. д.), показано, что унитарная вариация градиента потенциала прослеживается по данным всех сезонов 1964–1976 годов; вариация, построенная по данным зимних месяцев, практически повторяет форму кривой экспедиции «Карнеги» [22]. Аналогичные результаты были получены по данным обсерватории Нагиценк для 1971–1981 и 1991–2001 годов [23]. Таким образом, полученные результаты и проведённый обзор позволяют сделать вывод, что среднеширотная суточная вариация аэроэлектрического поля над сушей в зимние месяцы формируется, в основном, генераторами глобального пространственно-временного масштаба [3, 21].

Короткопериодные пульсации аэроэлектрического поля ΔE (частотный диапазон $\Delta f \approx 10^{-3} \div 10^0$ Гц) генерируются вследствие турбулентного перемешивания объёмных зарядов в атмосфере. Изучению процессов генерации пульсаций ΔE в последнее время посвящено большое количество работ [13, 17, 24–29]. Одна из основных задач исследования динамики электрического состояния приземной атмосферы заключается в анализе спектральных характеристик аэроэлектрических пульсаций. На рис. 6 приведён типичный пример спектра пульсаций ΔE , рассчитанного по данным наблюдений в условиях невозмущённой атмосферы. Самоподобный спектр пульсаций ΔE характеризуется степенным наклоном в частотном диапазоне $\Delta f = 10^{-2} \div 10^0$ Гц. Среднее значение показателя наклона спектров для диапазона частот $\Delta f \approx 10^{-2} \div 10^0$ Гц составило $\alpha_S \approx -2,67 \pm 0,03$. Следует особо подчеркнуть, что показатели наклона спектров пульсаций ΔE существенно превышают аналогичные величины колмогоровских спектров полей температуры и скорости ветра.

3. ТУРБУЛЕНТНАЯ КОРОТКОПЕРИОДНАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ АЭРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Динамика электрического состояния атмосферы проявляется в короткопериодных пульсациях аэроэлектрического поля [26], которые, в свою очередь, обусловлены турбулентным перемешиванием и конвективным переносом объёмного заряда. Самоподобие является одним из важных свойств однородной турбулентности, которое проявляется, например, в степенном спаде спектра пульсаций. При этом нарушение однородности турбулентности характеризуется перемежаемостью турбулентных пульсаций [30]. Результаты полевых и обсерваторских натуральных наблюдений позволяют определить статистические характеристики турбулентности, связанные с масштабной инвариантностью, и оценить степенные законы в интервалах самоподобия (скейлинги).

Для оценки свойств самоподобия во временном интервале τ от 1 до 200 с методом стационарных приращений вычислялись структурные функции второго порядка по алгоритму [30]:

$$D_E(t, \tau) = \langle |\Delta E(t + \tau) - \Delta E(t)|^2 \rangle. \quad (2)$$

Пространственные масштабы аэроэлектрических структур [27, 28] вычислялись по значениям τ с учётом одновременно наблюдаемой скорости ветра в приземном слое. Оказалось, что характерной особенностью полученных структурных функций (2) аэроэлектрического поля служит наличие интервала самоподобия, временной масштаб которого достигает $120 \div 200$ с (см. рис. 7).

