

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород)

На правах рукописи

ШАТАЛИНА Мария Викторовна

КВАЗИСТАЦИОНАРНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ И СТРУКТУРЫ В АТМОСФЕРЕ

25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2019

Научный руководитель: Мареев Евгений Анатольевич, доктор физико-математических наук, член-корр. РАН, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (г. Нижний Новгород).

Официальные оппоненты: Смышляев Сергей Павлович, доктор физико-математических наук, ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет» (г. Санкт-Петербург).

Дмитриев Эльдар Михайлович, кандидат физико-математических наук, Геофизическая обсерватория «Борок» филиал ФГБНУ Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук (г. Борок, Ярославская обл.).

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова Российской академии наук

Защита состоится 17 июня 2019 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д002.069.01 в ФГБНУ Институт прикладной физики РАН по адресу: 603950 г. Нижний Новгород, ГСП-120, ул. Ульянова, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

Автореферат разослан «14» мая 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

А. И. Малеханов

2

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации

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, 2]. 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 [3–10].

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 [11–13]. 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. 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, а также для разработки диагностики возмущений электрического поля и улучшения существующих прогнозных моделей погоды.

К настоящему моменту сложилось представление о влиянии турбулентности, конвекции, а также изменений электрической проводимости воздуха на динамику электрического поля атмосферного в пограничном слое [14–17]. Особое влияние уделяется исследованиям прямого воздействия на приземное аэроэлектрическое поле атмосферных аэрозолей, как природного, так и антропогенного происхождения [18–20]. Разработаны численные модели, позволяющие оценивать электроаэродинамическое состояние конвективного пограничного слоя атмосферы, в частности, найти пространственно-временные распределения концентрации аэроионов, напряженности электри-

ческого поля, плотности тока проводимости и плотности объемного заряда в различных физических условиях [21, 22].

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, 23, 24] и заключается в том, что в условиях «хорошей погоды» изменения электрического поля вблизи поверхности земли следуют за изменениями единого для всей Земли параметра – ионосферного потенциала. 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 [25]. 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. [26], а также изложение истории вопроса и обширную библиографию в статье [27]) указывали на возрастание поля в зимний период северного полушария. При этом вопрос о наличии и значимости полугодовой сезонной вариации остается до конца не выясненным.

В настоящее время в связи с активными разработками современных моделей глобальной атмосферной электрической цепи, посвященными анализу вкладов различных ее элементов, влияние регионов, занятых облаками (около 67 % земного шара), на электрические процессы в атмосфере представляет значительный интерес [28]. Статистический анализ большого массива данных измерений квазистатического электрического поля [29] показывает, что сплошная облачность уменьшает окружающее электрическое поле. Современные детальные исследования [3] роли слоистых облаков в глобальной электрической цепи подтвердили их вклад в качестве резисторов.

К актуальным проблемам физики атмосферы относится проблема возникновения и эволюции мощных конвективных систем, в частности, грозовых облаков [30, 31]. Исследование электрических процессов в конвективных системах необходимо для самосогласованного анализа динамики атмосферы и повышения точности прогнозов погоды [31, 32]. Организация сети пунктов наблюдения, оснащенных автоматизированными приемными системами регистрации данных, и связанных в единый комплекс, является наиболее подходящим и апробированным путем решения задачи мониторинга электрического поля атмосферы. С целью разработки таких систем проводятся натурные эксперименты по приему радиоизлучения ближних и дальних гроз, регистрации вертикального атмосферного электрического поля и изучение статистики и энергетики молниевых всплесков в средних широтах. Такие наблюдения необходимы в связи с проблемами изменений климата и возможного влияния антропогенных факторов и космической погоды на климатическую систему Земли.

