

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»
(ИПФ РАН)

На правах рукописи

Шаталина Мария Викторовна

Квазистационарные электрические поля и структуры в атмосфере

25.00.29 - физика атмосферы и гидросферы

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук.

Научный руководитель
чл.-кор. РАН
Мареев Евгений Анатольевич

Нижний Новгород - 2019

Оглавление

| | |
|--|----|
| Введение..... | 4 |
| Глава 1 Квазистационарные электрические поля и структуры в атмосфере в условиях хорошей погоды..... | 19 |
| 1.1. Аэроэлектрические структуры в пограничном слое..... | 19 |
| 1.2. Натурные исследования пульсаций электрического поля в приземном слое атмосферы в условиях хорошей погоды..... | 21 |
| 1.3. Моделирование динамики электрического поля в атмосфере методом пробных структур..... | 25 |
| 1.4. Диагностика электрического состояния пограничного слоя в условиях хорошей погоды | 32 |
| 1.5. Модель формирования спектров крупномасштабных структур, заполненных турбулентностью..... | 37 |
| 1.6. Выводы к главе 1..... | 40 |
| Глава 2 Время релаксации возмущений плотности электрического заряда в атмосфере в присутствии аэрозоля..... | 41 |
| 2.1. О взаимодействии атмосферных ионов и аэрозолей..... | 41 |
| 2.2. Модель коллективного взаимодействия ионов и аэрозолей в атмосфере | 45 |
| 2.3. Исследование времени жизни возмущений плотности электрического заряда в присутствии аэрозоля | 48 |
| 2.4. Выводы к главе 2..... | 57 |
| Глава 3 Особенности суточных и сезонных вариаций атмосферного электрического поля | 58 |
| 3.1. Мониторинг квазистатических электрических полей в Нижегородском регионе: методика эксперимента..... | 58 |
| 3.2. Особенности долгопериодных вариаций атмосферного электрического поля в средних широтах | 64 |
| 3.2.1. Суточная вариация электрического поля хорошей погоды | 64 |

| | |
|---|-----|
| 3.2.2. Низкочастотные спектры вариаций атмосферного электрического поля | 68 |
| 3.2.3. Сезонная вариация электрического поля | 72 |
| 3.3. О влиянии облачности на электрическое поле в приземном слое атмосферы | 76 |
| 3.3.1. Корреляции между среднесуточными значениями электрического поля, температуры и облачности по данным экспериментальных наблюдений | 76 |
| 3.3.2. Оценка влияния облачного слоя на электрическое поле, измеряемое на поверхности Земли..... | 79 |
| 3.4. Выводы к главе 3..... | 81 |
| Глава 4 Исследование характеристик конвективных событий на основе наземных измерений квазистатического электрического поля | 83 |
| 4.1. О статистических характеристиках полей конвективных событий | 83 |
| 4.2. Анализ динамики крупномасштабных возмущений электрического поля .. | 88 |
| 4.2.1. Мощное грозовое событие 1-2 июня 2015 г..... | 89 |
| 4.2.2. Финальная стадия грозы..... | 93 |
| 4.3. Детектирование разрядов с помощью сетей флюксметров..... | 95 |
| 4.4. Спектральные характеристики электрического поля грозовых событий ... | 100 |
| 4.5. Выводы к главе 4..... | 106 |
| Заключение | 108 |
| Список литературы | 111 |

Введение

Атмосферное электричество является предметом активного исследования более ста лет. За это время накоплено значительное количество экспериментальных данных, проведены многочисленные эксперименты в разных регионах планеты [1–7]. В последние годы в связи с возрастанием интереса к атмосферному электричеству как одному из основных механизмов, реализующих солнечно-атмосферные и солнечно-биосферные связи, а также важному фактору, оказывающему влияние на климат, экспериментальные исследования получают все большее развитие. Расширяется сеть наземных измерительных комплексов как в высокогорных и приполярных областях, так и на базе континентальных геофизических среднеширотных и субтропических обсерваторий [8–17].

Следует подчеркнуть, что одной из важных, до конца не решенных проблем атмосферного электричества остается проблема разделения глобальных и локальных эффектов, связанных с возмущениями электрических параметров атмосферы (проводимости, электрического поля и тока). В связи с этим ведутся активные исследования, как фундаментальные, так и прикладные, с целью диагностики источников этих возмущений, что позволило бы учитывать вклад различных эффектов при построении моделей глобальной электрической цепи, прогнозных моделей и др. Ранее считалось, что для выделения крупномасштабных эффектов в вариациях параметров глобальной электрической цепи пригодны результаты лишь тех измерений, которые проводятся в районах с чистой, незагрязненной промышленными аэрозолями, атмосферой, вне обменного слоя [18–21]. Однако современные исследования показывают, что изучение унитарной вариации атмосферного электрического поля, изначально обнаруженной над океаном, успешно ведется на континентальных станциях, как в городских условиях, так и в сельской местности [5, 9, 11, 22–26]. Анализ результатов такого рода экспериментов, когда на глобальные параметры накладываются местные метеорологические факторы разных масштабов, необходим для развития и апробации новейших моделей глобальной

электрической цепи [27–31], а также для разработки диагностики возмущений электрического поля и улучшения существующих прогнозных моделей погоды [32, 33].

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Диссертация посвящена исследованию источников и механизмов локальных и глобальных вариаций квазистационарного электрического поля в атмосфере. К настоящему моменту сложилось представление о влиянии турбулентности, конвекции, а также изменений электрической проводимости воздуха на динамику электрического поля атмосферного в пограничном слое [34–37]. Установлено, что значительную роль в вариациях атмосферно-электрических параметров в приземном слое играет зависимость интенсивности эманаций радиоактивных газов из почвы от температуры, давления, скорости ветра, степени заполнения почвенных пор влагой, льдом или снегом [10, 38–44]. Особое влияние уделяется исследованиям прямого воздействия на приземное аэроэлектрическое поле атмосферных аэрозолей, как природного, так и антропогенного происхождения [35, 36, 38, 45–49]. Разработаны численные модели, позволяющие оценивать электроаэродинамическое состояние конвективного погранслоя, в частности, найти пространственно-временные распределения концентрации аэроионов, напряжённости электрического поля, плотности тока проводимости и плотности объёмного заряда в различных физических условиях [50, 51]. Для параметризации моделей используются результаты как натуральных наблюдений, так и лабораторных экспериментов [24, 38, 39, 44, 52].

В последние десятилетия динамично развиваются исследования процессов, происходящих в конвективном атмосферном пограничном слое, что обусловлено необходимостью фундаментальных исследований формирования облачности, электрических эффектов, связанных с антропогенными и природными аэрозолями [10, 25, 36, 38, 53, 54]. Непрерывные измерения поля позволяют как изучить особенности длиннопериодных возмущений электрического поля, так и

проанализировать отдельные конвективные события [15, 24, 55]. Ведутся работы по разработке численных моделей, позволяющих оценивать электроаэродинамическое состояние конвективного погранслоя, в частности, находить пространственно-временные распределения концентрации аэроионов, напряжённости электрического поля, плотности тока проводимости и плотности объёмного заряда в различных физических условиях [50, 51, 56–58]. Исследованы взаимные корреляции вариаций напряжённости атмосферного электрического поля, плотности вертикального атмосферного электрического тока, плотности объёмного заряда и электрической проводимости атмосферы. Продолжаются исследования спектров короткопериодных пульсаций электрического поля [42, 59, 60]. Установлено, что формирование слоя приподнятой температурной инверсии сопровождается положительным трендом напряженности аэроэлектрического поля и генерацией короткопериодных аэроэлектрических пульсаций [41].

Долгопериодные измерения атмосферного электрического поля позволили исследовать суточную вариацию атмосферного электрического поля, которая является одним из наиболее фундаментальных явлений атмосферного электричества. Это явление было впервые описано почти сто лет назад [1, 2, 61] и заключается в том, что в отсутствие существенных локальных возмущений (как метеорологических – дождь, гроза, сильный ветер, так и антропогенных, обусловленных локальными источниками радиоактивности и аэрозольных частиц) изменения электрического поля вблизи поверхности земли следуют за изменениями единого для всей Земли параметра – ионосферного потенциала. Эти изменения обусловлены, в первую очередь, долготным распределением электрических генераторов на Земле – грозовых облаков и других облаков с развитой электрической структурой. Они носят, таким образом, глобальный характер и происходят одновременно на всей планете, т.е. суточная вариация поля, измеряемая в некоторой точке, зависит от единого времени суток (UT), поэтому ее часто называют унитарной вариацией поля «хорошей погоды» (о

критериях хорошей погоды в атмосферных электрических измерениях см. ниже). Измерения ионосферного потенциала весьма сложны и до сих пор были скорее фрагментарными [62].

Суточная вариация атмосферного электрического поля, обнаруженная над океаном (см. детальную библиографию в работе [22]), наблюдалась также и на континентальных станциях как в городских условиях, так и в сельской местности [7, 11, 13, 23, 63, 64]. Было показано, что для суточной вариации характерно наличие одного (в вечерние часы всемирного времени) или двух (в вечерние часы всемирного времени и локальный полдень) максимумов [3]. По данным наземного мониторинга электрического поля обнаружение суточной вариации требует анализа долгосрочных временных рядов с учётом условий хорошей погоды [12, 25], поэтому в рамках международного проекта GloCAEM (Global Coordination of Atmospheric Electricity Measurements) в 2018 году были сделаны первые шаги к созданию эффективной глобальной сети мониторинга атмосферного электричества, которая должна предоставлять данные практически в режиме реального времени [65].

Определение условий хорошей погоды может несколько отличаться в работах разных авторов. Под условиями хорошей погоды при проведении атмосферных электрических наблюдений в работах Анисимова с соавторами (см., например, [59]) подразумевается отсутствие осадков, в том числе тумана и дымки, скорость ветра не более 4 м/с, облачность не более 5 баллов. В последней работе на эту тему [12] предложено использовать в качестве основных три критерия хорошей погоды: (FW1) отсутствие гидрометеоров, аэрозолей и дымки, так что дальность прямой видимости составляет не менее 2 км, (FW2) незначительное количество кучевообразных облаков и отсутствие слоистых облаков с нижней границей ниже 1500 м, (FW3) скорость ветра у поверхности земли от одного до 8 м/с.

Уже ранние исследования в различных географических районах показали, что вид суточной вариации электрического поля существенно зависит от времени

года, т.е. имеет место сезонная вариация. Ранние работы (см. [21], а также изложение истории вопроса и обширную библиографию в статье [66]) указывали на возрастание поля в зимний период северного полушария, наблюдаемое на многочисленных станциях на суше и согласованное с результатами наблюдений в ходе морских экспедиций Carnegie и Maud. Однако учет локальных эффектов для измерений на суше, а также анализ данных на станции Mauna Loa на Гавайях (на высоте около 3400 м над уровнем моря, т.е. над слоем обмена атмосферы) и реанализ данных экспедиций Carnegie и Maud показал, что глобальная годовая вариация должна иметь максимум в июле, т.е. в период лета в северном полушарии [66]. При этом вопрос о наличии и значимости полугодовой сезонной вариации остается до конца не выясненным.

Следует подчеркнуть, что исследования суточной и сезонной вариации электрического поля необходимы для адекватного учета механизмов функционирования глобальной электрической цепи в современных погодноклиматических моделях. Так, параметризация ионосферного потенциала, впервые предложенная в работе [33], была использована для расчетов суточной и сезонной вариации ионосферного потенциала с помощью климатической модели ИВМ РАН INMCM4.0. Результаты расчетов оказались в удовлетворительном согласии с имеющимися экспериментальными данными.

В настоящее время, в связи с активными разработками современных моделей глобальной атмосферной электрической цепи [27, 30, 67], посвященными анализу вкладов различных ее элементов, влияние регионов, занятых облаками (около 67% земного шара), на электрические процессы в атмосфере представляет значительный интерес [23, 28, 31, 67]. Явление снижения напряженности электрического поля в присутствии искусственного пароводяного облака было получено в прямых экспериментах [68]. Статистический анализ большого массива данных измерений квазистатического электрического поля [69] показывает, что сплошная облачность уменьшает окружающее электрическое поле. Современные детальные исследования [8] роли слоистых облаков в глобальной электрической

цепи подтвердили потенциальную роль облаков типа Nimbostratus в качестве генератора тока и облаков типа Stratus в качестве резисторов. Синхронные наблюдения аэроэлектрического поля и температуры воздуха в среднеширотной геофизической обсерватории «Борок» [10, 70] показывают существенные корреляционные связи между измеряемыми параметрами на кратковременных периодах (1-100 с). Наблюдается положительная корреляция вариаций температуры и напряженности поля в условиях неустойчивой стратификации (позднее утро – день) и отрицательная корреляция в условиях устойчивости и сильной инверсии (поздний вечер – ночь).

К актуальным проблемам физики атмосферы относится проблема возникновения и эволюции мощных конвективных систем, в частности, грозových облаков [27, 58, 72, 74]. Исследование электрических процессов в конвективных системах необходимо для самосогласованного анализа динамики атмосферы и повышения точности прогнозов погоды [74, 76, 78]. Организация сети пунктов наблюдения, оснащенных автоматизированными приемными системами пеленга, и связанных в единый комплекс, является наиболее подходящим и апробированным путем решения задачи мониторинга молниевой активности. С целью разработки таких систем мониторинга проводятся натурные эксперименты по приему радиоизлучения ближних и дальних гроз, регистрации вертикального атмосферного электрического поля и изучение статистики и энергетики молниевых вспышек в средних широтах. Такие наблюдения необходимы в связи с проблемами изменений климата и возможным влиянии антропогенных факторов и космической погоды на климатическую систему Земли [27, 40, 65, 80]

Цели и задачи диссертационной работы:

Указанные выше обстоятельства позволили сформулировать следующие цели диссертационной работы:

1. Изучение механизмов генерации и совершенствование методики моделирования короткопериодных пульсаций электрического поля, необходимых

для получения информации о статистических характеристиках турбулентности и конвекции в различных областях атмосферы.

2. Исследование времени существования возмущений электрического заряда в атмосфере, в частности, влияние аэрозолей и электрического поля на время релаксации электрического заряда в конвективных ячейках.

3. Исследование характеристик долгопериодных вариаций атмосферного электрического поля в средних широтах в условиях хорошей погоды, а также исследование влияния облаков на основе результатов натурных экспериментов по измерению квазистатического электрического поля

4. Исследование статистических характеристиках электрических полей конвективных облаков и гроз на основе результатов натурных экспериментов по измерению квазистатического электрического поля.

Научная и практическая значимость

Результаты, полученные в диссертации, могут быть использованы как для исследования фундаментальных проблем исследований атмосферных процессов, так и для решения многих практических задач, включая внедрение новых систем мониторинга окружающей среды, совершенствование методов долгосрочного и краткосрочного метеопрогноза, климатологических исследований грозового электричества. Результаты выполненных исследований показывают, что комплексные измерения характеристик пульсаций аэроэлектрического поля приземного слоя могут служить средством диагностики динамических процессов в пограничном слое атмосферы, включая электрогазодинамическую турбулентность. Изучение механизмов генерации и совершенствование методики моделирования короткопериодных пульсаций электрического поля необходимо для получения информации о статистических характеристиках турбулентности и конвекции в различных областях атмосферы (приземный слой, конвективное облако и т.д.) в разных метеорологических условиях. С их помощью можно выявить закономерности формирования электрического состояния той или иной

области атмосферы, а также взаимного влияния электродинамических и газодинамических процессов. Указанные выводы представляют принципиальную важность для исследования характеристик конвекции и электрогазодинамической турбулентности в атмосфере с использованием результатов экспериментальных исследований атмосферного электрического поля и, кроме этого, дают основу для построения теории, которая способна объяснить физические механизмы влияния локальных эффектов и предложить соответствующие параметризации для нахождения приземного электрического поля в погодно-климатических моделях.

Результаты, полученные в ходе подготовки настоящей диссертационной работы использовались при выполнении:

- проектов РФФИ (00-02-17758-а, 04-02-16634-а, 07-02-01342-а, 07-05-13584-офи_ц, 08-05-97018-р_поволжье_а, 09-02-10019-к, 09-05-13600-офи_ц, 10-02-09480-моб_з, 10-05-01045-а, 11-01-97028-р_поволжье_а, 11-05-12055-офи_м, 11-05-97047-р_поволжье_а, 13-05-01139-р_поволжье_а, 13-05-97063-р_поволжье_а, 13-05-01100-а, 13-05-12103-офи_м, 16-05-01086-а, 17-55-10014_КО-а, 18-45-520003-р_а);
- грантов РФФИ (№16-17-00132, №18-77-10061);
- мегагрантов Правительства РФ (№14.В25.31.0023 «Молнии и грозы: физика и эффекты» и № 11.G34.31.0048 «Взаимодействие атмосферы, гидросферы и поверхности суши: физические механизмы, методы мониторинга и контроля планетарных пограничных слоев и качества окружающей среды»);
- Программ фундаментальных исследований ОФН РАН «Физика атмосферы: электрические процессы, радиофизические методы исследований», «Электродинамика атмосферы, радиофизические методы исследования атмосферных процессов», «Фундаментальные проблемы электродинамики и волновой диагностики атмосферы»;
- Программ Президиума РАН «Космос: исследования фундаментальных процессов и их взаимосвязей», «Природные катастрофы и адаптационные процессы в условиях изменяющегося климата и развития атомной

энергетики», «Природные катастрофы. Солнечная активность», «Природные катастрофы и адаптационные процессы в условиях изменяющегося климата и развития атомной энергетики».

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН).

Методология и методы исследования

Для решения задач, поставленных в рамках данной работы, применяются методы аналитического решения задач электродинамики и физики атмосферы, а также методы численного исследования в тех случаях, когда получения аналитических решений затруднено. Применяются методы статистического и спектрального анализа экспериментальных данных. Результаты численных расчетов апробированы и верифицированы по данным наземных систем наблюдения за электрическими параметрами атмосферы и систем сбора метеорологических данных. Результаты настоящего исследования также сравниваются с результатами работ, в том числе экспериментальных, других исследовательских групп.

Положения, выносимые на защиту

1. Найденные в натуральных экспериментах взаимосвязи характеристик спектров и структурных функций короткопериодных пульсаций электрического поля объяснены с помощью метода пробных структур. Разработанный в диссертации метод пробных структур позволяет эффективно моделировать характеристики пограничного слоя атмосферы со статистическими свойствами, близкими к наблюдаемым в натуральных экспериментах. Параметры аэроэлектрических структур могут быть определены с помощью разработанного итерационного алгоритма.

2. С ростом аэрозольной концентрации в системе, состоящей из легких аэроионов и аэрозольных частиц, с учетом зависимости коэффициентов взаимодействия этих частиц от напряженности внешнего электрического поля, время жизни аэроэлектрических структур существенно увеличивается по сравнению с характерным временем релаксации невозмущенного заряда в атмосфере. При определенных условиях учет зависимости коэффициента взаимодействия от напряженности электрического поля приводит к развитию неустойчивости в системе с характерным масштабом, близким к масштабам наблюдаемых аэроэлектрических структур.

3. На основании анализа экспериментальных данных долгосрочных непрерывных измерений электрического поля в Нижегородском регионе совместно с метеорологическими параметрами показано наличие корреляция между средними дневными значениями электрического поля и облачности. Выявленная корреляция носит противофазный характер и не зависит от сезона. В спектре низкочастотных вариаций электрического поля атмосферы обнаруживается 4-5 дневная гармоника, соответствующая среднему времени жизни атмосферных циклонов.

4. Непрерывные записи электрического поля с помощью сети флюксометров позволяют выявлять не только статистические характеристики грозовых облаков и молниевых вспышек в средних широтах, но и особенности переноса основных электрических зарядов в грозовых облаках.

Публикации и апробация результатов

Основные результаты диссертации опубликованы в 9 статьях в отечественных и международных научных журналах: «Известия РАН. Физика атмосферы и океана» [82, 84], «Известия ВУЗов. Радиофизика» [86–88], «Метеорология и гидрология» [89], «Проектирование и технология электронных средств» [90], «Геофизические исследования» [91], *Nonlinear Processes in*

Geophysics [92], и 19 трудах международных и всероссийских конференций [85-104]. Результаты диссертации опубликованы в 42 печатных работах.

Также основные результаты диссертации представлялись на следующих конференциях:

- Нижегородских сессиях молодых ученых (естественнонаучные дисциплины) (Дзержинск, 2002; Дзержинск, 2005, Н.Новгород, 2004, 2006));
- 38-ой Ассамблее Международного космического союза COSPAR (Бремен, 2010),
- 27-й Генеральной ассамблее Международного радиофизического союза (Маастрихт, Нидерланды, 2002), 30-й Генеральной ассамблее Международного радиофизического союза (Иstanbul, Турция, 2011);
- V Всероссийской конференции по атмосферному электричеству (Владимир, 2003), VI-й Всероссийской конференции по атмосферному электричеству (Нижний Новгород, 2007), VII-й Всероссийской конференции по атмосферному электричеству (Санкт-Петербург, 2012);
- Всероссийской конференции молодых ученых «Малые примеси, атмосферное электричество и динамические процессы в атмосфере»(Н. Новгород, 2000), на Всероссийской конференции молодых ученых «Малые примеси, атмосферное электричество и динамические процессы в атмосфере»(Н.Новгород, 2003), на Всероссийской конференции молодых ученых «Состав атмосферы и электрические процессы» (Москва, 2004, Борок, 2005), на Всероссийской конференции молодых ученых «Состав атмосферы, Климатические эффекты, Атмосферное электричество» (Москва, 2006, 2012), на Всероссийской конференции молодых ученых «Состав атмосферы и электрические процессы» (Н. Новгород, 2007), на Всероссийской конференции молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы» (Борок, 2008, Звенигород, 2009, Борок, 2011), на Всероссийской конференции молодых

ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты» (Н. Новгород, 2010, 2013, 2016);

- на международных конференциях по атмосферному электричеству «ICAE-2007» (Пекин, Китай, 2007), «ICAE-2011» (Рио-де-Жанейро, Бразилия, 2011), «ICAE- 2014» (Норман, США, 2011), «ICAE- 2018» (Нара, Япония, 2018);
- на конференции «Устойчивое развитие регионов в бассейнах великих рек. Международное и межрегиональное сотрудничество и партнерство» в рамках форума «Великие реки-2011» (Нижний Новгород, 2011),
- на VI международной конференции «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений»(с. Паратунка, Камчатский край, 2013);
- на 26й Генеральной ассамблее Международного союза геодезии и геофизики IUGG-2015 (Прага, Чехия, 2015);
- на Генеральной ассамблее Европейского союза наук о Земле EGU-2016 (Вена, Австрия, 2016);
- на VI Международной конференции «Frontiers of Nonlinear Physics» (Нижний Новгород, Россия, 2016);
- 3-й Всероссийской конференции «Глобальная электрическая цепь». (пос. Борок, Россия, 2017);
- на Международной конференции 2th URSI Atlantic Radio Science Meeting (Гран-Канария, Испания, 2018) ;
- докладывались на семинарах ИПФ РАН и конкурсах для молодых ученых ИПФ РАН.

Личный вклад автора

Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, в статьях [87–89] и трудах конференций [93–95, 97, 99, 100, 105, 107, 109, 110]

вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из четырех глав, Введения и Заключения. Во **Введении** обосновывается актуальность темы исследований, формулируется цель работы и кратко излагается ее содержание. Всего в работе 50 рисунков. Список литературы состоит из 143 наименований. Общее количество страниц в диссертации: 127 страниц.

1-я глава посвящена численному моделированию динамики электрического поля в атмосфере методом пробных структур.

В разделе 1.1 дается описание аэроэлектрических структур в атмосфере и их основных особенностей.

В разделе 1.2. описаны эксперименты по изучению электрического поля хорошей погоды, проведенные в Геофизической обсерватории "Борок" ОИФЗ РАН им. Шмидта.

В разделе 1.3. представлены результаты численного моделирование динамики электрического поля в атмосфере методом пробных структур. Проанализировано влияние больших ансамблей и отдельных интенсивных пробных структур, а также низкочастотной модуляции скорости потока на спектр флуктуаций и структурную функцию поля.

В разделе 1.4. предложен и реализован метод диагностики параметров аэроэлектрических структур на основе измерения короткопериодных флуктуаций электрического поля.

В разделе 1.5. представлена модель формирования спектров крупномасштабных структур, заполненных турбулентностью, исследованы их спектральные характеристики.

Во **2-й главе** представлены результаты исследований модели коллективного взаимодействия ионов и аэрозолей в атмосферной плазме.

В разделе 2.1. изложен обзор взаимосвязи содержания атмосферных ионов и аэрозолей.

В разделе 2.2. представлено описание и результаты численных исследований модели коллективного взаимодействия ионов и аэрозолей в атмосфере. Исследована зависимость эффективного времени релаксации возмущений электрического заряда в атмосфере в зависимости от различных параметров рассмотренной модели.

В **3-й главе** представлены результаты анализа длительных наземных измерений электрического поля атмосферы в Нижнем Новгороде.

В разделе 3.1. приведено описание системы мониторинга квазистатического электрического поля в Нижегородском регионе.

В разделе 3.2. представлены результаты анализа вариаций атмосферного электрического поля: суточная вариация (раздел 3.2.1), низкочастотные спектры поля хорошей погоды (раздел 3.2.2) и сезонная вариация (3.2.3).

Раздел 3.3. посвящен исследованию влияния облачности на атмосферное электрическое поле, представлены корреляционные соотношения электрического поля и метеорологических параметров (раздел 3.3.1) и теоретические оценки влияния облачного слоя на величину поля, измеряемого на земле (раздел 3.3.2).

4-я глава посвящена исследованию характеристик конвективных событий с использованием результатов разнесенного наземного приема атмосферного электрического поля.

Раздел 4.1. посвящен статистическим характеристикам полей конвективных событий в Нижнем Новгороде.

В разделе 4.2 приводятся результаты анализа крупномасштабных медленных возмущений электрического поля для финальной стадии грозы, в частности, результаты исследования двух «case-studies»: мощного грозового события 1-2 июня 2015 года (раздел 4.2.1) и финальной стадии грозы (раздел 4.2.2).

В разделе 4.3 представлены результаты исследований по детектированию грозовых разрядов с помощью сетей флюксометров на примере уникальной «зимней» грозы в Нижнем Новгороде 25 апреля 2015 года.

В разделе 4.4 проанализированы особенности спектральных характеристик электрического поля грозовых облаков.

В Заключение приведены основные результаты диссертации.

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю чл.-кор. РАН Марееву Е.А. за помощь в постановке научных задач, обсуждении полученных результатов и подготовке публикаций и докладов. Автор также выражает благодарность своим соавторам: Анисимову С.В., Шиховой Н.М., Галиченко С.В. и всему коллективу Геофизической обсерватории "Борок" ОИФЗ РАН за многолетнее плодотворное сотрудничество; соавторам Клименко В.В., Шлюгаеву Ю.В., Ильину Н.В. Дементьевой С.О. и Кутерину Ф.А. (ИПФ РАН) за организацию натурных экспериментов, совместную работу и ценные замечания в процессе работы над диссертацией.

Глава 1

Квазистационарные электрические поля и структуры в атмосфере в условиях хорошей погоды

Данная глава посвящена исследованию особенностей пульсаций электрического поля в приземном слое атмосферы и их спектров. Для объяснения особенностей показателей спектров электрического поля, полученных в натуральных экспериментах в условиях хорошей погоды, была построена модель формирования аэроэлектрических структур, которая, в частности, предоставила возможность диагностики их параметров.

1.1. Аэроэлектрические структуры в пограничном слое

Как было установлено в последние десятилетия XX века, короткопериодные (1-100 с) пульсации атмосферного электрического поля хорошей погоды связаны в первую очередь с атмосферной динамической турбулентностью. Для того, чтобы изучить эту связь, были разработаны методики и проведены экспериментальные исследования методом разнесенного приема турбулентных аэроэлектрических пульсаций, определены их спектральные и энергетические характеристики [71, 73, 75]. В результате структурно-временного анализа полученных данных было сформировано представление о так называемых аэроэлектрических структурах, которые представляют собой возмущения электрического заряда в воздухе, формирующиеся в результате турбулентного перемешивания заряженных частиц в воздухе. Формируясь в результате коллективных процессов или захвата конвективными ячейками положительных и отрицательных заряженных частиц (как ионов, так и аэрозолей), аэроэлектрические структуры перемещаются в потоке воздуха вдоль земной поверхности.

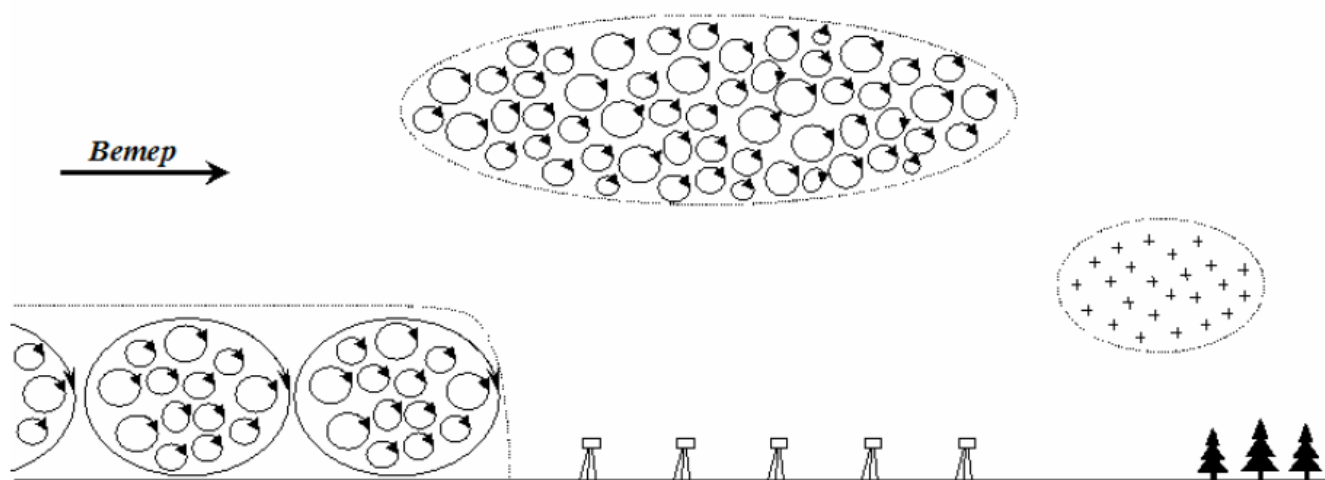


Рисунок 1.1 – Турбулентность и электрическое состояние приземной атмосферы [91]

Наиболее активно процесс формирования аэроэлектрических структур идет в условиях интенсивной конвекции. Размеры аэроэлектрических структур определяются характерными масштабами изменения аэродинамических и электродинамических параметров атмосферы (в том числе высотой приземного слоя и масштабом «электродного» слоя атмосферы) [75, 113], а также неоднородностей нагрева земной (водной) поверхности.

Поскольку дальнейшая эволюция конвективных элементов приводит, в частности, к образованию облаков [114, 115], связь подобных конвективных элементов атмосферы с развитием аэроэлектрических структур заставляет предположить, что процессы разделения и аккумуляции зарядов характерны уже для ранних стадий развития облака. Очевидно, что разработка методов диагностики и моделирования аэроэлектрических структур важна для изучения и конвективных, и электрических процессов в нижней тропосфере.

С другой стороны, анализ экспериментальных данных показал, что спектры пульсаций атмосферного электрического поля в достаточно широкой полосе частот 10^{-2} -1 Гц обычно подчиняются степенному закону, причем наиболее вероятные значения показателя спектра в условиях хорошей погоды находятся в интервале от -2,2 до -3,0 [55, 77, 79]. Поэтому в качестве одного из подходов к

решению задачи теоретического исследования флуктуаций электрического поля можно рассматривать моделирование спектров электрогазодинамической турбулентности. В отдельных экспериментальных реализациях короткопериодные пульсации электрического поля, по-видимому, действительно связаны с турбулентным перемешиванием заряженных частиц [37, 55, 116, 117]. Однако, в отличие от обычных для теории атмосферной турбулентности полей скорости, температуры и давления [81, 83], напряженность электрического поля нельзя считать локальной величиной, – флуктуации поля порождаются совокупным действием возмущений электрического заряда в окрестности точки наблюдения - в неоднородном слое приземной атмосферы.

1.2. Натурные исследования пульсаций электрического поля в приземном слое атмосферы в условиях хорошей погоды

Эксперименты, результаты которых послужили основанием и основной мотивацией исследований, изложенных в настоящей главе, были выполнены с использованием метода разнесенного синхронного приема пульсаций аэроэлектрического поля (см. подробнее [82, 92, 109]). Наблюдения проводились на полевом измерительном полигоне Геофизической обсерватории «Борок» РАН [58°04'25"с.ш. 38°14'07"в.д.]. В качестве датчиков атмосферного электрического поля использовались электростатические флюксометры, специально разработанные в Геофизической обсерватории «Борок» РАН для непрерывной работы в условиях полевого натурального эксперимента [55]. Флюксометр является хорошо известным и апробированным средством для измерения вертикального электрического поля в атмосфере [11, 20, 39, 55, 65, 101, 118], позволяющим вести круглогодичные наблюдения вне зависимости от погоды [119–121]. Установка Геофизической обсерватории «Борок» РАН состояла из двух «измерительных линеек», содержащих по пять датчиков в каждой из линий. Процедура обработки включала спектральный, структурный и структурно-временной анализ вариаций напряженности поля [82].

Спектры пульсаций электрического поля в достаточно широкой полосе частот 10^{-2} -1 Гц обычно подчиняются степенному закону, причем наиболее вероятные значения показателя спектра в условиях хорошей погоды (отсутствие облачности, скорость ветра не превышает 3 м/с) находятся в интервале от -2,2 до -3,0 [79, 87]. В области более низких частот 10^{-4} - 10^{-2} Гц соответствующие спектры, как правило, характеризуются наличием составляющих, приводящих в различных реализациях к изменению показателя степени, отклонению от степенного закона и насыщению [82].

На рисунке 1.2 приведен характерный пример синхронных записей вариаций электрического поля, регистрируемых с использованием электростатических флюксометров (а) и индукционных датчиков (б). На рисунке 1.3 приведен спектр электрического поля (а) и структурная функция (б). Процедура вычисления структурной функции и спектров на основе получаемых данных во всем диапазоне измеряемых частот подробно описана в [94]. Приведенные результаты получены для условий хорошей погоды. На регистрограммах хорошо видна последовательность вариаций электрического поля различной амплитуды (от десятков В/м до 150 В/м), регистрируемая практически синхронно всеми десятью датчиками.

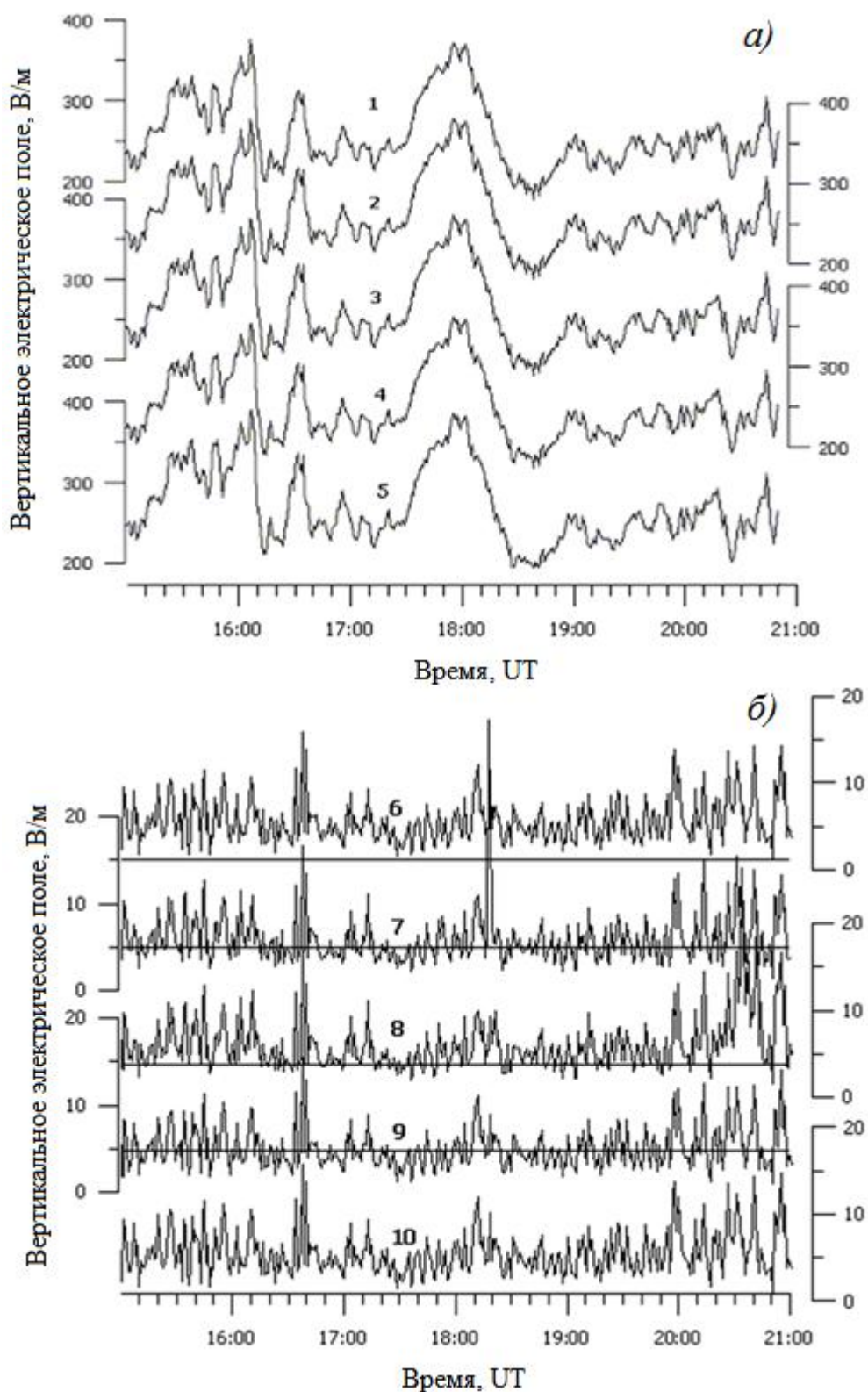


Рисунок 1.2 – Регистрограммы синхронных наблюдений приземного поля атмосферы 29 сентября 2001 г. (а) каналы 1-5 -минутные средние напряженности поля; (б) каналы 6-10 – минутные стандартные отклонения поля аэроэлектрических пульсаций

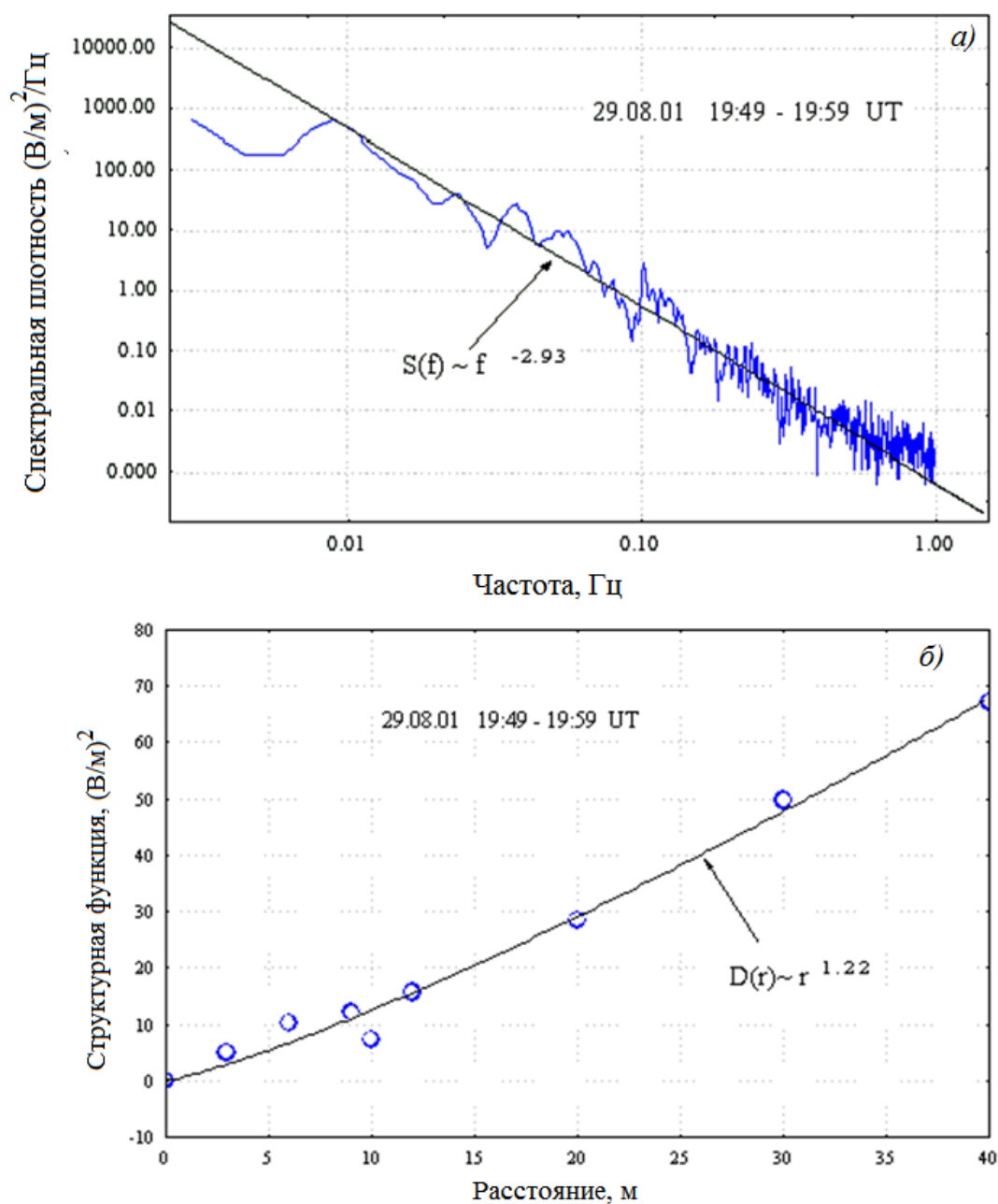


Рисунок 1.3 – Спектральная плотность (а) и структурная функция (б) приземного электрического поля атмосферы 29 сентября 2001 г. для интервала 19:49-19:59 UT

Для описания формирования спектра флуктуаций электрического поля ранее была развита теория, учитывающая турбулентное перемешивание заряженных частиц, и продемонстрирована принципиальная роль нелокальности связи напряженности электрического поля и плотности объемного заряда в условиях пространственно неоднородной турбулентности [55, 73, 75, 77, 79]. В

отличие от обсуждаемых в классической теории атмосферной турбулентности пульсаций скорости и температуры нейтрального газа [81], напряженность атмосферного электрического поля является нелокальной величиной, которая определяется неоднородным распределением объемных зарядов в пространстве вблизи точки наблюдения. В результате наклон спектра структурированных аэроэлектрических пульсаций существенно зависит от локализации аэроэлектрических структур относительно точки наблюдения. Это очевидно, в частности, при рассмотрении следующих двух предельных случаев. Для идеально однородной турбулентности с «вмороженными», как пассивная примесь, объемными зарядами спектр пульсаций поля в инерционном интервале пропорционален $\Psi_E(f) \propto f^{-1/3}$, где f - частота. В то же время спектр, генерируемый турбулентными пульсациями заряда внутри аэроэлектрической структуры, удаленной от точки наблюдения, оказывается пропорциональным $\Psi_E(f) \propto f^{-5/3}$, если плотность заряда по-прежнему ведет себя как пассивная примесь (см. подробнее раздел 1.4). В реальных экспериментах [55, 82, 122] реализуются промежуточные значения показателей спектра пульсаций электрического поля в достаточно явно выраженном интервале самоподобия, охватывающем две декады по частоте. В настоящей главе для построения модели электрогазодинамической (ЭГД) турбулентности в атмосфере применяется дискретный метод пробных структур, впервые использованный в работах [82, 94].