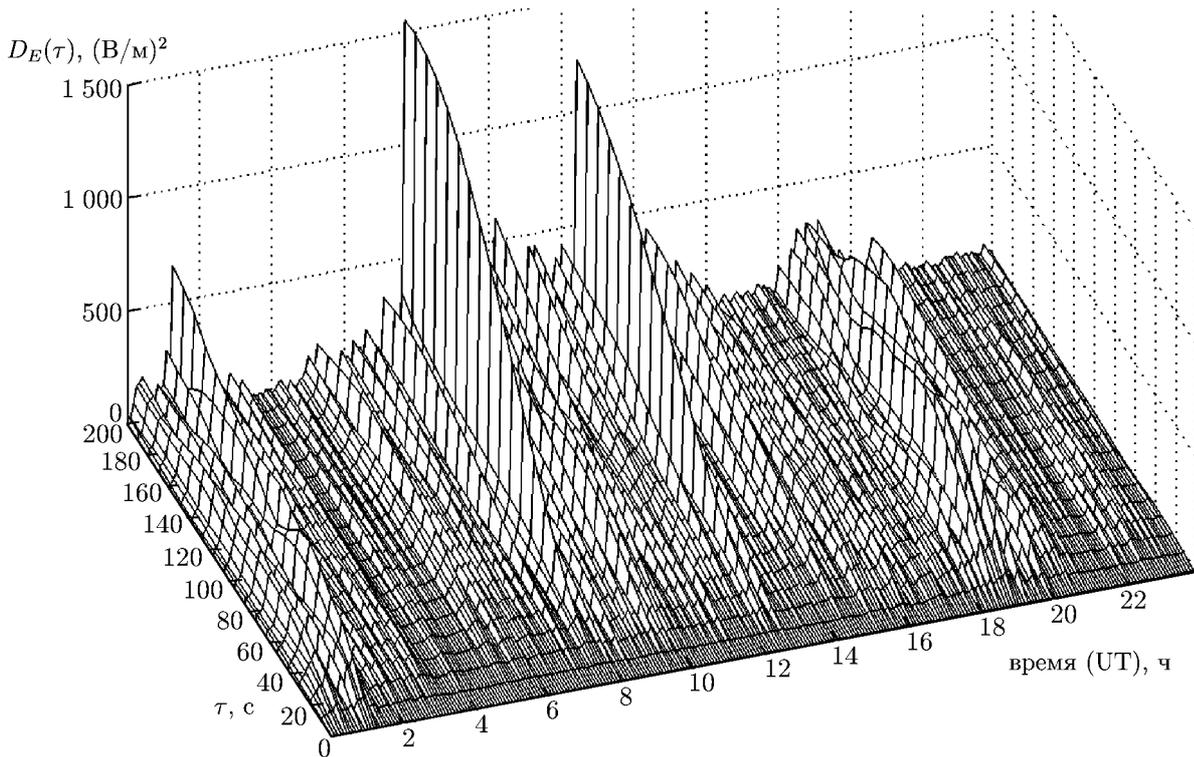


Рис. 7. Структурные функции аэроэлектрического поля по данным наблюдений обсерватории «Борок» 30.07.2012, построенные методом стационарных приращений

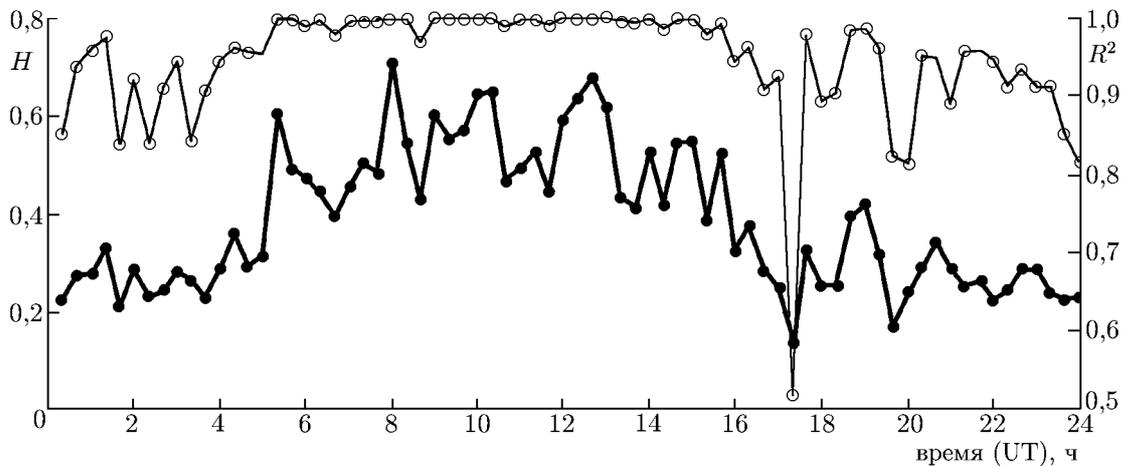


Рис. 8. Динамика показателя Хёрста (H) аэроэлектрических пульсаций, наблюдаемых в условиях хорошей погоды 30.07.2012 по данным обсерватории «Борок» (чёрные кружки), R^2 — коэффициент детерминации (белые кружки)

Показатель Хёрста H использовался для исследования динамики нелокальности напряжённости аэроэлектрического поля. На каждом 20-минутном интервале зависимость дисперсии приращений аэроэлектрических пульсаций ΔE от величины временного смещения τ описывалась соотношением

$$\langle [\Delta E(\tau)]^2 \rangle \sim \tau^{2H}. \tag{3}$$

На рис. 8 приведена суточная вариация показателя H , изменяющегося в интервале $0,25 \div 0,70$ при коэффициенте детерминации $R^2 = 0,8 \div 1,0$. Заметим, что обнаруженная вариация показателя Хёрста пульсаций ΔE во временном интервале 05:00 ÷ 15:00 UT при $H = 0,5$ соответствует процессу с нормальной диффузией, т. е. отсутствием дальних и близких корреляций. При этом зависимость дисперсии приращений от расстояния между отсчётами линейна. Значениям $H > 0,5$ в динамике поля ΔE соответствует режим супердиффузии, и турбулентные пульсации характеризуются дальними корреляциями. Значениям $H < 0,5$ соответствует субдиффузия, что определяет повышенную вероятность генерации короткопериодных флуктуаций относительно вероятности существования тренда. Проведённый анализ показал (см. рис. 8), что значимая аппроксимация зависимости (3): значимость $p < 0,01$, а следовательно, наличие в динамике пульсаций ΔE режима однородной турбулентности, соответствует периодам развитой конвекции.

Значительные отклонения от гауссовского распределения приращений флуктуаций полей характерно для полей с перемежаемостью — резкой сменой активных турбулентных и пассивных (ламинарных) фаз процесса, регистрируемых в точке наблюдения и обусловленных сосуществованием в пространстве неоднородных областей плотности электрического заряда. Для количественной оценки перемежаемости на каждом 20-минутном интервале рассчитывалась мера локальной перемежаемости (ЛИМ), позволяющая оценить степень неравномерности распределения энергии поля по масштабам на выбранном интервале времени: $\text{ЛИМ}(s, t) = |W_s(t)|^2 / \langle |W_s(t)|^2 \rangle_t$, где $W_s(t)$ — коэффициенты непрерывного вейвлет-преобразования с базовым вейвлетом Морле. Далее вычислялись значения функции пологости, которая определяется как средняя по времени величина квадратов модулей ЛИМ на временном отрезке t для каждого масштаба s пульсаций ΔE_z : $F(s) = \langle [\text{ЛИМ}(s, t)]^2 \rangle_t$. Проведённый с помощью ЛИМ анализ позволил утверждать, что для интервалов перехода к сильной конвекции на малых масштабах s ($1 \div 50$ с) значения функции пологости пульсаций ΔE_z на 2–3 порядка превышают значения $F(s)$, соответствующие гауссовскому сигналу. В большинстве случаев с началом конвекции зависимость $F(s)$ на рассматриваемых масштабах представляет собой степенную функцию: $F(s) \propto s^{-\gamma}$, где $\gamma > 0$, и, следовательно, можно считать [30], что короткопериодные пульсации ΔE_z на этих интервалах обладают свойством перемежаемости. Анализ распределений приращений ΔE показал, что их отличие от негауссовского наиболее существенно во время перехода к конвекции.

4. ДИНАМИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ

На рис. 9 изображён суточный ход концентраций лёгких атмосферных ионов n_+ и n_- . По данным за 13, 14, 15, 24 и 25 августа 2011 года среднесуточная концентрация положительных лёгких атмосферных ионов n_+ составила $474 \pm 260 \text{ см}^{-3}$, лёгких отрицательных атмосферных ионов $n_- = 350 \pm 140 \text{ см}^{-3}$, среднесуточная удельная электрическая проводимость атмосферы $\lambda = 13 \pm 4 \text{ фСм/м}$, а среднесуточная плотность объёмного заряда ρ составила $19 \pm 13 \text{ пКл/м}^3$. По данным за июль–август 2012 года среднесуточное значение для концентрации лёгких положительных ионов составило $350 \pm 100 \text{ см}^{-3}$, лёгких отрицательных атмосферных ионов $240 \pm 115 \text{ см}^{-3}$, плотности объёмного заряда, сосредоточенного на лёгких ионах $17 \pm 20 \text{ пКл/м}^3$, удельной электрической проводимости приземного слоя атмосферы $10 \pm 3 \text{ фСм/м}$. Аналогичные результаты для среднесуточных величин n_+ , n_- , λ и ρ получены по данным наблюдений 27–31 июля и 1, 8, 13–17 августа 2012 года. Следует заметить, что максимальные значения концентраций лёгких атмосферных ионов и электрической проводимости воздуха наблюдаются в ночное время, а максимальная плотность объёмного заряда — в первый час после восхода Солнца. Среднее время восхода Солнца для представленных данных составляет 02:00 UT. Возможной причиной увели-

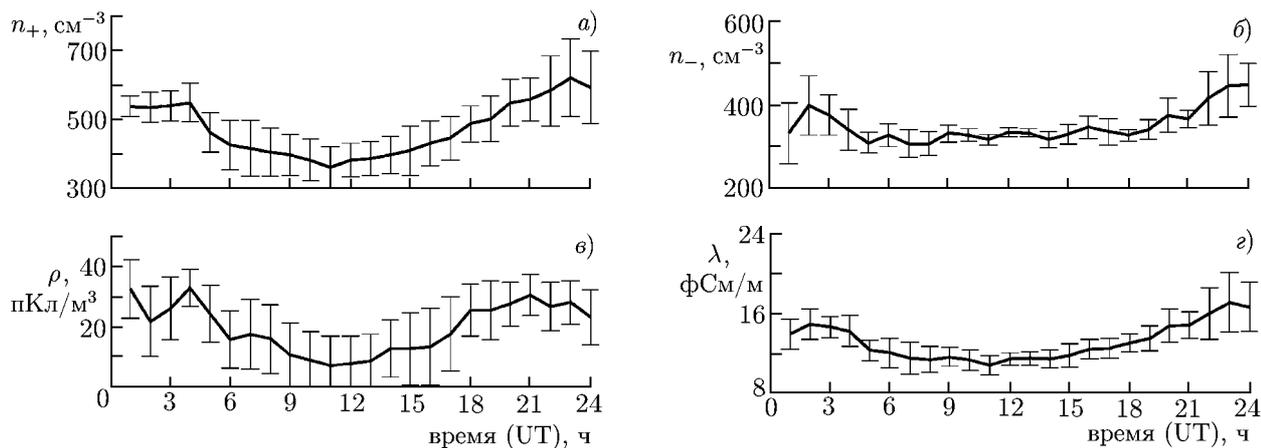


Рис. 9. Суточный ход концентраций лёгких атмосферных положительных (а) и отрицательных (б) ионов, плотности объёмного электрического заряда (в), сосредоточенного на лёгких атмосферных ионах и удельной электрической проводимости приземной атмосферы (г) по данным за 13, 14, 15, 24 и 25 августа 2011 года (усреднение 1 час)

чения суммарного положительного заряда лёгких ионов в утренние часы может быть более интенсивное формирование фракций средних и тяжёлых ионов за счёт гидратации и кластеризации в условиях прогрева поверхности и испарения воды [11]. Возрастание концентрации гидратных комплексов приводит к неравномерному перераспределению электрического заряда по ионным фракциям и приобретению тяжёлой фракцией отрицательного заряда [11, 12].