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 электрическое поле в приземном слое на основе результатов натурных экспериментов по измерению квазистатистического электрического поля.
4. Исследование статистических характеристик электрических полей конвективных облаков и гроз на основе результатов натурных экспериментов по измерению квазистатистического 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-п_поволжье_а, 09-02-10019-к, 09-05-13600-офи_ц, 10-02-09480-моб_з, 10-05-01045-а, 11-01-97028-п_поволжье_а, 11-05-12055-офи_м, 11-05-97047-п_поволжье_а, 13-05-01139-п_поволжье_а, 13-05-97063-п_поволжье_а, 13-05-01100-а, 13-05-12103-офи_м, 16-05-01086-а, 17-55-10014_КО-а, 18-45-520003-п_а);
- грантов РНФ (№16-17-00132, №18-77-10061);
- мегагрантов Правительства РФ (№14.B25.31.0023 «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 атмосфер: электрические процессы, радиофизические методы исследования», «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».

Методология и методы исследования

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

Научная новизна диссертационной работы определяется новыми методами исследования и оригинальными результатами, полученными впервые:

1. Предложен и численно реализован метод пробных структур для моделирования и диагностики электрического состояния пограничного слоя атмо-

сферы, позволяющий интерпретировать результаты структурно-временного анализа короткопериодных пульсаций электрического поля. Разработан итерационный алгоритм восстановления параметров аэроэлектрических структур.

2. Пр продемонстрировано влияние аэрозоля на время жизни возмущений электрического заряда в атмосфере. Показано, что с ростом аэрозольной концентрации и пространственного масштаба системы время жизни аэроэлектрических структур существенно увеличивается.

3. На основании результатов анализа данных натурных наблюдений показано, что среднесуточные значения электрического поля коррелируют со среднесуточным значением балла общей облачности в противофазе независимо от сезона, что согласуется с теоретическими оценками влияния слоистых облаков на электрическое поле в приземном слое.

4. Разработаны методы обработки и анализа данных натурных экспериментов по регистрации атмосферного квазистационарного электрического поля, позволяющие выявлять особенности переноса основных электрических зарядов в грозных облаках и статистические характеристики молниевых вспышек.

Положения, выносимые на защиту

1. Найденные в натурных 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 натурных 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. Средние дневные значения напряженности атмосферного электрического поля и средние дневные значения слоистой облачности коррелируют в противофазе, что подтверждается экспериментальными данными натурных наблюдений и теоретическими оценками. Выявленная корреляция не зависит от сезона. В спектре низкочастотных вариаций электрического поля атмосфе-

ры наблюдается 4-5 дневная гармоника, соответствующая среднему времени жизни атмосферных циклонов.

4. Записи электрического поля, регистрируемого с помощью сети флюксометров в грозных условиях, позволяют выявлять статистические характеристики молниевых вспышек и особенности переноса основных электрических зарядов в грозных облаках.

Апробация результатов

Основные результаты диссертации опубликованы в работах [A1-A29] и обсуждались 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 (Нижегород, 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" (Нижегород, 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 Междуна-

родной 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 внутренних семинарах ИПФ РАН и конкурсе молодых ученых ИПФ РАН 2003 года.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 42 работы, из которых 9 статей в реферируемых журналах из списка ВАК, 19 работ в сборниках трудов международных и всероссийских конференций и 14 тезисов докладов.

Личный вклад автора в проведенные исследования

Все приведенные в диссертации и вошедшие в работы [A1-A29] результаты, 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 [A3, A7, A9] и трудах конференций [A10-A14, A18, A20, A26-A29] вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из четырех глав, Введения и Заключение. Объем диссертации составляет 127 страниц, включая 50 рисунка и 3 таблицы. Список литературы содержит 143 наименований, включая 28 работ автора.

Краткое содержание диссертации

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

В разделе 1.1 дается описание аэроэлектрических структур в атмосфере и их основных особенностей. 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 [33–35]. 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.