1.3. Моделирование динамики электрического поля в атмосфере методом пробных структур

Задача восстановления источников квазистатического поля по его регистрограммам в конечном числе точек на поверхности относится к типу некорректно поставленных задач. Однако с учетом имеющейся в эксперименте информации о скорости переноса источников поля над поверхностью Земли, можно провести процедуру регуляризации задачи, проводя поиск в классе

источников, движущихся с определенной скоростью в заданном направлении. В рамках данной процедуры разработана численная модель расчета флуктуаций электрического поля на поверхности Земли. Пробные структуры задавались следующими параметрами: монопольным зарядом Q , дипольным зарядом P , горизонтальной скоростью V , и координатой $\vec{r} = (x, y, z)$, ось Z направлена вверх, перпендикулярно поверхности Земли, ось X совпадает с линейкой приемников (Рисунок 1.4).

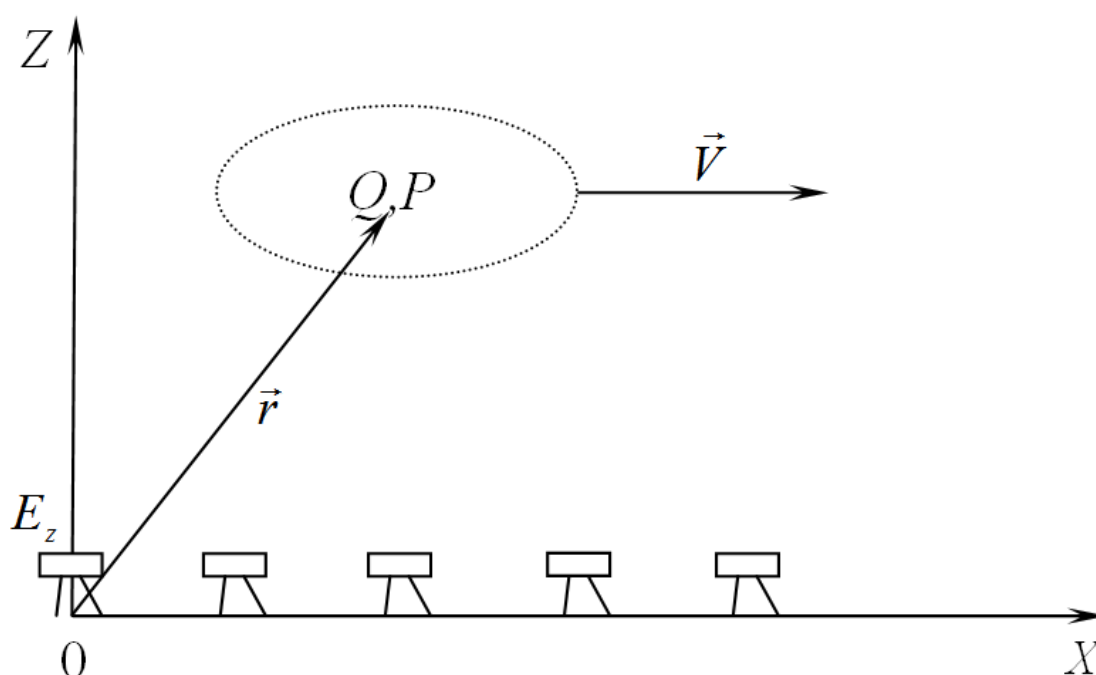


Рисунок 1.4 – Схематическое изображение модельной аэроэлектрической структуры с параметрами Q , P , V и \vec{r} , пролетающей над линейкой флюксметров

Электрическое поле, создаваемое i -ой структурой в точке $\vec{r}' = (x', y', z')$, в квазистатическом приближении рассчитывалось с использованием метода изображений [85] в приближении идеально проводящей Земли по формулам:

$$E_i^m(\vec{r}, t, \vec{r}_i') = \frac{2Q_i z_i'}{((x_i' - x) + V_i t)^2 + (y_i' - y)^2 + (z_i' - z)^2}^{\frac{3}{2}} \quad (1.1)$$

для монополя, и

$$E_i^d(\vec{r}, t, \vec{r}_i') = \frac{6P_{x_i z_i'}(x_i' + V_i t)}{(((x_i' - x) + V_i t)^2 + (y_i' - y)^2 + (z_i' - z)^2)^{3/2}} \quad (1.2)$$

для горизонтального диполя. Тогда ансамбль из N заряженных структур создает в точке наблюдения \vec{r}' вертикальное электрическое поле $E_z(\vec{r}, t)$, равное суперпозиции полей отдельных структур:

$$E_z(\vec{r}, t) = \sum_{i=1}^N (E_{i_z}^m + E_{i_z}^d). \quad (1.3)$$

При вычислении структурной функции усреднение по ансамблю из N частиц заменялось усреднением по времени измерений в предположении эргодичности процесса:

$$D_E(x) = \frac{1}{T} \int_0^T |E_z(0, t) - E_z(x, t)|^2 dt. \quad (1.4)$$

Вначале задавались случайные параметры структур и вычислялось значение электрического поля $E_z(x, t)$, создаваемого на виртуальных приемниках, расположенных вдоль оси X в интервале $x \in [0; L_D]$, где L_D - расстояние порядка 100 м. После этого по формуле (1.4) рассчитывалась структурная функция $D(x)$. Спектр электрического поля $\Psi_E(\omega)$ вычислялся для точки $\vec{r} = (0, 0, 0)$ с помощью быстрого преобразования Фурье с применением процедуры предварительного вычитания среднего. При выборе параметров структур считалось выполненным соотношение $L_D \ll L_z \ll L_{\perp}$, где L_{\perp} - интервал, в котором распределены структуры в плоскости (XOY) , L_z - интервал распределения структур по высоте.

Как показал численный анализ, вследствие того, что вклад каждой отдельной структуры в результирующее электрическое поле обратно пропорционален квадрату расстояния, а приемники расположены на одной прямой вдоль оси X , вклад структур с отличной от нуля поперечной координатой пренебрежимо мал. Ниже представлены результаты моделирования динамики

электрического поля с учетом структур, летящих со скоростью V вдоль оси X в плоскости XOZ со случайной начальной координатой x_0 и случайным зарядом. Оказалось, что поведение поля во времени и соответствующий спектр близки к экспериментальным, если распределение пробных структур (общим числом $N \sim 10^1 \div 10^3$), представляет собой несколько слоев монополей, движущихся со скоростью 1-2 м/с на высотах 5, 20, 50, 100 и более метров, а заряд структур в среднем растет с ростом высоты от 0.1 (на нижнем уровне) до 1000 ед. СГСЭ (на верхнем уровне). Данное распределение отвечает тому обстоятельству, что суммарный заряд крупной структуры пропорционален ее объему, и такие структуры реально могут сформироваться лишь на достаточно большой высоте. Концентрация крупных структур, естественно, мала по сравнению с концентрацией мелких, но мелкие неоднородности заряда на больших высотах не вносят вклада в поле, измеряемое на поверхности Земли, и поэтому их можно не учитывать.

Численное моделирование показало, что достаточно представительный ансамбль структур, распределенных по высоте и интенсивности, формирует пульсации поля со статистическими свойствами, близкими к наблюдаемым в опыте. Для выяснения наклона полученные спектры пульсаций аппроксимировались степенными функциями $\Psi_E(f) \propto f^{-\alpha_s}$. Результаты расчетов представлены на рисунках 1.5-1.7.

На рисунке 1.5 приведены результаты расчета для 500 аэроэлектрических структур, распределенных в слое высотой 110 м. Наклон спектра равен $\alpha_s=2.66$ (спектр аппроксимировался в интервале частот $[0.01, 0.1]$ Гц); структурная функция растет на малых масштабах с показателем степени $\alpha_D=0.91$.

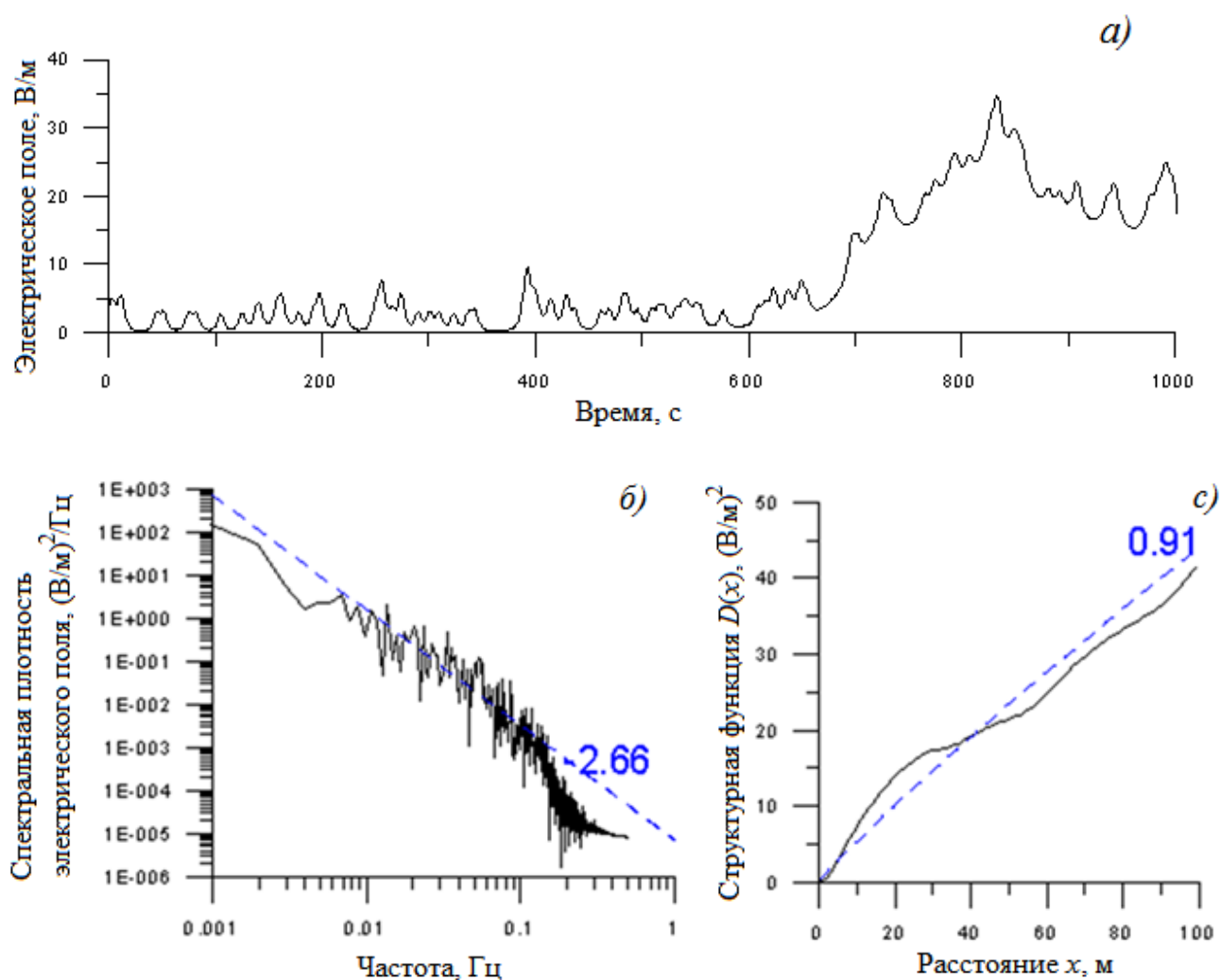


Рисунок 1.5 – Пример электрического поля (а), спектра (б) и структурной функции (в) ансамбля монопольных структур. $N = 500$, $V = 1$ м/с, $Q \in [0.1; 1000]$ ед. СГСЭ

На рисунке 1.6 продемонстрировано влияние отдельного интенсивного диполя на спектр и структурную функцию поля, генерируемого ансамблем пробных структур. Оказалось, что такие интенсивные источники, характеризуемые высокими значениями мультипольных моментов, ведут к уменьшению наклона спектра в области самоподобия и увеличению степени роста структурной функции аэроэлектрических пульсаций. В данном случае эти показатели были равными $\alpha_S = 3.58$; $\alpha_D = 1.22$ для облака монополей, и $\alpha_S = 2.76$;

$\alpha_D=1.43$ в присутствии интенсивного диполя (спектры аппроксимировались на участке $[0.01, 0.1]$ Гц).

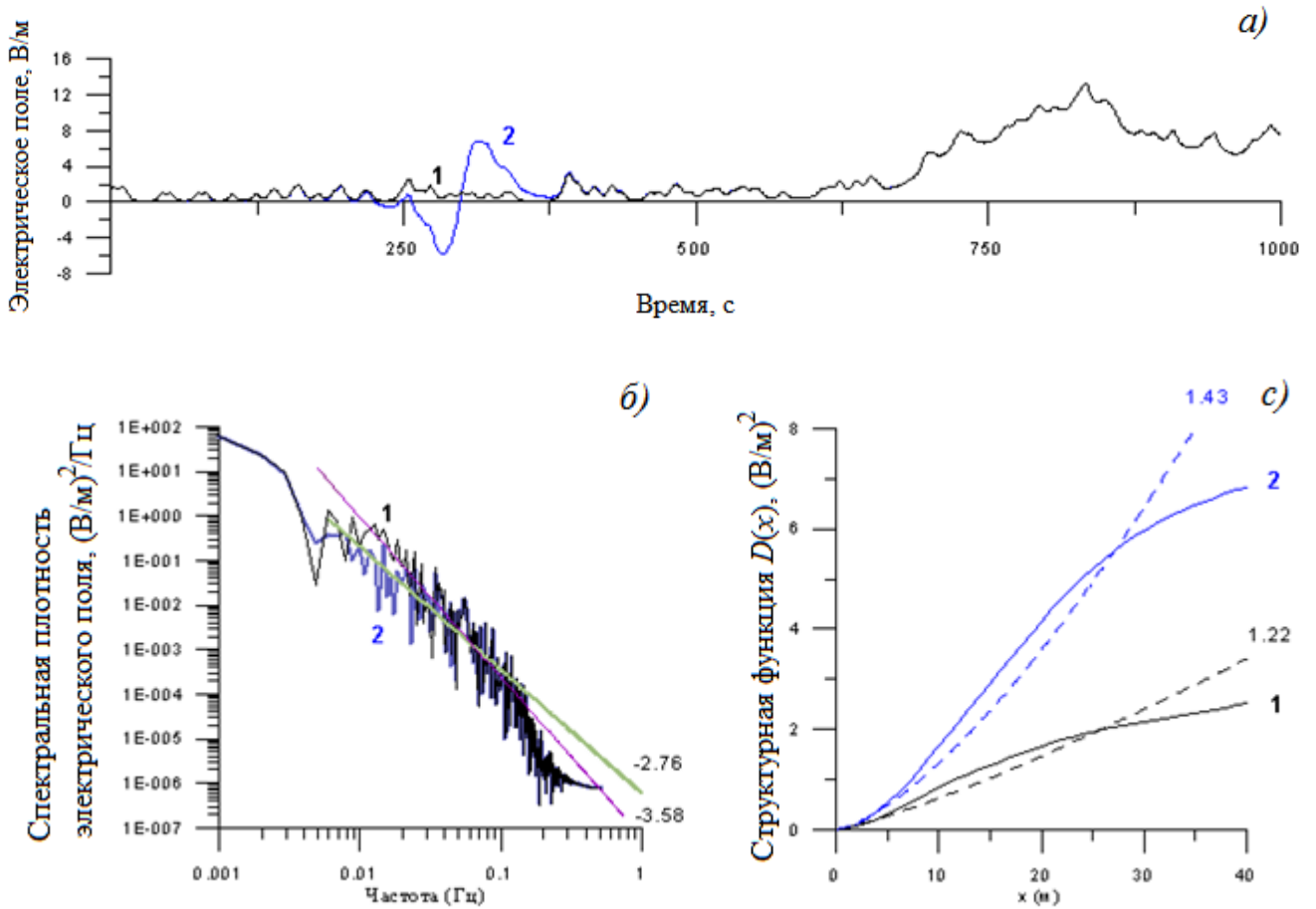


Рисунок 1.6 – Влияние отдельного интенсивного диполя на электрическое поле (a), спектра (б) и структурной функции (в) ансамбля монополярных структур. 1 – без дипольной структуры, 2 – с дипольной структурой. $N = 260$, $V = 1$ м/с, $Q \in [0.1;1000]$ ед. СГСЭ, дипольный момент $P_x = 10^5$ ед. СГСЭ·м

Как видим, в рамках предложенной модели связь между показателями наклона спектров и роста структурной функции отличаются от классической связи $\alpha_d = \alpha_s - 1$, справедливой для колмогоровской турбулентности. Данное обстоятельство является следствием нелокального характера измеряемой величины электрического поля в рассматриваемой неоднородной среде и подробно обсуждается в работе [82]. Отметим, что связь показателей роста

структурных функций и индексов наклона спектра несколько менялась в зависимости от параметров случайно выбранного ансамбля структур, причем важную роль играл выбор интервалов аппроксимации соответствующих зависимостей, определяемый фактически условиями натурального эксперимента. В исследуемом интервале частот и масштабов эта связь в среднем оказалась близкой к полученным в эксперименте соотношениям.

Ниже приведены на рисунке 1.7 результаты анализа ансамбля структур, осциллирующих в плоскости XOZ с периодами $T_g=5\div 7$ минут (частоты $f_g \approx 0.002 - 0.003$ Гц), отвечающим типичным значениям периодов наиболее «высокочастотных» волн в атмосфере[115].

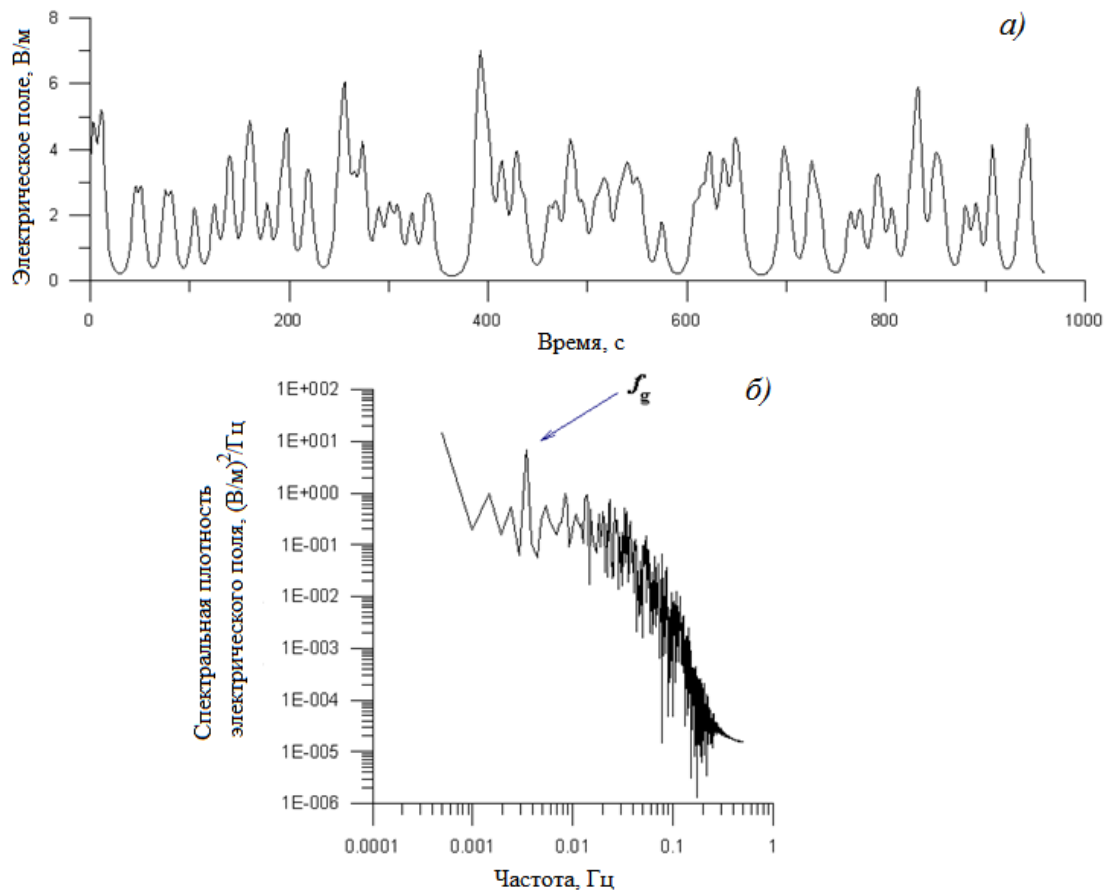


Рисунок 1.7 – Пример поля (а) и спектра (б) ансамбля монопольных структур, осциллирующих в плоскости XOZ с частотой $f_g \approx 0.003$ Гц ($N = 150$, $V = 1$ м/с, $Q \in [1;10]$ ед. СГСЭ)

Расчеты показали, что ансамбль структур, находящийся в поле внутренней гравитационной волны, генерирует спектр с максимумом, соответствующим частоте волны $f_g \approx 0.003$ Гц (рисунок 1.7). Для последнего случая вычисления велись в классе движущихся на небольшой высоте монополярных пробных структур. В целом же влияние гравитационных волн на ЭГД турбулентность представляет собой крупную проблему, требующую специального исследования.

Таким образом, приведенные в данном разделе результаты модельных экспериментов показывают, что для численного исследования динамики атмосферного электрического поля необходимо учитывать неоднородность пространственного распределения объемных зарядов в пограничном слое атмосферы.

1.4. Диагностика электрического состояния пограничного слоя в условиях хорошей погоды

В настоящем разделе представлен следующий алгоритм анализа экспериментальных данных, позволяющий осуществлять диагностику электрического состояния пограничного слоя атмосферы, включая параметры и распределение аэроэлектрических структур. Из величины напряженности электрического поля, регистрируемого при натурных наблюдениях, на первом этапе вычитается его среднее за некоторый достаточно большой интервал значение. Результат разности рассматривается и анализируется как совокупность флуктуаций поля, обусловленных вкладом локальных пробных структур. Если ограничиться рассмотрением наборов только монополярных разноименно заряженных структур, можно воспользоваться для учета напряженности поля отдельной структуры выражением (1.2). В этом простейшем приближении восстанавливаемые структуры характеризуются следующими параметрами: начальные координаты (x_0, y_0, z_0) , заряд Q , и горизонтальная скорость $V = \text{const}$. Учитывая, что поле структуры достаточно сильно убывает с расстоянием, а также тот факт, что экспериментальные измерения электрического поля велись в

основном с использованием линейки датчиков, выстроенных вдоль одной прямой, можно считать все структуры движущимися в плоскости XOZ , т.е. $y_0 = 0$. Таким образом, максимум поля определяется условием: $x_0 = -Vt_{\max}$, и поле в максимуме равно:

$$E_{\max} = \frac{2Q}{z_0^2} \quad (1.6)$$

На каждом шаге итерационного алгоритма вычисляется вклад элементарных структур, причем расчет начинается с отвечающих наибольшим по амплитуде и продолжительности вариациям напряженности электрического поля. Рассчитанная величина поля модельных структур вычитается из исходного. Таким образом вычисления ведутся до того предела, когда модуль разности восстановленной и измеренной экспериментально напряженности электрического поля становится меньше заданной величины ($< 0.1\%$ от исходного) для каждого из мгновенных значений напряженности поля.

Пример применения изложенной процедуры к анализу данных эксперимента приведен на рисунках 1.8-1.10. На основе данных обсерваторских наблюдений от 29 августа 2001 года для промежутка времени 16:30–8:30 UT (см. рисунок 1.2), согласно предложенному алгоритму были получены параметры 557 модельных структур. Распределение структур и их зарядов в пространстве представлено на рисунке 1.8. На рисунке 1.9 приведено рассчитанное для наиболее интенсивных 100 структур электрическое поле в сравнении с экспериментально измеренным, а на рисунке 1.10 – спектр и структурная функция этого модельного поля.

Считая заданной плотность электрического заряда внутри аэроэлектрической структуры, можно оценить ее характерный масштаб. Для такой оценки было принято значение $\rho = 50 \text{ e/cm}^3$, характерное для развитого электродного эффекта [25, 113, 123] и фиксировавшееся ранее в измерениях возмущений плотности заряда в приземном слое [93, 124]. Так, для двух наиболее

интенсивных структур (см. на рисунке 1.6 (а) точки 1 и 2) получается $V_{\text{str}} \cong 10^7 \div 10^8 \text{ м}^3$. Естественно предположить, что паре монополярных структур разного знака, близких по значению и летящих на близкой высоте, соответствует единая дипольная структура. Поэтому отмеченные структуры 1 и 2 можно рассматривать как одно крупное поляризованное облако с наклонным относительно оси Z дипольным моментом, горизонтальным масштабом около 4 км, вертикальным размером около 200 м, и высотой пролета над приемником около 500 м. Наряду с нескомпенсированным зарядом, захваченным вследствие электродного эффекта, определенный вклад могут вносить коллективные эффекты взаимодействия легких ионов мелких аэрозолей и гидрометеоров, а также поляризация структуры во внешнем электрическом поле [73]. В процессе дальнейшей эволюции аэроэлектрической структуры в ней могут начаться процессы разделения заряда и фазовых переходов воды, характерные для облака. В более специальных условиях (например, при пылевых бурях) возмущения плотности заряда и электрического поля на поверхности Земли могут стать существенно более высокими вследствие интенсивных процессов разделения зарядов при трении [125].

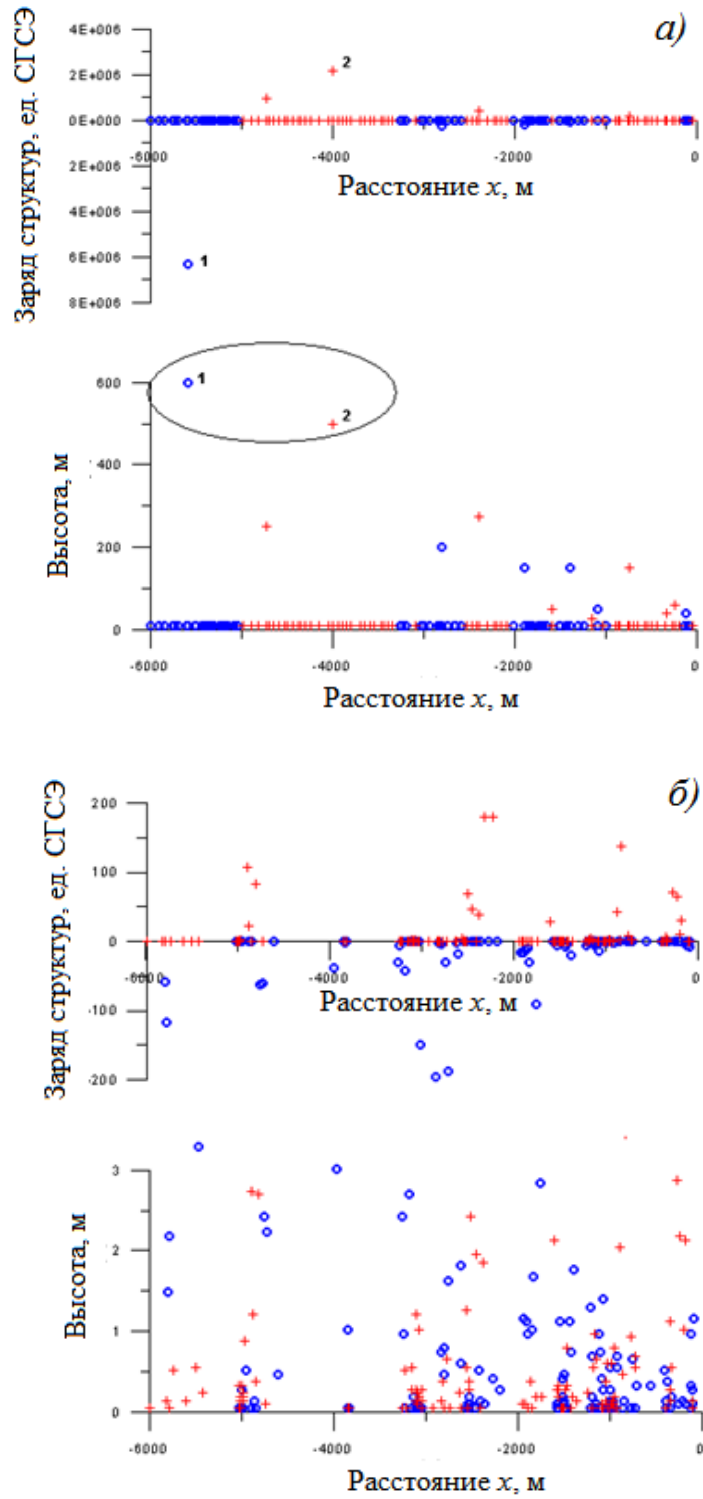


Рисунок 1.8 – Распределение структур по заряду и в плоскости XOZ во всем пространстве (*a*) и в интервале высот от 0 до 3 м (*б*)



Рисунок 1.9 – Вертикальное электрическое поле $E_z(t)$: экспериментальное (черная линия) и модельное (серая линия), построенное на основе данных для первых 100 структур, полученных при последовательных итерациях

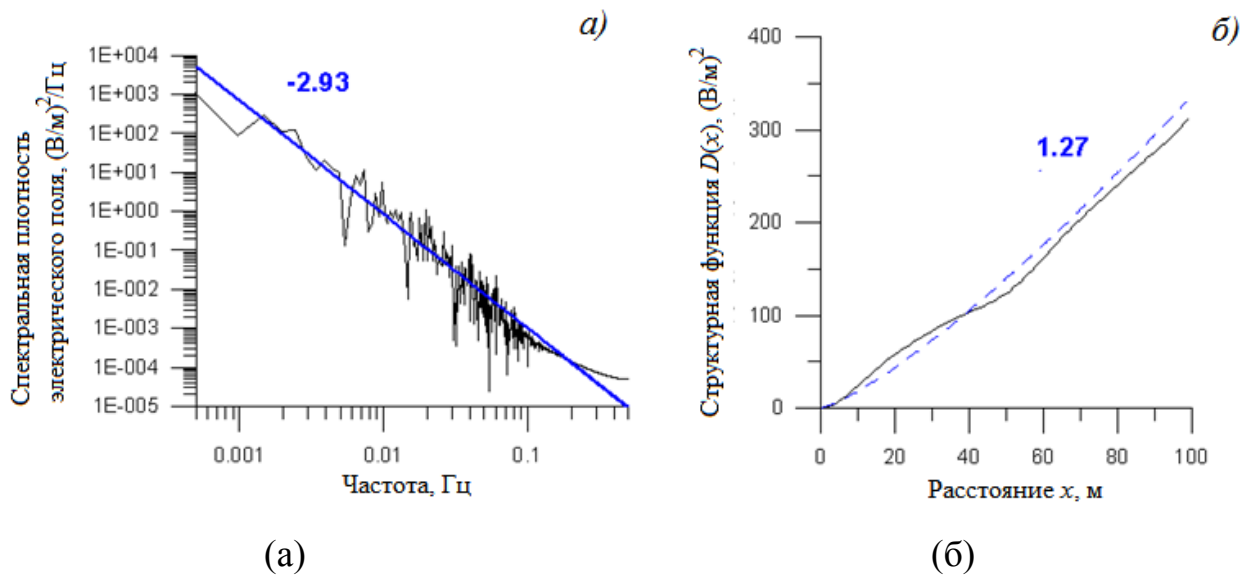


Рисунок 1.10 – Спектр (а) и структурная функция (б) и модельного электрического поля, $\alpha_S=2.93$ и $\alpha_D=1.27$

1.5. Модель формирования спектров крупномасштабных структур, заполненных турбулентностью

Для ряда задач диагностики электрического поля в атмосфере представляет интерес учет вклада крупномасштабной структуры, заполненной ЭГД турбулентностью. экспериментальные данные о турбулентности пограничного слоя свидетельствуют о том, что она, как правило, является «структурированной», т.е. сосредоточенной в конвективных струях, термиках и т.д. [114, 126]. В предположении, что турбулентность колмогоровская, а плотность электрического заряда является пассивной примесью, этот вклад можно вычислить аналитически [87, 91, 95, 127].

Рассмотрим спектр пульсаций, порождаемый структурами, которые заполнены турбулентным газом. Представим плотность электрического заряда аэроэлектрической структуры объема V_{str} , перемещающейся вдоль оси X со скоростью V на высоте z_0 , в виде: $\rho(\vec{r}, t) = \rho(x - Vt, y, z)$. Если плотность заряда является пассивной примесью, то спектр электрического поля, создаваемого такой структурой, представляет собой свертку спектров мелкомасштабной однородной турбулентности и изолированной структуры и выражается формулой:

$$\Psi_E(f) = \frac{10^{-2} \sigma_\rho V_{str}^2}{2z_0^3 L_0^{2/3} V^2} \int_{-\infty}^{\infty} F\left(\frac{2|f - f'|z_0}{V}\right) \left(k_0^2 + \frac{f'^2}{V^2}\right)^{-5/6} df', \quad (1.7)$$

где L_0 – внешний масштаб турбулентности, $k_0 = 1/L_0$, σ_ρ – проводимость, а

$$F = e^{-\frac{2|f-f'|z_0}{V}} \left(3 + 6 \frac{z_0}{V} |f - f'| + 4 \frac{z_0^2}{V^2} |f - f'|^2 \right) - \quad (1.8)$$

спектр изолированной структуры $F \propto |f|z_0/V$. Отсюда в предельном случае $L_0 \ll z_0$, когда масштабы функций сильно отличаются, спектр поля изолированной структуры получается $\Psi_E(f) \sim f^{-5/3}$, удовлетворяющий универсальному «закону $-5/3$ ». В общем случае интеграл можно исследовать численно (см. рисунок 1.11).

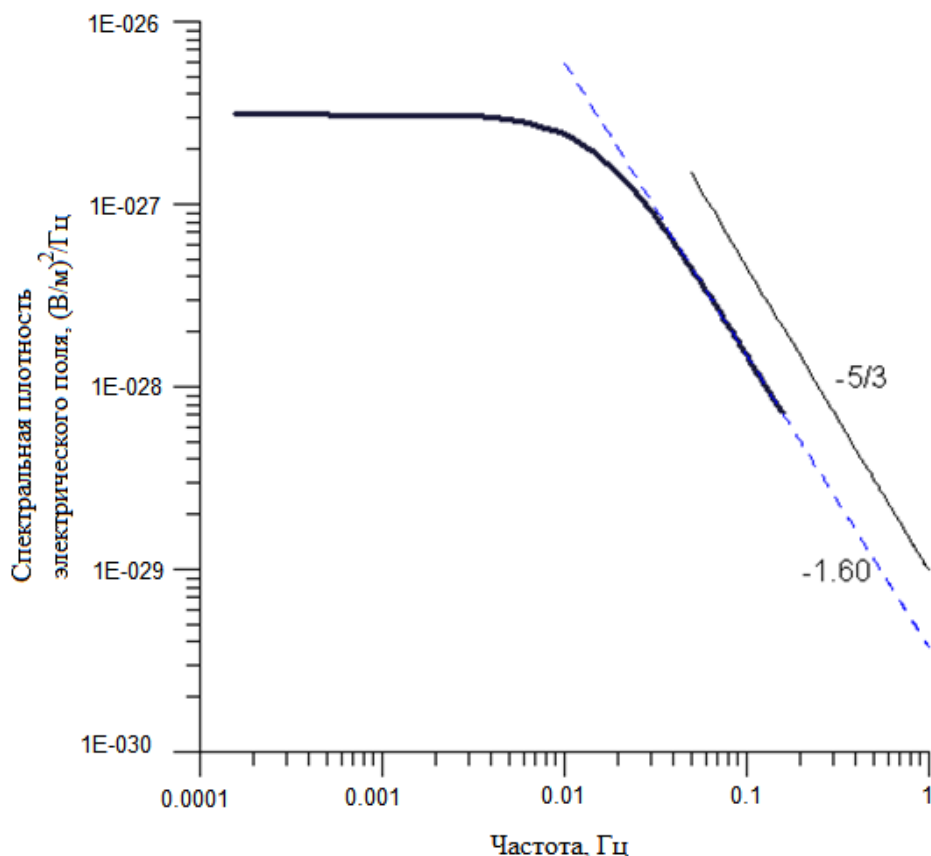


Рисунок 1.11 – Пример спектра (1.7) для следующих параметров: $z_0 = 1500$ м и $L_0 = 60$ м, $V_{str} = 2,7 \cdot 10^4$, $\sigma_p = 10^{-11}$. Для сравнения на графике приведен наклон $f^{-5/3}$

Из рисунка 1.11 видно, что спектр спадает степенным образом в области частот больше 0.01 Гц и практически не зависит от частоты в низкочастотной области. Если аппроксимировать полученный спектр на участке [0.05, 0.15] Гц степенной функцией $\Psi_E(f) \propto f^{-\alpha_s}$, то оказывается, что наклон спектра $\alpha_s \approx 1.6$ близок к «закону -5/3» [81] и слабо зависит от параметров. При увеличении L_0 «завал» спектра происходит при более низких частотах. Дополнительный анализ показал, что изменение параметров L_0 и z_0 в достаточно широком диапазоне при соблюдении условия $L_0 \ll z_0$ не меняет характер спектра. Оказалось, что качественно картина решения (вид кривой и степень наклона при больших частотах) не меняется и при $L_0 \cong z_0$.