Регистрограммы концентраций лёгких атмосферных ионов n_+ , n_- , вариаций напряжённости атмосферного электрического поля E_z , удельной электрической проводимости воздуха λ , наблюдаемой в эксперименте плотности вертикального атмосферного электрического тока J_z и рассчитанных по экспериментальным данным согласно закону Ома величин E_z и λ , плотности вертикального атмосферного тока J_c за 3 августа 2012 года приведены на рис. 10. Коэффициент корреляции величин E_z и λ составил $-0,49$. Коэффициент корреляции величин J_z и λ составил $0,53$, а коэффициент корреляции величин J_z и J_c равен $0,93$. Коэффициенты корреляции вариаций аэроэлектрических величин E_z , J_z , n_+ , n_- , λ и плотности объёмного электрического заряда ρ , сосредоточенного на лёгких атмосферных ионах, рассчитывались также по данным наблюдений 29 июля 2012 года. Коэффициент корреляции величин E_z и λ составил $-0,51$. Коэффициент корреляции величин E_z и ρ равен $-0,46$, величин ρ и J_z — $0,47$ и величин λ и J_z — $0,65$. Кросс-корреляционный анализ для плотности тока и других электродинамических величин приземной атмосферы при усреднении данных за время, меньшее 20 мин, выявил малые значения коэффициентов взаимной корреляции (от $0,01$ до $0,30$). Это обусловлено тем, что данные о токе J_z , получаемые с токового коллектора, интегрированы по площади, в то время как величины E_z , n_+ , n_- , λ , фактически, измеряются в точке.

Реализуемые в полевых наблюдениях условия позволяют проанализировать короткопериодные изменения концентрации лёгких ионов, электрической проводимости и объёмного заряда приземного слоя. На рис. 11 показаны спектры Фурье вариаций плотности объёмного заряда для ночного и дневного времени суток по данным за 3 августа 2012 года. Заметим, что спектр вариаций плотности объёмного заряда самоподобен в интервале периодов от 2 до 500 с. В течение суток показатель наклона спектра в интервале периодов от 10 до 500 с изменяется от $-1,6$ до $-1,75$ и в среднем близок к $-5/3$. Обнаружено, что в интервале периодов от 2 до 10 с показатель наклона спектра меняется в течение суток в зависимости от интенсивности турбулентности. В ночное время, когда турбулентность подавлена устойчивой стратификацией, показатель наклона

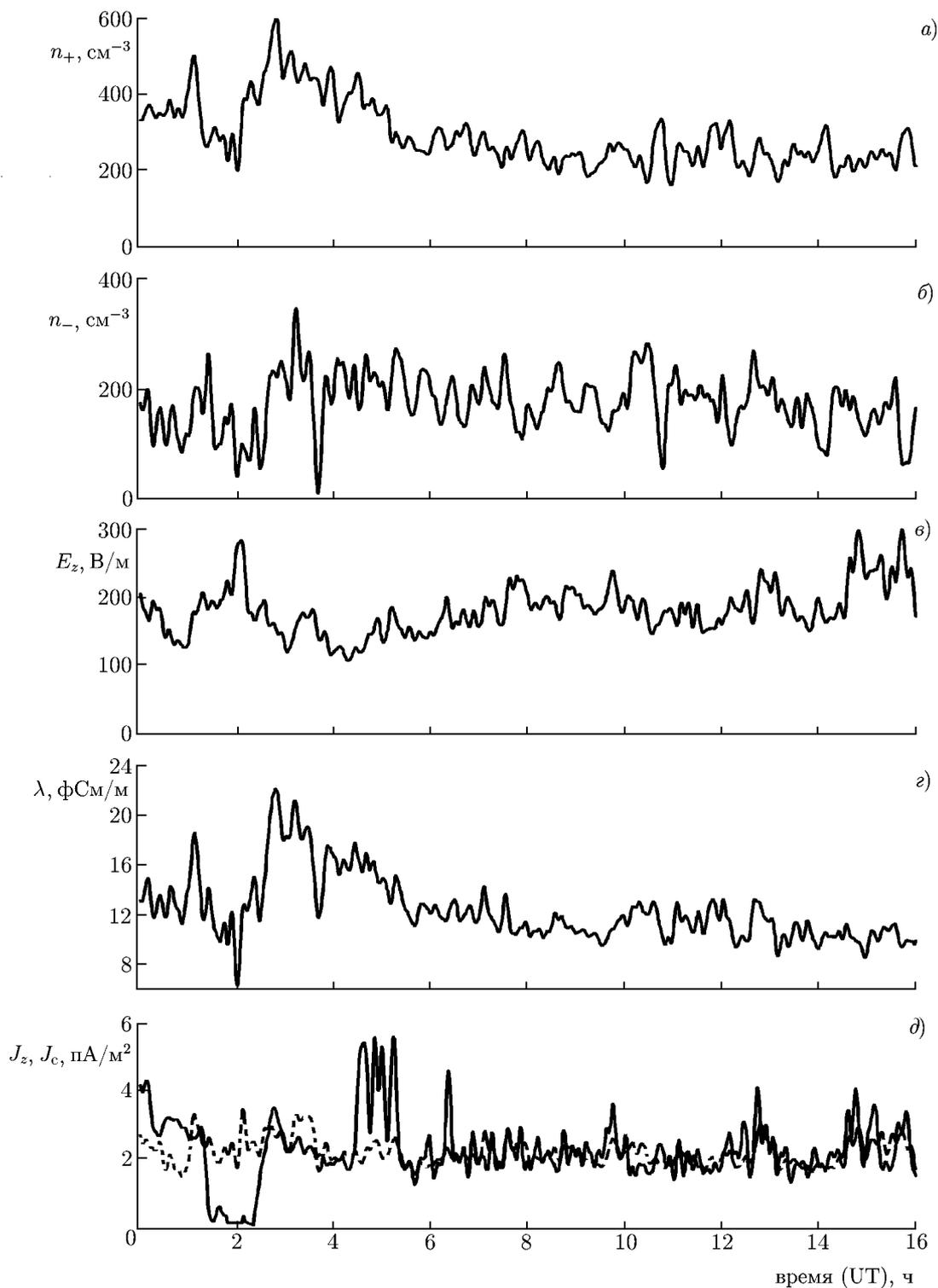


Рис. 10. Вариации концентраций лёгких атмосферных положительных (а) и отрицательных (б) ионов, напряжённости атмосферного электрического поля (в), удельной электрической проводимости (г) и плотности вертикального атмосферного электрического тока (д) по данным наблюдений обсерватории «Борок» 03.08.2012 (усреднение 5 мин). Пунктирной линией на панели (д) показан атмосферный вертикальный электрический ток J_c , рассчитанный по данным измерений λ и E_z