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

Анализ экспериментальных данных, проведенный Анисимовым с соавторами в работах [36–38], 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 . Поэтому в качестве одного из подходов к решению задачи теоретического исследования флуктуаций электрического поля можно рассматривать моделирование основных характеристик спектров электрогазодинамической турбулентности. Во многих экспериментальных реализациях короткопериодные пульсации электрического поля действительно связаны с турбулентным перемешиванием заряженных частиц [37]. Однако, в отличие от обычных для теории атмосферной турбулентности полей скорости, температуры и давления [39, 40], напряженность электрического поля нельзя считать локальной величиной, потому что флуктуации поля порождаются совокупным действием возмущений электрического заряда в окрестности точки наблюдения – в неоднородном слое приземной атмосферы.

В разделе 1.3 представлены результаты численного моделирования 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.

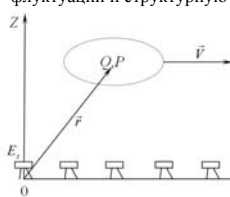


Рис. 1. Схематическое изображение модели аэроэлектрической структуры с параметрами Q , P , V и F , пролетающей над линейкой флюксметров

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 задан-

ном 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 (рис. 1).

Электрическое поле, создаваемое i -ой структурой в точке $\vec{r} = (x', y', z')$, в квазистатическом приближении рассчитывалось с использованием метода изображений [41] в приближении идеально проводящей Земли по формулам:

$$E_i^m(\vec{r}, t, \vec{r}_i') = \frac{2Q_i z_i'}{((x_i' - x) + V_i t)^2 + (y_i' - y)^2 + (z_i' - z)^2)^{3/2}} \quad (1)$$

для монополя, и

$$E_i^d(\vec{r}, t, \vec{r}_i') = \frac{6P_i z_i' (x_i' + V_i t)}{((x_i' - x) + V_i t)^2 + (y_i' - y)^2 + (z_i' - z)^2)^{5/2}} \quad (2)$$

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:

$$E_z(\vec{r}, t) = \sum_{i=1}^N (E_i^m + E_i^d). \quad (3)$$

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

$$D_E(x) = \frac{1}{T} \int_0^T |E_z(0, t) - E_z(x, t)|^2 dt. \quad (4)$$

В разделе 1.4 предложен и реализован метод диагностики параметров аэроэлектрических структур на основе измерения короткопериодных флуктуаций электрического поля. Результат разности рассматривается и анализируется как совокупность флуктуаций поля, обусловленных вкладом локальных пробных структур. Если ограничиться рассмотрением наборов только монопольных разноименно заряженных структур, можно воспользоваться для учета напряженности поля отдельной структуры выражением (1). Представлен алгоритм анализа экспериментальных данных, позволяющий осуществлять диагностику электрического состояния пограничного слоя атмосферы, включая параметры и распределение аэроэлектрических структур. Приведены примеры применения разработанного алгоритма к анализу данных натурных экспериментов.

В разделе 1.5 представлена модель формирования спектров крупномасштабных структур, заполненных турбулентностью, исследованы их спектральные характеристики. В предположении, что турбулентность колмогоровская, а плотность электрического заряда является пассивной примесью, получено аналитическое выражение для спектра напряженности электрического поля и приведен пример спектра со сходными характеристиками, полученного в результате численного моделирования.

Во главе 2 представлены результаты исследований модели коллективного взаимодействия ионов и аэрозолей в атмосферной плазме. Приведены результаты исследований стационарных состояний 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 аэроэлектрических структур в такой системе от концентрации аэрозольных частиц, стационарного электрического поля и внешнего масштаба системы.