Показательно, что подобный вид спектра получается, когда турбулентность представляется в виде потока ЭГД вихрей – монополей, вращающихся с некоторой угловой скоростью. Так, для ансамбля структур, летящих над землей со скоростью 1 м/с и вращающихся (в попутной системе отсчета) в плоскости XOZ по окружности с радиусом $R = 1$ м и частотой $f_{\text{turb}} = 0.2$ Гц, спектр ведет себя подобным образом: степенной спад с показателем $\alpha_S \approx -4.5$ при больших частотах (рисунок 1.12). Кроме того, в спектре наблюдается максимум на частоте вращения структур. Параметры структур в данном примере были выбраны следующим образом: заряд структур $Q = \text{ед.СГСЭ}$, высота $z_0 = 5$ м.

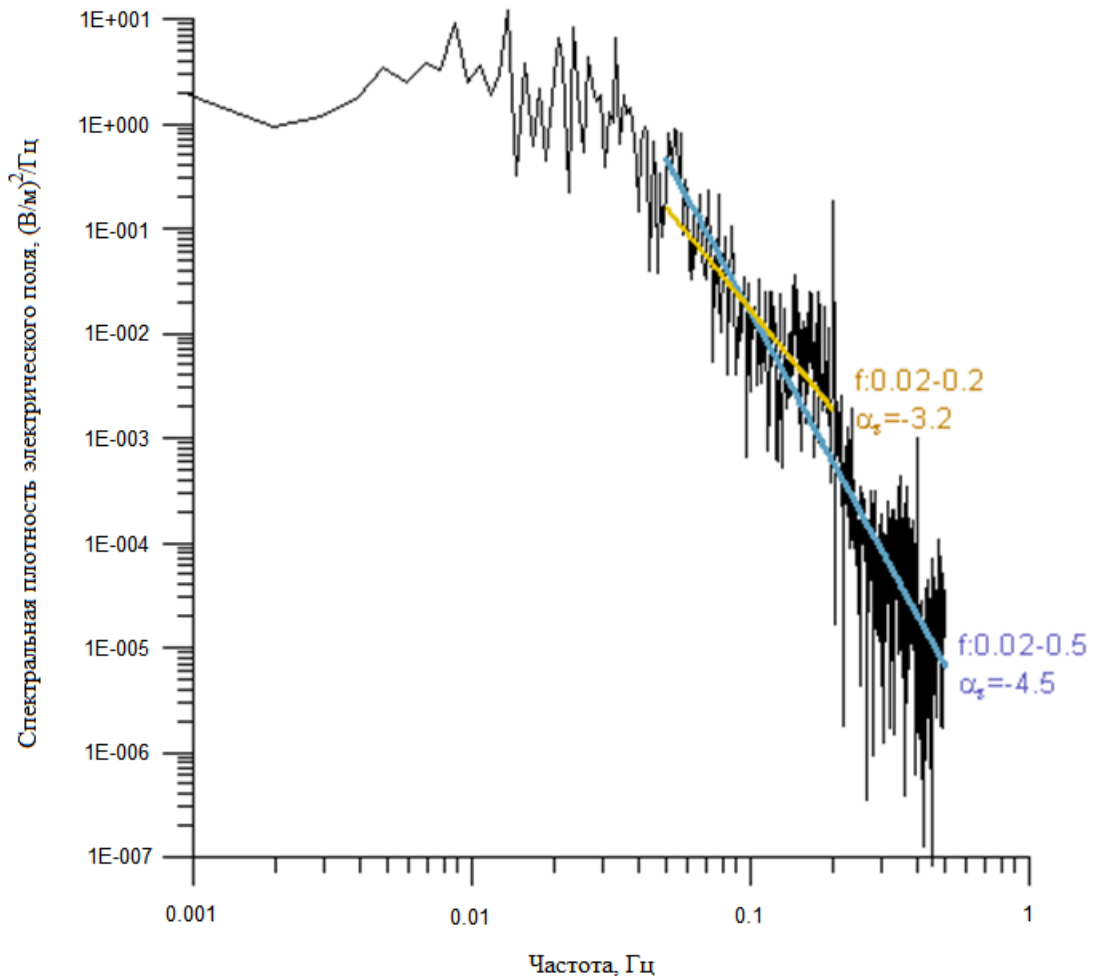


Рисунок 1.12 – Пример спектра ансамбля вращающихся монополярных структур. $N = 100$, $V = 1$ м/с, $Q = 10$ ед.СГСЭ·м, $z_0 = 5$ м, радиус вращения $R = 1$ м, частота вращения $f_{\text{turb}} = 0.2$ Гц

Структурная функция в данном случае резко растет на малых масштабах, а затем испытывает квазипериодические осцилляции вблизи уровня насыщения.

Рассмотренные в данном разделе «эталонные» примеры могут быть полезными при анализе вклада крупных аэроэлектрических структур, заполненных турбулентностью, в частности, классического конвективного облака.

1.6. Выводы к главе 1

В настоящей главе предложен и реализован метод пробных структур для моделирования и диагностики электродинамики пограничного слоя атмосферы. Приведены результаты численного моделирования, необходимого для интерпретации найденных в натуральных экспериментах взаимосвязей параметров спектров и структурных функций короткопериодных пульсаций электрического поля. Разработан итерационный алгоритм восстановления параметров аэроэлектрических структур. Найденны условия, при которых ансамбль модельных структур, распределенных по высоте и интенсивности, формирует пульсации поля со статистическими свойствами, близкими к наблюдаемым в опыте, в частности, генерирует временные реализации со спектрами, обнаруживающими свойства самоподобия в диапазоне частот 10^{-2} -1 Гц. Спектр, генерируемый турбулентностью удаленной аэроэлектрической структуры, оказывается пропорциональным $f^{-5/3}$.

Сравнение с результатами экспериментов показывает, что удаленные аэроэлектрические структуры при наблюдении на поверхности Земли не вносят существенного вклада в энергетику процесса, проявляясь в немногих неструктурированных спектрах, однако эти структуры определяют дисперсию показателей наклона спектров пульсаций.

Результаты, изложенные в данной главе, опубликованы в работах [82, 87, 92–95, 109].

Глава 2

Время релаксации возмущений плотности электрического заряда в атмосфере в присутствии аэрозоля

В настоящей главе исследованы стационарные состояния модельной системы, состоящей из легких аэроионов и аэрозольных частиц в приземном слое атмосферы, с учетом зависимости коэффициентов взаимодействия частиц от напряженности внешнего электрического поля. Получена зависимость времени жизни возмущений электрического заряда в такой системе от концентрации аэрозольных частиц, стационарного электрического поля и внешнего масштаба системы.

2.1. О взаимодействии атмосферных ионов и аэрозолей

Время релаксации возмущений электрического заряда в нижней атмосфере

$$\tau_r = \frac{1}{4\pi\sigma}, \quad (2.1)$$

где $\sigma = q\mu n$ – проводимость, обусловленная носителями заряда q с подвижностью μ и концентрацией n , является фундаментальной характеристикой среды. Лишь при достаточно большом времени релаксации заряда в проводящей среде движение такой среды во внешнем электрическом поле успевает приводить к существенному перераспределению заряда и поля. Так, в приземном слое атмосферы воздух представляет собой слабопроводящую среду, проводимость которой определяется подвижностью легких ионов и составляет $\sigma_0 \approx 10^{-14}$ См/м [3, 116]. Следовательно, время релаксации заряда в воздухе $\tau_r \approx 10^3$ с. Наличие в воздухе над сушей аэрозольных частиц с концентрацией 10^4 см⁻³ и выше ведет обычно к еще большему уменьшению проводимости [128]. Вместе с тем проводимость достаточно быстро (экспоненциально) растет с высотой с

характерным масштабом порядка 6 км [29]. Наличие постоянно действующих источников ЭДС – грозových генераторов, поддерживающих разность потенциалов между землей и ионосферой в областях невозмущенной атмосферы, приводит к поддержанию тока хорошей погоды, который на фоне неоднородного распределения проводимости формирует распределенный положительный заряд в нижних слоях тропосферы [3, 114, 129]. Любые возмущения проводимости в некоторой области атмосферы при этом ведут к формированию электрического заряда вблизи границ этой неоднородности (например, вблизи нижней границы облака, определяемой обычно уровнем конденсации). В тропосфере характерна ситуация, когда ионы находятся в состоянии, близком к термодинамическому равновесию с молекулами газа, причем анализ ионного состава предполагает учет различия диффузионных потоков ионов на нейтральные и разнополярно заряженные аэрозольные частицы [34]. В этом случае справедливы соотношение Эйнштейна для соотношений средних подвижностей положительных и отрицательных ионов μ_{\pm} и их коэффициентов диффузий в среде D_{\pm}

$$\mu_{\pm} / D_{\pm} = q / k_B T, \quad (2.2)$$

где T - температура, а также классическая зависимость для скорости и подвижности ионов обоих знаков в электрическом поле: $V_{\pm} = \mu_{\pm} E$. Легкие аэроионы определяют проводимость атмосферы. Их подвижность в нормальных условиях составляет $\mu = 0.5 \div 5 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ [114].

Основными факторами эволюции униполярного заряда в атмосфере являются: турбулентная диффузия носителей заряда, рекомбинация зарядов с фоновыми ионами, и электростатическое расталкивание ионов [34, 130]. Характерное время турбулентной диффузии порядка $10\text{-}10^3$ с, причем случайные движения воздуха уменьшают плотность зарядов тем сильнее, чем меньше размер зоны возмущений, причем независимо от подвижности и знака заряда новых ионов. Характерное время рекомбинации заряда с фоновыми ионами воздуха – порядка 10^3 с. Кулоновское расталкивание легких ионов составляет 3-30 с, тогда

как тяжелых - $3 \cdot (10^4 \div 10^5)$. Характерное время адсорбции униполярных зарядов частицами атмосферного аэрозоля:

$$\tau_a = (\pi N_a R_a^2 V_{T-})^{-1}, \quad (2.3)$$

где $V_{T-} = 3 \cdot 10^4$ см/с – средняя тепловая скорость отрицательного нового иона, N_a и R_a – соответственно концентрация и средний радиус аэрозоля. Оценка по формуле (2.3) для $R_a = 0.1$ мкм и $N_a = 10^3 - 10^4$ см⁻³ дает $\tau_a = 10 - 100$ с, что означает, что адсорбцию на аэрозолях необходимо учитывать в моделях ионизации, а также, что значительная доля новых легких ионов преобразуется после столкновений с аэрозолем в тяжелые ионы, таким образом спектр подвижностей смещается в сторону тяжелых ионов, таким образом они будут определять проводимость атмосферы в области, где присутствует аэрозоль [130].

Уравнение баланса ионов:

$$\frac{\partial n_{\pm}}{\partial t} = q - \alpha n_+ n_- - n_{\pm} \int_{a=D_0}^{\infty} N_a \beta_a dD_a \quad (2.4)$$

здесь n_{\pm} – концентрации положительных и отрицательных аэроионов, N_a – счетная концентрация аэрозольных частиц со средним диаметром D_a в интервале от D_0 до D_{∞} , α – коэффициент рекомбинации ионов, q – интенсивность ионообразования.

В ряде моделей при анализе ионной обстановки учитываются различия потоков ионов на нейтральные и разнополярно заряженные аэрозольные частицы:

$$\beta_{\pm a} n_{\pm} N_a = \beta_{\pm} n_{\pm} N_0 + \beta_{-\pm} n_{\pm} N_- + \beta_{+\pm} n_{\pm} N_+ \quad (2.5)$$

β_{\pm} – параметр взаимодействия с нейтральными частицами, $\beta_{\pm\pm}$ – с заряженными. Средние значения параметров взаимодействия ионов с тяжелыми ионами и нейтральными аэрозолями (см³/с) [34]:

$$\begin{aligned} \beta_{0-} &= (1.67 - 3.0) \cdot 10^{-6}; \quad \beta_{0+} = (1.2 - 2.2) \cdot 10^{-6}; \\ \beta_{+-} &= (3.97 - 4.9) \cdot 10^{-6}; \quad \beta_{-+} = (4.55 - 5.89) \cdot 10^{-6}; \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\beta_{++} = \beta_{--} \cong (0.5 - 0.9) \cdot 10^{-6}.$$

Содержание тяжелых ионов обычно относительно невелико (10-20%). Наибольший вклад в адсорбцию атмосферных ионов вносят аэрозольные частицы промежуточного интервала размеров $D_a = 0.05 \div 0.5$ мкм. Среднее время жизни аэроионов, обусловленное их адсорбцией аэрозольными частицами $\tau_a = (\beta_a D_a)^{-1} \sim 150 \div 300$ с для разных регионов России. Среднее время жизни легких ионов, обусловленное их рекомбинацией друг с другом, при концентрации $N \sim 10^2 \div 10^3$ равно соответственно $10^3 \div 10^4$ с. В среднем интенсивность ионообразования, обусловленная постоянными природными генераторами ионов: естественной радиоактивностью и космическим излучением, в приземном слое воздуха близка к (10 ± 3) пар ионов в секунду в одном кубическом сантиметре.

Равновесная концентрация атмосферных ионов при условии, что аэрозольные частицы и гидрометеоры отсутствуют. Тогда из уравнения (2.4) можно получить:

$$\frac{\partial n_{\pm}}{\partial t} = q - \alpha_{\pm} n_{+} n_{-} \quad (2.7)$$

В стационарных условиях ($n_{\pm} = \text{const}$) оценка максимальной концентрации n_{\pm} ионов в приземном слое составит:

$$n_{\pm} = (q / \alpha_{\pm})^{1/2}, n_{\pm} \sim (1.5 - 2) \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}. \quad (2.8)$$

За основу положительного иона принимают обычно N_2^+ , а отрицательного O_2^- - из-за большей вероятности встречи ионизирующей частицы или кванта излучения с соответствующими молекулами [131].

2.2. Модель коллективного взаимодействия ионов и аэрозолей в атмосфере

В настоящем разделе рассмотрена модель системы, состоящая из легких аэроионов и аэрозольных частиц, с учетом зависимости коэффициентов взаимодействия этих частиц от напряженности внешнего электрического поля. В декартовой системе координат с осью Z , перпендикулярной земной поверхности, полная систем уравнений, включающая уравнения баланса ионов и аэрозолей, а также уравнения Пуассона для самосогласованного поля, имеет вид:

$$\frac{\partial n_+}{\partial t} + \frac{\partial n_+ v_+}{\partial z} = q - \alpha n_+ n_- - \beta_{+0}(E_z) n_+ N_0 - \beta_{+-} n_+ N_- \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial n_-}{\partial t} + \frac{\partial n_- v_-}{\partial z} = q - \alpha n_+ n_- - \beta_{-0}(E_z) n_- N_0 - \beta_{-+} n_- N_+ \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial N_+}{\partial t} + \frac{\partial N_+ u_+}{\partial z} = \beta_{+0} n_+ N_0 - \beta_{+-} n_- N_+ \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial N_-}{\partial t} + \frac{\partial N_- u_-}{\partial z} = \beta_{-0} n_- N_0 - \beta_{-+} n_+ N_- \quad (2.12)$$

$$v_{\pm} = \pm \mu_{\pm} E - D_{\pm} \frac{\nabla n_{\pm}}{n_{\pm}} \quad (2.13)$$

$$u_{\pm} = \frac{g}{v_a} - D_{a\pm} \frac{\nabla N_{\pm}}{N_{\pm}} \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial z} = 4\pi e(n_+ - n_- + N_+ - N_-) \quad (2.15)$$

Здесь n_{\pm} - концентрации положительных и отрицательных аэроионов, N_{\pm} - концентрации заряженных аэрозолей, N_0 - концентрация нейтральных аэрозолей, β_{ij} - коэффициенты прилипания аэроионов к аэрозольным частицам, E_z - вертикальная компонента напряженности электрического поля, μ_{\pm} и D_{\pm} - подвижности и коэффициенты диффузии аэроионов, $D_{a\pm}$ - коэффициенты диффузии аэрозолей, e - заряд электрона. Скорости заряженных аэрозолей u_{\pm}

определяются их движением в гравитационном поле и турбулентной диффузией. Горизонтальная компонента скорости ветра не учитывается.

Необходимо отметить, что к настоящему времени нет надежных экспериментальных данных о зависимости коэффициентов прилипания от напряженности внешнего поля, тогда как приближенные оценки показывают, что эта зависимость существует. В работе Клетта [131], например, показано, что зависимость коэффициента прилипания начинает сказываться уже при $r \cong 30$ мкм и становится существенной в более высоких полях. Существуют также и другие дополнительные эффекты, такие, как, например, селективный захват ионов (эффект Вильсона), которые играют важную роль в реальных системах, но слишком сложны для учета в теоретических расчетах эффектов прилипания. Поэтому в приведенном ниже анализе мы не конкретизируем зависимость $\beta(E)$ в условиях приземного слоя, однако пользуемся простейшей оценкой для малых коэффициентов взаимодействия.

Распределение аэрозолей по зарядам в данной задаче для простоты не учитывается. Предполагается, что справедливы следующие соотношения симметрии коэффициентов: $\mu_+ = \mu_- = \mu$, $\beta_{+0} = \beta_{-0} = \beta(E_z)$, $\beta_{+-} = \beta_{-+} = \beta_m$. Стационарное состояние системы определяется выражениями:

$$n_{+0} = n_{-0} = n_0 = \frac{\sqrt{q\alpha + \beta^2 N_0^2} - \beta N_0}{\alpha} \quad (2.16)$$

$$N_{+0} = N_{-0} = N_k = N_0 \frac{\beta}{\beta_m} \quad (2.17)$$

Как видно на рисунке 2.1, в стационарном случае с ростом концентрации аэрозолей концентрация аэроионов уменьшается вследствие их адсорбции аэрозольными частицами. В общем случае это приводит к уменьшению проводимости атмосферы и замедлению релаксации заряда, то есть время релаксации растет (рисунок 2.2).

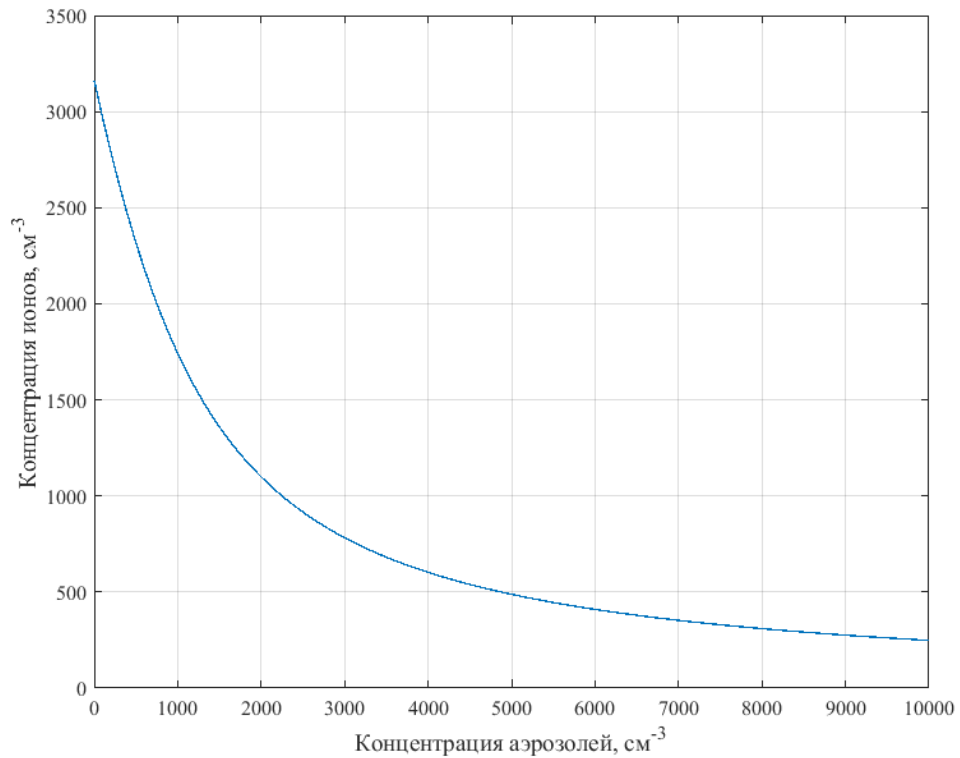


Рисунок 2.1 – Зависимость стационарной концентрации аэроионов от концентрации аэрозолей (2.16)

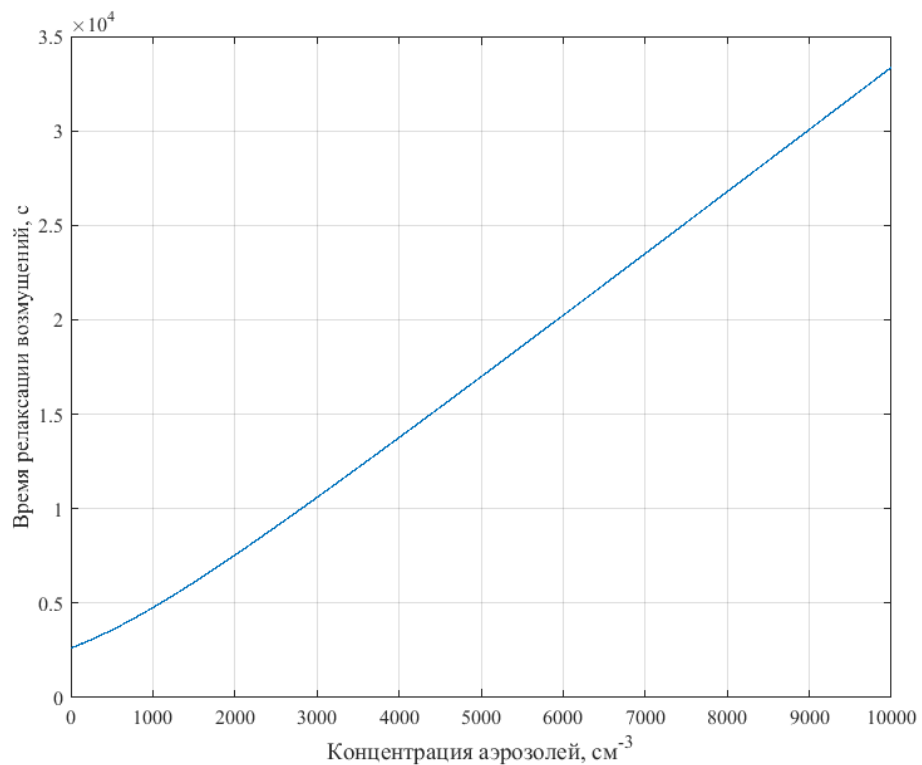


Рисунок 2.2 – Зависимость времени релаксации возмущений электрического заряда τ_r в атмосфере от концентрации аэрозолей (2.11)

2.3. Исследование времени жизни возмущений плотности электрического заряда в присутствии аэрозоля

Для того, чтобы исследовать влияние аэрозоля на время релаксации возмущений плотности электрического заряда, линеаризуем исходную систему (2.9)-(2.15). Будем искать решение в виде малых возмущений $\tilde{n}_\pm, \tilde{N}_\pm, \tilde{E}$. Предполагается, что возмущения электрического поля достаточно малы, так что коэффициенты прилипания можно представить в виде:

$$\beta(E) = \beta(E_0) + \tilde{\beta}(E_0) \frac{\tilde{E}}{E_0}.$$

Далее мы будем просто обозначать: $\beta = \beta(E_0)$, $\tilde{\beta} = \tilde{\beta}(E_0)$. Линеаризованную систему удобно записать для переменных, характеризующих возмущение плотности заряда $j = \tilde{n}_+ - \tilde{n}_-$, $J = \tilde{N}_+ - \tilde{N}_-$, проводимости $n = \tilde{n}_+ + \tilde{n}_-$, $N = \tilde{N}_+ + \tilde{N}_-$ и электрического поля \tilde{E} :

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \mu E_0 \frac{\partial j}{\partial z} = -(\gamma + 2\alpha n_0)n - \beta_m n_0 N - 2\tilde{\beta} n_0 N_0 \frac{\tilde{E}}{E_0} \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial j}{\partial t} + \mu E_0 \frac{\partial n}{\partial z} = -(4\pi\sigma_i + \gamma)j + (4\pi\sigma_i + \beta_m n_0)J \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} - \frac{g}{v_a} \frac{\partial N}{\partial z} = (\gamma + 2\beta_m N_k)n - \beta_m n_0 N + 2\tilde{\beta} n_0 N_0 \frac{\tilde{E}}{E_0} \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial J}{\partial t} - \frac{g}{v_a} \frac{\partial J}{\partial z} = j\gamma - \beta_m n_0 J \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial \tilde{E}}{\partial z} = 4\pi e(j + J), \quad (2.22)$$

где введен параметр $\gamma = \beta N_0 + \beta_m N_k$, а $\sigma_i = 2e\mu n_0$ - проводимость, обусловленная аэроионами. Заметим, что с учетом (2.17) параметр $\gamma = 2\beta N_0 = 2\beta_m N_k$.

Будем искать решение линеаризованной системы в виде:

$$n, N, j, J, \tilde{E} \propto \exp(\lambda t - ikz), \quad (2.21)$$

где $\lambda = -\tau_r^{-1}$ – величина, обратно пропорциональная времени релаксации возмущений электрического заряда.

Тогда дисперсионное уравнение запишется следующим образом:

$$\begin{aligned} & -[(\lambda + \gamma + 4\pi\sigma_i)(\lambda + \beta_m n_0) + \gamma(4\pi\sigma_i - \beta_m n_0)][(\lambda + \gamma + 2\alpha n_0)(\lambda + \beta_m n_0) + \\ & + \beta_m n_0(\gamma - 2\beta_m N_k)] + 4\pi\sigma_i N_0 \tilde{\beta}(\lambda + \gamma + \beta_m n_0)(\lambda + 2\beta_m n_0) - \\ & - (kV_d)^2 (\lambda + \beta_m n_0)^2 = 0 \end{aligned} \quad (2.22)$$

Здесь $V_d = \mu E_0$ – дрейфовая скорость электронов во внешнем невозмущенном электрическом поле.

Введем следующие частоты:

$$\nu_{ii} = \alpha n_0 \quad - \text{частота рекомбинации ионов};$$

$\nu_a = \gamma$ – частота рекомбинации ионов на заряженных и нейтральных аэрозолях;

$\nu_E = \tilde{\beta} E_0 N_0$ – частота рекомбинации ионов на нейтральных аэрозолях, зависящая от электрического поля;

$$\nu_m = \beta_m n_0 \quad - \text{частота рекомбинации заряженных аэрозолей с ионами};$$

$$\nu_q = 4\pi\sigma_i \quad - \text{"частота" релаксации заряда (отличается в } 1/\varepsilon \text{ раз от обычной)}$$

$$\nu_p = 4\pi\sigma / \varepsilon, \quad \varepsilon \approx 1 \text{ в воздухе).}$$

Тогда уравнение (2.22) можно переписать в виде:

$$\lambda^4 + a_1 \lambda^3 + a_2 \lambda^2 + a_3 \lambda + a_4 = 0, \quad (2.23)$$

где коэффициенты $a_{1,2,3,4}$ выражаются через введенные выше частоты следующим образом:

$$a_1 = 2\nu_a + 2\nu_{ii} + \nu_q + \nu_m; \quad (2.24)$$

$$\begin{aligned} a_2 = & \nu_q(\nu_a + \nu_m) + \nu_m(\nu_a + 2\nu_{ii}) + (\nu_a + \nu_q + \nu_m)(\nu_m + \nu_a + 2\nu_{ii}) - \\ & - \nu_q \nu_E + (kV_d)^2; \end{aligned} \quad (2.25)$$

$$a_3 = v_q(v_a + v_m)(v_m + v_a + 2v_{ii}) + v_m(v_a + 2v_{ii})(v_a + v_q + v_m) - v_q v_E(v_a + 3v_m) + 2v_m(kV_d)^2; \quad (2.26)$$

$$a_4 = v_q v_m(v_a + v_m)(v_a + 2v_{ii}) - 2v_m v_q v_E(v_a + v_m) + (kV_d)^2 v_m^2; \quad (2.27)$$

и, следовательно, являются функциями параметров стационарного состояния: концентрации аэрозолей N_0 , электрического поля E_0 , масштаба возмущений $L=2\pi k^{-1}$, а также коэффициента взаимодействия с нейтральными аэрозолями $\tilde{\beta}$, учитывающего зависимость от электрического поля.

Наибольший интерес представляет случай, когда $\tau_r > \tau_0$, где $\tau_0 = (4\pi\sigma_i)^{-1}$ - время релаксации заряда в системе без аэрозолей. Был проведен численный анализ уравнения (2.23), в результате были получены и проанализированы зависимости эффективного времени жизни возмущений плотности электрического заряда от концентрации аэрозольных частиц, стационарного электрического поля и внешнего масштаба системы (см. рисунки 2.3-2.6). Численные значения для коэффициентов прилипания α , β , β_m , q и характерные значения стационарных концентраций аэроионов и аэрозолей приведены выше (2.6).

Получено, что рост электрического поля E_0 приводит к увеличению времени жизни τ_r в некотором интервале параметров (рисунок 2.3), причем этот эффект имеет место только при наличии аэрозолей. С увеличением концентрации аэрозолей этот эффект усиливается. Дальнейший рост электрического поля приводит, в конечном счете, к росту дрейфовой скорости электронов и, как следствие, к уменьшению времени релаксации заряда. Тем не менее именно квазиэлектростатическое взаимодействие может приводить к наиболее интересным эффектам в рассматриваемой модельной системе, что будет продемонстрировано ниже.

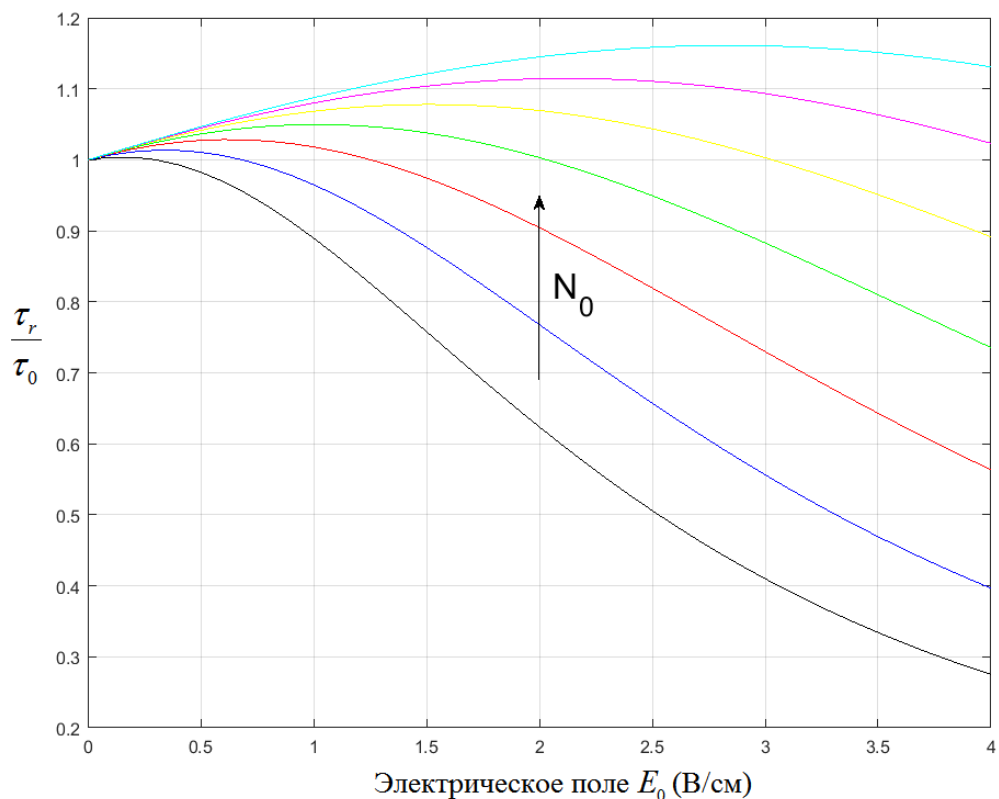


Рисунок 2.3 – Зависимость эффективного времени жизни от электрического поля E_0 для различных концентраций аэрозолей $N_0 = 0, 10^3, 2 \cdot 10^3 \dots \text{см}^{-3}$. Стрелкой указано направление роста концентрации.

Как видно на рисунке 2.4, с ростом концентрации аэрозолей эффективное время жизни возмущений увеличивается, как было отмечено раньше в разделе 2.2. Однако учет электрических взаимодействий ионов с аэрозолями приводит к тому, что для возмущения с малыми масштабами $(kV_d)^{-1} \cong \tau_0$ дрейф ионов в электрическом поле приводит к ускорению релаксации зарядов. Для больших масштабов $(kV_d)^{-1} \gg \tau_0$ этот эффект проявляется в меньшей степени, тем не менее эффективное время жизни увеличивается незначительно.

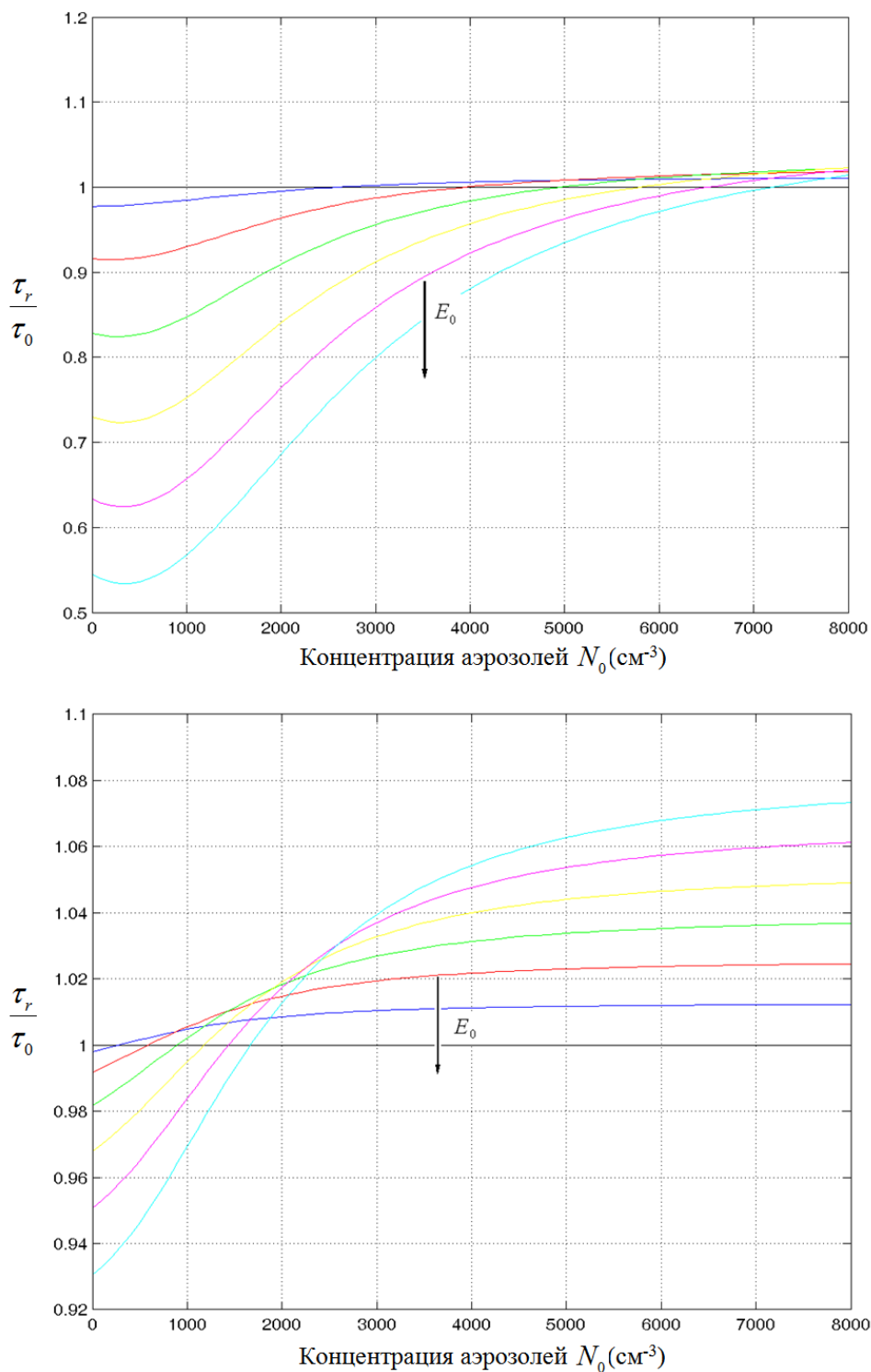


Рисунок 2.4 – Зависимость эффективного времени жизни от концентрации аэрозоля для малых масштабов (вверху) и больших масштабов (внизу) для различных электрических полей $E_0 = 0, 0.5, 1 \dots$ В/см. Стрелкой указано направление роста электрического поля

На рисунке 2.5 приведена зависимость эффективного времени жизни от внешнего масштаба возмущения для различных электрических полей. Видно, что при прочих равных условиях время жизни увеличивается только тогда, когда масштаб слоя превышает некоторую величину порядка 200 метров, причем влияние этого параметра проявляется достаточно слабо.

На рисунке 2.6. приведена зависимость эффективного времени жизни от электрического поля E_0 для различных коэффициентов взаимодействия с нейтральными аэрозолями $\tilde{\beta}$. Отметим также, что увеличение параметра $\tilde{\beta}$ приводит к развитию неустойчивости в системе, причем, если концентрация аэрозолей возрастает, то инкремент λ становится положительным и неустойчивость развивается при меньших значениях $\tilde{\beta}E_0 \cong \beta$, что продемонстрировано на рисунке 2.7.