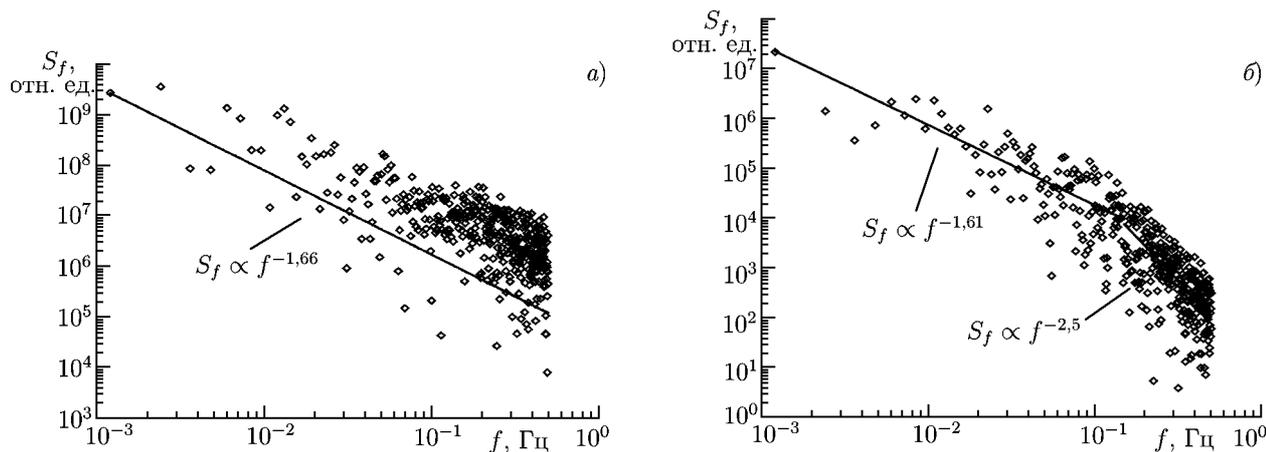


Рис. 11. Спектральная плотность мощности объёмного заряда по данным наблюдений обсерватории «Борок» 03:15÷03:30 UT (а) и 00:00÷00:15 UT (б) 3 августа 2012 года

спектра находится в диапазоне от $-1,9$ до $-3,1$, а в дневное время близок к $-5/3$. Применение метода стационарных приращений позволило обнаружить когерентные аэроэлектрические структуры плотности объёмного электрического заряда, сосредоточенного на лёгких атмосферных ионах. Рисунок 12 иллюстрирует наличие аэроэлектрических структур плотности объёмного заряда ρ и пульсаций аэроэлектрического поля ΔE .

Электрическая проводимость приземного слоя атмосферы формируется ионообразованием под воздействием космических лучей и радиоактивных эманаций земной поверхности. На рис. 13 представлены регистрограммы вариаций объёмной радиоактивности радона-222 (Rn^{222}), концентраций лёгких атмосферных ионов n_+ , n_- и плотности объёмного заряда, сосредоточенного на лёгких атмосферных ионах по данным за 26 сентября 2010 года. Данные усреднены по скользящему интервалу с длительностью 1 ч. Коэффициент корреляции плотности объёмного заряда и объёмной радиоактивности радона-222 составил 0,78.

С целью анализа суточной динамики электрической проводимости приземного слоя атмосферы выполнялся вейвлет-анализ вариаций плотности объёмного заряда, концентрации лёгких ионов и удельной электрической проводимости атмосферы. По данным наблюдений 25 августа 2011 года (время восхода Солнца 02:10 UT, время локального полдня 08:28 UT) в интервале времени 02:00÷05:00 UT в вейвлет-спектре присутствует ярко выраженная гармоника с периодом 20 мин. По мере роста температуры воздуха гармоника становится менее выраженной. При существенном замедлении роста температуры воздуха в вейвлет-спектре появляется гармоника с масштабом в 50 мин и менее выраженная гармоника с масштабом в 20 мин. В вейвлет-спектре проводимости атмосферы в интервале времени 02:00÷03:30 UT присутствуют ярко выраженные гармоники с периодами 20 и 40 мин. Гармоники становятся менее выраженными, когда температура воздуха растёт и стабилизируется, но вариации с масштабом в 20÷30 мин проявляются в интервале времени 08:00÷12:00 UT. Локальный полдень характеризуется наиболее интенсивной конвекцией вследствие прогрева приземного слоя атмосферы и земной поверхности Солнцем. Конвективные потоки формируют периодические вариации концентраций лёгких атмосферных ионов. Заметим, что по временному периоду вариаций можно судить о пространственных масштабах конвективных ячеек, формирующих динамику аэроэлектрических величин.