В разделе 2.1. изложен обзор взаимосвязи содержания атмосферных ионов и аэрозолей. Время релаксации возмущений электрического заряда в нижней атмосфере $\tau_r = (4\pi\sigma)^{-1}$, где $\sigma = q\mu n$ – проводимость, обусловленная носителями заряда q с подвижностью μ и концентрацией n , является фундаментальной характеристикой среды. Только при достаточно большом времени релаксации заряда в проводящей среде движение такой среды во внешнем электрическом поле успеет приводить к существенному перераспределению заряда и поля. Основными факторами эволюции униполярного заряда в атмосфере являются: турбулентная диффузия носителей заряда, рекомбинация зарядов с фоновыми ионами, и электростатическое расталкивание ионов. Сравнение скоростей этих процессов [14] показывает, характерное время адсорбции униполярных зарядов частицами атмосферного аэрозоля (~ 10 – 100 с) существенно меньше или сравнимо с временами, следовательно в моделях ионизации необходимо учитывать адсорбцию на аэрозолях, а также тот факт, что значительная доля новых легких ионов преобразуется после столкновения с аэрозолем в тяжелые ионы, и именно они будут определять проводимость атмосферы в области, где присутствует аэрозоль.

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 декартовой системе координат с осью Z , перпендикулярной земной поверхности, полная система уравнений, включающая уравнение баланса ионов и аэрозолей, а также уравнения Пуассона для самосогласованного поля, имеет вид:

$$\frac{\partial n_+}{\partial t} + \frac{\partial n_+ v}{\partial z} = q - \alpha n_+ n_- - \beta_{+0}(E_z) n_+ N_0 - \beta_{+-} n_+ N_- \quad (5)$$

$$\frac{\partial n_-}{\partial t} + \frac{\partial n_- v}{\partial z} = q - \alpha n_+ n_- - \beta_{-0}(E_z) n_- N_0 - \beta_{-+} n_- N_+ \quad (6)$$

$$\frac{\partial N_+}{\partial t} + \frac{\partial N_+ u}{\partial z} = \beta_{+0} n_+ N_0 - \beta_{+-} n_+ N_- \quad (7)$$

$$\frac{\partial N_-}{\partial t} + \frac{\partial N_- u}{\partial z} = \beta_{-0} n_- N_0 - \beta_{-+} n_- N_+ \quad (8)$$

$$v_{\pm} = \pm \mu_{\pm} E - D_{\pm} \frac{\nabla n_{\pm}}{n_{\pm}} \quad (9)$$

$$u_{\pm} = \frac{g}{v_a} - D_{a\pm} \frac{\nabla N_{\pm}}{N_{\pm}} \quad (10)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial z} = 4\pi e(n_+ - n_- + N_+ - N_-) \quad (11)$$

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, $\mu_{\pm}$ 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. Для того, чтобы исследовать влияние аэрозоля на время релаксации возмущений плотности электрического заряда, исходная система (5)–(11) была линеаризована, и решение искалось в виде малых возмущений $\sim \exp(\lambda t - ikz)$, где $\lambda = -\tau^{-1}$ – величина, обратно пропорциональная времени релаксации возмущений электрического заряда.

Полученное дисперсионное уравнение четвертого порядка, коэффициенты которого 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 β , учитывающего зависимость от электрического поля, было исследовано численно, и получены зависимости эффективного времени жизни возмущений плотности электрического заряда от концентрации аэрозольных частиц, стационарного электрического поля и внешнего масштаба системы. Показано, что зависимость времени релаксации заряда от напряженности электрического поля имеет сложный характер: при умеренных значениях поля время

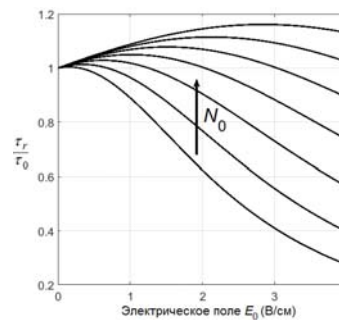


Рис. 2. Зависимость эффективного времени жизни от электрического поля E_0 для различных концентраций аэрозолей $N_0 = 0, 10^3, 2 \cdot 10^3 \dots \text{см}^{-3}$. Стрелкой указано направление роста концентрации.

может возрастать, но дальнейший рост поля приводит к росту дрейфовой скорости электронов и к уменьшению времени релаксации (рис. 2). Тем не менее именно квазистатическое 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.