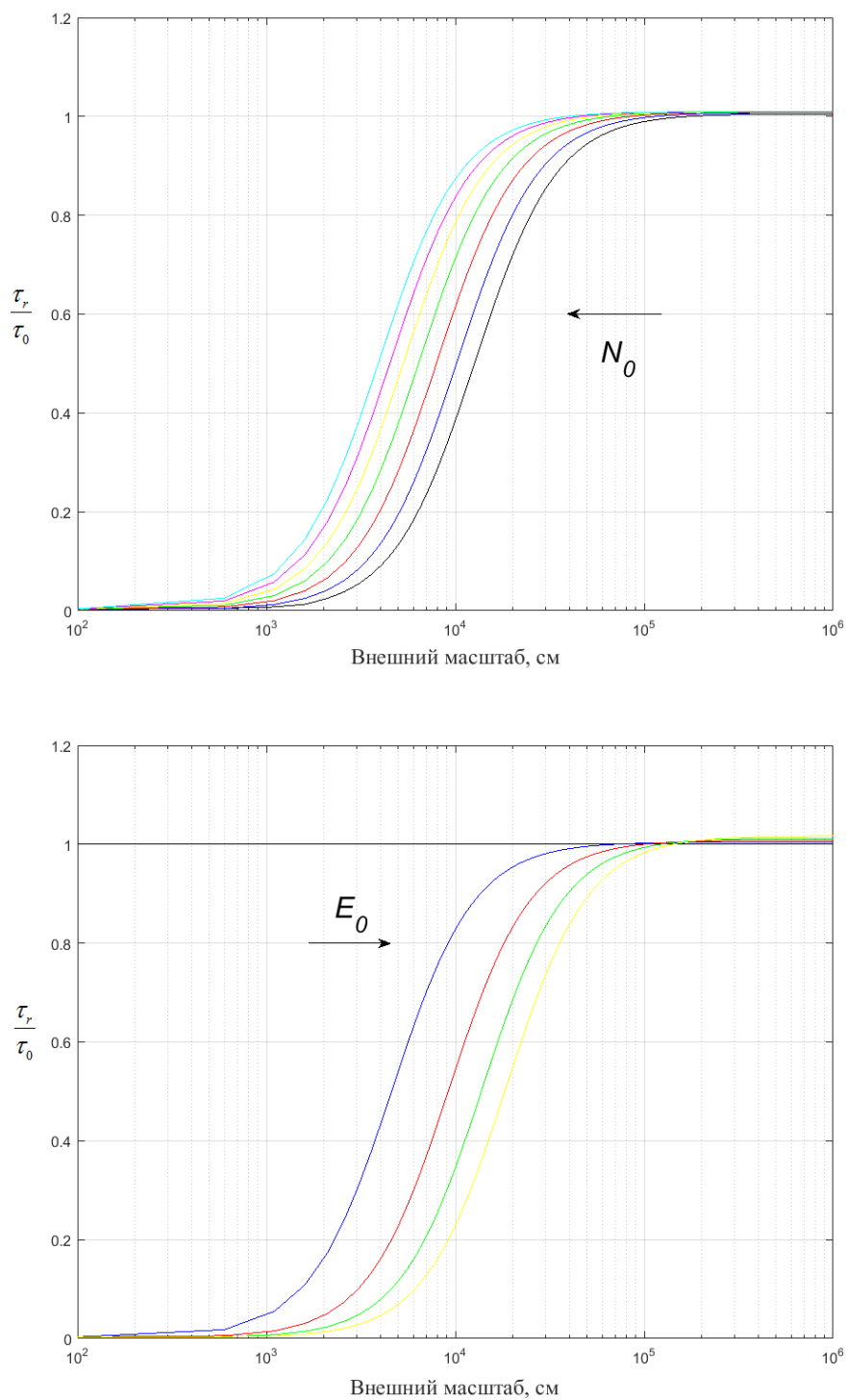


Рисунок 2.5 – Зависимость эффективного времени жизни от внешнего масштаба возмущения для различных электрических полей $E_0 = 0, 0.5, 1 \dots \text{В/см}$ (а) и различных концентраций аэрозолей $N_0 = 0, 10^3, 2 \cdot 10^3 \dots \text{см}^{-3}$ (б). Стрелкой указано направление роста параметров

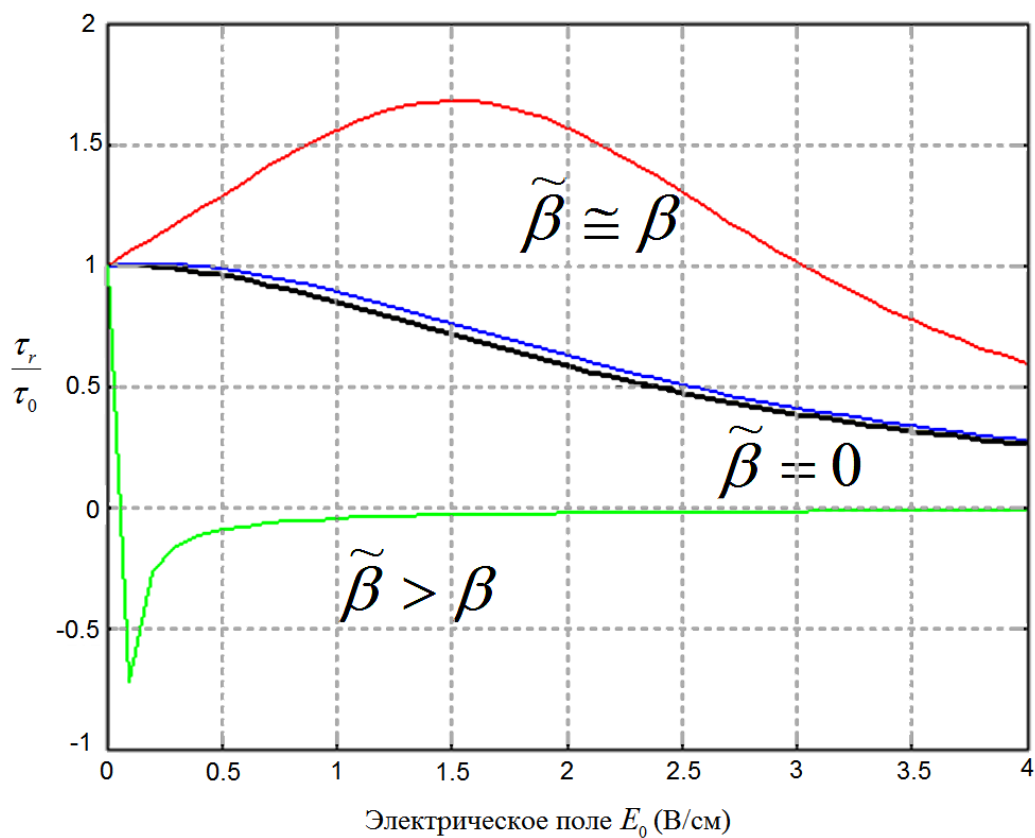


Рисунок 2.6 – Зависимость эффективного времени жизни возмущений электрического поля от электрического поля E_0 для различных коэффициентов взаимодействия с нейтральными аэрозолями $\tilde{\beta} = 2 \cdot 10^{-7}$, $2 \cdot 10^{-6}$ ($\text{см}^3/\text{с} \cdot \text{В}$), - для концентрации аэрозолей $N_0 = 3 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$

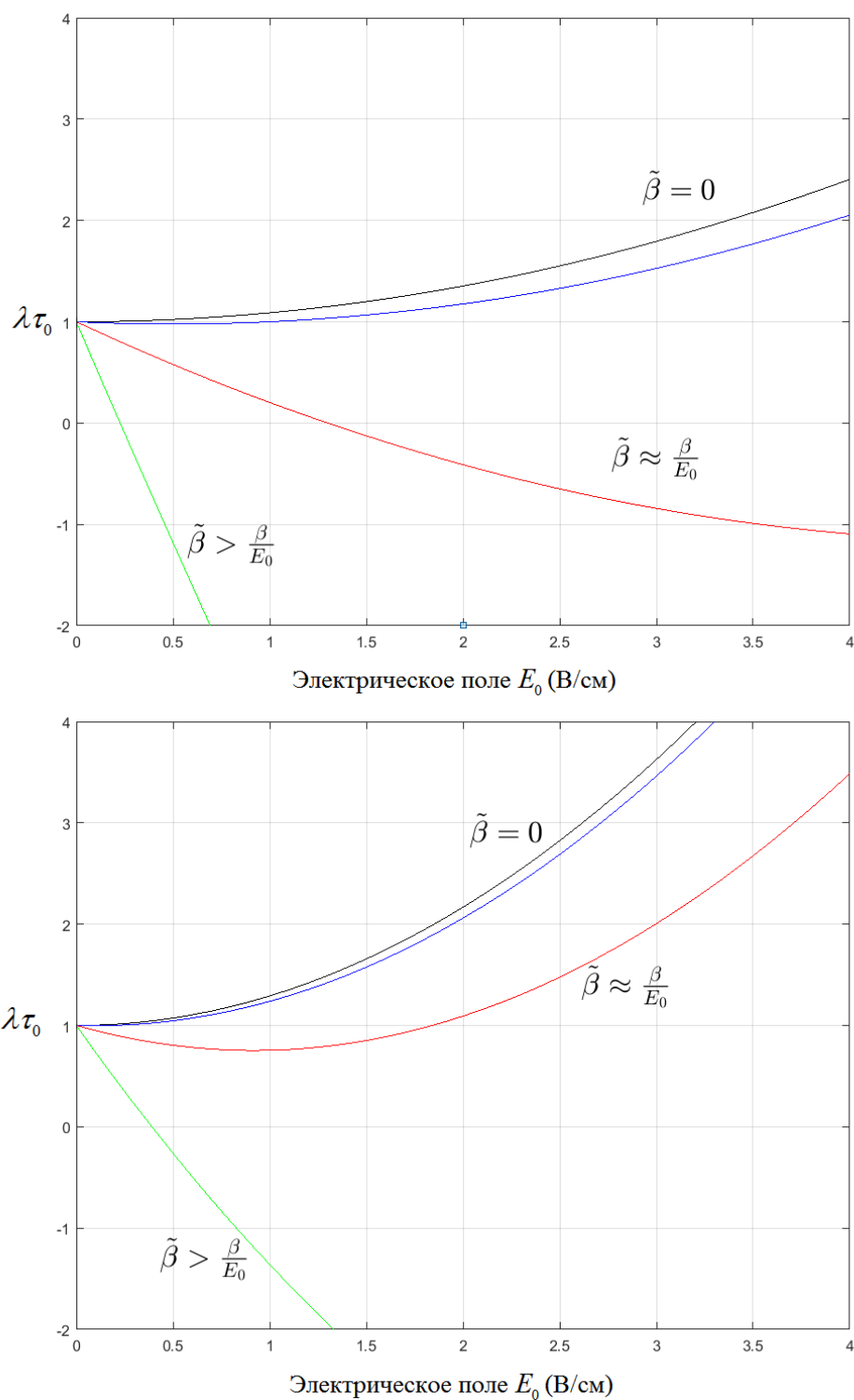


Рисунок 2.7 – Зависимость инкремента λ от электрического поля E_0 для различных коэффициентов взаимодействия с нейтральными аэрозолями $\tilde{\beta} = 2 \cdot 10^{-7}$, $2 \cdot 10^{-6}$ (см³/с·В), (а) - для концентрации аэрозолей $N_0 = 2 \cdot 10^3$ см⁻¹, (б) - для концентрации аэрозолей $N_0 = 3 \cdot 10^3$ см⁻¹

2.4. Выводы к главе 2

Исследованы стационарные состояния модельной системы, состоящей из легких аэроионов и аэрозольных частиц, с учетом зависимости коэффициентов взаимодействия этих частиц от напряженности внешнего электрического поля, и проанализировано влияние аэрозоля на время жизни возмущений электрического заряда. Показано, что с ростом аэрозольной концентрации и внешнего масштаба системы время жизни возмущений электрического заряда в рассматриваемой системе увеличивается. Наиболее заметно влияние изменения концентрации аэрозолей и соответствующее уменьшение количества аэроионов. Зависимость времени релаксации заряда от напряженности электрического поля имеет более сложный характер: при умеренных значениях поля время может возрастать, но дальнейший рост поля приводит к росту дрейфовой скорости электронов и к уменьшению времени релаксации, тем не менее именно квазиэлектростатическое взаимодействие может приводить к наиболее интересным эффектам в рассматриваемой модельной системе и развитию неустойчивости. С уменьшением подвижности аэроионов время жизни возмущений электрического заряда линейно растет. С ростом концентрации аэрозолей эффективное время релаксации возмущений увеличивается, причем с возрастанием концентрации аэрозолей все более существенно влияние внешнего электрического поля.

Результаты, изложенные в данной главе, опубликованы в работах [91, 97, 109].

Глава 3

Особенности суточных и сезонных вариаций атмосферного электрического поля

Данная глава посвящена исследованиям суточных и сезонных вариаций электрического поля в атмосфере Нижнего Новгорода в 2009-2018 гг. Исследована кривая локальной суточной вариации, в частности, ее сезонная изменчивость. Проведен спектральный анализ низкочастотных вариаций электрического поля атмосферы. На основе экспериментальных данных исследована взаимосвязь среднесуточных значений электрического поля с среднесуточной температурой приземного атмосферного слоя и облачностью, проведены теоретические оценки влияния облачности на электрическое поле в приземном слое.

3.1. Мониторинг квазистатических электрических полей в Нижегородском регионе: методика эксперимента

На территории Нижегородского региона при участии автора создана и апробирована многопунктовая система мониторинга экстремальных метеорологических явлений. Ее частью является многофункциональный экспериментальный комплекс по приему и регистрации атмосферного квазистатического электрического поля. Аппаратура размещенная на территории Волжской Гидрометеорологической обсерватории (г. Городец, Нижегородская область), в четырех пунктах в Нижнем Новгороде - на крыше Института прикладной физики РАН (ИПФ РАН), крыше Института физики микроструктур РАН (ИФМ РАН), крыше Нижегородского государственного университета им. Лобачевского (ННГУ), на территории Аэрологической станции "Нижний Новгород" (АС НН) и г. Семенов, позволяет вести круглогодичные наблюдения электрического поля как в невозмущенной атмосфере, так и в грозových условиях,

а так же осуществлять местоопределение молниевых разрядов [86, 88, 89, 94, 98, 99, 101, 110]. Расстояние между пунктами наблюдения в Нижнем Новгороде составляет 6-8 км, что соответствует характерному размеру грозовой ячейки. Взаимное расположение регистрационных датчиков электрического поля и радиолокатора показано на рис.3.1.

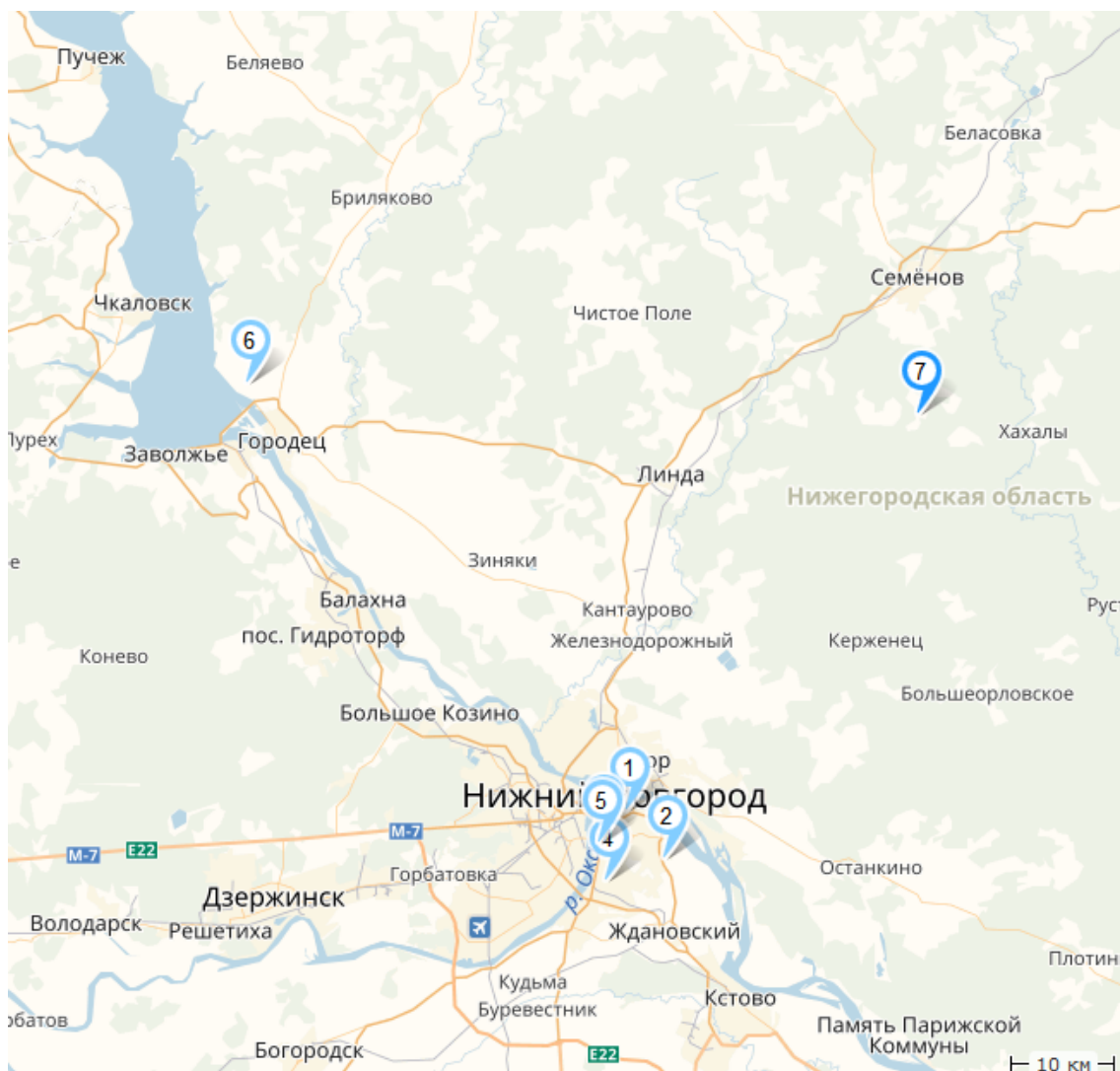


Рисунок 3.1 – Схема расположения регистрационных пунктов системы мониторинга опасных метеорологических явлений. Масштаб карты 10 км.

1. Флюксметр и грозопеленгатор ИПФ РАН
2. Флюксметр ИФМ РАН
3. Флюксметр ННГУ
4. Аэрологическая станция "Нижний Новгород" (АС НН)
5. Метеорадар
6. Грозопеленгатор (Волжская ГМО)
7. Грозопеленгатор (г. Семенов)

На рисунке 3.2 приведена схема размещения комплексов по приему и регистрации электромагнитных полей на территории города Нижнего Новгорода.

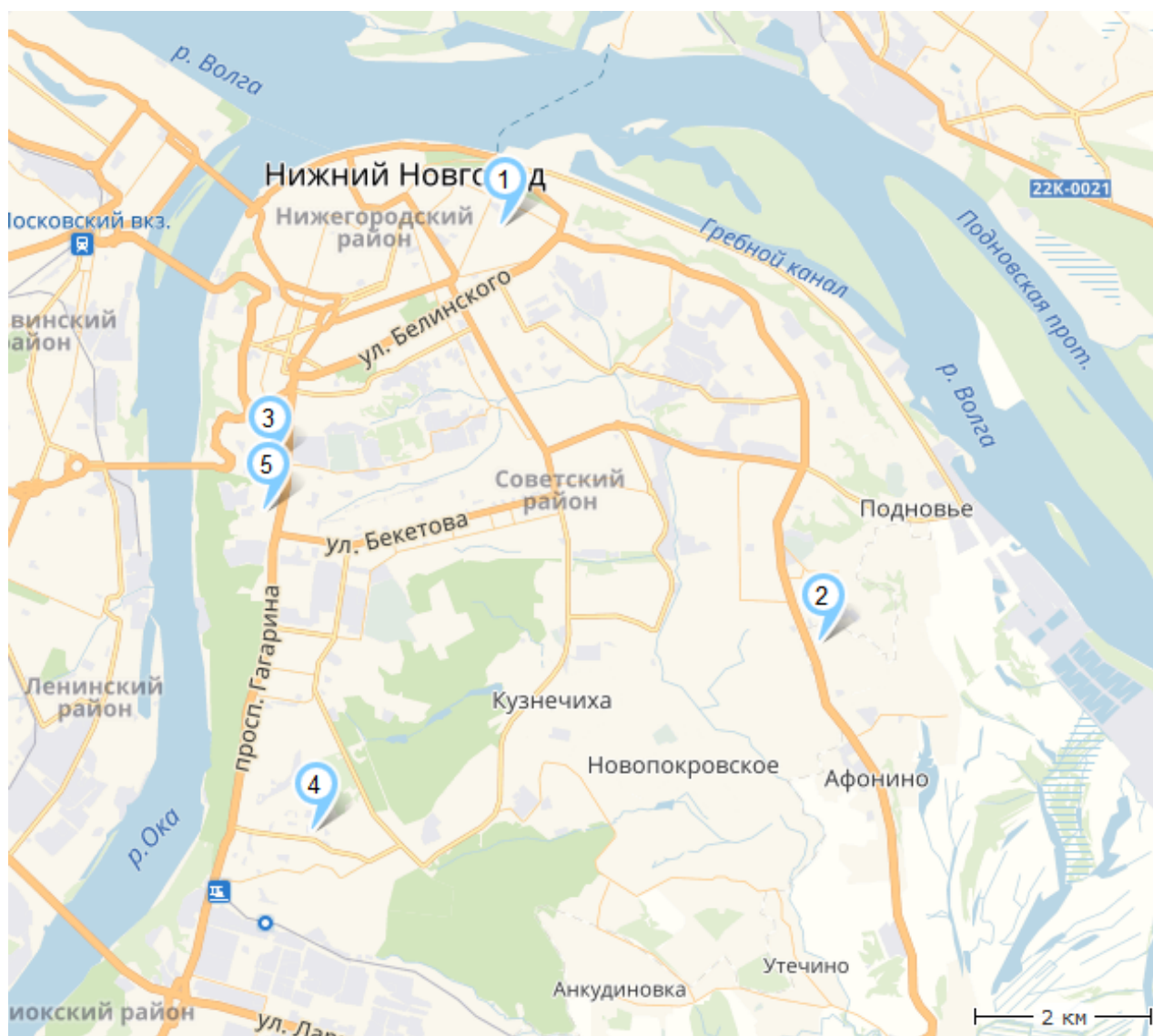


Рисунок 3.2 – Схема расположения регистрационных пунктов системы мониторинга опасных метеорологических явлений. Масштаб карты 2 км.

1. Флюксметр и грозопеленгатор ИПФ РАН
2. Флюксметр ИФМ РАН
3. Флюксметр ННГУ
4. Аэрологическая станция "Нижний Новгород"(АС НН)
5. Метеорадар

До 2012 года измерения велись с помощью флюксометров, изготовленных в ИПФРАН, начиная с января 2012 года в качестве приборов для регистрации квазистатического электрического поля использовались флюксометры Voltek EFM-100 [121]. Паспортная частота дискретизации электрического сигнала составляет 20 Гц, чувствительность флюксометра ± 20 кВ/м. максимальная дальность до 38 км. Для расширения амплитудного диапазона принимаемого поля были установлены делители 1:4 для пунктов ИПФ РАН, ИФМ РАН и АС НН и 1:3 для пункта ННГУ, что позволило регистрировать электрические поля в диапазоне от ± 80 кВ/м. Даты установки флюксометров в пунктах наблюдения: ИПФРАН – 13.01.2012, ИФМРАН – 04.05.2012, ННГУ – 05.12.2013, АС НН – 28.04.2014.

В результате обработки результатов измерений было обнаружено, что таймер микроконтроллеров всех используемых флюксометров Voltek EFM-100 работает на $\sim 1.7\%$ быстрее, поэтому количество отсчетов за сутки в среднем на 280435.37 больше паспортного. При статистической обработке усредненных данных была проведена соответствующая нормировка по времени. На пункте наблюдения ИПФРАН осуществляется синхронизация по GPS-сигналу. На остальных пунктах наблюдения компьютеры, предназначенные для записи и хранения данных, синхронизируются через Интернет. Для того, чтобы осуществить привязку флюксометров по времени с точностью до 1 сек, были выбраны несколько сильных молниевых разрядов, зарегистрированных одновременно всеми флюксометрами (а также системой WWLN) и вычислен временной сдвиг относительно GPS для остальных пунктах наблюдения ("зимняя гроза" 25 апреля 2015 года).

Обработка данных включала в себя необходимого для учета месторасположения флюксометров расчет коэффициента редукции [132] для каждого пункта наблюдения. За стандартную величину поля хорошей погоды было принято $E_{fw} = 100$ В/м [3]. За несколько лет наблюдений по данным портала gr5.ru [133] были выбраны 19 дней хорошей погоды, т.е. расчет проводился по суткам наблюдений, в течение которых по данным метеорологических

наблюдений облачность полностью отсутствовала и скорость ветра не превышала 3 м/с. В течение всего периода измерений 2012-2018 гг. коэффициенты редукиции датчиков практически не изменялись.

Гистограммы десятиминутных средних значений электрического поля, измеренных на всех четырех пунктах в 2013-2018 гг., показаны на рисунке 3.3. (ср. с результатами анализа в работе [65]). Средние медианные значения поля, найденные по этим гистограммам, для всех 4-х пунктов наблюдения равны 130 В/м. Для дальнейшего анализа суточной вариации, в отличие от работы [65]), были использованы не все данные в пределах 80% функции распределения, представленной на рисунке 3.3, а лишь эпизоды с хорошей погодой (отсутствие осадков, в том числе тумана и дымки, скорость ветра не более 4 м/с, облачность не более 5 баллов).

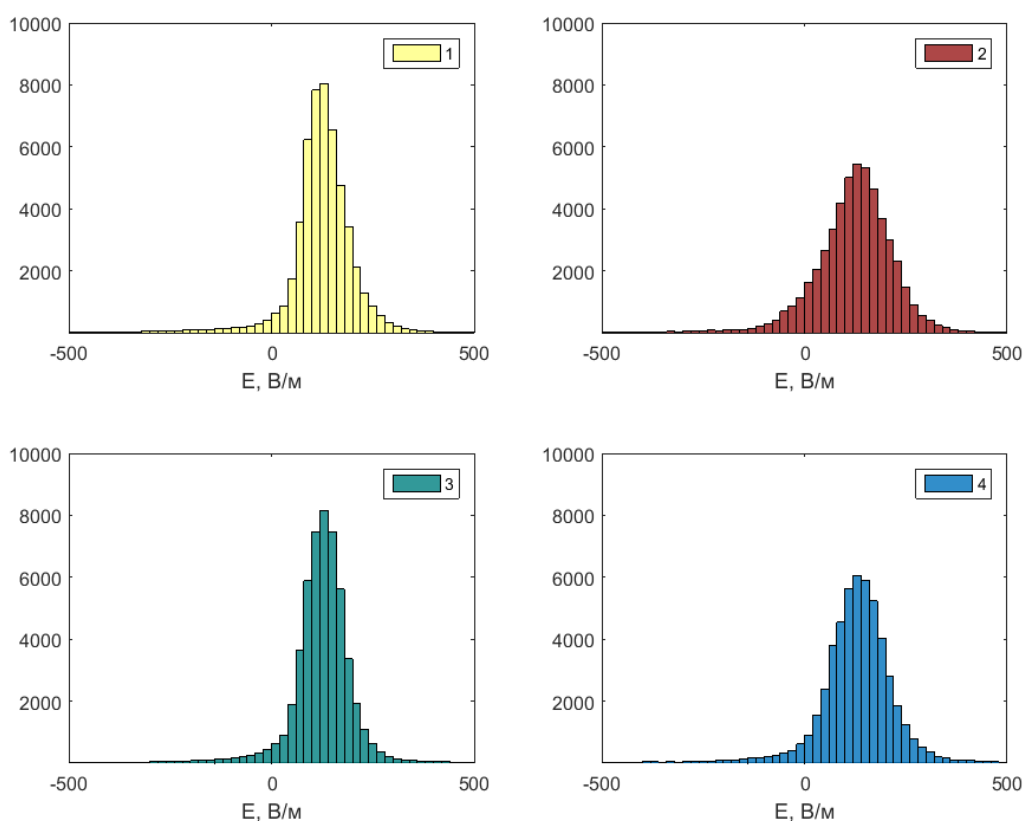


Рисунок 3.3 – Гистограммы десятиминутных средних значений электрического поля, измеренных на всех четырех пунктах в 2013-2018 гг., построенные в диапазоне ± 500 В/м: 1 - по данным флюксметра ИПФРАН, 2 - по данным флюксметра ИФМ РАН, 3 - по данным флюксметра ННГУ, 4 - по данным флюксметра АС НН

Информация о пунктах наблюдений (местоположение, полученные коэффициенты редукции) приведены в Таблице 3.1.

Таблица 3.1. Информация о пунктах наблюдений квазистатического электрического поля в Нижнем Новгороде

| Пункт наблюдения | Координаты | Высота над землей, м | Коэффициент редукции | Стандартное отклонение, В/м | Коэффициент асимметрии |
|------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------|------------------------|
| ИПФРАН | 56°19'25"N 44°01'21"E | 33 | 3.47 | 139.17 | -3.29 |
| ИФМРАН | 56°16'51"N 44°04'58"E | 11 | 2.76 | 145.47 | -1.84 |
| ННГУ | 56°17'56"N 43°58'48"E | 17 | 3.55 | 139.17 | -2.74 |
| АС НН | 56°15'40"N 43°59'20"E | 6 | 3.56 | 147.61 | -2.57 |

3.2. Особенности долгопериодных вариаций атмосферного электрического поля в средних широтах

3.2.1. Суточная вариация электрического поля хорошей погоды

С использованием данных, полученных с помощью системы нижегородского мониторинга квазистатического поля, были проанализированы вариации вертикальной компоненты атмосферного электрического поля хорошей погоды за 2013-2018 гг. В результате обработки 139 суточных записей с четырех пунктов наблюдения была исследована суточная (унитарная) вариация атмосферного электрического поля в условиях хорошей погоды в Нижнем Новгороде в зависимости от сезона и дней недели. Под условиями хорошей погоды понималось отсутствие облачности в течение исследуемых суток, а так же максимальная скорость ветра не должна была превышать 3 м/с. В указанной выборке записей 40 относились к холодному сезону, 99 к теплomu; 38 записей были сделаны в выходные дни, 101 — в рабочие.

Основные результаты данного исследования представлены на рисунках 3.4-3.6. Из рисунка 3.4 видно, что суточная вариация, наблюдаемая (на всех четырех пунктах) в Нижнем Новгороде, относится к типу «вариации с двумя максимумами» [65]. Вечерний максимум суточной вариации совпадает по времени с максимумом кривой Карнеги, которая является характеристикой глобальной электрической цепи. Наибольших значений поле достигает в зимний период (что согласуется с экспериментальными наблюдениями на континентальных станциях [4, 7, 17, 21, 59, 63, 134–136]). Максимум поля в первой половине дня (09:00-11:00 по местному времени) является характерным для городской среды и показывает, что локальные эффекты (прежде всего загрязнение городского воздуха аэрозолями) вносит существенный вклад в возмущения поля. Сравнение с результатами других авторов ([4, 7, 9, 21, 134, 137]) показывает, что локальный максимум наблюдается несколько позже, чем проявляется обычно "эффект восхода" в местности с низким содержанием

аэрозолей, и что величина утреннего максимума по амплитуде больше, чем вечернего.

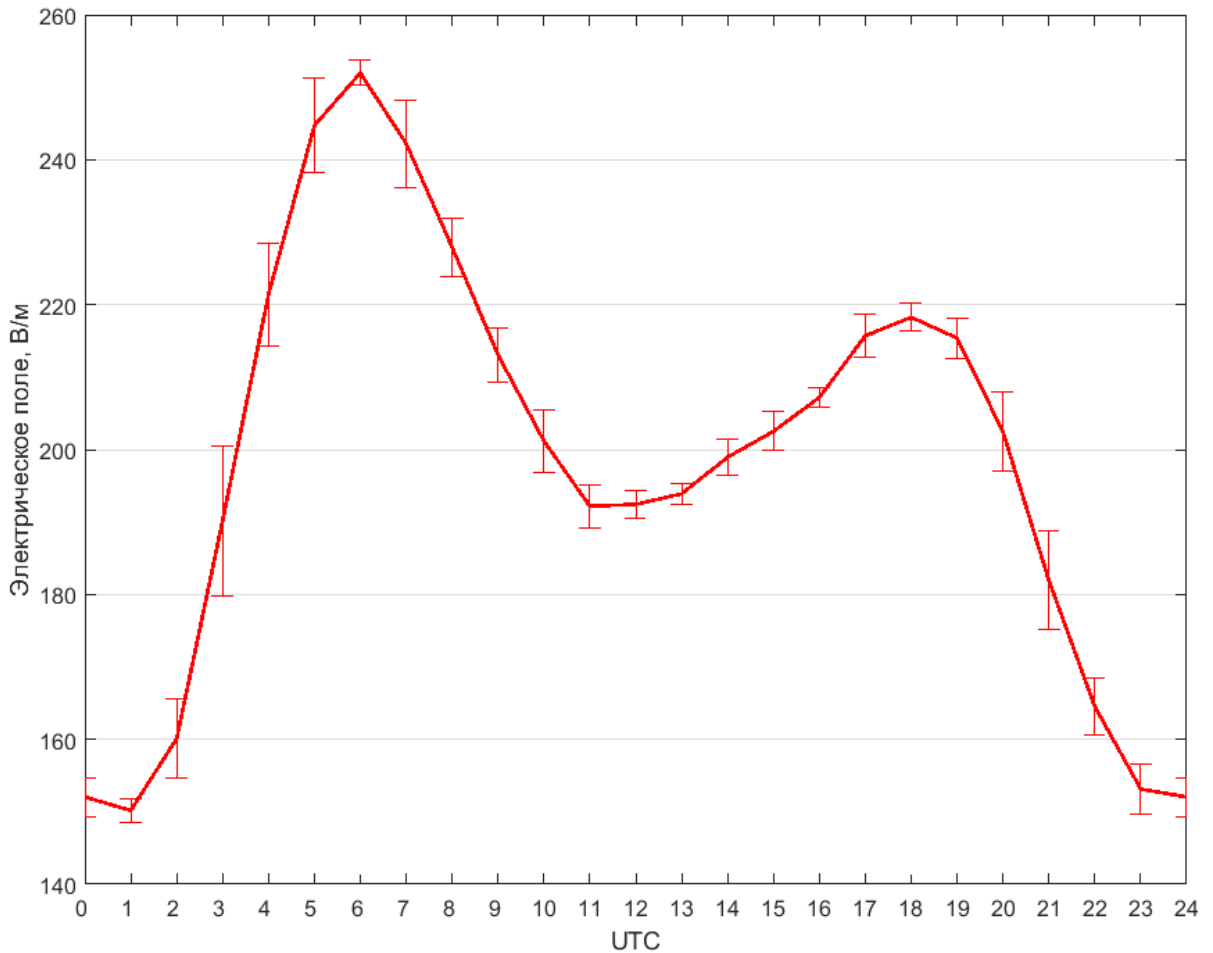


Рисунок 3.4 – Суточная вариация атмосферного электрического в Нижнем Новгороде в 2013-2018 гг., усредненная по всем четырем пунктам наблюдения

Интересным результатом является существенное отличие кривых суточной вариации для холодного и теплого периодов (рисунок 3.5). Под «холодным периодом» подразумевается период года с октября по апрель. Отдельно было исследовано поведение суточной вариации в выходные и рабочие дни недели (рисунок 3.6). Из рисунков 3.5-3.6 видно, что в зимний период, когда в дни хорошей погоды температура воздуха наиболее низка, глобальные эффекты преобладают над локальными, особенно в выходные дни. В летний период вклад

глобальных эффектов сравним или меньше. Схожие унитарные вариации наблюдались в городской черте в других городах [7, 15, 23, 24, 64, 65, 135, 137].

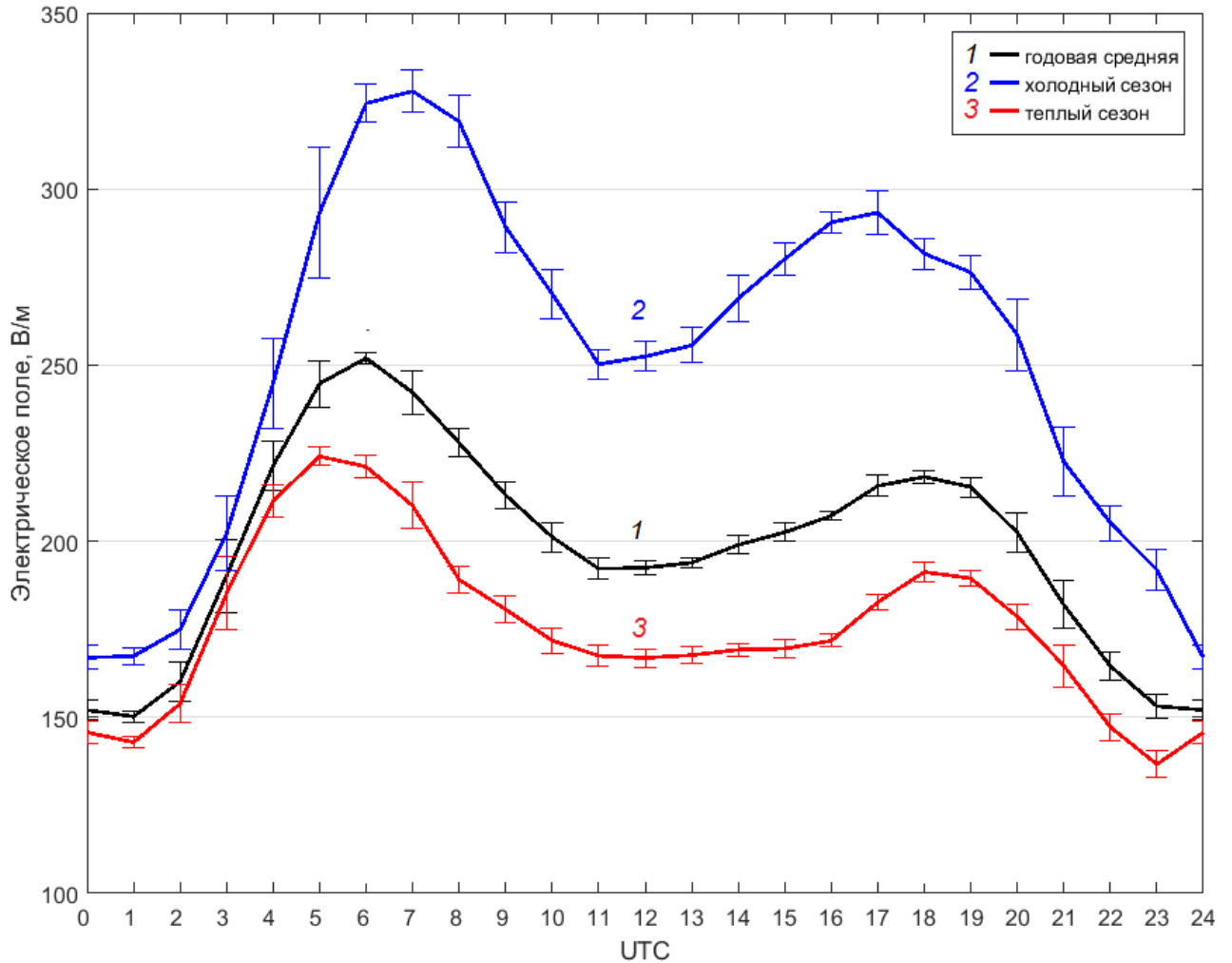


Рисунок 3.5 – Суточная вариация атмосферного электрического поля в Нижнем Новгороде в 2013-2018 гг., усредненная по всем четырем пунктам наблюдения: 1 - годовая средняя, 2 - холодный период, 3 -теплый период (часовое усреднение методом скользящего среднего)

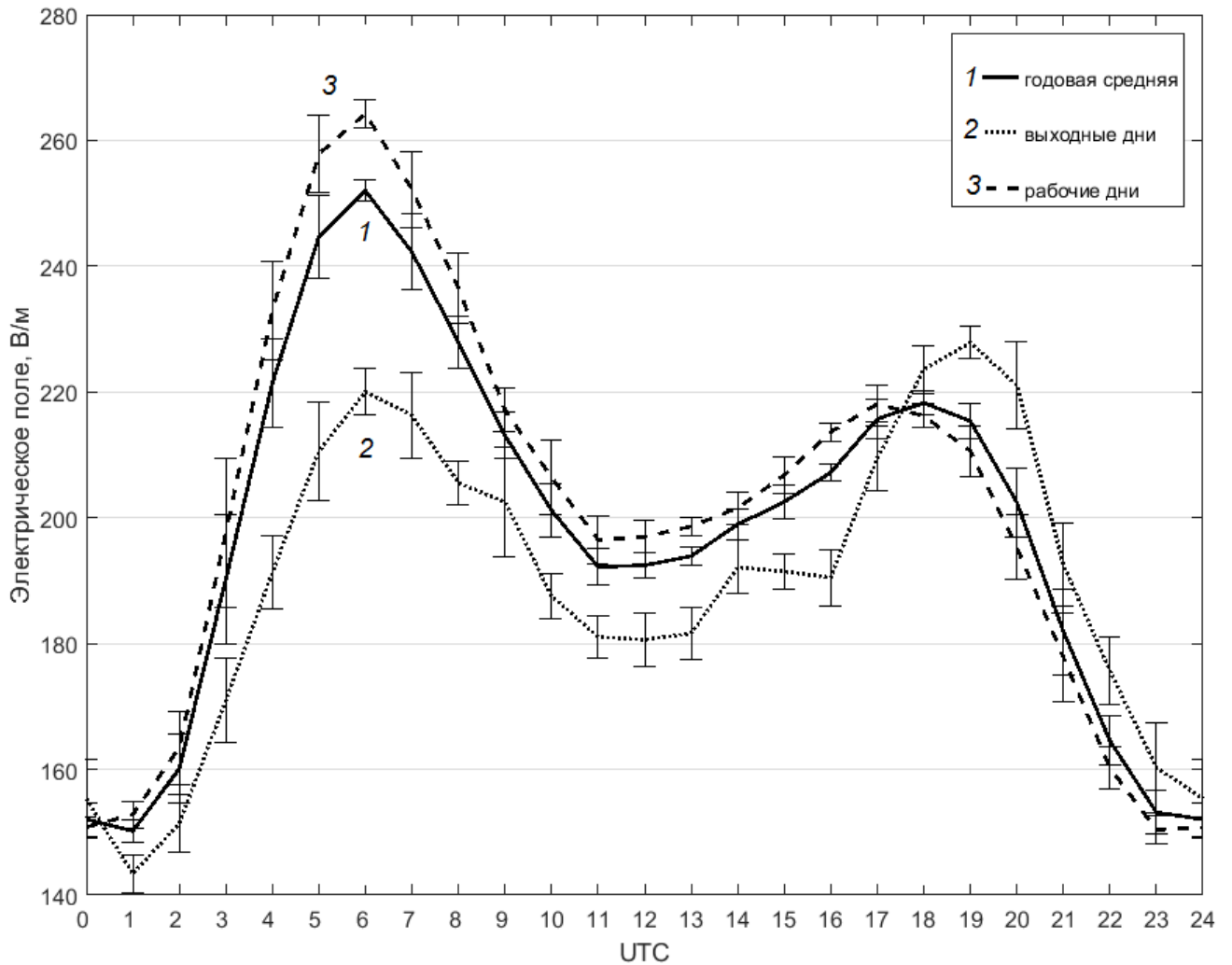


Рисунок 3.6 – Суточная вариация атмосферного электрического поля в Нижнем Новгороде в 2013-2018 гг., усредненная по всем четырем пунктам наблюдения: 1 - годовая средняя, 2 - выходные дни, 3 - рабочие дни

Полученные результаты позволяют выявить роль локальных эффектов в формировании суточной вариации в районах средних широт с умеренно континентальным климатом и дают основу для построения теории, которая способна объяснить физические механизмы влияния локальных эффектов и построить соответствующие параметризации для нахождения приземного электрического поля в погодно-климатических моделях.