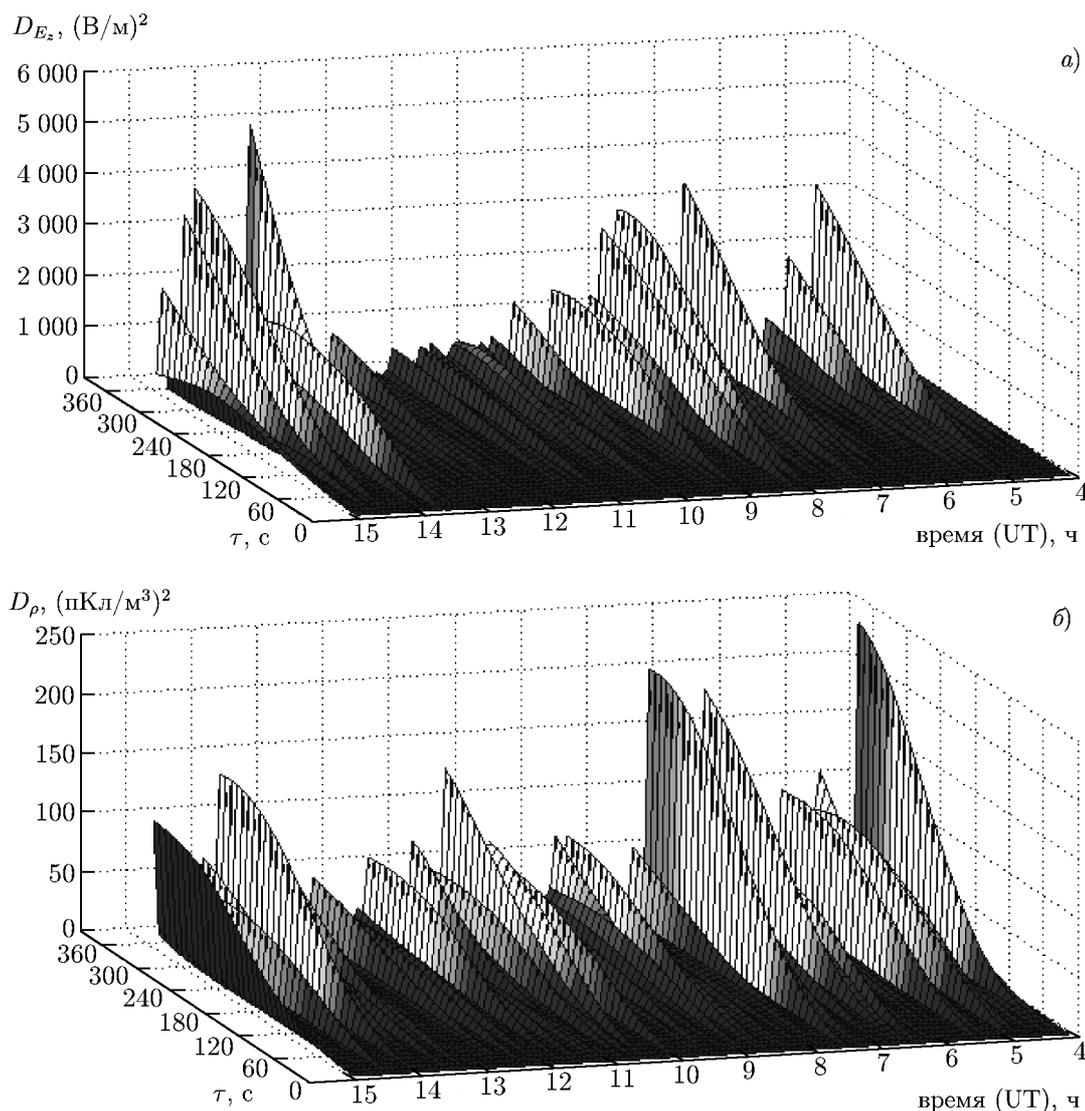


Рис. 12. Когерентные аэроэлектрические структуры напряжённости атмосферного электрического поля $D_{E_z} = [E_z(t+\tau) - E(t)]^2$ (а) и плотности объёмного заряда $D_\rho = [\rho(t+\tau) - \rho(t)]^2$ (б) по данным наблюдений обсерватории «Борок» 28.07.2012

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Статистическая обработка данных наземных аэроэлектрических наблюдений, выполненных в 1998–2013 годах в среднеширотной обсерватории «Борок», позволяет утверждать следующее.

1) Ряд среднемесячных значений напряжённости атмосферного электрического поля E_z во временном интервале 1998–2012 годов стационарен относительно среднего значения, линейный тренд напряжённости атмосферного электрического поля не обнаружен.

2) Годовой ход аэроэлектрического поля в средних широтах северного полушария имеет максимум в апреле и минимум в ноябре–декабре.