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.

Глава 3 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 со среднесуточной температурой приземного атмосферного слоя и облачностью, проведены теоретические оценки влияния облачности на электрическое поле в приземном слое.

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

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 грозовых условиях, а так же осуществлять местоположение молниевых разрядов. Обработка данных включала в себя необходимого для учета месторасположения флюксометров расчет коэффициента редукции для каждого из пунктов наблюдений путем выборки 19 дней хорошей погоды и деления среднего поля, зарегистрированного флюксометром на стандартную величину поля хорошей погоды 130 В/м.

В разделе 3.2 представлены результаты анализа вариаций атмосферного электрического поля: суточная вариация, низкочастотные спектры поля хорошей погоды и сезонная вариация.

В разделе 3.2.1 представлены результаты 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 (рис. 3–4).

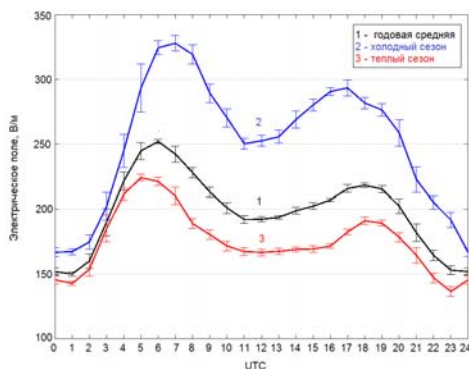


Рис. 3. Суточная вариация атмосферного электрического в Нижнем Новгороде в 2013–2018 гг., усредненная по всем четырем пунктам наблюдения. 1 – годовая средняя, 2 – холодный период, 3 – теплый период (часовое усреднение методом скользящего среднего).

В указанной выборке записей 40 относились к холодному сезону, 99 к теплому; 38 записей были сделаны в выходные дни, 101 в рабочие. Из рис. 3 видно, что суточная вариация, наблюдаемая (на всех четырех пунктах) в Нижнем Новгороде, относится к типу «вариации с двумя максимумами» [25]. 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 [3, 5, 8–10, 42]. 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) вносят существенный вклад в возмущения поля. Сравнение с результатами других авторов 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.

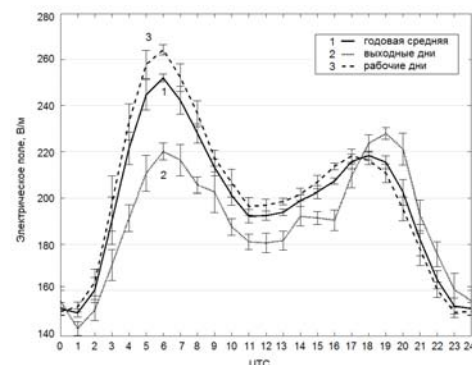


Рис. 4. Суточная вариация атмосферного электрического в Нижнем Новгороде в 2013–2018 гг., усредненная по всем четырем пунктам наблюдения. 1 – годовая средняя, 2 – выходные дни, 3 – рабочие дни.

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 по-

строить соответствующие параметризации для нахождения приземного электрического поля в погодно-климатических моделях.

В разделе 3.2.2 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. 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.

В разделе 3.2.3 представлены результаты сравнительного анализа среднемесячных значений поля в Нижнем Новгороде и нескольких других пунктах России с разными климатическими условиями: Борок Ярославской обл. (58°03'45" с. ш. 38°14'23" в. д.), Якутск (62°01'38" с. ш. 129°43'55" в. д.), Паратунка (Камчатка, 52°57'38" с. ш. 158°14'55" в. д.) Также приведены данные измерений в пункте с субтропическим климатом – Исламабад (33°40' с. ш. 73°10' в. д.). Показано, 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.