3.2.2. Низкочастотные спектры вариаций атмосферного электрического поля

В настоящем разделе исследованы низкочастотные спектры вариаций электрического поля в условиях хорошей погоды. Были проанализированы длинные ряды данных, полученные как в зимний, так и летний периоды. Спектральная плотность возмущений для каждой грозы вычислялась непосредственно методом быстрого преобразования Фурье с применением спектрального окна Блэкмана-Хэрриса. На рисунке 3.7. представлена нормированная спектральная плотность вариаций электрического поля в августе 2011 и январе 2012 гг. Основным максимум спектра соответствует унитарной суточной вариации электрического поля. Кроме того, наблюдается ярко выраженная гармоника, соответствующая периоду 12 часов, связанная с приливными явлениями. Кроме того, выявлена 4-5 дневная гармоника, соответствующая среднему времени жизни атмосферных циклонов, являющаяся важной климатологической характеристикой атмосферного электрического поля [100]. В зимний период низкочастотная гармоника выражена заметно слабее. В работе [40] так же было отмечено, что в спектре флуктуаций, полученный в ГО "Борок" ОИФЗ РАН в сентябре 2008 г., наблюдается максимум для периода 120 часов (5 суток).

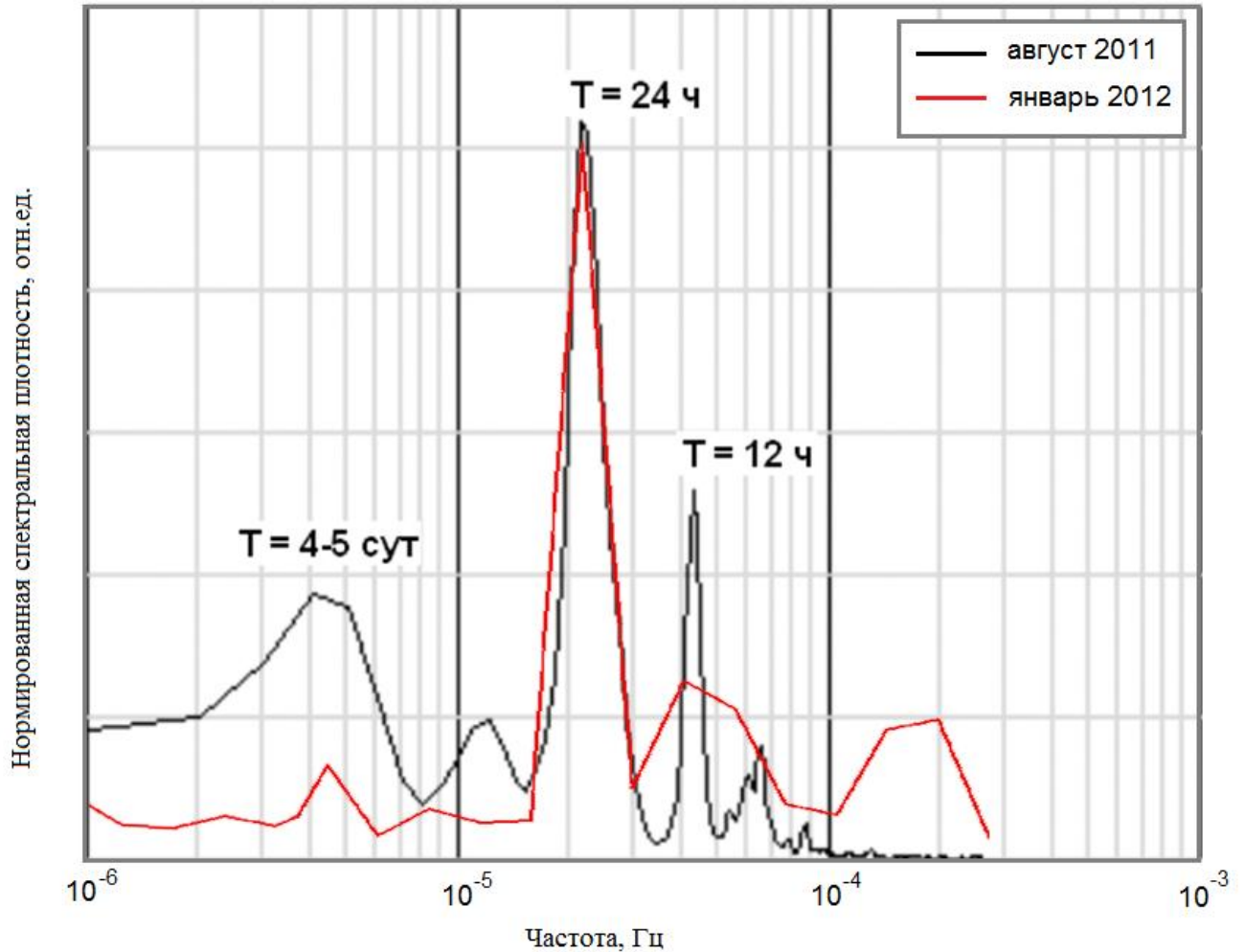


Рисунок 3.7 – Нормированная спектральная плотность вариаций электрического поля по данным электростатического флюксметра, установленного на крыше ИПФ РАН (Нижний Новгород): черная линия - август 2011 г., красная линия - январь 2012 г.

Для сравнения была построена нормированная спектральная плотность электрического поля в Нижегородском регионе в условиях экстремально жаркого лета 2010 года. Это время характеризовалось наличием стабильного атмосферного блокинга в течении нескольких недель. В спектре ожидаемо крайне слабо выражена гармоника, соответствующая времени жизни циклонов (Рисунок 3.8).

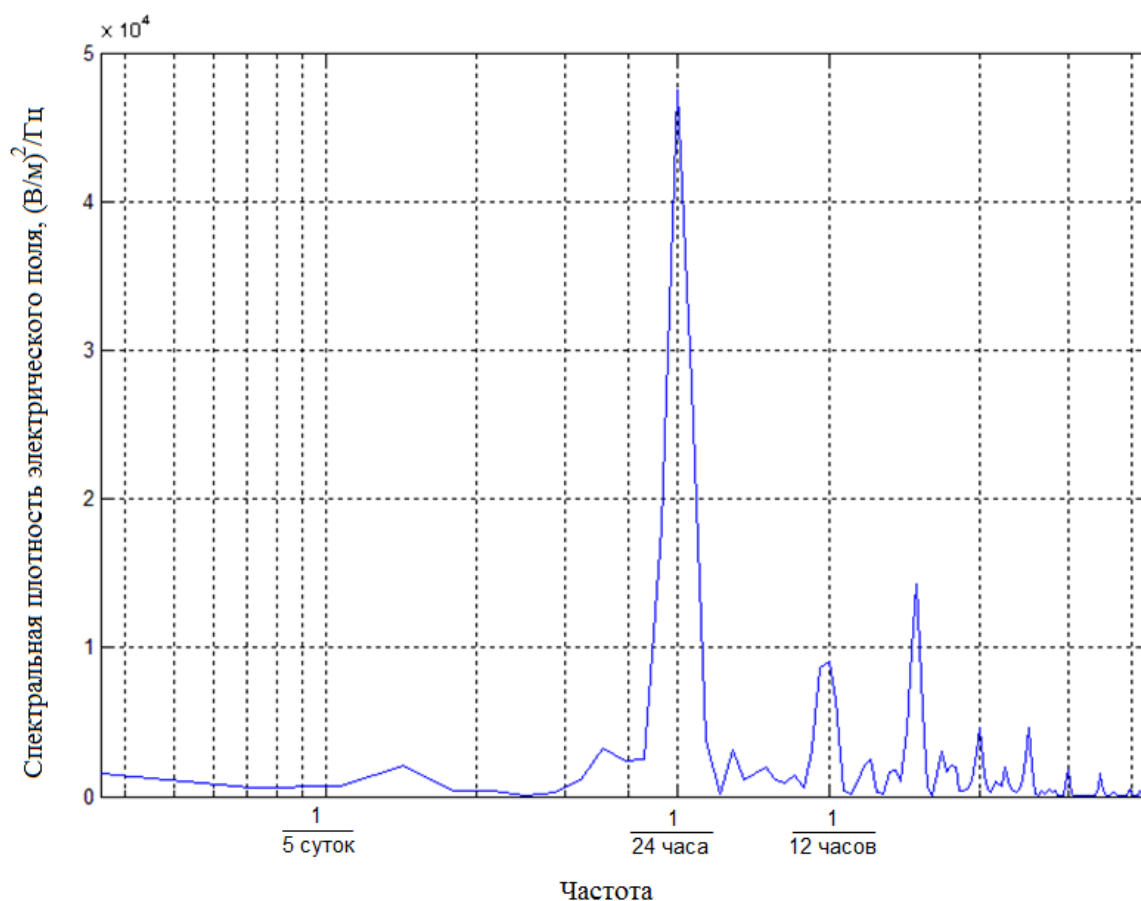


Рисунок 3.8 – Спектральная плотность вариаций электрического поля по данным электростатического флюксметра, установленного на крыше ИПФ РАН (Нижний Новгород, август 2010)

Для сравнения с результатами, полученных в Нижегородском регионе, был построен низкочастотный спектр вариаций электрического поля на основе данных, полученных коллегами из ААНИИ, в феврале 2001 года в Антарктиде [100]. Особенностью этого периода была стабильная хорошая погода (полярный день, ясно, скорость ветра не превышала 2 м/с) в течение всего месяца, что позволило для вычисления спектра брать данные сразу за весь период. Результат представлен на рисунке 3.9. Двенадцатичасовой максимум выражен заметно слабее, чем в среднеширотных спектрах в связи с тем, что приливные эффекты вблизи полюса почти не оказывают влияние на вариации электрического поля. Гармоника, соответствующая периоду в пять суток, выражена достаточно четко,

хотя ее амплитуда относительно суточной гармонике мала, что объясняется стабильностью атмосферного антициклона в течение периода наблюдений.

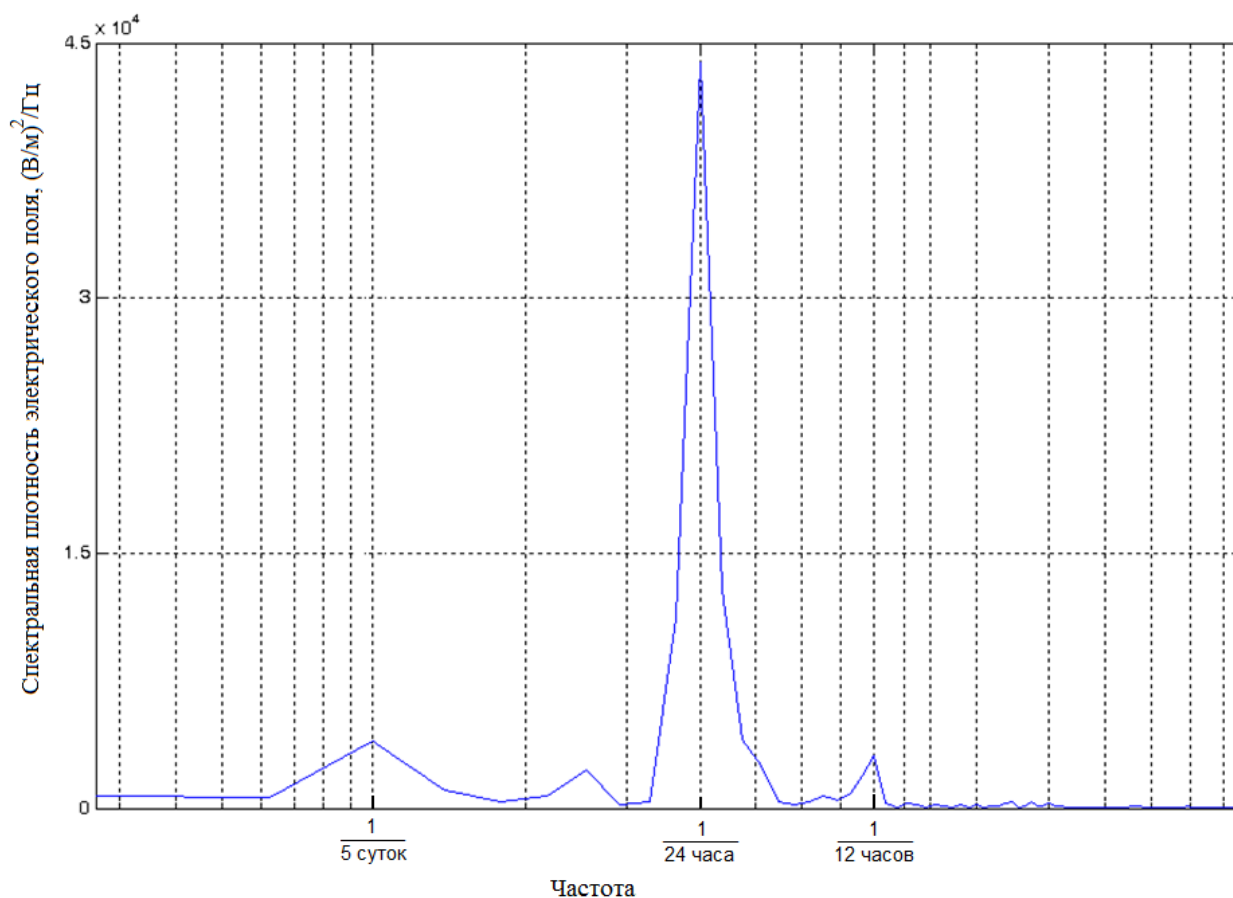


Рисунок 3.9 – Спектр вариаций электрического поля (Антарктида, февраль 2001 г).

Полученные результаты демонстрируют особенности динамики низкочастотных вариаций электрического поля атмосферы, в частности, показано существование 4-5 дневной гармонике, соответствующей среднему времени жизни атмосферных циклонов.

3.2.3. Сезонная вариация электрического поля

Уже ранние исследования в различных географических районах показали, что вид суточной вариации электрического поля существенно зависит от времени года, т.е. имеет место сезонная вариация. Ранние работы (см. [21], а также изложение истории вопроса и обширную библиографию в статье [66]) указывали на возрастание поля в зимний период северного полушария, наблюдаемое на многочисленных станциях на суше и согласованное с результатами наблюдений в ходе морских экспедиций Carnegie и Maud. Однако учет локальных эффектов для измерений на суше, а также анализ данных на станции Mauna Loa на Гавайях (на высоте около 3400 м над уровнем моря, т.е. над слоем обмена атмосферы) и реанализ данных экспедиций Carnegie и Maud показал, что глобальная годовая вариация должна иметь максимум в июле, т.е. в период лета в северном полушарии [66]. При этом вопрос о наличии и значимости полугодовой сезонной вариации остается до конца не выясненным.

Результаты анализа среднемесячных значений поля приведены на рисунке 3.11. Наблюдения в Нижнем Новгороде ($56^{\circ}19'37''$ с. ш. $44^{\circ}00'27''$ в. д.) в 2013-2017 гг. показывают, что максимальные значения напряженности поля наблюдаются в холодный период года – с ноября по март. Максимум поля приходится на март. Заметим, что климат в НН умеренно континентальный, осадков среднем выпадает 653 мм в год, наибольшее количество – в июле, наименьшее – в марте.

Для сравнения на том же рисунке 3.10 приведены графики сезонной вариации поля в трех разнесенных на большие расстояния пунктах России с разными климатическими условиями: Борок Ярославской обл. ($58^{\circ}03'45''$ с. ш. $38^{\circ}14'23''$ в. д.), Якутск ($62^{\circ}01'38''$ с. ш. $129^{\circ}43'55''$ в. д.), Паратунка (Камчатка, $52^{\circ}57'38''$ с. ш. $158^{\circ}14'55''$ в. д.) Также приведены данные измерений в пункте с субтропическим климатом - Исламабад ($33^{\circ}40'$ с. ш. $73^{\circ}10'$ в. д.)

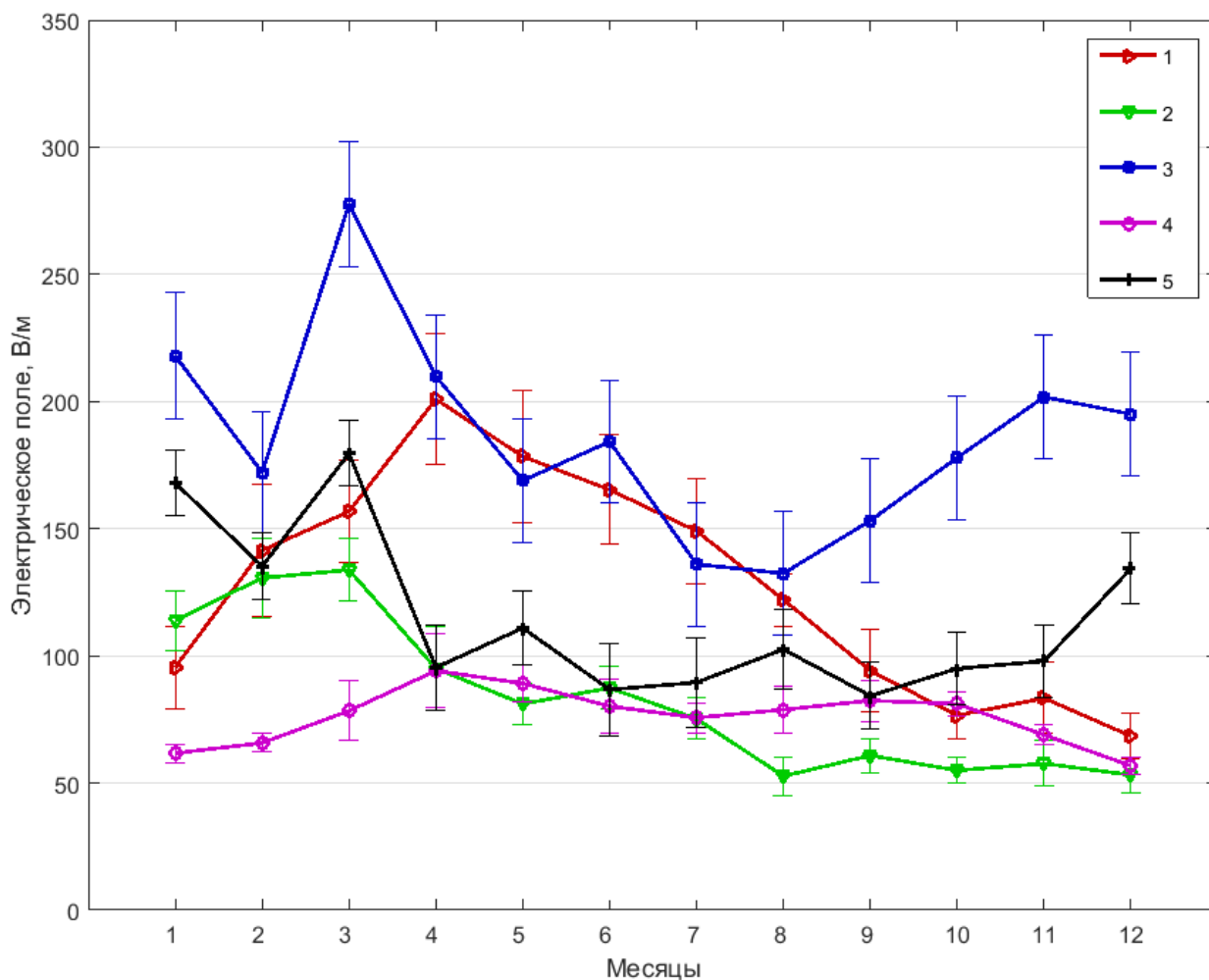


Рисунок 3.10 – Сезонная вариация напряженности электрического поля E_z : 1- по данным ГО «Борок» ИФЗ РАН за 1998 – 2009 гг. [59]; 2 - по данным ГО «Паратунка» за 1997 – 2008 гг. [16]; 3 - по наблюдениям в Исламабаде в 2013-2015 [11]; 4 - по наблюдениям в г. Якутске в 2011 г. [17]; 5 - по наблюдениям в г. Нижнем Новгороде 2013-2017 гг. Вертикальные линии – стандартная ошибка измерений среднего значения

Наиболее длительный (четырнадцатилетний) период наблюдений отражает кривая годового хода среднемесячной напряжённости поля за 1998-2009 гг. на среднеширотной геофизической обсерватории в Борке [22]. Наблюдения осуществляются в экологически чистом регионе на берегу Рыбинского водохранилища. Борок, как и Нижний Новгород, расположен в Верхнем Поволжье, в центре европейской равнины (расстояние между Борком и Нижним

Новгородом составляет около 350 км), поэтому климатические условия в этих пунктах сходные. Локальной особенностью Борка, таким образом, является меньший уровень антропогенной нагрузки и более длительный период таяния снежного покрова. Возможно, с этими особенностями связано наличие значимого апрельского максимума среднего значения напряжённости электрического поля, наблюдаемого в Борке.

Годовой максимум среднемесячных значений в Паратунке (Камчатка, $52^{\circ}57'38''$ с. ш. $158^{\circ}14'55''$ в. д.), как и в Нижнем Новгороде, приходится на март [16]. Период наблюдений, отраженный на графике, охватывает 1997-2008 гг. Климат в Паратунке переходный от морского к континентальному. Средняя температура в июле и августе $+13-14^{\circ}\text{C}$, средняя температура января -9°C . Среднее число осадков – до 1120 мм в год. Благодаря тому, что пункт окружен со всех сторон сопками, среднегодовая скорость ветра здесь не велика.

Сезонный ход напряженности поля в Якутске [17] имеет максимумы в весенние и осенние месяцы и минимумы, приходящиеся на летние и зимние месяцы. Непрерывные наблюдения напряженности атмосферного электрического поля в Якутске были организованы в 2009 г. и продолжаются по настоящее время. На графике отражены данные за период наблюдений 2009–2013 гг. Измерение напряженности поля осуществляется с помощью электростатического флюксметра производства НИРФИ (г. Нижний Новгород), установленного на крыше главного здания ИКФИА СО РАН. Наблюдения электрического поля в Якутске замечательны, в частности, тем, что климат в здесь резко континентальный: в январе средняя температура $-38,6^{\circ}\text{C}$, в июле $19,5^{\circ}\text{C}$. Среднегодовая сумма осадков в Якутске - около 238 мм. Воздух в городе, как правило, сухой, особенно летом (влажность воздуха за год составляет около 68 %). Наблюдаемый зимний минимум авторы связывают с уменьшением напряженности поля во время наступающих зимой морозных (ледяных) туманов в пункте наблюдения.

Кривые сезонной вариации поля в Исламабаде [11] построены по данным 2015-2017 гг., т.е. за сравнительно небольшой период времени. Исламабад находится на северной окраине плато Потохар, на высоте 618 м над уровнем моря. Датчик установлен на крыше здания (на высоте около 8 м от земли) в Университете Куэйд-и-Азам ($33^{\circ}45'$ с. ш. $73^{\circ}08'$ в. д.) Это одноэтажное здание высотой около 7 м. Территория покрыта низкорослыми деревьями и растениями. Климат Исламабада является субтропическим, на который сильно влияют сезонные ветры - муссоны, а также предгорное местоположение. Исламабад находится в зоне умеренной влажности, что для Пакистана является редкостью, так как многие зоны страны страдают от засушливого климата. За год в районе столицы выпадает до 900 мм осадков. Наиболее тёплым месяцем в Исламабаде является июнь (а не июль или август). Причиной этого является наступление муссона в июле-августе, когда обильно выпадают осадки (более половины годовой нормы), и средняя температура снижается. Средняя температура июня составляет $+31,3^{\circ}\text{C}$. Наиболее холодным месяцем является январь, средняя температура которого составляет $+10,2^{\circ}\text{C}$. Характерны тёплые дни и холодные ночи, время от времени в зимние месяцы случаются заморозки, хотя и достаточно редко; иногда выпадает снег, хотя тоже нечасто. Несмотря на существенные отличия в амплитуде (связанные, вероятно, с большей высотой над уровнем моря), форма кривой сезонной вариации в Исламабаде сходна с кривой, наблюдаемой в Нижнем Новгороде, и имеет максимум в марте.

Суммируя результаты проведенного сравнительного анализа, можно заключить, что в Нижнем Новгороде, как и в других пунктах наблюдений на суше в средних широтах, летний максимум, обусловленный ростом ионосферного потенциала, маскируется локальными эффектами, которые приводят к возрастанию среднего поля в зимние месяцы и весеннему максимуму приземного поля.

Заметим при этом, что, например, результаты статистического анализа материала, полученного в Борке, показывают, что унитарная вариация (с

минимумом в утренние и максимумом в вечерние часы всемирного времени) 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°56' с.ш., 17°35' в. д.], и среднеширотной обсерватории Нагиценк (Nagycenk), расположенной в Венгрии (47°38' с.ш., 16°43' в. д.) Анализ суточной вариации поля в Нижнем Новгороде в зимние месяцы с целью выявления глобальных эффектов будет проведен в отдельной работе.

Теория, которая объяснила бы локальные особенности поведения сезонной вариации поля, пока не построена. Для ее построения необходимо выявление механизмов возмущений приземного электрического поля с учетом влияния метеорологических факторов и антропогенных воздействий на динамику проводимости пограничного слоя атмосферы.

3.3. О влиянии облачности на электрическое поле в приземном слое атмосферы

3.3.1. Корреляции между среднесуточными значениями электрического поля, температуры и облачности по данным экспериментальных наблюдений

В настоящем разделе представлены результаты наблюдений и обработки экспериментальных данных длительных (2012–2018 гг.) непрерывных измерений электрического поля с помощью сети флюксометров, расположенной в Нижегородском регионе, и проведено их сопоставление с метеорологическими параметрами для условий "нарушенной погоды". Под условиями "нарушенной погоды" в настоящем исследовании подразумевается облачная погода (облачность более 5 баллов), при которой не зарегистрирована грозовая активность, т.е. отсутствие мощных конвективных облаков.

В результате анализа многолетних наблюдений было установлено, что корреляции среднесуточных значений электрического поля со среднесуточной

температурой приземного слоя атмосферы являются положительными летом и отрицательными зимой (рисунки 3.11-3.12).

Коэффициент корреляции между средним электрическим полем и облачностью близок к -0.48 и не зависит от сезона. Коэффициенты корреляции между средним электрическим полем и температурой варьируются от -0.39 зимой до 0.41 летом. На этом этапе анализа дни осадков не были исключены из рассмотрения, также как и дни со значительной грозовой активностью.

Сравнение экспериментальных данных показывает, что ослабление среднесуточных значений электрического поля в среднем составляет около 69% в случае периодов 5 и более дней, когда облачность в 100% состоит в основном из слоистых облаков (Рисунок 3.13). Такие периоды можно рассматривать в стационарном приближении.

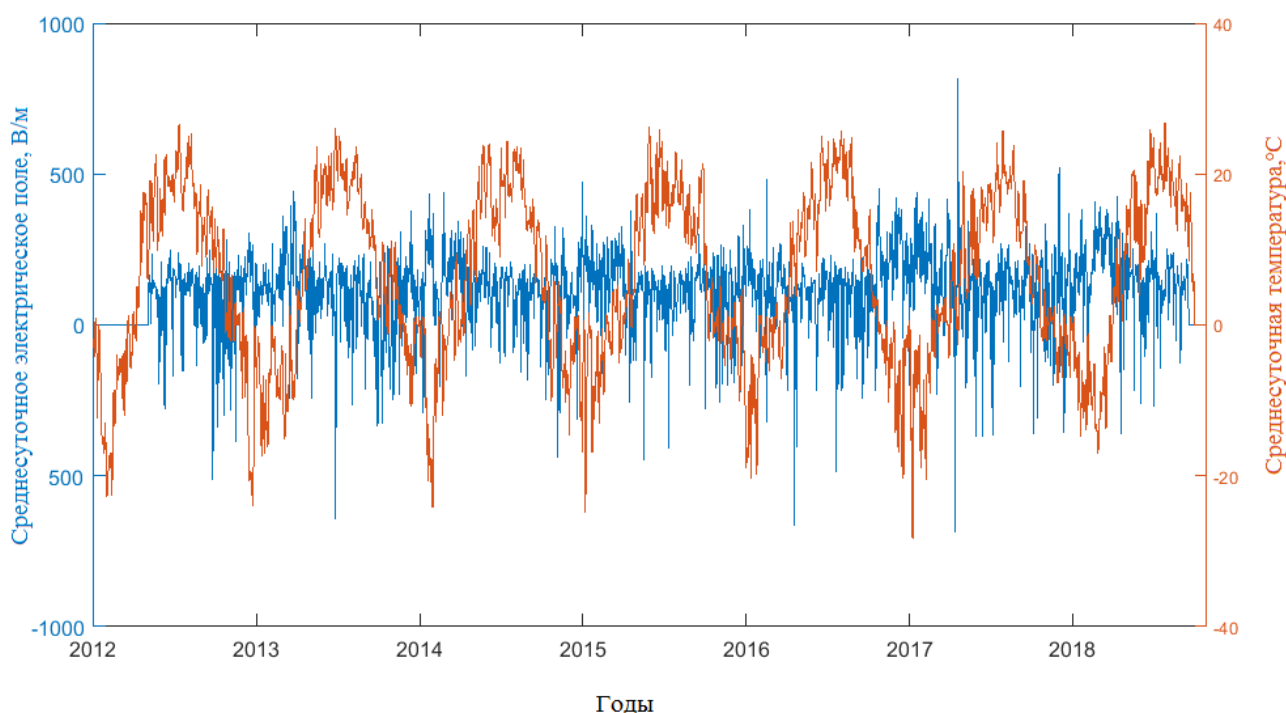


Рисунок 3.11 – Вариации среднесуточных значений температуры (оранжевая линия) с 1.01.2012 по 30.09.2018 и атмосферного электрического поля (синяя линия) с 1.07.2012 по 30.09.2018 по данным флюксметра ИФМРАН



Рисунок 3.12 – Вариации среднесуточных нормированных значений поля E/E_0 , температуры $T/10$ и облачности $C/100$ зимой (DJF), весной (MAM), летом (JJA) и осенью (SON) 2015 г.

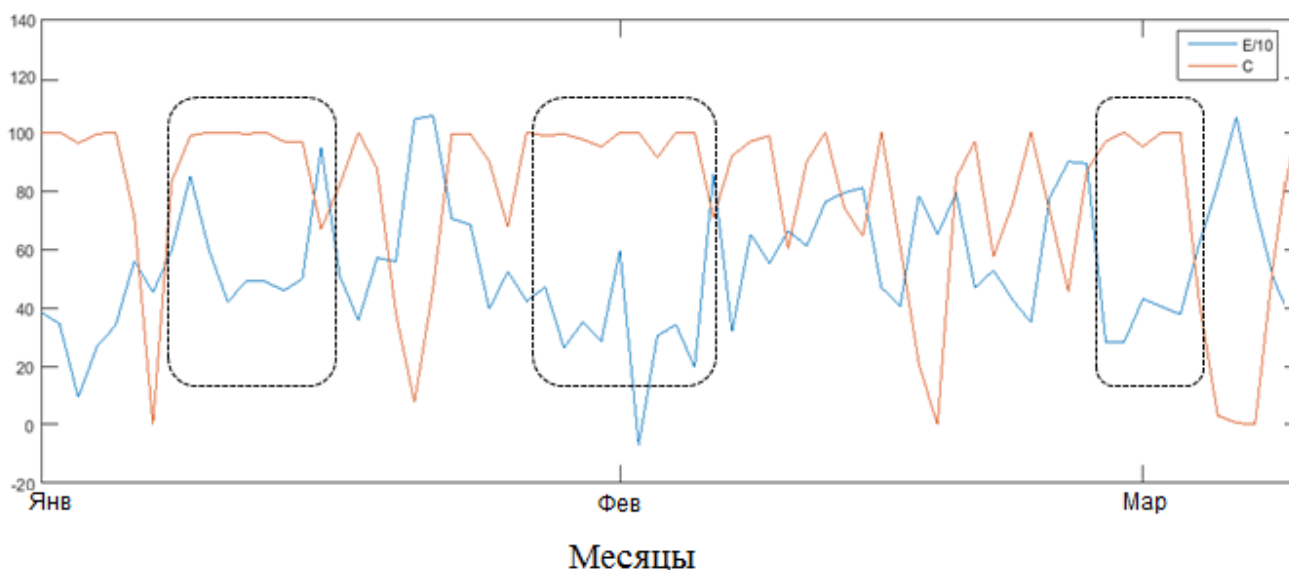


Рисунок 3.13 – Вариации среднесуточных значений поля $E/10$ В/м и облачного покрова C (%) в первом квартале 2016 года. Пунктирными линиями выделены 5 или более дней с почти 100% облачностью

3.3.2. Оценка влияния облачного слоя на электрическое поле, измеряемое на поверхности Земли

Для интерпретации данных наблюдений были использована дискретная (электротехническая) модель глобальной электрической цепи [29, 30], позволяющей получить понимание механизмов воздействия возмущений проводимости атмосферы на процессы протекания в ней тока. В моделях глобальной цепи грозовые облака рассматриваются как источники тока [138], так и источники напряжения [139]. В настоящем разделе рассматриваются влияние элементов глобальной электрической цепи (облаков), не содержащих грозовые источники, поэтому в стационарных случаях (см. рисунок 3.14) можно сделать предварительные оценки влияния облака на электрическое поле в приближении постоянного ионосферного потенциала.

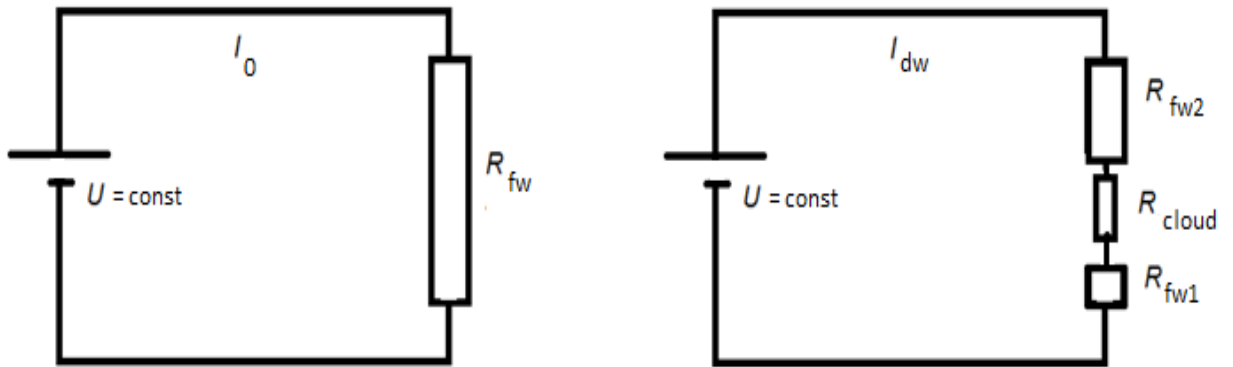


Рисунок 3.14 – Схема эквивалентной электрической цепи: слева - в условиях хорошей погоды; справа - нарушенная погода (облачный слой)

В условия хорошей погоды сопротивление R_{fw} столба воздуха высоты H определяется как [29]:

$$R_{fw} \sim \frac{1}{\sigma_0} \int_0^H e^{z/H_0} dz \quad (3.1)$$

где z – высота, $\sigma_0 = \text{const}$, H_0 – характерная высота роста проводимости (6.5 км). В присутствии облачного слоя сопротивление эквивалентной части цепи нарушенной погоды R_{dw} будет определяться по формуле:

$$R_{dw} = R_{fw1} + R_{cl} + R_{fw2} \sim \frac{1}{\sigma_0} \int_0^{h_1} e^{z/H_0} dz + \frac{1}{\sigma_c} \int_{h_1}^{h_2} e^{z/H_0} dz + \frac{1}{\sigma_0} \int_{h_2}^H e^{z/H_0} dz, \quad (3.2)$$

где h_1 and h_2 – высота нижней и верхней границы облака соответственно, σ_c – константа проводимости облачного слоя, $\sigma_c < \sigma_0$ [31]. В приближении постоянного ионосферного потенциала $U = \text{const}$ из закона Ома с учетом того, что $\sigma E \sim I$ можно получить соотношение между электрическим полем нарушенной погоды E_{dw} и полем хорошей погоды E_{fw} в точке наблюдения:

$$\frac{E_{dw}}{E_{fw}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_c} - 1 \right) \cdot \left(\frac{e^{h_2/H_0} - e^{h_1/H_0}}{e^{H/H_0} - 1} \right)}, \quad (3.3)$$

т.е. есть ослабление поля обусловлено соотношением проводимостей внутри облака и окружающей атмосферы, а также соотношением толщины облака и атмосферного слоя. Из формулы (3.3) для облачного слоя толщиной 4 км, находящегося на высоте 2 км и проводимостью в 10 раз меньше чем у окружающей атмосферы ($\sigma_c/\sigma_0 = 0.1$), можно получить, что электрическое поле в точке наблюдения в присутствии облака будет составлять 73% от среднего значения электрического поля хорошей погоды, что близко к наблюдаемым в эксперименте (раздел 3.3.1) характеристикам. Здесь, также можно отметить, что схожие величины ослабления поля в присутствии облачного слоя (около 70%) наблюдались как по результатам анализа долгопериодных вариаций электрического поля во Флориде [69], так и в экспериментах по исследованию влияния искусственного облака на электрическое поле [68].