3) Суточный ход напряжённости E_z содержит вариации как глобального, так и регионального масштабов; наиболее точно среднеширотный суточный ход напряжённости E_z над сушей повто-

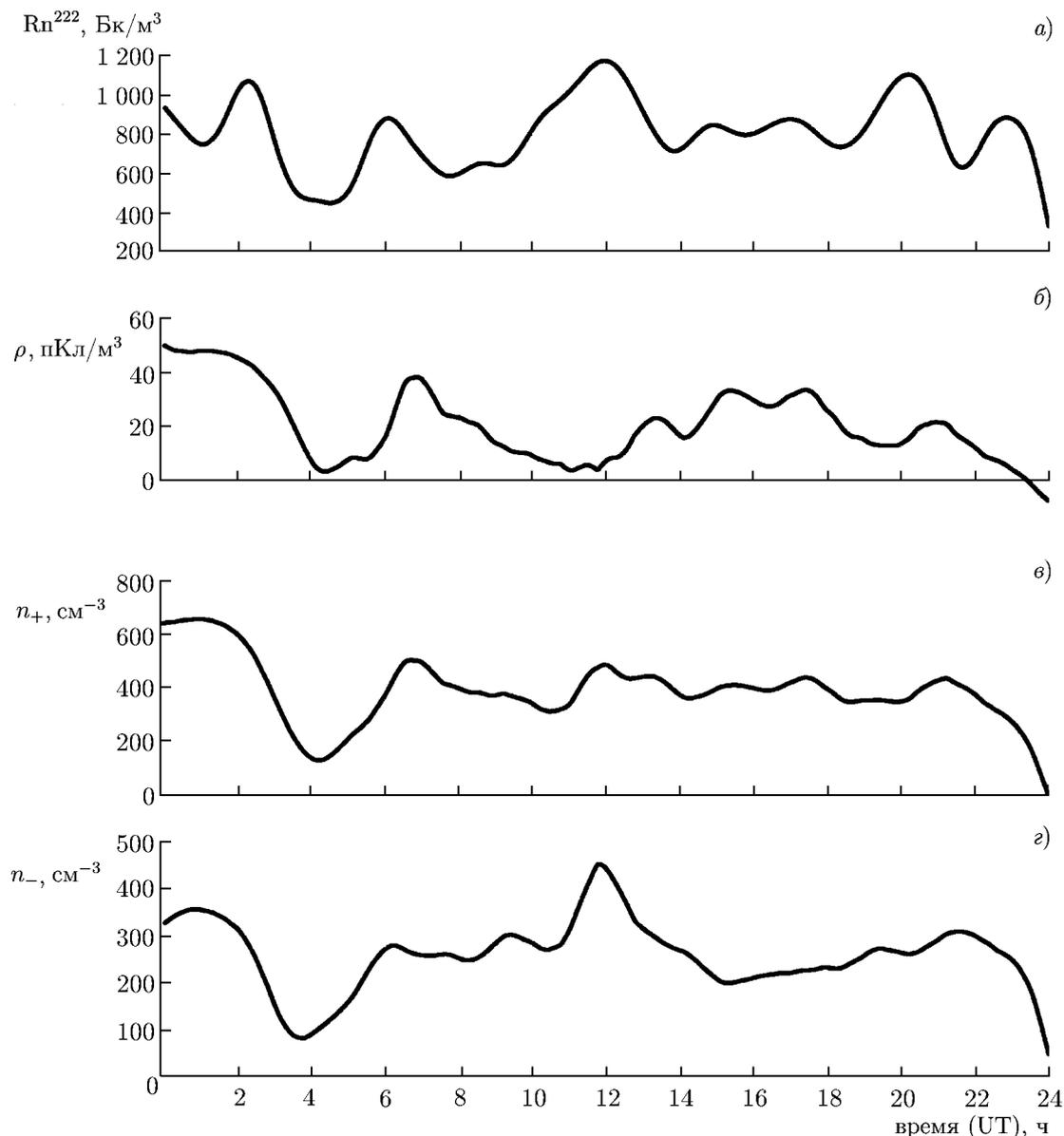


Рис. 13. Суточные вариации объёмной радиоактивности радона-222 (а), плотности объёмного заряда (б), сосредоточенного на лёгких атмосферных ионах, и концентраций лёгких атмосферных ионов (в, г) по данным наблюдений обсерватории «Борок» 26.09.2010. Данные усреднены по скользящему интервалу с длительностью 1 ч

ряет унитарную вариацию с минимумом в утренние и максимумом в вечерние часы всемирного времени в зимние месяцы года (декабрь, январь, февраль).

4) Короткопериодные пульсации ΔE аэроэлектрического поля обладают самоподобием со степенным законом изменения нормированной спектральной плотности, среднее значение показателя наклона спектров $\alpha_S \approx -2,67 \pm 0,03$.

5) Характерной особенностью динамики турбулентных аэроэлектрических пульсаций и плотности объёмного заряда является наличие когерентных аэроэлектрических структур.

6) Вариации концентраций лёгких атмосферных ионов и плотности объёмного заряда связаны с вариациями эманаций радона-222.

7) Спектр вариаций плотности объёмного заряда самоподобен, показатель наклона спектра вариаций плотности объёмного заряда близок к $-5/3$ в течение суток в интервале периодов от 10 до 500 с.