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). 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. 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. Из анализа экспериментальных данных, как полученных в Нижнем Новгороде, так и в работах по исследованию долгопериодных вариаций электрического поля во Флориде [29], было получено, что электрическое поле, измеряемое у поверхности Земли, в присутствии облачного слоя составляет около 70 % от поля хорошей погоды. Для интерпретации данных наблюдений были использована дискретная (электротехническая) модель глобальной электрической цепи [43, 44], позво-

ляющей получить понимание механизмов воздействия возмущений проводимости атмосферы на процессы протекания в ней тока.

В условиях хорошей погоды сопротивление R_{fw} столба воздуха высоты H определяется как [43]:

$$R_{fw} \sim \frac{1}{\sigma_0} \int_0^H e^{z/H_0} dz \quad (12)$$

где z – высота, $\sigma_0 = \text{const}$, H_0 – характерная высота роста проводимости (6.5 км). 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:

$$\frac{E_{dw}}{E_{fw}} = \left[1 + \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_0} - 1 \right) \cdot \left(\frac{e^{h_2/H_0} - e^{h_1/H_0}}{e^{H/H_0} - 1} \right) \right]^{-1} \quad (13)$$

где h_1 and h_2 – высота нижней и верхней границы слоя облачности соответственно, σ_c – константа проводимости облачного слоя, $\sigma_c < \sigma_0$ [45], т. е. есть ослабление поля обусловлено соотношением проводимостей внутри облака и окружающей атмосферы, а также соотношением толщины облака и атмосферного слоя. Из формулы (13) 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 характеристикам.

Глава 4 посвящена изучению характеристик грозовых событий с использованием непрерывных записей электрического поля с помощью сети флюксметров. 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.

Раздел 4.1 посвящен статистическим характеристикам полей конвективных событий в Нижнем Новгороде. Проанализированы ряды стандартного отклонения (или дисперсии) вертикальной компоненты электрического поля с часовым усреднением. Интенсивные конвективные события хорошо видны в виде пиков дисперсии электрического поля для соответствующих дат (см. рис. 5). Такие ряды дисперсии удобны для изучения региональной климато-

логии грозовой активности и хорошо коррелируют с наблюдательными данными по грозам.

Описанный выше подход позволил более точно подсчитать статистику грозовых событий в Нижнем Новгороде. 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, поэтому также число гроз было существенно меньше среднего.

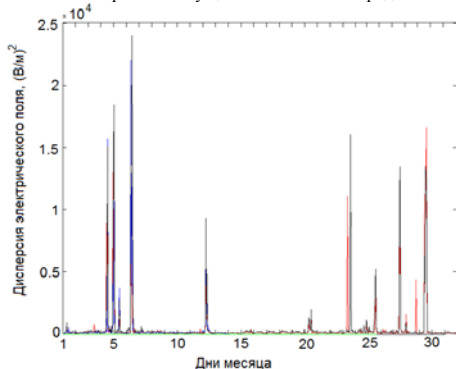


Рис. 5. Дисперсия электрического поля в мае 2016 по данным флюксметров, установленного на крыше ИПФ РАН, ИФМ РАН, ННГУ и Аэрологической станции "Нижний Новгород" с часовым усреднением.

В разделе 4.2 приводятся результаты анализа крупномасштабных медленных возмущений электрического поля для финальной стадии грозы.

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 (в Главе 1 настоящей диссертации). 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 третье необходимое условие для регуляризации задачи.

В разделе 4.3 представлены результаты исследований по детектированию грозовых разрядов с помощью сетей флюксметров на примере уникальной "зимней" грозы в Нижнем Новгороде 25 апреля 2015 года. Получены координаты первого, самого мощного разряда, также зарегистрированного 8 станциями сети глобального мониторинга WWLNN, а также оценена величина переносимого заряда.

В разделе 4.4 проанализированы особенности спектральных характеристик электрического поля грозовых облаков. 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 0.5-1.5 мГц (периоды 10-30 мин), где спектральная плотность увеличивается более чем в 104 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.

В Заключении приведены основные результаты диссертации.