3.4. Выводы к главе 3

Представлены результаты натуральных экспериментов по приему и регистрации полей в Нижегородском регионе. В результате обработки 139 суточных записей с четырех пунктов наблюдения (разнесенных на 6-8 км друг от друга) в Нижнем Новгороде в 2013-2018 гг. была исследована суточная вариация атмосферного электрического поля хорошей погоды для различных сезонов и дней недели. Показано, что кривая локальной суточной вариации всегда имеет два максимума. Вечерний максимум суточной вариации (19:00-20:00 UTC) совпадает по времени с максимумом кривой Карнеги, характеризующей глобальную электрическую цепь. Наибольшие значения амплитуды поля достигаются в зимний период. Максимум поля в первой половине дня (09:00-11:00 по местному времени) является характерным для городской среды и показывает, что локальные

эффекты, связанные с присутствием в воздухе аэрозольных частиц, вносят существенный вклад в формирование суточной вариации, особенно в летний период.

По данным измерений 2013-2018 гг. выявлена сезонная вариация среднемесячных значений атмосферного электрического поля хорошей погоды (с максимальными значениями в зимний и весенний период) и проведен ее сравнительный анализ с результатами измерений сезонной вариации в других районах земного шара.

Проанализированы низкочастотные вариации электрического поля атмосферы, в частности, показано существование 4-5 дневной гармоник, соответствующей среднему времени жизни атмосферных циклонов.

Показано, что среднесуточные значения электрического поля коррелируют с среднесуточной температурой приземного атмосферного слоя и облачностью летом в фазе, а зимой в противофазе. Сделаны теоретические оценки влияния облачности на электрическое поле в приземном слое для различных предельных случаев, в частности, в приближении постоянного ионосферного потенциала, и проведено их сопоставление с экспериментальными результатами.

Полученные результаты полезны для выявления роли глобальных и локальных эффектов в формировании суточной вариации в районах средних широт с умеренно континентальным климатом. Они могут послужить основой для развития теории, объясняющей физические механизмы этих эффектов и построить достаточно простые параметризации для нахождения приземного электрического поля в погодно-климатических моделях.

Результаты, изложенные в данной главе, опубликованы в работах [88, 99–102, 105, 107, 110].

Глава 4

Исследование характеристик конвективных событий на основе наземных измерений квазистатического электрического поля

Настоящая глава посвящена изучению характеристик грозовых событий с использованием непрерывных записей электрического поля с помощью сети флюксометров. Исследованы статистические характеристики грозовых облаков и молниевых вспышек в средних широтах, выявлены особенности переноса основных электрических зарядов в грозовых облаках. Получена статистика грозовых событий в Нижнем Новгороде за девятилетний период наблюдений. Исследованы спектральные характеристики возмущений электрического поля во время грозовых событий и проведено сравнение этих характеристик со спектрами поля невозмущенной атмосферы.

4.1. О статистических характеристиках полей конвективных событий

С точки зрения климатологии грозы, а также сравнительного анализа результатов наблюдений грозового электричества с метеорологическими данными большой интерес представляют непрерывные ряды записи электрического поля. В период грозовой активности усредненное поле достигает величин порядка 10 кВ/м [86, 98], причем знак поля часто меняется. Поэтому были построены ряды стандартного отклонения (или дисперсии) вертикальной компоненты электрического поля с часовым усреднением.

На рисунке 4.1 приведены результаты обработки данных непрерывных записей вертикальной компоненты электрического поля, полученных с помощью флюксометров, размещенных в Нижнем Новгороде, в 2015 году. Интенсивные конвективные события хорошо видны в виде пиков стандартного отклонения

электрического поля. В теплый период (апрель-сентябрь) такие события соответствуют грозам, в холодный период (октябрь-март) они соответствуют метелям и ливням.

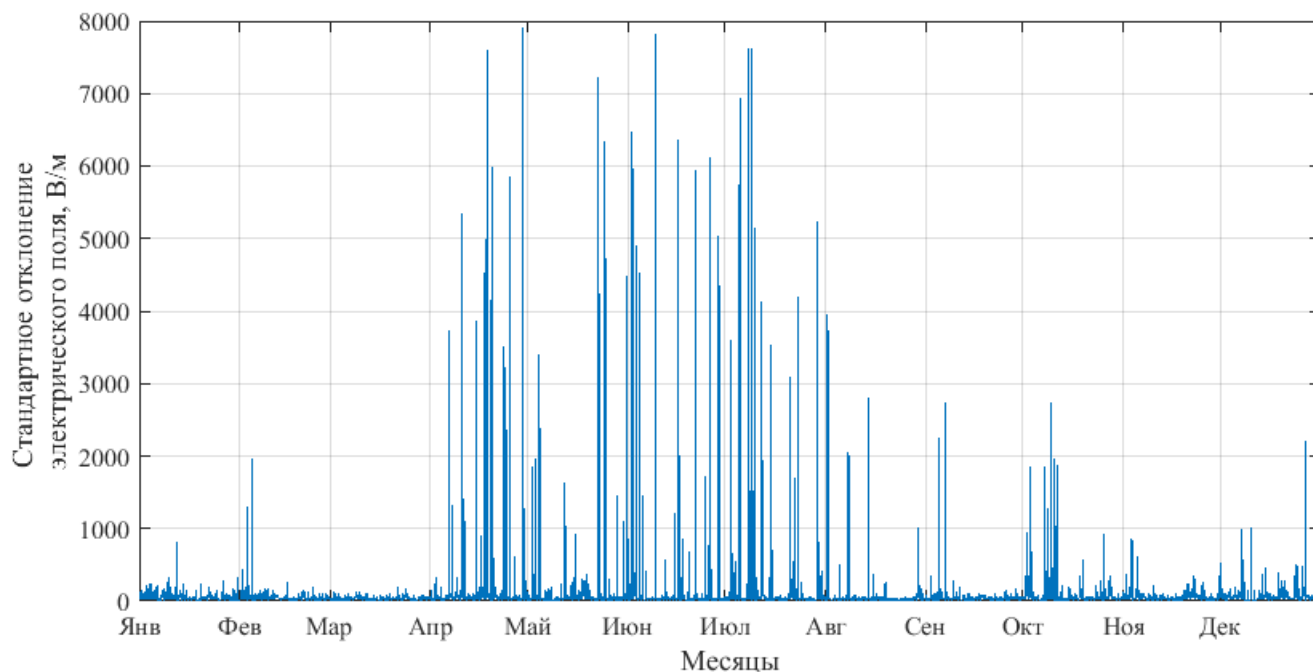


Рисунок 4.1 – Стандартное отклонение электрического поля (часовое усреднение), измеренного на флюксметре ИФМ РАН в 2015 г.

На рисунках 4.2-4.3 приведены результаты обработки данных непрерывных записей вертикальной компоненты электрического поля, полученных со всех четырех флюксметров, размещенных в Нижнем Новгороде, в мае 2016 года. Интенсивные конвективные события хорошо видны в виде пиков дисперсии электрического поля для соответствующих дат. Такие ряды дисперсии удобны для изучения региональной климатологии грозовой активности и хорошо коррелируют с наблюдательными данными по грозам [86, 98, 99, 101, 106].

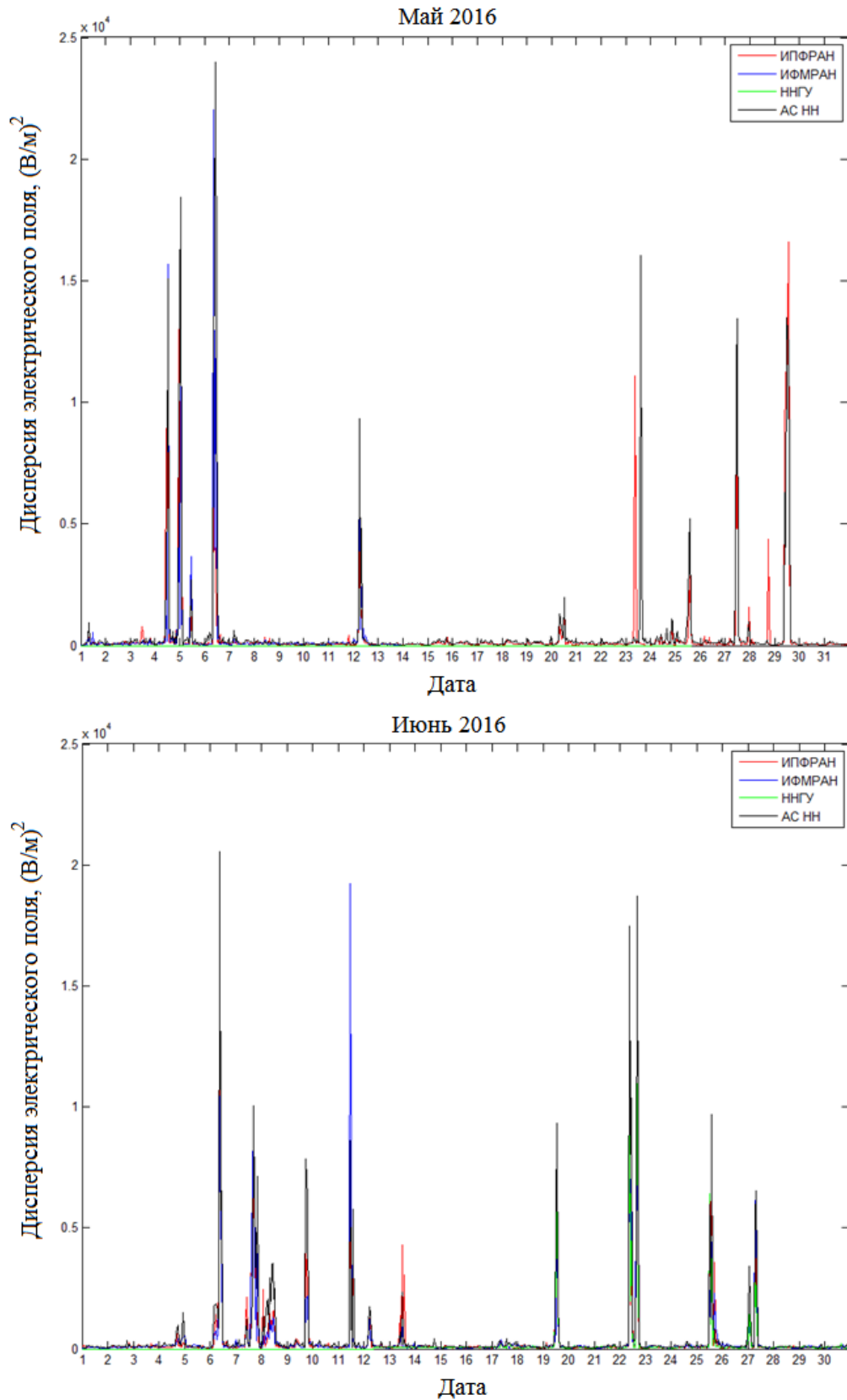


Рисунок 4.2 – Дисперсия электрического поля в мае-июне 2016 по данным флюксометров, установленного на крыше ИПФ РАН, ИФМ РАН, ННГУ и Аэрологической станции "Нижний Новгород" с часовым усреднением.

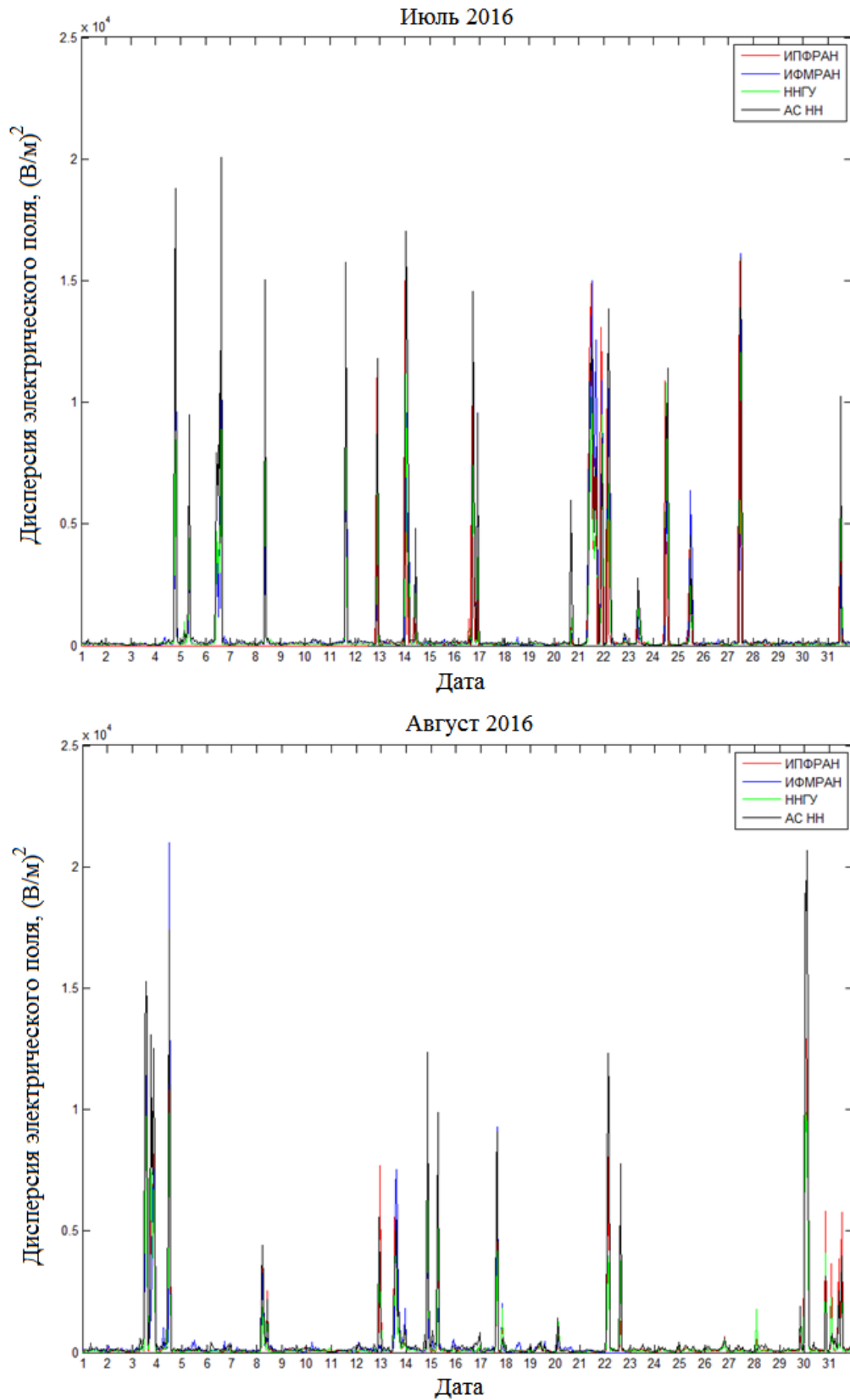


Рисунок 4.3 – Дисперсия электрического поля в июле-августе 2016 по данным флюксометров, установленного на крыше ИПФ РАН, ИФМ РАН, ННГУ и АС НН с часовым усреднением.

Также это позволило более точно подсчитать статистику грозовых событий в Нижнем Новгороде. В таблице 4.1 приведены результаты за 9-ти летний период наблюдений.

Таблица 4.1 – Статистика грозовых событий в Нижнем Новгороде за девятилетний период наблюдений

| | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
|-----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Май | - | 7 | 5 | 8 | 4 | 9 | 8 | 1 | 4 |
| Июнь | 4 | 11 | 5 | 14 | 5 | 13 | 7 | 1 | 3 |
| Июль | 3 | 14 | 9 | 12 | 9 | 13 | 16 | 6 | 8 |
| Август | 6 | 5 | 8 | 10 | 13 | 3 | 9 | 4 | 7 |
| Всего за сезон | 13 | 37 | 27 | 44 | 31 | 36 | 40 | 12 | 22 |

Получено, что в среднем в Нижнем Новгороде происходит около 35 грозовых событий. 2010 год выделяется аномально малым результатом событий, что объясняется особенностью погодных условий (аномальная жара в течение летнего периода). В 2017 году первая половина конвективного сезона (май-август) была аномально холодной (как видно на Рисунке 4.4), поэтому также число гроз было существенно меньше среднего.

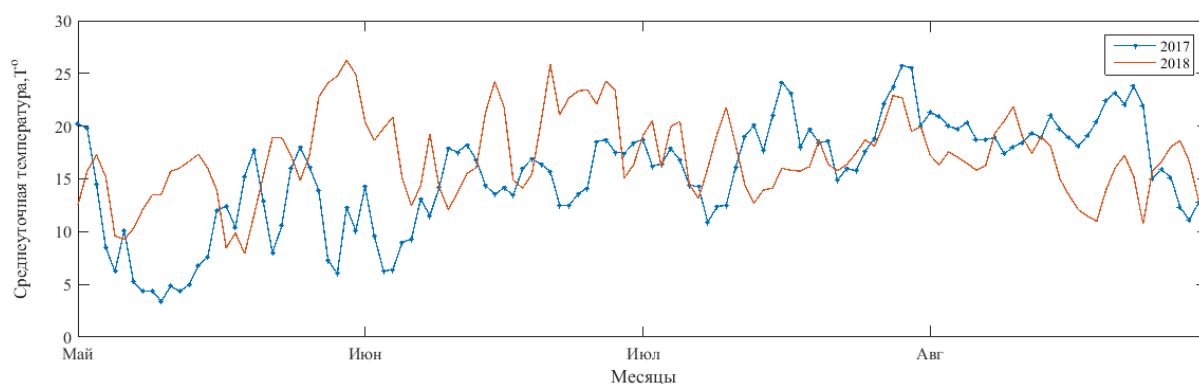


Рисунок 4.4 – Среднесуточная температура в течение конвективного сезона (май-август) в 2017-2018 гг. по данным портала rp5.ru [133].

4.2. Анализ динамики крупномасштабных возмущений электрического поля

Непрерывные измерения поля, проводимые в Нижегородском регионе, описанные в разделе 3.1, позволили как изучить особенности длиннопериодных возмущений электрического поля, так и проанализировать отдельные интенсивные конвективные события. Подробные исследования выделенных опасных метеорологических явлений (так называемые case-studies) дают возможность продвинуться в изучении особенностей электродинамики грозовых облаков, а также служат эффективным инструментом для повышения точности прогнозных моделей [89, 104, 108].

Была разработана модель диагностики крупномасштабного распределения зарядов в грозовых облаках на основе разнесенного приема электрического поля, базирующаяся на методе пробных структур, первоначально разработанном для восстановлений распределения зарядов в условиях хорошей погоды (см. Главу 1) [82, 87, 93, 96, 109]. Были проанализированы данные по нескольким грозовым событиям, с помощью численного моделирования и обратного расчета получены распределения зарядов. Алгоритм расчета, позволяющий оценить величину заряда, содержащегося в облаке, построен так, чтобы удовлетворить условию минимального расстояния до датчика в момент наблюдения максимума электрического поля, что дает нам третье необходимое условие для регуляризации задачи.

Для того чтобы оценить заряды, содержащиеся в грозовом облаке, введем систему декартовых координат с началом в месте расположения метеорадара. Ось Z направлена вверх, значение координаты z соответствует высоте над поверхностью Земли. Электрическое поле, создаваемое i -м зарядом на k -м датчике из принципа суперпозиции и отражений, в приближении проводящей земли, можно вычислить как (см. Раздел 1.1):

$$E_{z_k} = 2 \sum_i \frac{Q_i (z_i - z_k)}{\left((x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2 + (z_i - z_k)^2 \right)^{3/2}} \quad (4.1)$$

Здесь $(x_i, y_i, z_i) = (V_x, V_y, V_z)t$ координаты i -го заряда, (V_x, V_y, V_z) – проекции скорости его движения на оси координат. В дальнейшем для простоты мы полагаем $V_z = 0$, считая, что перемещение заряда по вертикали пренебрежимо мало и облачные ячейки, несущие заряд определенного знака сохраняются достаточно долго, то есть общее распределение заряда сохраняется на протяжении пролета ячейки над приемником, и на результирующее поле оказывает влияние только горизонтальный перенос.

Таким образом, из анализа экспериментальных данных можно получить промежутки времени между максимумами поля, создаваемыми зарядом, скорость их перемещения и другие параметры. Некоторые результаты анализа полученных данных приведены в следующих разделах.

4.2.1. Мощное грозовое событие 1-2 июня 2015 г.

Среди экстремальных грозовых событий 2015 года была выделена мощная продолжительная гроза 1-2 июня, которая прошла в Нижегородской области с юга на север [89, 104]. На рисунке 4.5 приведена интегральная радиолокационная отражаемость для начала грозового события (по данным метеорадара).

Радиолокационная отражаемость выше 45 дБ характерна для очагов грозовой активности [89, 104, 108]. По данным флюксометров гроза также началась около 23:00 по местному времени (20:00 UTC) и продолжалась почти 8 часов. На рисунках 4.2-4.4 приведены результаты обработки данных непрерывных записей вертикальной компоненты электрического поля, полученных с помощью флюксометров, размещенных в Нижнем Новгороде, для периода длительностью 20 дней (май-июнь 2015 г.) с часовым усреднением. На графике дисперсии (рисунок 4.6) она наглядно выделяется максимальной амплитудой и продолжительностью среди более коротких и менее интенсивных грозовых событий.

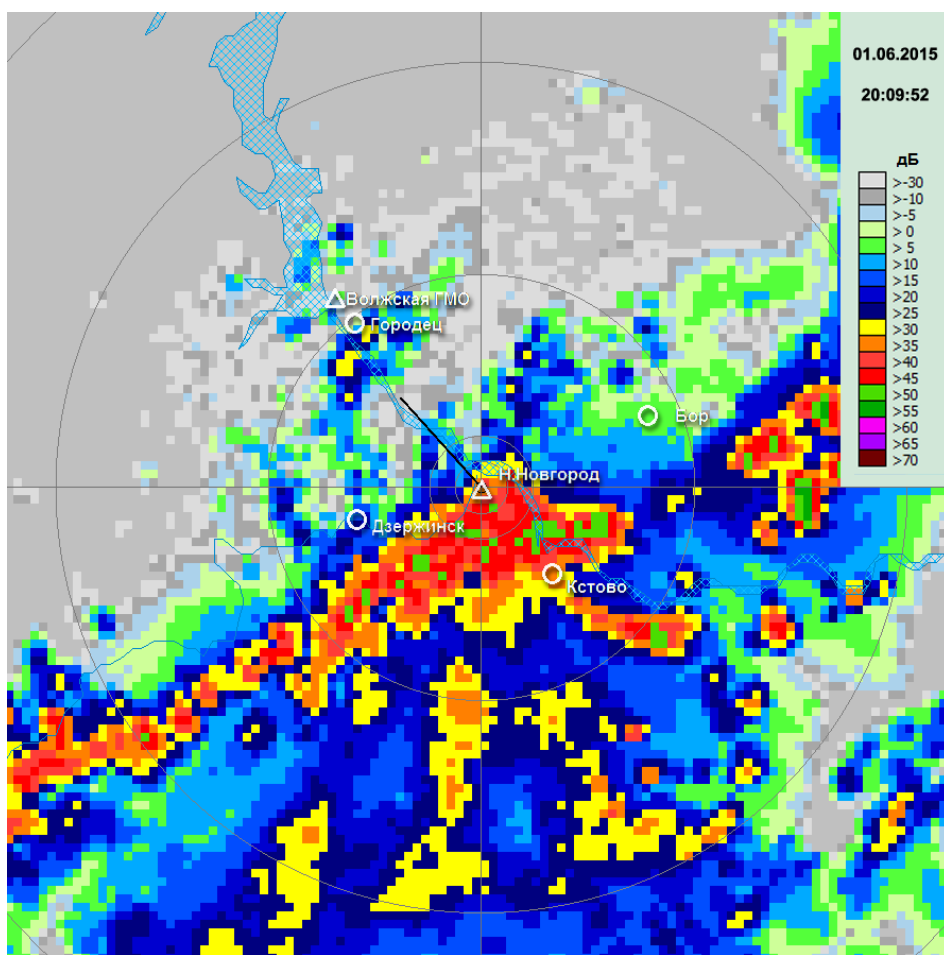


Рисунок 4.5 – Радиолокационная диаграмма отражаемости облаков (дБ) во время начала мощного грозового события 01.06.2015, 20:09 UTC по данным метеорадара, установленного в Нижнем Новгороде. Масштаб карты 210x210 км.

На рисунке 4.7 представлена полная запись флуктуаций электрического поля во время грозового события 1-2 июня по данным флюксметров, установленных на крыше ИПФ РАН, ИФМ РАН, ННГУ и АС НН. На записи видно множество пиков, соответствующих грозовым разрядам. В отличие от данных грозопеленгационной системы, данные, полученные с помощью электростатических флюксметров позволяют исследовать распределение электрического поля и заряда внутри облака и его изменение во время вспышек молнии на расстоянии до 10-15 км от грозовых очагов.

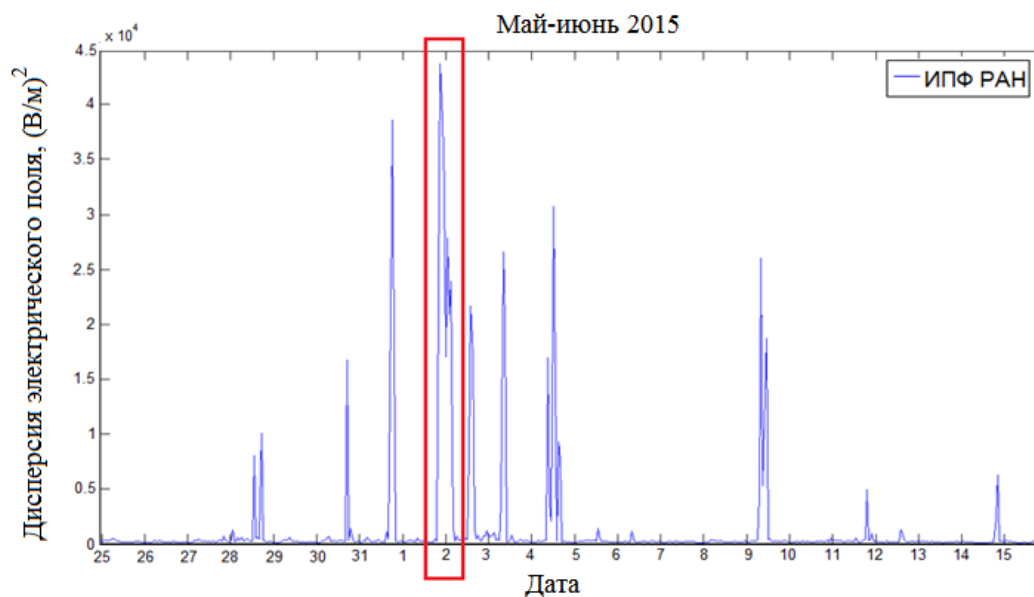


Рисунок 4.6 – Дисперсия электрического поля в мае-июне 2015 по данным флюксметра, установленного на крыше ИПФ РАН, с часовым усреднением

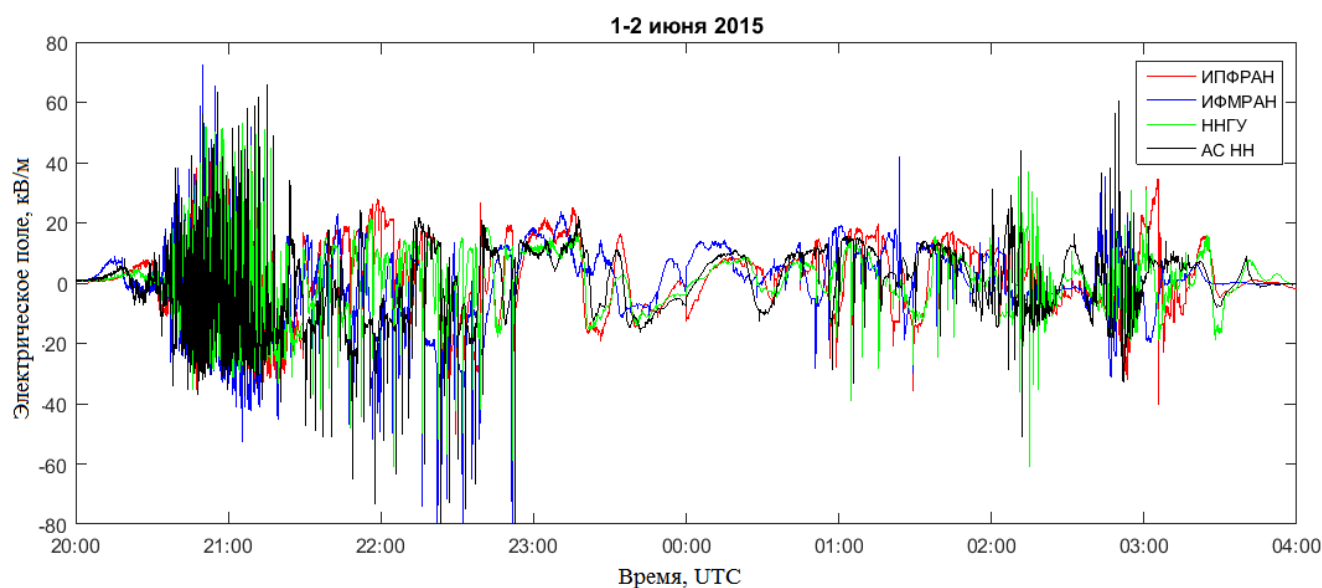


Рисунок 4.7 – Полная запись электрического поля мощного грозового события 01-02.06.2015 по данным флюксметров, установленных на крыше ИПФРАН, ИФМРАН, ННГУ и АС НН, с секундным усреднением.

Анализ усредненных записей квазистатического электрического поля позволяет получить дополнительную информацию о скорости перемещения основных зарядов в грозовом облаке [89, 96]. В случае, если вектор направления

движения грозовой ячейки совпадает с вектором, соединяющим точки наблюдения, можно сделать простую оценку этой скорости. На рисунке 4.8 приведена запись электрического поля для начала рассматриваемого грозового события с часовым усреднением, максимумы поля соответствуют моментам времени, в которые основные грозовые заряды находились на минимальном расстоянии от каждого из флюксометров.

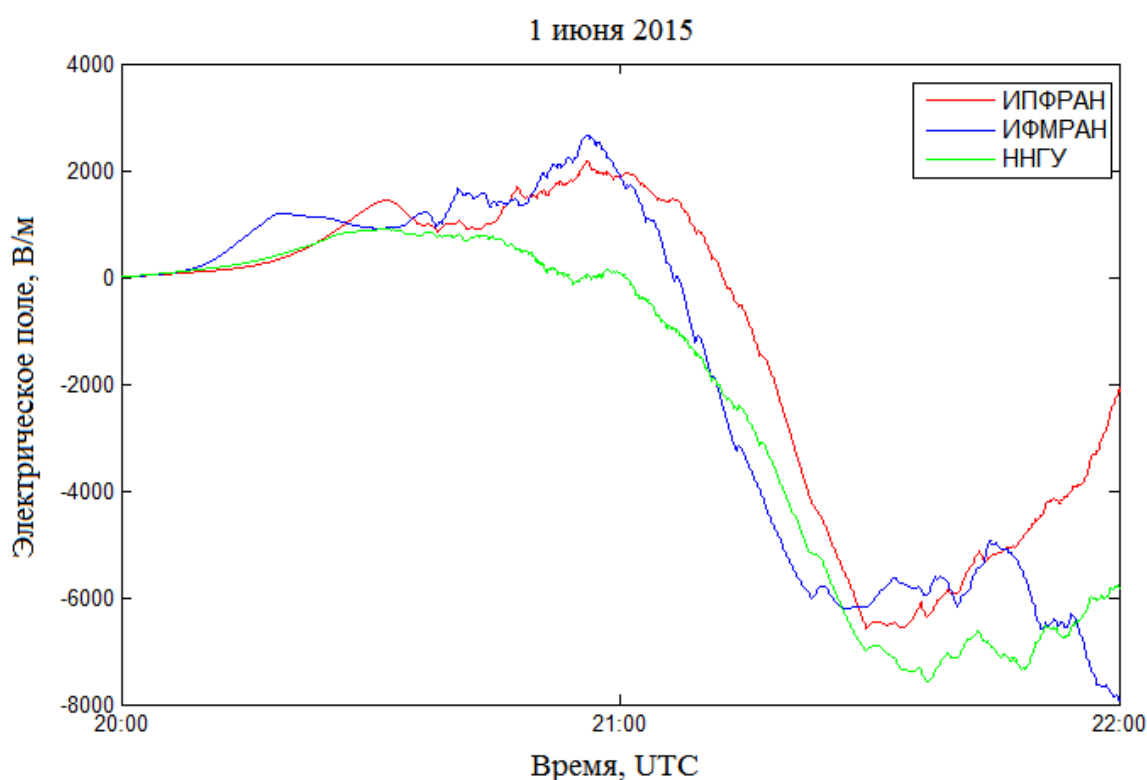


Рисунок 4.8 – Вариации электрического поля в начале грозового события 01-02.06.2015 с десятиминутным усреднением.

Таким образом, в начале грозового события 1 июня 2015 скорость перемещения зарядов составляла около 15 м/с (6040 м между ИФМРАН и ИПФРАН за 395 секунд). При этом скорость перемещения грозового фронта по радару составляла от 7.4 м/с до 10.8 м/с, т.е. перемещение зарядов опережало среднюю скорость грозового фронта, что свидетельствовало о развитой конвекции в рассматриваемом грозовом облаке.

4.2.2. Финальная стадия грозы

На рисунке 4.9 приведены усредненные вариации электрического поля во время грозы 17 июля 2008 г. На рисунке 4.10. приведена взаимная корреляционная функция флуктуаций электрического поля в двух наблюдательных пунктах. В данном случае отрицательный временной сдвиг означает, что возмущение на Аэрологической станции "Нижний Новгород" опережает коррелированное возмущение на ст. ИПФРАН на 800 с.

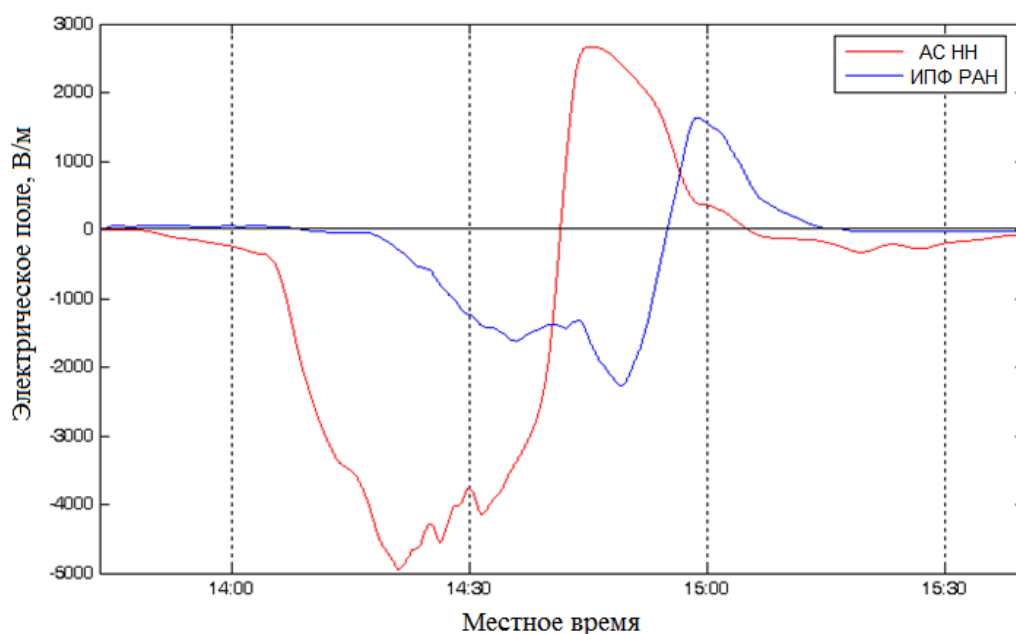


Рисунок 4.9 – Усредненные вариации электрического поля во время грозы 17.07.08 в интервале 14:20-15:30 LT. Красная линия – АС НН , синяя – ст. ИПФ РАН.

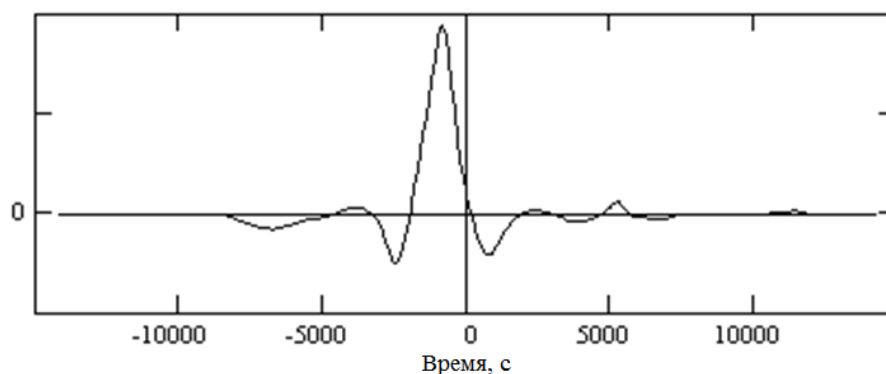


Рисунок 4.10 – Взаимная корреляционная функция флуктуаций электрического поля в двух наблюдательных пунктах.

В свою очередь анализ данных радара (рисунок 4.11.) показывает, что с учетом взаимного расположения пунктов наблюдения облако переносится со скоростью 10 км/с, что соответствует корреляционному сдвигу. Так же видно, что грозовое облако, проходящее над радаром к концу наблюдений распадается.