Применение методов нелинейной динамики к анализу электрического состояния приземной атмосферы позволило оценить пространственно-временные масштабы интервала самоподобия и определить характер обобщённого диффузионного процесса генерации аэроэлектрических пульсаций. Фрактальная размерность пульсаций аэроэлектрического поля принимает значения от 1,1 до 1,95, при этом показатель структурной функции второго порядка лежит в диапазоне $0,4 \div 1,4$. Показатель Хёрста H аэроэлектрических пульсаций ($H = 0,2 \div 0,7$), характеризующий скейлинг поля, имеет суточный тренд и достигает максимума в районе локального полдня. Обнаружены участки с перемежаемостью турбулентности, соответствующие резкой смене активных турбулентных и пассивных ламинарных фаз динамики пульсаций ΔE . Перемежаемость аэроэлектрических пульсаций характеризуется негауссовым распределением приращений поля, некоторым набором показателей степени для спектральной плотности в диапазоне частот ($10^{-2} \div 10^{-1}$) Гц, значимым отклонением от линейной зависимости скейлинговой экспоненты и показателя перемежаемости от нуля и степенной зависимостью функции пологости от временного масштаба вариаций. Перемежаемость турбулентных аэроэлектрических пульсаций может быть обусловлена пространственной неоднородностью плотности электрического объёмного заряда и в большинстве случаев соответствует временным интервалам, предшествующим началу конвекции.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 12–05–00820, 13–05–12060, 12–05–31517) и Правительства Российской Федерации (договор 14.B25.31.0023).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов С. В., Мареев Е. А. // Физика Земли. 2008. № 10. С. 8.
2. Чалмерс Дж. Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 420 с.
3. Anisimov S. V. // Proc. 12th Int. Conf. Atmos. Electricity, Versailles, France, 2003. P. 693.
4. Mareev E. A., Anisimov S. V. // Atmos. Res. 2009. V. 91. P. 161.
5. Roble R. G., Tzur I. // The Earth's Electrical Environment / Ed. by E. P. Krider, E. G. Roble. Washington: Natl. Acad. Press, 1986. P. 206.
6. Williams E. R. // Atmos. Res. 2009. V. 91. P. 140.
7. Тверской П. Н. Атмосферное электричество. Л.: Гостехиздат, 1949. 252 с.
8. Троицкая В. А., Моргунов В. А., Анисимов С. В. // Электрическое взаимодействие геосферных оболочек. М.: ОИФЗ РАН, 2000. С. 5.
9. <http://geobrk.adm.yar.ru>.
10. Harrison R. G. // Weather. 2003. V. 58. P. 11.
11. Смирнов В. В. Ионизация в тропосфере. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 312 с.
12. Смирнов В. В. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46, № 3. С. 321.
13. Anisimov S. V., Mareev E. A., Shikhova N. M., et al. // Atmos. Res. 2005. V. 76. P. 16.
14. Harrison R. G. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2005. V. 67. P. 763.
15. Hoppel W. A., Anderson R. V., Willet J. C. // The Earth's Electrical Environment / Ed. by E. P. Krider, E. G. Roble. Washington: Natl. Acad. Press, 1986. P. 149.
16. Анисимов С. В., Шихова Н. М. // Российский журнал наук о Земле. 2009. Т. 11, doi:10.2205/2009ES000363.
17. Анисимов С. В., Галиченко С. В., Шихова Н. М. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48, № 4. С. 442.

18. Harrison R. G. // *Atmos. Environ.* 1997. V. 31, No. 20. P. 3483.
19. Marshall T. C., Rust W. D., Stolzenburg M., et al. // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. P. 24455.
20. Анисимов С. В., Шихова Н. М. // *Геофизические исследования.* 2010. Т. 11, № 1. С. 55.
21. Israelsson S., Tammet H. // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2001. V. 16. P. 1693.
22. Märcz F., Bencze P. // *Acta Geod. Geophys. Mont. Hung.* 1981. V. 16. P. 415.
23. Märcz F., Harrison R. G. // *Ann. Geophys.* 2003. V. 21. P. 2193.
24. Анисимов С. В., Мареев Е. А. // *Докл. РАН.* 2000. Т. 371, № 1. С. 101.
25. Анисимов С. В., Мареев Е. А. // *Докл. РАН.* 2001. Т. 381, № 1. С. 107.
26. Анисимов С. В., Шихова Н. М., Мареев Е. А., Шаталина М. В. // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2003. Т. 39, № 6. С. 765.
27. Anisimov S. V., Bakastov S. S., Mareev E. A. // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. P. 10603.
28. Anisimov S. V., Mareev E. A., Bakastov S. S. // *J. Geophys. Res. D.* 1999. V. 104, No. 12. P. 14359.
29. Anisimov S. V., Mareev E. A., Shikhova N. M., Dmitriev E. M. // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29, No. 12. P. 2217.
30. Frisch U. *Turbulence. The legacy of A. N. Kolmogorov.* Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 296 p.

Поступила в редакцию 15 октября 2013 г.; принята в печать 27 декабря 2013 г.

DYNAMICS OF UNDISTURBED MIDLATITUDE ATMOSPHERIC ELECTRICITY: FROM OBSERVATIONS TO SCALING

S. V. Anisimov, K. V. Afanogenov, and N. M. Shikhova

Long-term dynamics of the electric field of the midlatitude ground atmosphere in a wide range of temporal scales is analyzed according to multiyear observatory and seasonal field observations. It is found that the diurnal dynamics of the aereoelectric field at mid-latitudes most authentically repeats a unitary variation for the winter months. It is asserted that short-period pulsations of the electric field have a self-similar power-law spectrum. Spatio-temporal scales of the self-similarity interval are estimated and the nature of the generalized diffusive process of the aereoelectric pulsation generation is defined. Characteristics of the turbulent ΔE_z pulsations are analyzed. Estimates of interrelation between the dynamic (fractal dimensions, intermittency indices, etc.) and power (degrees of spectrum inclination and structural function) ΔE_z characteristics are obtained. Mutual correlations between atmospheric electric field variations, vertical atmospheric electrical current density, space charge density, and atmospheric electrical conductivity are studied. It is shown that variations of the light atmospheric ion concentrations and space charge density are related with variations of the Radon-222 emanations. Spectral analysis of the space charge density variations is carried out. It is shown that the electrodynamic state of the ground atmosphere depends on the convective condition of the atmospheric boundary layer.