Основные результаты работы

1. Предложен и реализован метод пробных структур для моделирования и диагностики электродинамики пограничного слоя атмосферы. На основе численного моделирования интерпретированы найденные в натурных экспериментах взаимосвязи параметров спектров и структурных функций короткопериодных пульсаций электрического поля. Разработан итерационный алгоритм восстановления параметров аэроэлектрических структур. Найденные 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 степенными спектрами в диапазоне частот $10^{-2} - 1$ Гц.

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 пространственного масштаба системы время жизни аэроэлектрических структур увеличивается. Продemonстрировано, что при умеренных значениях напряженности электрического поля время релаксации заряда возрастает, но дальнейший рост поля приводит к росту дрейфовой скорости электронов и к уменьшению времени релаксации.

3. На основе длительных 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 суточной вариации 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. Показано существование 4–5 дневной гармоник, соответствующей среднему времени жизни атмосферных циклонов. Показано, что среднесуточные значения электрического поля коррелируют со среднесуточными значениями облачности в противофазе, что согласуется с теоретическими оценками влияния 100 % слоистой облачности на электрическое поле в приземном слое в приближении постоянного ионосферного потенциала.

4. Показано, что непрерывные записи электрического поля с помощью сети флюксметров позволяют выявить не только статистические характеристики грозных облаков и молниевых вспышек в средних широтах, но и особенности распределения зарядов и их переноса в грозных облаках. Получена статистика грозных событий в Нижнем Новгороде за 9-летний период наблюдений. Исследованы спектральные характеристики возмущений электрического поля во время грозных событий и проведено сравнение этих характеристик со спектрами поля невозмущенной атмосферы. Обнаружено значительное усиление спектральной плотности вариаций электрического поля во время грозы.

Список цитированной литературы

- 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. V. 55. P. 351–361.
- Dolezal H. Discussion of the fundamental problem of atmospheric electricity // *Pure and Applied Geophysics*. 1972. V. 100, № 1. P. 8–43.
- Odzimek A., Baranski P., Kubicki M., Jasikiewicz D. Electrical signatures of Nimbostratus and Stratus clouds in ground-level vertical atmospheric electric field and current density at mid-latitude station Swider, Poland // *Atmospheric Research*. 2018. V. 209. P. 188–203.
- Anisimov S. V., Galichenko S. V., Aphinogenov K. V., Prokhorchuk A.A. Evaluation of the Atmospheric Boundary-Layer Electrical Variability // *Boundary-Layer Meteorology*. 2017. V. 167, № 2. P. 327–348.

21

- Торопов А.А., Козлов В.И., Каримов Р.Р. Вариации атмосферного электрического поля по наблюдениям в Якутске // *Наука и образование*. 2016. № 2. С. 58–65.
- Harrison R.G., Nicoll K.A., Fair weather criteria for atmospheric electricity measurements // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2018. V. 179. P. 239–250.
- Kubicki M., Odzimek A., Neska M., Relationship of ground-level aerosol concentration and atmospheric electric field at three observation sites in the Arctic, Antarctic and Europe // *Atmospheric Research*. 2016. V. 178–179. P. 329–346.
- Gurmani S.F., Ahmad N., Tacza J., Iqbal T. First seasonal and annual variations of atmospheric electric field at a subtropical station in Islamabad, Pakistan // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2018. V. 179. P. 441–449.
- Смирнов С. Э., Анисимов, С. В., Шихова Н. М. Вариации аэроэлектрического поля среднеширотных обсерваторий // "Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений", Сборник докладов V международной конференции 2–7 августа 2010 года, с. Паратунка Камчатский край. С. 208–211.
- Ahmad N., Gurmani S. F., Qureshi R. M., Iqbal T. Preliminary results of fair-weather atmospheric electric field in the proximity of Main Boundary Thrust, Northern Pakistan // *Advances in Space Research*. 2019. V. 63, № 2. P. 927–936.
- А. Г. Ансен, Х. Д. Канониди, С. П. Чернышева, Д. Н. Четаев, В. М. Шефтель Магнитосферные эффекты в атмосферном электричестве – М.: Наука, 1988. 150 с.
- Yerg D.G., Johnson K.R. Short-period fluctuations in the fair-weather electric field // *Journal of Geophysical Research*. 1974. V. 79, № 15. P. 2177–2184.
- Akhmetov O.I., Fedorenko Y. V. Investigation of the aero-electrical characteristics of atmosphere surface layer in Arctic // *Physics of auroral phenomena*. 2008. V. 30, № 1. P. 207–210.
- Смирнов В.В. Ионизация в тропосфере – СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 312 с.
- 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.
- Harrison R.G. Columnar resistance changes in urban air // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2005. V. 67, № 8–9. P. 763–773.
- Hoppel W.A. Atmospheric electricity in the planetary Boundary Layer Washington, D.C.: National Academies Press, 1986. P. 149–165.
- Silva H.G., Conceição R., Khan M.A.H., Matthews J.C., Wright M.D., Colares-Pereira M., Shallcross D.E. Atmospheric electricity as a proxy for air quality: Relationship between potential gradient and pollutant gases in an urban environment // *Journal of Electrostatics*. 2016. V. 84. P. 32–41.