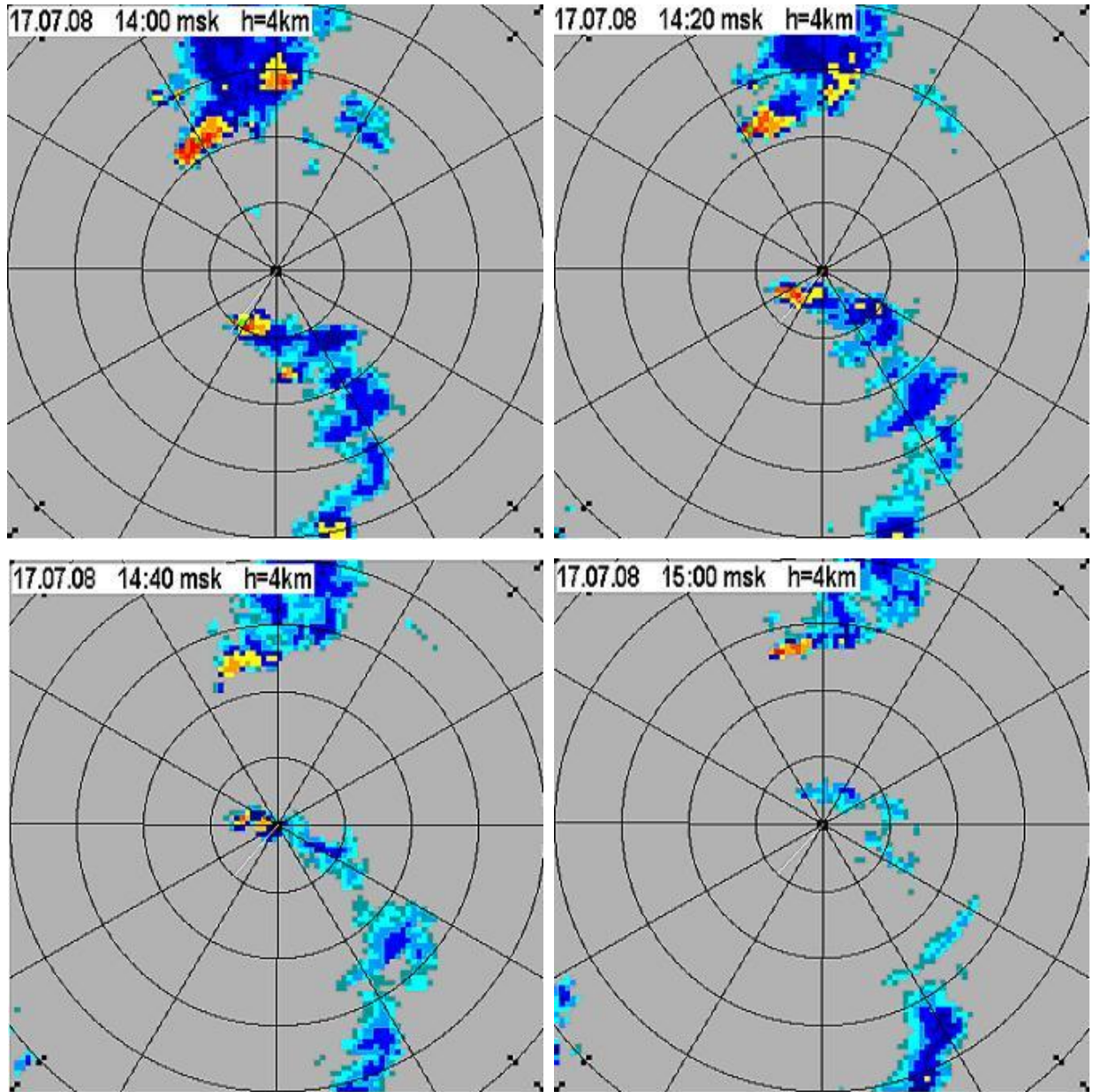


Рисунок 4.11 – Радиолокационные изображения динамики грозовой облачности 17 июля 2008 г., по данным метеорадара

Алгоритм учитывал изменения заряда в облаке с течением времени. На рисунке 4.12 приведено реальное и модельное поля для случая распада грозы. Заряды облака: Аэрологическая станция "Нижний Новгород" (начало распада грозы) : - 37 Кл, -29,6 Кл и 29 Кл, ст. ИПФ РАН (распад грозы) : -7,4 Кл, -14 Кл и 15 Кл. Временной сдвиг между коррелированными возмущениями связан с переносом полученных зарядов с ветром и составляет 818 с, что соответствует экспериментальным результатам (рисунок 4.10).

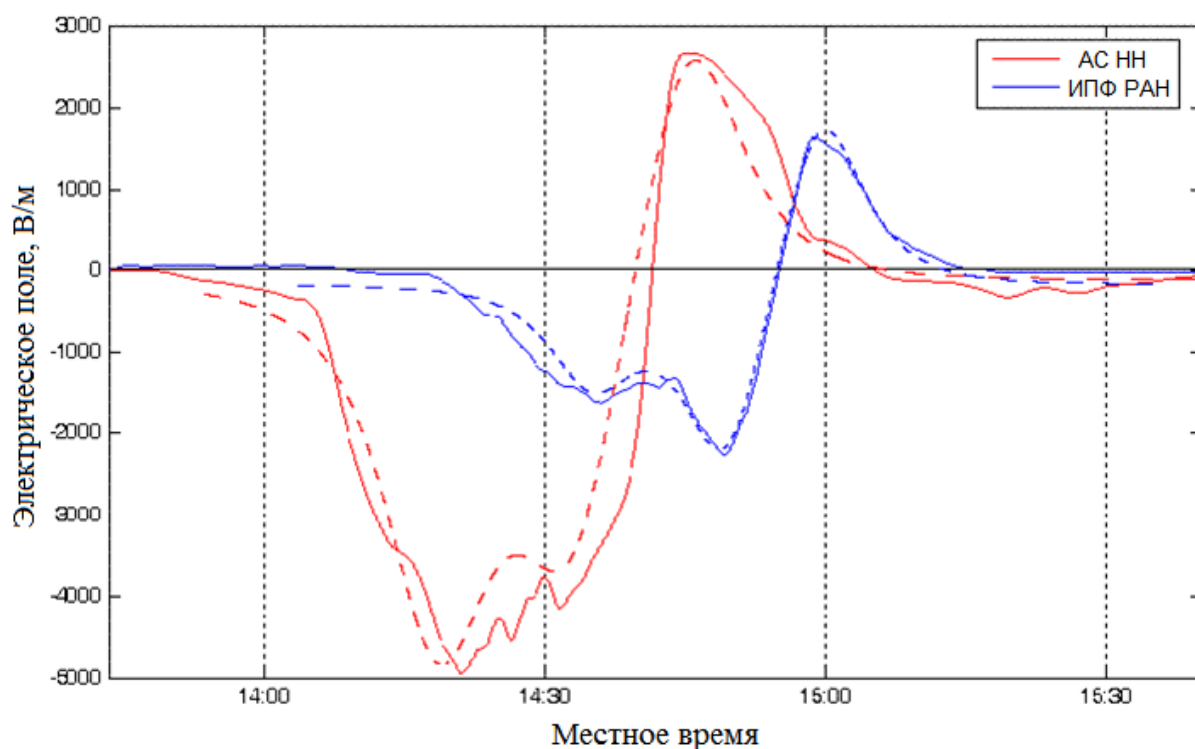


Рисунок 4.12 – Экспериментальное (сплошная линия) и модельное (пунктирная линия) поля в грозовом облаке для грозового события 17.07.2008

4.3. Детектирование разрядов с помощью сетей флюксометров

Вопрос о местоопределении грозовых разрядов с помощью измерений квазистатического поля представляет собой известную задачу физики атмосферы [140]. Для точного позиционирования требуется организация одновременного разнесенного приема электрического поля в 4-х точках. Нижегородская система мониторинга электрического поля позволяет решить эту задачу, четыре пункта

наблюдений достаточно для нахождения четырех неизвестных (трех координат и заряда)

$$\Delta E_i = \frac{2Qz}{\left((x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + z^2\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (4.2)$$

Здесь $i=1,2,3,4$ - номер пункта регистрации, ΔE_i - величина скачка электрического поля, измеренная на i -м флюксметре в момент разряда, (x_i, y_i) - координаты i -го пункта регистрации, (x, y, z) и Q - параметры переносимого заряда. Разницей высот установки пунктов регистрации z_i в данном случае можно пренебречь, потому что высоты наблюдаемых грозовых облаков не менее 1000 м [133], что много больше высоты установки датчиков (см. Таблицу 3.1).

Аналитическое решение системы (4.2) можно получить, переписав ее в виде:

$$(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + z^2 = \frac{(2Qz)^{\frac{2}{3}}}{(\Delta E_i)^{\frac{2}{3}}} \quad (4.3)$$

Составляя попарно уравнения для каждого i , можно исключить слагаемые x^2, y^2, z^2 и снова переписать систему в виде трех уравнений [140]:

$$2x(x_i - x_j) + 2y(y_i - y_j) + (\Delta E_i^{-\frac{2}{3}} - \Delta E_j^{-\frac{2}{3}})\xi = r_i^2 - r_j^2 \quad (4.4)$$

где $\xi = (2Qz)^{\frac{2}{3}}$, $r_i^2 = x_i^2 + y_i^2$, а $i=1,2,3$ и $j=2,3,4$ - номера пунктов наблюдений. Эту линейную систему можно решить, подставив измеренные значения скачков электрического поля ΔE_i и координаты флюксметров (см. Рисунок 3.2). Высота перенесенного заряда будет определяться по формуле:

$$z = \sqrt{\left(\Delta E_i^{-\frac{2}{3}}\xi - [(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2]\right)}, \quad (4.5)$$

а величина заряда из определения ξ :

$$Q = \frac{\xi^{\frac{3}{2}}}{2z} \quad (4.6)$$

В качестве объекта исследования выбрано необычное грозовое событие 25 апреля 2015 года в Нижнем Новгороде, так называемая "зимняя гроза" [141, 142], сопровождающаяся снегом и большими (по сравнению со средними летними значениями) амплитудами электрического поля. Температура поверхности при этом была 5.2°C . На рисунке 4.13 приведена усредненная запись электрического поля выбранного события по данным флюксометров, установленного на крыше ИПФРАН, ИФМРАН, ННГУ и АС НН. На рисунке 4.14 приведена радиолокационная диаграмма отражаемости облаков во время грозового события исследуемого грозового события.

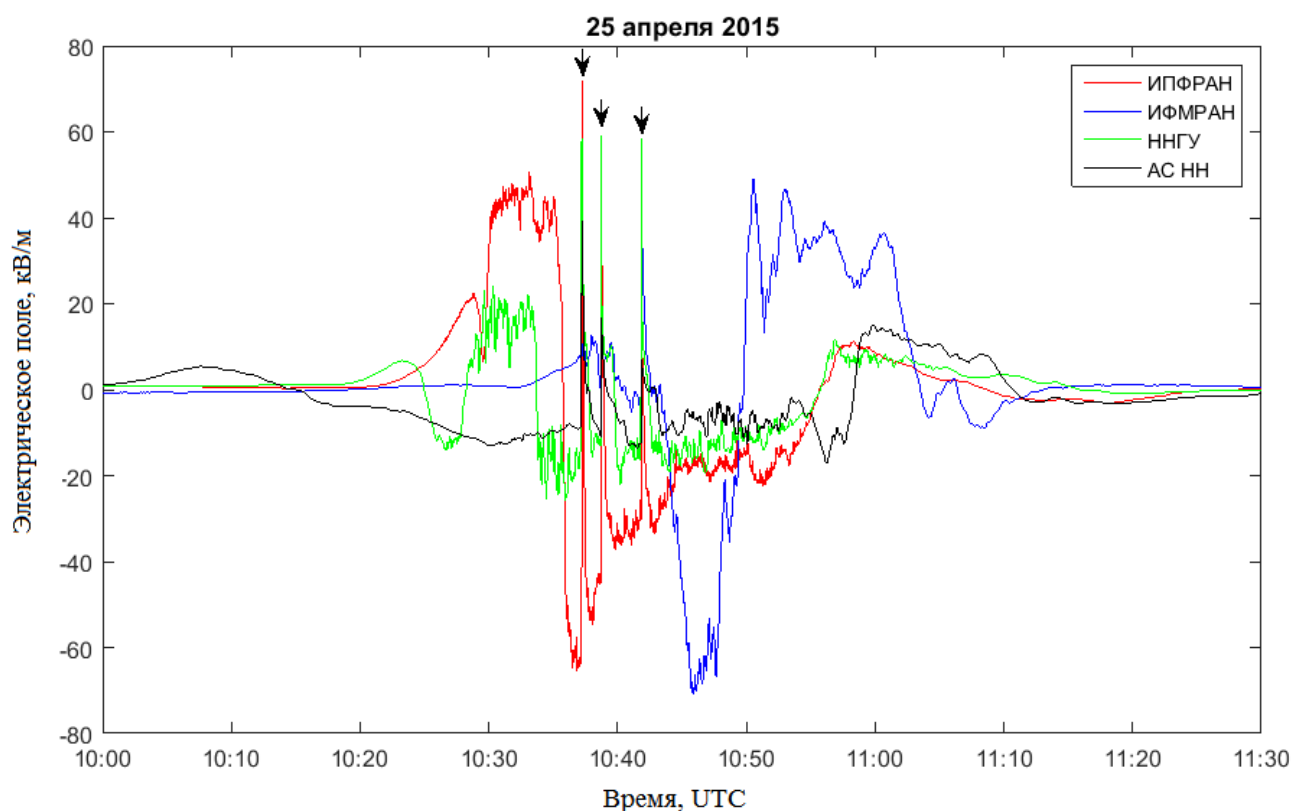


Рисунок 4.13 – Запись электрического поля грозового события 25.04.2015 по данным флюксометров, установленного на крыше ИПФРАН, ИФМРАН, ННГУ и Аэрологической станции "Нижний Новгород" (секундное усреднение). Стрелками отмечены моменты молниевых разрядов

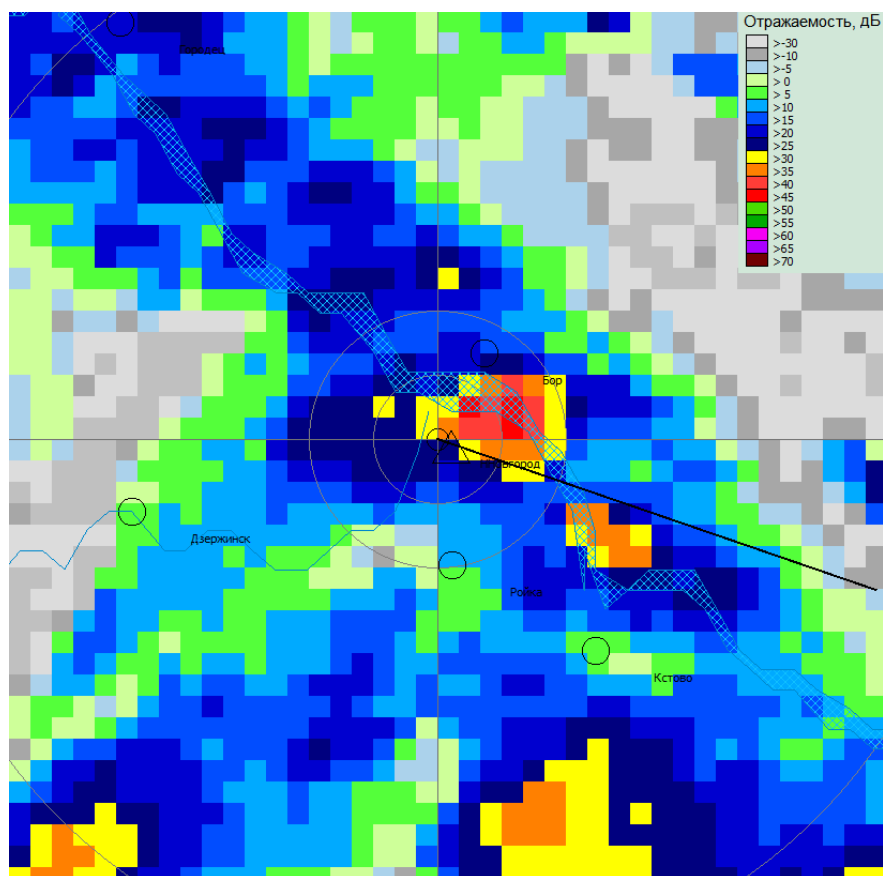


Рисунок 4.14 – Радиолокационная диаграмма отражаемости облаков во время грозового события 25.04.2015, 10:40 UTC по данным метеорадара, установленного в Нижнем Новгороде. Размер карты 80x80 км.

Согласно данным глобальной сети грозопеленгации WWLLN [143], на территории Нижнего Новгорода были зафиксированы два разряда (таблица 4.2):

Таблица 4.2 – Параметры грозовых разрядов, зарегистрированных сетью WWLLN 25.04.2015

| Часы | Минуты | Секунды | Широта | Долгота | Количество станций |
|---------|---------|---------|---------|---------|--------------------|
| 10.0000 | 38.0000 | 46.4572 | 56.3019 | 44.0643 | 8 |
| 10.0000 | 41.0000 | 54.3249 | 56.3418 | 43.9832 | 5 |

По формулам (4.4)-(4.6) рассчитаны характеристики первого, наиболее мощного разряда, зарегистрированного 8-ю станциями WWLLN. Перенесенный заряд Q составил 192 Кл, что является характерной величиной для зарядов в "зимних грозах" [142]. На рисунке 4.14 приведено место разряда и его сравнения с координатами разряда, зарегистрированного сетью WWLLN (см. Таблицу 4.2). Результаты расчетов сопоставлены так же с данными метеорадара.

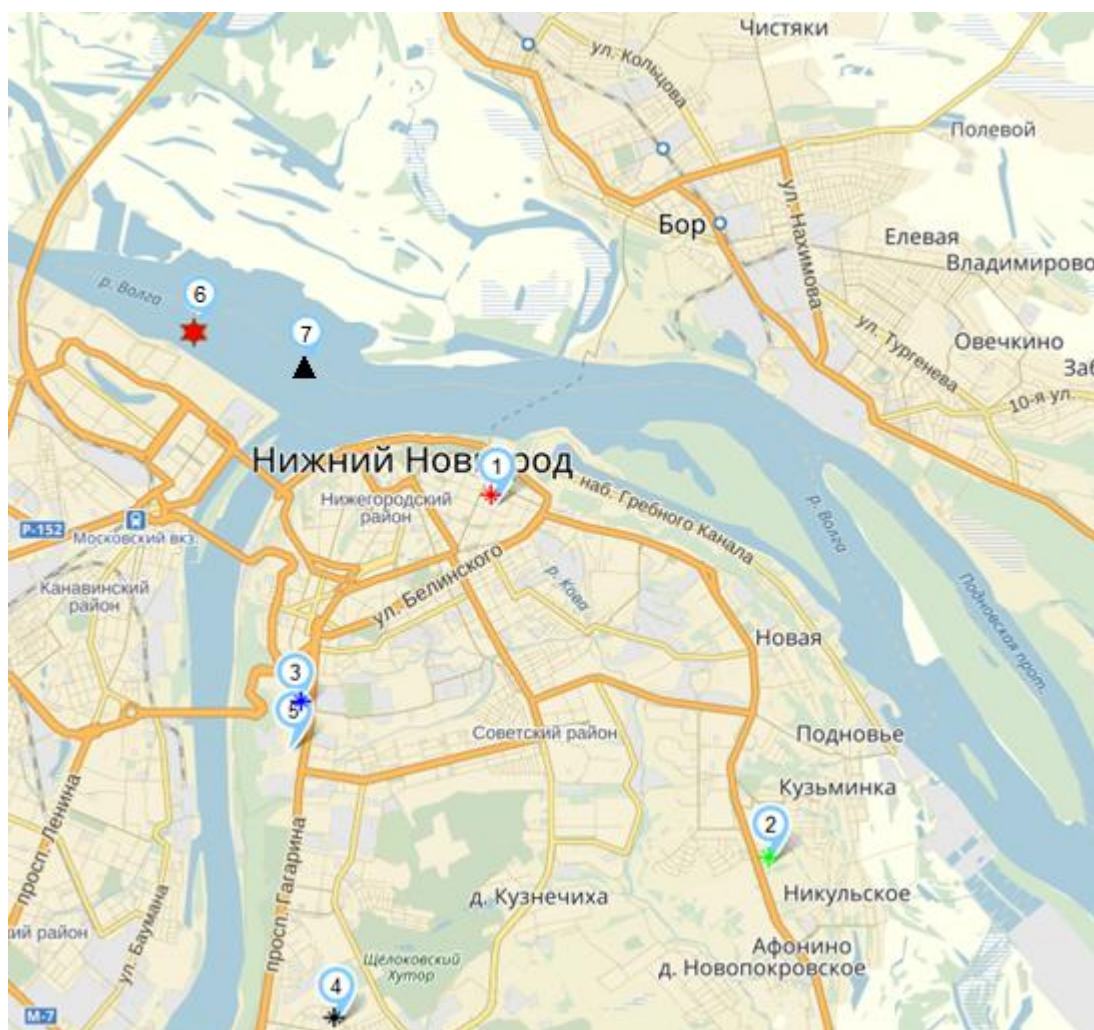


Рисунок 4.14 – Результаты расчетов по местоопределению мощного грозового разряда для события 25.04.2015: 1-4 - наблюдательные пункты по регистрации электрических полей, 5 - метеорадар, 6 - рассчитанная позиция разряда, 7 - позиция разряда по координатам сети WWLLN.

На рисунке 4.15 на радиолокационной диаграмме отражаемости (вертикальный разрез) показана высота исходного заряда, перенесенного на землю в процессе молниевых разрядов (2435 м), соответствующего максимальной радиолокационной отражаемости в исследуемом конвективном облаке, а, следовательно, основной грозовой ячейке.

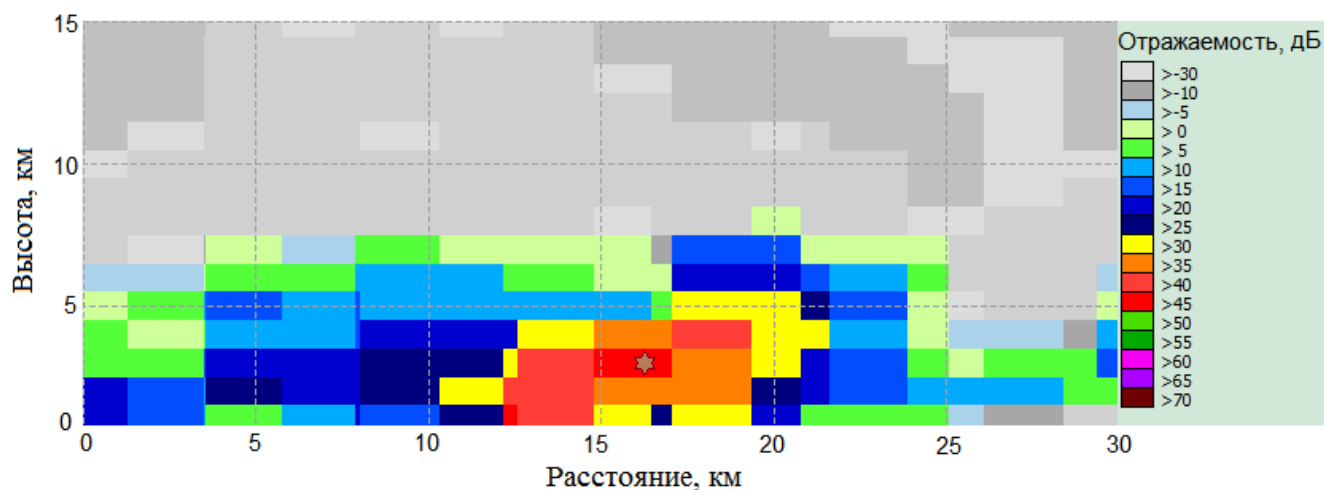


Рисунок 4.15 – Радиолокационная диаграмма отражаемости облаков во время грозового события 25.04.2015, 10:40 UTC по данным метеорадара, установленного в Нижнем Новгороде, вертикальный разрез. Местоположение исходного заряда отмечено звездочкой.

4.4. Спектральные характеристики электрического поля грозовых событий

Данные экспериментов, проведенных в 2005-2016 гг., позволили детально исследовать спектральные характеристики электрического поля во время грозовых событий и провести сравнение этих характеристик со спектрами электрического поля невозмущенной атмосферы. На рисунке 4.16 приведены усредненные по 7 грозовым событиям спектральные плотности флуктуаций электрического поля в двух пунктах, из которых видно значительное увеличение спектральной плотности во время грозы. Были использованы данные лета 2009 г.: 11 июня, 13 июня, 16 июня, 11-12 июля, 21-22 июля, 13 августа и 22 августа.

Обнаружено значительное усиление спектральной плотности вариаций электрического поля во время грозы. Максимальное усиление, обусловленное импульсной компонентой из-за молниевых разрядов, наблюдается в области периодов порядка минуты (от нескольких минут до десятков секунд). Существенное усиление имеет место и в диапазоне $0.5 \div 1.5$ мГц (периоды $10 \div 30$ мин), где спектральная плотность увеличивается более чем в 10^4 раз, тогда как на еще более низких частотах фактор усиления равен 100 (всего ~ 10 раз для поля). Обнаружены квазимонохроматические составляющие (с периодами 10-20 мин) в частотных спектрах флуктуаций электрического поля мощных грозовых облаков, дрейфующие по частоте в процессе зарождения, активизации и распада облака.

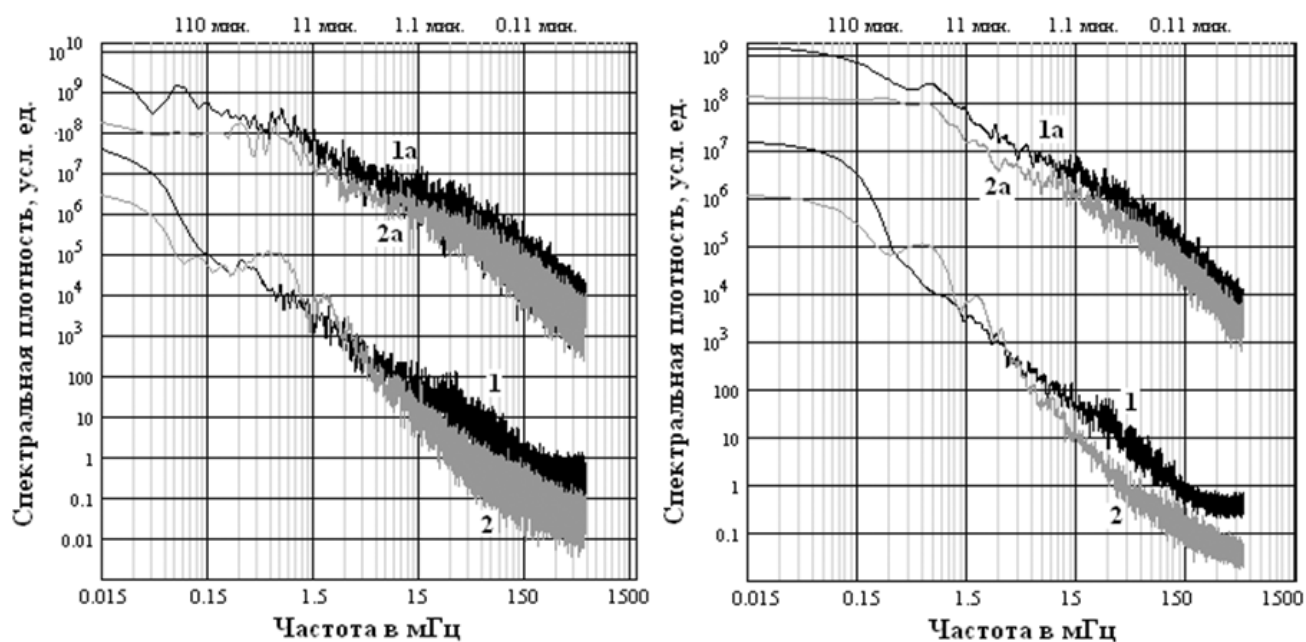


Рисунок 4.16 – Усредненные по 7 событиям лета 2009 г. спектральные плотности флуктуаций электрического поля: 1 – по данным флюксметра на крыше ИПФ; 2 – по данным флюксметра на здании АС «Нижний Новгород»; индексом «а» отмечены спектры во время гроз, без индекса – спектры в невозмущенные периоды в течение нескольких часов, предшествовавших грозам; справа – те же спектральные плотности, сглаженные по 16 гармоникам

На Рисунке 4.17 показано, как именно усиливаются флуктуации в различных частотных диапазонах во время близких гроз. Максимальное усиление в области от 1.5 мГц и выше ($T < 1$ мин) обусловлено импульсной компонентой из-за разрядов. Из рисунка видно, что весьма существенное усиление происходит и в диапазоне 0.5÷1.5 мГц ($T=10\div30$ мин), где спектральная плотность увеличивается более, чем в 10^4 раз, тогда как на самых низких частотах фактор усиления равен 100 (всего ~ 10 раз для поля). Этот факт подчеркивает важную роль внутриоблачных неоднородностей зарядов и их динамики в эволюции грозового облака.

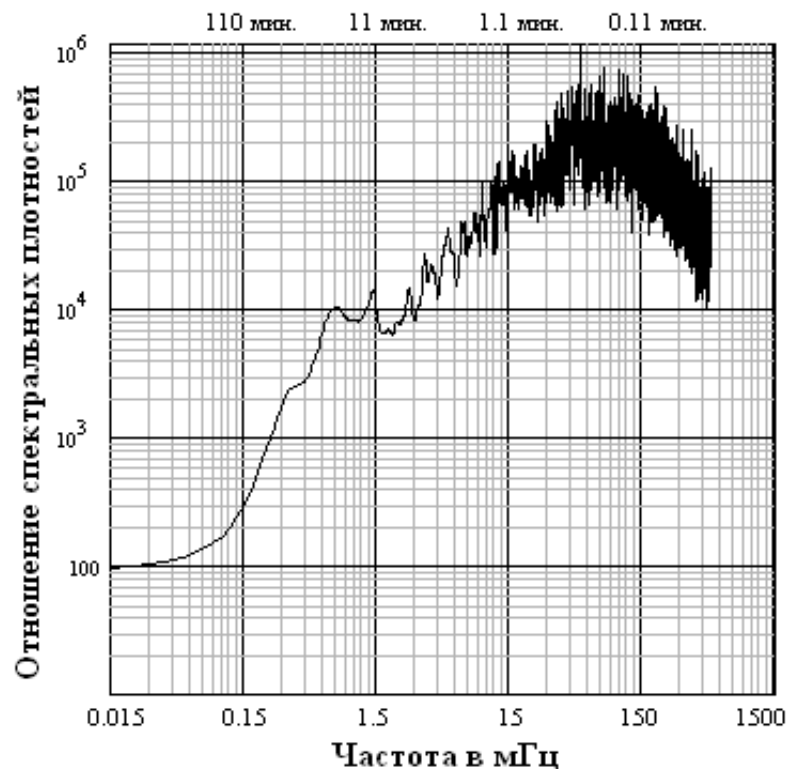


Рисунок 4.17 – Фактор усиления спектральной плотности флуктуаций электрического поля по отношению к невозмущенным периодам в течение нескольких часов, предшествовавших грозам, в присутствии не грозовой облачности (усредненное по 7 грозам 2009 г.).

Так как компонента, связанная с разрядами, часто маскирует регулярную часть возмущений, целесообразно их разделить и анализировать отдельно. На

рисунке 4.18 приведены типичные усредненные спектры регулярных возмущений электрического поля в окрестности грозовых облаков, рассчитанные для 15 грозовых событий.

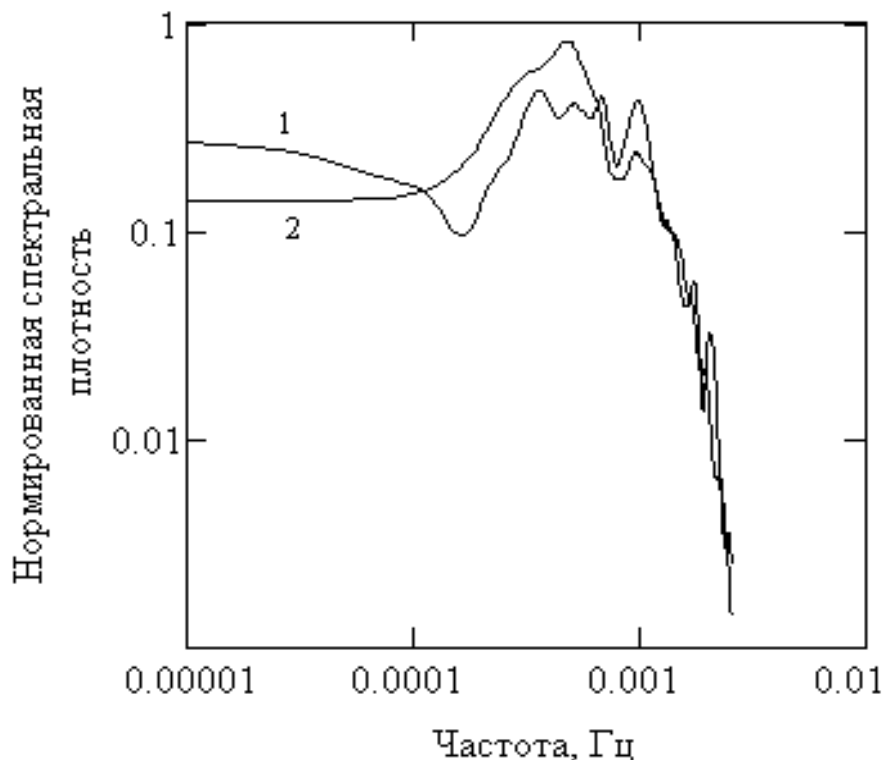


Рисунок 4.18 – Усредненная спектральная плотность флуктуаций напряженности электрического поля в окрестности грозового облака: 1 – для 5 гроз 2005 г.; 2 – для 10 гроз 2006 г.

При анализе данных использованы записи грозовых возмущений электрического поля, полученные на площадке Волжской ГМО (Городец) во время летних наблюдений 2005-2006 гг. В экспериментах использовался датчик электростатического поля в атмосфере, изготовленный в ИПФРАН. Частота оцифровки входного сигнала составлял 128 Гц, поэтому для отделения «гладкой» части возмущений электрического поля от импульсной компоненты, связанной с короткими (3-5 с) скачками поля во время разрядов, исходные значения поля усреднялись на интервалах 100 с (12800 отсчетов). В результате такой НЧ фильтрации получены средние значения поля со скважностью 1 значение/100 с,

т.е. максимальная частота в дальнейших спектральных оценках равна $(200 \text{ с})^{-1} = 0.005 \text{ Гц}$. Спектральная плотность возмущений для каждой грозы вычислялась непосредственно методом быстрого преобразования Фурье с применением спектрального окна Блэкмана-Хэрриса (уровень боковых лепестков -74 дБ). Перед усреднением по нескольким грозам каждый спектр был нормирован на максимум, а результирующий средний спектр – на единичную площадь под спектральной кривой.

Полученные спектры имеют две существенных особенности: 1) основная доля спектральной мощности содержится в полосе частот с периодами $T < 1 \text{ час}$; 2) спектральная плотность довольно резко спадает для флуктуаций с периодами короче $\sim 15 \text{ мин}$. Первая особенность означает, что возмущения электрического поля в окрестности грозового облака имеют, как правило, знакопеременный характер. В результате среднее по времени (или по площади облака, если флуктуации связаны с движением облака относительно пункта измерений) поле существенно меньше, чем его амплитудные значения, а постоянная составляющая поля под облаком оказывается всего лишь на порядок больше поля хорошей погоды. Это означает, в частности, что регулярный ток (обусловленный регулярным квазистационарным электрическим полем) может при усреднении на временах порядка времени жизни грозовой системы оказаться малым по сравнению со средним током молниевых разрядов. Данное обстоятельство необходимо учитывать при изучении проблемы баланса токов в глобальной электрической цепи, рассматривая замыкание токовой цепи в пространстве между облаком и землей.

Вторая особенность – обрезание спектра на высоких частотах – связана с фильтрацией вклада мелких масштабов в результирующее поле у земной поверхности. Как показано в [79], корреляционную функцию электрического поля, измеряемого у земной поверхности, можно записать в виде

$$\psi_E(\tau) = 4 \iint \frac{z_1 z_2 \psi_\rho(\tau, \Delta \vec{r})}{|\vec{R} + \Delta \vec{r} / 2|^3 |\vec{R} - \Delta \vec{r} / 2|^3} d\Delta \vec{r} d\vec{R}, \quad (4.7)$$

где ψ_ρ - корреляционная функция плотности зарядов в облаке, R – расстояние до облака, Δr – расстояния между зарядами внутри облака, z_1 и z_2 – высота зарядов над земной поверхностью, коэффициент 4 учитывает индуцированные в проводящей земле заряды. Если представить $\psi_\rho(\tau, \Delta r)$ через спектральную плотность флуктуаций заряда $\Phi_\rho(\tau, \vec{k})$ в виде разложения по пространственным масштабам

$$\psi_\rho(\tau, \Delta \vec{r}) = \int \Phi_\rho(\tau, \vec{k}) \exp(i\vec{k}\Delta \vec{r}) d\vec{k}, \quad (4.8)$$

то корреляционная функция для электрического поля примет вид

$$\psi_E(\tau) = 4 \int d\vec{k} \Phi_\rho(\tau, \vec{k}) \cdot G(\vec{k}), \quad (4.9)$$

где

$$G(\vec{k}) = \iint \frac{z_1 z_2 \exp(i\vec{k}\Delta \vec{r})}{|\vec{R} + \Delta \vec{r}/2|^3 |\vec{R} - \Delta \vec{r}/2|^3} d\Delta \vec{r} d\vec{R}. \quad (4.10)$$

Здесь $G(\vec{k})$ играет роль НЧ фильтра пространственных частот. Частотная характеристика этого фильтра зависит от геометрии облака и расстояния до него от точки наблюдения и может быть вычислена для некоторых простых или предельных случаев. В частности, для достаточно больших расстояний $R \gg L \geq \Delta r$, где L – линейный размер облака, частотная характеристика пространственного НЧ фильтра имеет «полосу пропускания» $k \leq 2\pi/L$, т.е. вклад в электрическое поле на большом расстоянии дают неоднородности заряда, соизмеримые с размером самого облака. Экспериментально это проявляется в более низкочастотном характере спектров полей удаленных гроз. Для ближних гроз также имеет место НЧ фильтрация вклада мелкомасштабных структур, что приводит к обрезанию спектра на высоких частотах.

4.5. Выводы к главе 4

Показано, что непрерывные записи электрического поля с помощью сети флюксометров позволяют выявить не только статистические характеристики грозовых облаков и молниевых вспышек в средних широтах, но и выявлять особенности переноса основных электрических зарядов в грозовых облаках. Показано, что анализ дисперсии непрерывных рядов записей электрического поля позволяет вычленить наиболее интенсивные грозовые события. Получена статистика грозовых событий в Нижнем Новгороде за 9-ми летний период наблюдений.

На основе результатов обработки экспериментальных данных системы по приему и регистрации квазиэлектростатического поля атмосферы в Нижнем Новгороде продемонстрирована возможность применения метода пробных структур, первоначально разработанного для восстановлений распределения зарядов в условиях хорошей погоды, для диагностик крупномасштабного распределения зарядов в грозовых. Были проанализированы данные по нескольким грозовым событиям, с помощью разработанных алгоритмов обратного расчета получены распределения зарядов. Показана возможность применимости результатов измерения квазистатического электрического поля с помощью сети флюксометров для местоопределения мощных отдельных разрядов и оценки переносимого заряда на землю.

Исследованы спектральные характеристики возмущений электрического поля во время грозовых событий и проведено сравнение этих характеристик со спектрами поля невозмущенной атмосферы. Выделены две основных компоненты возмущений электрического поля: а) «регулярная» компонента с характерными временами возмущений от нескольких минут до часа и более; б) импульсная компонента поля, обусловленная разрядами внутри облака и из облака на землю, для которой характерными временами можно считать средний интервал между импульсами (разрядами) и длительность самого импульсного возмущения. Обнаружено значительное усиление спектральной плотности вариаций

электрического поля во время грозы. Максимальное усиление, обусловленное импульсной компонентой из-за молниевых разрядов, наблюдается в области периодов порядка минуты (от нескольких минут до десятков секунд). Результаты проведенных измерений позволяют утверждать, что по спектрам возмущений поля грозового облака можно судить о среднем времени релаксации (регенерации) поля, типичное значение которого составило десять секунд.

Обнаружено значительное усиление спектральной плотности вариаций электрического поля во время грозы. Максимальное усиление, обусловленное импульсной компонентой из-за молниевых разрядов, наблюдается в области периодов порядка минуты (от нескольких минут до десятков секунд). Существенное усиление имеет место и в диапазоне $0.5 \div 1.5$ мГц (периоды $10 \div 30$ мин), где спектральная плотность увеличивается более чем в 10^4 раз, тогда как на еще более низких частотах фактор усиления равен 100 (всего ~ 10 раз для поля). Обнаружены квазимонохроматические составляющие (с периодами 10-20 мин) в частотных спектрах флуктуаций электрического поля мощных грозовых облаков, дрейфующие по частоте в процессе зарождения, активизации и распада облака.

Результаты, изложенные в данной главе, опубликованы в работах [86, 89, 92, 96, 98, 101, 103].

Заключение

Предложен и реализован метод пробных структур для моделирования и диагностики электродинамики пограничного слоя атмосферы. Приведены результаты численного моделирования, необходимого для интерпретации найденных в натуральных экспериментах взаимосвязей параметров спектров и структурных функций короткопериодных пульсаций электрического поля.

Разработан итерационный алгоритм восстановления параметров аэроэлектрических структур. Найдены условия, при которых ансамбль модельных структур, распределенных по высоте и интенсивности, формирует пульсации поля со статистическими свойствами, близкими к наблюдаемым в опыте, в частности, генерирует временные реализации со спектрами, обнаруживающими свойства самоподобия в диапазоне частот 10^{-2} -1 Гц.

Сравнение с результатами экспериментов показывает, что удаленные аэроэлектрические структуры при наблюдении на поверхности Земли не вносят существенного вклада в энергетику процесса, проявляясь в немногих неструктурированных спектрах, однако эти структуры определяют дисперсию показателей наклона спектров пульсаций.

Исследованы стационарные состояния модельной системы, состоящей из легких аэроионов и аэрозольных частиц, с учетом зависимости коэффициентов взаимодействия этих частиц от напряженности внешнего электрического поля, и проанализировано влияние аэрозоля на время жизни возмущений электрического заряда. Показано, что с ростом аэрозольной концентрации и внешнего масштаба системы время жизни аэроэлектрических структур в рассматриваемой системе увеличивается.

Наиболее заметно влияние изменения концентрации аэрозолей и соответствующее уменьшение количества аэроионов. Зависимость времени релаксации заряда от напряженности электрического поля имеет более сложный характер: при умеренных значениях поля время может возрастать, но дальнейший рост поля приводит к росту дрейфовой скорости электронов и к уменьшению

времени релаксации, тем не менее именно квазиэлектростатическое взаимодействие может приводить к наиболее интересным эффектам в рассматриваемой модельной системе и развитию неустойчивости. С уменьшением подвижности аэроионов время жизни возмущений электрического заряда линейно растет. С ростом концентрации аэрозолей эффективное время релаксации возмущений увеличивается, причем с возрастанием концентрации аэрозолей все более существенно влияние внешнего электрического поля..

Представлены результаты натурных экспериментов по приему и регистрации полей в Нижнем Новгороде. Исследована суточная вариация атмосферного электрического поля хорошей погоды для различных сезонов и дней недели. Показано, что кривая локальной суточной вариации всегда имеет два максимума. Вечерний максимум суточной вариации (19:00-20:00 UTC) совпадает по времени с максимумом кривой Карнеги, характеризующей глобальную электрическую цепь. Наибольшие значения амплитуды поля достигаются в зимний период.

По данным измерений 2013-2018 гг. выявлена сезонная вариация среднемесячных значений атмосферного электрического поля хорошей погоды (с максимальными значениями в зимний и весенний период) и проведен ее сравнительный анализ с результатами измерений сезонной вариации в других районах земного шара. Проанализированы низкочастотные вариации электрического поля атмосферы, в частности, показано существование 4-5 дневной гармоник, соответствующей среднему времени жизни атмосферных циклонов.

Показано, что среднесуточные значения электрического поля коррелируют с среднесуточной температурой приземного атмосферного слоя и облачностью летом в фазе, а зимой в противофазе. Сделаны теоретические оценки влияния облачности на электрическое поле в приземном слое для различных предельных случаев, в частности, в приближении постоянного ионосферного потенциала, и проведено их сопоставление с экспериментальными результатами.

Показано, что непрерывные записи электрического поля с помощью сети флюксометров позволяют выявить не только статистические характеристики грозовых облаков и молниевых вспышек в средних широтах, но и выявлять особенности переноса основных электрических зарядов в грозовых облаках. Показано, что анализ дисперсии непрерывных рядов записей электрического поля позволяет вычленить наиболее интенсивные грозовые события. Получена статистика грозовых событий в Нижнем Новгороде за 9-ми летний период наблюдений.

Проанализированы данные по нескольким грозовым событиям, с помощью разработанных алгоритмов обратного расчета получены распределения зарядов. Показана возможность применимости результатов измерения квазистатического электрического поля с помощью сети флюксометров для местоопределения мощных отдельных разрядов и оценки переносимого заряда на землю.

Исследованы спектральные характеристики возмущений электрического поля во время грозовых событий и проведено сравнение этих характеристик со спектрами поля невозмущенной атмосферы. Обнаружено значительное усиление спектральной плотности вариаций электрического поля во время грозы.

Список литературы

1. Whipple F.J.W. On the association of the diurnal variation of the electric potential gradient in fine weather with the distribution of thunderstorms over the globe // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society – 1929. – Т. 55 – С.351–361.
2. Mauchly S.J. On the diurnal variation of the potential gradient of atmospheric electricity // Journal of Geophysical Research – 1923. – Т. 28 – № 3 – С.61.
3. Чалмерс Д. Атмосферное электричество – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 420с.
4. Xu B. Periodic variations of atmospheric electric field on fair weather conditions at YBJ, Tibet / Xu B., Zou D., Chen B.Y., Zhang J.Y., Xu G.W. // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics – 2013. – Т. 97 – С.85–90.
5. Burns G.B. Atmospheric Global Circuit Variations from Vostok and Concordia Electric Field Measurements / Burns G.B., Frank-Kamenetsky A. V., Tinsley B.A., French W.J.R., Grigioni P., Camporeale G., Bering E.A. // Journal of the Atmospheric Sciences – 2017. – Т. 74 – № 3 – С.783–800.
6. Dolezalek H. Discussion of the fundamental problem of atmospheric electricity // Pure and Applied Geophysics PAGEOPH – 1972. – Т. 100 – № 1 – С.8–43.
7. De S.S. Studies on the seasonal variation of atmospheric electricity parameters at a tropical station in Kolkata, India / De S.S., Paul S., Barui S., Pal P., Bandyopadhyay B., Kala D., Ghosh A. // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics – 2013. – Т. 105–106 – С.135–141.
8. Odzimek A. Electrical signatures of Nimbostratus and Stratus clouds in ground-level vertical atmospheric electric field and current density at mid-latitude station Swider, Poland / Odzimek A., Baranski P., Kubicki M., Jasinkiewicz D. // Atmospheric Research – 2018. – Т. 209 – С.188–203.
9. Anisimov S. V. Evaluation of the Atmospheric Boundary-Layer Electrical Variability / Anisimov S. V., Galichenko S. V., Aphinogenov K. V., Prokhorchuk A.A. // Boundary-Layer Meteorology – 2017. – Т. 167 – № 2 – С.327–348.
10. Торопов А.А. Вариации атмосферного электрического поля по

- наблюдениям в Якутске / Торопов А.А., Козлов В.И., Каримов Р.Р. // Наука и образование – 2016. – № 2 – С.58–65.
11. Harrison R.G. Fair weather criteria for atmospheric electricity measurements / Harrison R.G., Nicoll K.A. // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* – 2018. – Т. 179 – С.239–250.
 12. Gołkowski M. Estimation of global lightning activity and observations of atmospheric electric field / Gołkowski M., Kubicki M., Cohen M., Kułak A., Inan U.S. // *Acta Geophysica* – 2011. – Т. 59 – № 1 – С.183–204.
 13. Kubicki M. Relationship of ground-level aerosol concentration and atmospheric electric field at three observation sites in the Arctic, Antarctic and Europe / Kubicki M., Odzimek A., Neska M. // *Atmospheric Research* – 2016. – Т. 178–179 – С.329–346.
 14. Gurmani S.F. First seasonal and annual variations of atmospheric electric field at a subtropical station in Islamabad, Pakistan / Gurmani S.F., Ahmad N., Tacza J., Iqbal T. // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* – 2018. – Т. 179 – С.441–449.
 15. Нагорский П.М. Вариации метеорологических и атмосферно-электрических величин в дымах от мощных лесных пожаров / Нагорский П. М., Ипполитов И. И., Кабанов М. В., Пхалагов Ю. А., Смирнов С. В. // "Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений: VI международная конференция", с. Паратунка, Камчатский край, 9-13 сентября 2013. – С. 154–158.
 16. Смирнов С.Э. Вариации аэроэлектрического поля среднеширотных обсерваторий / Смирнов С. Э., Анисимов, С. В., Шихова Н. М.// "Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений", Сборник докладов V международной конференции 2-7 августа 2010 года, с.Паратунка Камчатский край. – С. 208–211.
 17. Ahmad N. Preliminary results of fair-weather atmospheric electric field in the proximity of Main Boundary Thrust, Northern Pakistan / Ahmad N., Gurmani

- S.F., Qureshi R.M., Iqbal T. // *Advances in Space Research* – 2019. – Т. 63 – № 2 – С.927–936.
18. Апсен А.Г. Магнитосферные эффекты в атмосферном электричестве / А. Г. Апсен, Х. Д. Канониди, С. П. Чернышева, Д. Н. Четаев, В. М. Шефтель – М.: Наука, 1988. – 150с.
 19. Парамонов Н.А. Об унитарной вариации градиента атмосферно-электрического потенциала // *Доклады Академии наук СССР* – 1950. – Т. 70 – № 1 – С.37–38.
 20. Yerg D.G. Short-period fluctuations in the fair-weather electric field / Yerg D.G., Johnson K.R. // *Journal of Geophysical Research* – 1974. – Т. 79 – № 15 – С.2177–2184.
 21. Akhmetov O.I. Investigation of the aero-electrical characteristics of atmosphere surface layer in arctic / Akhmetov O.I., Fedorenko Y. V. // *Physics of auroral phenomena* – 2008. – Т. 30 – № 1 – С.207–210.
 22. Harrison R.G. The Carnegie Curve // *Surveys in Geophysics* – 2013. – Т. 34 – № 2 – С.209–232.
 23. Bennett A.J. Atmospheric electricity in different weather conditions / Bennett A.J., Harrison R.G. // *Weather* – 2007. – Т. 62 – № 10 – С.277–283.
 24. Sheftel V.M. Air conductivity and atmospheric electric field as an indicator of anthropogenic atmospheric pollution / Sheftel V.M., Chernyshev A.K., Chernysheva S.P. // *Journal of Geophysical Research* – 1994. – Т. 99 – № D5 – С.10793.
 25. Israelsson S. Vertical profiles of electrical conductivity in the lowermost part of the turbulent boundary layer over flat ground / Israelsson S., Knudsen E., Anisimov S. V. // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* – 1994. – Т. 56 – № 12 – С.1545–1550.
 26. Yaniv R. Local and global impacts on the fair-weather electric field in Israel / Yaniv R., Yair Y., Price C., Katz S. // *Atmospheric Research* – 2016. – Т. 172–173 – С.119–125.

27. Williams E. Recent progress on the global electrical circuit / Williams E., Mareev E. // *Atmospheric Research* – 2014. – Т. 135–136 – С.208–227.
28. Zhou L. Global Circuit Model with Clouds / Zhou L., Tinsley B.A. // *Journal of the Atmospheric Sciences* – 2010. – Т. 67 – № 4 – С.1143–1156.
29. Odzimek A. EGATEC: A new high-resolution engineering model of the global atmospheric electric circuit—Currents in the lower atmosphere / Odzimek A., Lester M., Kubicki M. // *Journal of Geophysical Research* – 2010. – Т. 115 – № D18 – С.D18207.
30. Rycroft M.J. New model simulations of the global atmospheric electric circuit driven by thunderstorms and electrified shower clouds: The roles of lightning and sprites / Rycroft M.J., Odzimek A., Arnold N.F., Füllekrug M., Kułak A., Neubert T. // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* – 2007. – Т. 69 – № 17–18 – С.2485–2509.
31. Slyunyaev N.N. Influence of Large-Scale Conductivity Inhomogeneities in the Atmosphere on the Global Electric Circuit / Slyunyaev N.N., Mareev E.A., Kalinin A. V., Zhidkov A.A. // *Journal of the Atmospheric Sciences* – 2014. – Т. 71 – № 11 – С.4382–4396.
32. Дементьева С.О. Расчет электрического поля и индекса молниевой активности в моделях прогноза погоды / Дементьева С.О., Ильин Н.В., Мареев Е.А. // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана* – 2015. – Т. 51 – № 210–217.
33. Mareev E.A. Variation of the global electric circuit and Ionospheric potential in a general circulation model / Mareev E.A., Volodin E.M. // *Geophysical Research Letters* – 2014. – Т. 41 – № 24 – С.9009–9016.
34. Смирнов В.В. Ионизация в тропосфере – СПб.: Гидрометеиздат, 1992. – 312с.
35. Смирнов С.Э. Реакция электрического состояния приземной атмосферы на геомагнитную бурю 5 апреля 2010 г. // *Доклады Академии наук* – 2014. – Т. 456 – № 3 – С.342–346.

36. Harrison R.G. Columnar resistance changes in urban air // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* – 2005. – Т. 67 – № 8–9 – С.763–773.
37. Hoppel W.A. Atmospheric electricity in the planetary Boundary Layer Washington, D.C.: National Academies Press, 1986. – С. 149–165.
38. Кудринская Т.В. Исследования ионизационного состояния приземного слоя атмосферы в разных геофизических условиях / Кудринская Т.В., Куповых Г.В., Редин А.А. // *Метеорология и гидрология* – 2018. – № 4 – С.77–84.
39. Петров А.И. Измерительный комплекс для исследования электричества приземного слоя атмосферы / Петров А.И., Петрова Г.Г., Панчишкина И.Н., Кудринская Т.В., Петров Н.А. // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки* – 2010. – № 3 – С.47–52.
40. Anisimov S. V. Research of an electric component of middle-latitude region climate / Anisimov S. V., Shikhova N.M. // *Russian Journal of Earth Sciences* – 2009. – Т. 11 – № 2 – С.1–7.
41. Анисимов С.В. Формирование электрически активных слоев атмосферы с температурной инверсией / Анисимов С.В., Галиченко С.В., Шихова Н.М. // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана* – 2012. – Т. 48 – № 4 – С.442–452.
42. Анисимов С.В. Перенос электричества в атмосферном слое обмена / Анисимов С.В., Шихова Н.М. // *Геофизические исследования* – 2010. – Т. 11 – № 1 – С.55–63.
43. Harrison R.G. Space weather driven changes in lower atmosphere phenomena / Harrison R.G., Nicoll K.A., McWilliams K.A. // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* – 2013. – Т. 98 – С.22–30.
44. Анисимов С.В. Объемная активность радона и ионообразование в невозмущенной нижней атмосфере: наземные наблюдения и численное моделирование / Анисимов С.В., Галиченко С.В., Афиногенов К.В., Макрушин А.П., Шихова Н.М. // *Физика Земли* – 2017. – № 1 – С.155–170.

45. Anisimov S. V. Electrodynamic properties and height of atmospheric convective boundary layer / Anisimov S. V., Galichenko S. V., Mareev E.A. // *Atmospheric Research* – 2017. – Т. 194 – С.119–129.
46. Silva H.G. Atmospheric electricity as a proxy for air quality: Relationship between potential gradient and pollutant gases in an urban environment / Silva H.G., Conceição R., Khan M.A.H., Matthews J.C., Wright M.D., Collares-Pereira M., Shallcross D.E. // *Journal of Electrostatics* – 2016. – Т. 84 – С.32–41.
47. Yassin M.F. Experimental study of the impact of structural geometry and wind direction on vehicle emissions in urban environment / Yassin M.F., Ohba M. // *Transportation Research Part D: Transport and Environment* – 2012. – Т. 17 – № 2 – С.161–168.
48. Matthews J.C. Urban and rural measurements of atmospheric potential gradient / Matthews J.C., Wright M.D., Clarke D., Morley E.L., Silva H., Bennett A.J., Robert D., Shallcross D.E. // *Journal of Electrostatics* – 2019. – Т. 97 – С.42–50.
49. Kourtidis K. A study of the impact of synoptic weather conditions and water vapor on aerosol–cloud relationships over major urban clusters of China / Kourtidis K., Stathopoulos S., Georgoulas A.K., Alexandri G., Rapsomanikis S. // *Atmospheric Chemistry and Physics* – 2015. – Т. 15 – № 19 – С.10955–10964.
50. Anisimov S. V. Space charge and aroelectric flows in the exchange layer: An experimental and numerical study / Anisimov S. V., Galichenko S. V., Shikhova N.M. // *Atmospheric Research* – 2014. – Т. 135–136 – С.244–254.
51. Редин А.А. Электродинамическая модель конвективно-турбулентного приземного слоя атмосферы / Редин А.А., Куповых Г.В., Болдырев А.С. // *Известия вузов. Радиофизика* – 2013. – Т. 56 – № 11–12 – С.820–828.
52. Harrison R. Long-range correlations in measurements of the global atmospheric electric circuit // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* – 2004. – Т. 66 – № 13–14 – С.1127–1133.
53. Zilitinkevich S.S. Geophysical turbulence and planetary boundary layers // *Geophysical Journal* – 2010. – № 6 – С.168–174.

54. Parishani H. Toward low-cloud-permitting cloud superparameterization with explicit boundary layer turbulence / Parishani H., Pritchard M.S., Bretherton C.S., Wyant M.C., Khairoutdinov M. // *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* – 2017. – Т. 9 – № 3 – С.1542–1571.
55. Анисимов С.В. Спектры пульсаций электрического поля приземной атмосферы / Анисимов С.В., Мареев Е.А. // *Доклады РАН* – 2001. – Т. 381 – № 1 – С.107–112.
56. Anisimov S. V. On the electro–dynamical characteristics of the fog / Anisimov S. V., Mareev E.A., Shikhova N.M., Sorokin A.E., Dmitriev E.M. // *Atmospheric Research* – 2005. – Т. 76 – № 1–4 – С.16–28.
57. Harrison R.G. On the microphysical effects of observed cloud edge charging / Harrison R.G., Nicoll K.A., Ambaum M.H.P. // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* – 2015. – Т. 141 – № 692 – С.2690–2699.
58. Mareev E.A. The role of turbulence in thunderstorm, snowstorm, and dust storm electrification / Mareev E.A., Demytyeva S.O. // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* – 2017. – Т. 122 – № 13 – С.6976–6988.
59. Anisimov S. V. Intermittency of turbulent aeroelectric field / Anisimov S. V., Shikhova N.M. // *Atmospheric Research* – 2014. – Т. 135–136 – С.255–262.
60. Анисимов С.В. Динамика электричества невозмущенной атмосферы средних широт: от наблюдений к скейлингу / Анисимов С.В., Шихова Н.М., Афиногенов К.В. // *Известия вузов. Радиофизика* – 2013. – Т. 56 – № 11–12 – С.787–802.
61. Mauchly S.J. Note on the diurnal variation of the atmospheric electric potential gradient // *Physics Review* – 1921. – Т. 18 – С.161–162.
62. Markson R. The Global Circuit Intensity: Its Measurement and Variation over the Last 50 Years // *Bulletin of the American Meteorological Society* – 2007. – Т. 88 – № 2 – С.223–242.
63. Kubicki M. Seasonal and daily variations of atmospheric electricity parameters registered at the Geophysical Observatory at Świder (Poland) during 1965-2000 /

- Kubicki, M., Michnowski, S., MysŁek-Laurikainen, B. // Proceedings of the 13th International Conference on Atmospheric Electricity.– August 13-17, Beijing, China, 2007. – С. 50–54.
64. Имянитов И.М. Ход напряженности электрического поля в атмосфере с высотой в ясные дни (по результатам измерений во время международного геофизического года) / Имянитов И.М., Чубарина Е.В. // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова – 1960. – № 110 – С.7–22.
65. Nicoll K.A. A global atmospheric electricity monitoring network for climate and geophysical research / Nicoll K.A., Harrison R.G., Barta V., Bor J., Brugge R., Chillingarian A., Chum J., Georgoulas A.K., Guha A., Kourtidis K., Kubicki M., Mareev E., Matthews J., Mkrtchyan H., Odzimek A., Raulin J.-P., Robert D., Silva H.G., Tacza J., Yair Y., Yaniv R. // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics – 2019. – Т. 184 – С.18–29.
66. Adlerman E.J. Seasonal variation of the global electrical circuit / Adlerman E.J., Williams E.R. // Journal of Geophysical Research: Atmospheres – 1996. – Т. 101 – № D23 – С.29679–29688.
67. Baumgaertner A.J.G. On the role of clouds in the fair weather part of the global electric circuit / Baumgaertner A.J.G., Lucas G.M., Thayer J.P., Mallios S.A. // Atmospheric Chemistry and Physics – 2014. – Т. 14 – № 16 – С.8599–8610.
68. Кузнецов В.В. Исследование влияния искусственного облака на атмосферное электрическое поле / Кузнецов В.В., Чернева Н.В., Бабаханов И.Ю. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана – 2007. – Т. 43 – № 2 – С.1–7.
69. Lucas G.M. Statistical analysis of spatial and temporal variations in atmospheric electric fields from a regional array of field mills / Lucas G.M., Thayer J.P., Deierling W. // Journal of Geophysical Research: Atmospheres – 2017. – Т. 122 – № 2 – С.1158–1174.
70. Anisimov S. V. Mechanisms of coupling of aeroelectric and temperature fields in the lower atmosphere / Anisimov S. V., Mareev E.A., Shikhova N.M. //

- Radiophysics and Quantum Electronics – 2006. – Т. 49 – № 1 – С.31–46.
71. Мареев Е.А. Российские исследования в области атмосферного электричества в 2003–2007 гг. / Мареев Е.А., Стасенко В.Н. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана – 2009. – Т. 45 – № 5 – С.709–720.
72. Stolzenburg M. Charge Structure and Dynamics in Thunderstorms / Stolzenburg M., Marshall T.C. // Space Science Reviews – 2008. – Т. 137 – № 1–4 – С.355–372.
73. Kostinskiy A.Y. Electric discharges produced by clouds of charged water droplets in the presence of moving conducting object / Kostinskiy A.Y., Syssoev V.S., Mareev E.A., Rakov V.A., Andreev M.G., Bogatov N.A., Makal'sky L.M., Sukharevsky D.I., Aleshchenko A.S., Kuznetsov V.E., Shatalina M. V. // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics – 2015. – Т. 135 – С.36–41.
74. Анисимов С.В. Электричество конвективного атмосферного пограничного слоя: натурные наблюдения и численное моделирование / Анисимов С.В., Галиченко С.В., Шихова Н.М., Афиногенов К.В. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана – 2014. – Т. 50 – № 4 – С.445–454.
75. Betz H.D. Lightning: Principles, instruments and applications: Review of modern lightning research / H. D. Betz, U. Schumann, P. Laroche – Springer Netherlands, 2009.– 641с.
76. Анисимов С.В. Структуры и спектры турбулентных пульсаций аэроэлектрического поля / Анисимов С.В., Шихова Н.М., Мареев Е.А., Шаталина М.В. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана – 2003. – Т. 39 – № 5 – С.766–781.
77. Мареев Е.А. Российские исследования атмосферного электричества в 2011 - 2014 гг. / Мареев Е.А., Стасенко В.Н., Булатов А.А., Дементьева С.О., Евтушенко А.А., Ильин Н.В., Кутерин Ф.А., Слюняев Н.Н., Шаталина М.В. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2016. – Т. 52 – № 2 – С.175–186.
78. Клименко В.В. О статистических характеристиках электрических полей

- грозовых разрядов в атмосфере / Клименко В.В., Мареев Е.А., Шаталина М.В., Шлюгаев Ю.В., Соколов В.В., Булатов А.А., Денисов В.П. // Известия вузов. Радиофизика – 2013. – Т. 56 – № 11–12 – С.864–874.
79. Шаталина М.В. Моделирование динамики электрического поля методом пробных структур / Шаталина М.В., Мареев Е.А., Анисимов С.В., Шихова Н.М. // Известия вузов. Радиофизика – 2005. – Т. 48 – № 8 – С.648–660.
80. Шаталина М.В. Экспериментальное исследование суточных и сезонных вариаций атмосферного электрического поля / Шаталина М.В., Мареев Е.А., Клименко В.В., Кутерин Ф.А., Николл К.А. // Известия вузов. Радиофизика – 2019. – (принята в печать).
81. Шаталина М.В. Мониторинг и моделирование грозовых событий в Нижегородском регионе: интенсивная гроза 1-2 июня 2015 г. / Шаталина М.В., Дементьева С.О., Мареев Е.А. // Метеорология и гидрология – 2016. – № 11 – С.81–87.
82. Мареев Е.А. Современные проблемы исследования грозового электричества / Мареев Е.А., Трахенгерц В.Ю., Иудин Д.И., Сорокин А.Е., Шаталина М.В. // Проектирование и технология электронных средств – 2004. – № Специальный выпуск – С.7–16.
83. Анисимов С.В. Время релаксации электрического заряда и спектры пульсаций электрического поля приземной атмосферы / Анисимов С.В., Мареев Е.А., Шаталина М.В., Шихова Н.М. // Геофизические исследования – 2010. – Т. 9 – № 2 – С.25–46.
84. Anisimov S. V. Aeroelectric structures and turbulence in the atmospheric boundary layer / Anisimov S. V., Mareev E.A., Shikhova N.M., Shatalina M. V., Galichenko S. V., Zilitinkevich S.S. // Nonlinear Processes in Geophysics – 2013. – Т. 20 – № 5 – С.819–824.
85. Shatalina M. V. Recovery of space charge distribution by the method of test structure / Shatalina, M. V., Mareev, E. A., Anisimov, S. V., Shikhova, N. M. // Proceedings of the 13th International Conference on Atmospheric Electricity. –

2007. – August 13-17, Beijing, China. – С. 174–177.
86. Шаталина М.В. Состояние пограничного слоя атмосферы и спектры пульсаций электрического поля // Пятая Российская конференция по атмосферному электричеству. Сборник научных трудов. Владимир, 2003. – Т. 1 – С. 150–153.
87. Шаталина М.В. Диагностика турбулентности и аэроэлектрических структур в атмосфере // Труды VII-й Всероссийской конференции молодых ученых "Малые примеси атмосферы. Атмосферное электричество" Нижний Новгород, 13-15 мая 2003 г, 2003. – С. 156–160.
88. Ильин Н.В. Конвективный перенос электрического заряда в пограничном слое атмосферы и его диагностика / Ильин, Н. В., Евтушенко, А. А., Кутерин, Ф. А., Мареев, Е. А., Шаталина, М. В., Анисимов, С. В. // Труды VII-й Российской конференции по атмосферному электричеству. Санкт-Петербург, 2012. – С. 90–92.
89. Шаталина М.В. О времени релаксации заряда в пограничном слое атмосферы, Труды VI-й Российской конференции по атмосферному электричеству. Нижний Новгород, 2007. – С. 91–92.
90. Shlyugaev Y. V. Electromagnetic Signatures of Extreme Meteorological Events in the Upper Volga Region Diagnostics / Shlyugaev, Yu V., Klimenko, V. V., Mareev, E. A., Sokolov, V. V., Shatalina, M. V. // Proc. XIV Int. Conf. on Atmos. Electr. ICAE2011, Rio de Janeiro, Brazil, Aug 2011 – 2011. – 4p.
91. Шаталина М.В. Система мониторинга экстремальных метеорологических явлений в Нижегородском регионе / Шаталина, М. В., Мареев, Е. А., Клименко, В. В., Шлюгаев Ю. В. // "Великие реки 2011". Труды конгресса 13-го Международного научно-промышленного форума: в 3-х томах. – 2012. – С. 266–268.
92. Шаталина М.В. Низкочастотные спектры вариаций атмосферного электрического поля / Шаталина, М. В., Клименко, В. В., Франк-Каменецкий, А. В. // Труды VII-й Российской конференции по

- атмосферному электричеству. Санкт-Петербург, 2012. – С. 259–261.
93. Шлюгаев Ю.В. Мониторинг опасных метеорологических явлений в Верхне-Волжском регионе / Шлюгаев, Ю. В., Клименко, В. В., Мареев, Е. А., Панютин, А. А., Соколов, В. В., Шаталина, М. В. // Труды VII-й Российской конференции по атмосферному электричеству. Санкт-Петербург, 2012. – С. 263–267.
 94. Клименко В.В. Об уровне флуктуаций атмосферного электрического поля в области периодов $T = 1-100$ суток. / Клименко, В. В., Мареев, Е. А., Шаталина, М. В. // Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений: VI международная конференция, с.Паратунка, Камчатский край, 9-13 сентября 2013 г.: сб. докл./отв. ред. Б. М. Шевцов, Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2013. – С. 95–99.
 95. Mareev E.A. Radio-physical methods of analysis for thunderstorm field perturbations / Mareev, E. A., Klimenko, V. V., Shlyugaev, Yu. V., Shatalina, M. V., Iudin, D. I. // 2011 XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium, Istanbul, Turkey 13-20 Aug. 2011 – IEEE, 2011. – С.1–4.
 96. Demytyeva S.O. Modeling of Electric Parameters of Real Thunderstorms in Numerical Weather Prediction Models, Nizhny Novgorod / Demytyeva S.O., Ilin, N. V., Shatalina, M. V., Mareev, E. A. // VI International Conference “Frontiers of Nonlinear Physics” (FNP 2016), Nizhny Novgorod, Russia, 17-23 July 2016. – С.231–232.
 97. Shatalina M. V. Ionospheric Potential Shielding by the Cloud Layer / Shatalina M. V., Klimenko V. V., Mareev E. A. // Proceedings of XVI International Conference on Atmospheric Electricity, 17-22 June, Nara city, Nara, Japan, 2018. – P-01-03..
 98. Klimenko V. V. Spectral/Statistical Characteristics of Electric Field Perturbations and their Implications for Thunderstorm Generator Diagnostics / Klimenko V. V., Mareev E. A., Shlyugaev Yu V., Denisov V. P., Shatalina M. V., Shirokov E. A. // Proc. XIV Int. Conf. on Atmos. Electr. ICAE2011 Rio de Janeiro, Brazil, Aug,

2011. – 4p.
99. Shatalina M. V. On the Impact of Disturbed Weather Regions on the Global Electric Circuit / Shatalina M.V., Klimenko V.V. // 2nd URSI Atlantic Radio Science Conference, May 28 - June 1, Gran Canaria, Spain. - IEEE, 2018. – 1p.
 100. Demytyeva S. Thunderstorms based on Electric Parameters Calculations in Numerical Weather Prediction Models / Demytyeva S., Ilin N., Shatalina M., Mareev, E., Geophysical Research Abstracts 2016. – EGU2016-855.
 101. Shatalina M. V. Aeroelectric structures diagnostics using ground-based observations / Shatalina, M. V., Mareev, E. A., Klimenko, V. V. // 38th COSPAR Scientific Assembly Proceedings, Bremen, Germany, 18-25 July, 2010. – A11-0202.
 102. Шаталина М.В. Сезонная изменчивость электрического поля в приземном слое атмосферы / Шаталина М. В., Клименко В. В., Мареев Е.А. // Глобальная электрическая цепь. Материалы Третьей Всероссийской конференции, Борок, Россия, 25-29 сентября, 2017. – С. 94.
 103. Ильин Н.В. Глобальные электрические цепи планет земной группы / Ильин Н. В., Евтушенко А. А., Кутерин Ф. А. , Мареев Е. А., Шаталина М. В. // Материалы конференции «Глобальная электрическая цепь». Всероссийская конференция Борок, 28 октября – 1 ноября 2013 г, 2013. – С. 10–11.
 104. Шаталина М.В. Региональные аспекты климатологии молнии / Шаталина М.В., Мареев Е.А., Шлюгаев Ю.В., Ильин Н.В., Кутерин Ф.А., Дементьева С.О., Булатов А.А. // В сборнике: Великие реки'2016 Труды научного конгресса 18-го Международного научно-промышленного форума: в 3-х томах. – Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет; ответственный редактор А. А. Лапшин. 2016. – С. 280-281.
 105. Anisimov S. V. On the generation and evolution of aeroelectric structures in the surface layer / Anisimov S. V., Mareev E.A., Bakastov S.S. // Journal of Geophysical Research: Atmospheres – 1999. – Т. 104 – № D12 – С.14359–14367.

106. Anisimov S. V. Spatiotemporal structures of electric field and space charge in the surface atmospheric layer / Anisimov S. V., Bakastov S.S., Mareev E.A. // *Journal of Geophysical Research* – 1994. – Т. 99 – № D5 – С.10603.
107. Анисимов С.В. Аэроэлектрические структуры в атмосфере / Анисимов С.В., Мареев Е.А. // *Доклады РАН* – 2000. – Т. 371 – № 1 – С.101–104.
108. Willett J. An analysis of the electrode effect in the limit of strong turbulent mixing // *Journal of Geophysical Research* – 1978. – Т. 83 – № C1 – С.402–408.
109. Винниченко Н.К. Турбулентность в свободной атмосфере / Н. К. Винниченко, Н. З. Пинус, С. М. Шметер, Г. К. Шур – Л.: Гидрометеиздат, 1976.– 288с.
110. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей. // под ред. Ф.Т.М. Ньистадт, Х. Ван Доп. – – Л.: Гидрометеиздат, 1985.– 352с.
111. Anisimov S. V. Universal spectra of electric field pulsations in the atmosphere / Anisimov S. V., Mareev E.A., Shikhova N.M., Dmitriev E.M. // *Geophysical Research Letters* – 2002. – Т. 29 – № 24 – С.70-1-70–4.
112. Анисимов С.В. Механизмы формирования спектра пульсаций электрического поля приземной атмосферы / Анисимов С.В., Мареев Е.А., Шихова Н.М., Дмитриев Э.М. // *Известия вузов. Радиофизика* – 2001. – Т. 44 – № 7 – С.562–576.
113. Israël H. Atmospheric electrical agitation // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* – 1959. – Т. 85 – № 364 – С.91–104.
114. Anderson R. V. The dependence of space charge spectra on Aitken nucleus concentrations // *Journal of Geophysical Research* – 1982. – Т. 87 – № C2 – С.1216.
115. Обухов А.М. Турбулентность и динамика атмосферы – Л.: Гидрометеиздат, 1988.– 413с.
116. Зилитинкевич С.С. Атмосферная турбулентность и планетарные пограничные слои – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013.– 256с.

117. Harrison R.G. Urban smoke concentrations at Kew, London, 1898–2004 // *Atmospheric Environment* – 2006. – Т. 40 – № 18 – С.3327–3332.
118. Chubb J. ‘Operational health’ monitoring for confidence in long term electric field measurements / Chubb J., Harbour J. // *Journal of Electrostatics* – 2010. – Т. 68 – № 5 – С.469–472.
119. Chubb J. The measurement of atmospheric electric fields using pole mounted electrostatic fieldmeters // *Journal of Electrostatics* – 2014. – Т. 72 – № 4 – С.295–300.
120. Boltek EFM-100 Atmospheric Electric Field Monitor User Manual [Электронный ресурс]. URL: https://www.boltek.com/EFM-100C_Manual_121415.pdf. (дата обращения: 16.05.2016)
121. Анисимов С.В. Электродинамические свойства тумана / Анисимов С.В., Мареев Е.А., Сорокин А.Е., Шихова Н.М., Дмитриев Э.М. // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана* – 2003. – Т. 39 – № 1 – С.58–73.
122. Ландау Л.Д. Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц – М.: Наука, 1982.– 624с.
123. Tuomi T.J. The atmospheric electrode effect over snow // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* – 1982. – Т. 44 – № 9 – С.737–745.
124. Ogden T.L. Electric space-charge pulses near the ground in sunny weather / Ogden T.L., Hutchinson W.C.A. // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* – 1970. – Т. 32 – № 6 – С.1131–1138.
125. Смирнов В.В. Электрическое поле пылевых струй // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана* – 1999. – Т. 35 – № 5 – С.616–623.
126. Kouznetsov R. The vertical structure of turbulent momentum flux in the lower part of the atmospheric boundary layer / Kouznetsov R., Kramar V.F., Kallistratova M.A. // *Meteorologische Zeitschrift* – 2007. – Т. 16 – № 4 – С.367–373.
127. Mareev E.A. Studies of an artificially generated electrode effect at ground level / Mareev E.A., Israelsson S., Knudsen E., Kalinin A. V., Novozhenov M.M. //

- Annales Geophysicae – 1996. – Т. 14 – № 10 – С.1095–1101.
128. Whitlock W.S. Short-period variations in the atmospheric electric potential gradient / Whitlock W.S., Chalmers J.A. // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society – 1956. – Т. 82 – № 353 – С.325–336.
129. Hoppel W.A. Ion-aerosol attachment coefficients, ion depletion, and the charge distribution on aerosols // Journal of Geophysical Research – 1985. – Т. 90 – № D4 – С.5917.
130. Смирнов В.В. Эволюция объемных униполярных зарядов в тропосфере // Метеорология и гидрология – 2003. – № 10 – С.20–32.
131. Klett J.D. Ion Transport to Cloud Droplets by Diffusion and Conduction, and the Resulting Droplet Charge Distribution / Klett J.D. // Journal of the Atmospheric Sciences – 1971. – Т. 28 – № 1 – С.78–85.
132. Кудринская, Т. В. Болдырева К.А. Исследование вариаций атмосферного электрического поля на разных уровнях у земли / Кудринская, Т. В. Болдырева К.А., Новикова О.В., Пестов Д.А., Болдырев А.С., Редин А.А., Князева З.М. // Научная мысль Кавказа – 2012. – № 4 – С.95–98.
133. Архив метеорологических данных [Электронный ресурс]. URL: <https://rp5.ru>. (дата обращения: 29.12.2018).
134. Okawati A. Locality of Calm Day Atmospheric Electric Potential-Gradient in Kyoto City // Journal of geomagnetism and geoelectricity – 1961. – Т. 12 – № 3 – С.129–137.
135. Silva H.G. Atmospheric electric field measurements in urban environment and the pollutant aerosol weekly dependence / Silva H.G., Conceição R., Melgão M., Nicoll K., Mendes P.B., Tlemçani M., Reis A.H., Harrison R.G. // Environmental Research Letters – 2014. – Т. 9 – № 11 – С.114025.
136. Tacza J. A new South American network to study the atmospheric electric field and its variations related to geophysical phenomena / Tacza J., Raulin J.-P., Macotela E., Norabuena E., Fernandez G., Correia E., Rycroft M.J., Harrison R.G. // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics – 2014. – Т. 120 –

- C.70–79.
137. Silva H.G. Modulation of urban atmospheric electric field measurements with the wind direction in Lisbon (Portugal) / Silva H.G., Matthews J.C., Conceição R., Wright M.D., Pereira S.N., Reis A.H., Shallcross D.E. // *Journal of Physics: Conference Series* – 2015. – Т. 646 – № 1 – C.012013.
 138. Holzer R.E. Distribution electrical conduction currents in the vicinity of thunderstorms / Holzer R.E., Saxon D.S. // *Journal of Geophysical Research* – 1952. – Т. 57 – № 2 – C.207–216.
 139. Markson R. Solar modulation of atmospheric electrification and possible implications for the Sun–weather relationship // *Nature* – 1978. – Т. 273 – № 5658 – C.103–109.
 140. Krehbiel P.R. An analysis of the charge structure of lightning discharges to ground / Krehbiel P.R., Brook M., McCrory R.A. // *Journal of Geophysical Research* – 1979. – Т. 84 – № C5 – C.2432.
 141. Brook M. Breakdown electric fields in winter storms // *Res. Lett. Atmos. Electr.* – 1992. – № 12 – C.47–52.
 142. Rakov V.A. A Review of Positive and Bipolar Lightning Discharges // *Bulletin of the American Meteorological Society* – 2003. – Т. 84 – № 6 – C.767–776.
 143. WWLLN [Электронный ресурс]. URL: <http://wwlln.net/>. (дата обращения: 01.08.2016).