22

- 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. A global atmospheric electricity monitoring network for climate and geophysical research // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2019. V. 184. P. 18–29.
- Anisimov S. V., Galichenko S. V., Mareev E.A. Electrodynamics properties and height of atmospheric convective boundary layer // *Atmospheric Research*. 2017. V. 194. P. 119–129.
- Anisimov S. V., Galichenko S. V., Shikhova N.M. Space charge and aeroelectric flows in the exchange layer: An experimental and numerical study // *Atmospheric Research*. 2014. V. 135–136. P. 244–254.
- Редин А.А., Куповых Г.В., Болдырев А.С. Электродинамическая модель конвективно-турбулентного приземного слоя атмосферы // *Известия вузов. Радиофизика*. 2013. Т. 56, № 11–12. С. 820–828.
- Mauchly S.J. On the diurnal variation of the potential gradient of atmospheric electricity // *Journal of Geophysical Research*. 1923. V. 28, № 3. P. 61.
- Mauchly S.J. Note on the diurnal variation of the atmospheric electric potential gradient S.J. // *Physics Review*. 1921. V. 18. P. 161–162.
- Чалмерс Д. Атмосферное электричество. – Л.: Гидрометеоздат, 1974. 420 с.
- Парамонов Н.А. Об унитарной вариации градиента атмосферно-электрического потенциала // *Доклады Академии наук СССР*. 1950. Т. 70, № 1. С. 37–38.
- Adlerman E.J., Williams E.R. Seasonal variation of the global electrical circuit // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1996. V. 101, № D23. P. 29679–29688.
- Baumgaertner A.J.G., Lucas G.M., Thayer J.P., Mallios S.A. On the role of clouds in the fair weather part of the global electric circuit // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2014. V. 14, № 16. С. 8599–8610.
- Lucas G.M., Thayer J.P., Deierling W. Statistical analysis of spatial and temporal variations in atmospheric electric fields from a regional array of field mills // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2017. V. 122, № 2. P. 1158–1174.
- Мареев Е.А., Стасенко В.Н. Российские исследования в области атмосферного электричества в 2003–2007 гг. // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2009. Т. 45, № 5. С. 709–720.
- Stolzenburg M., Marshall T.C. Charge Structure and Dynamics in Thunderstorms // *Space Science Reviews*. 2008. V. 137, № 1–4. P. 355–372.
- Анисимов С.В., Галиченко С.В., Шихова Н.М., Афиногенов К.В. Электричество конвективного атмосферного пограничного слоя: натурные наблюдения и численное моделирование // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2014. Т. 50, № 4. С. 445–454.

23

- Anisimov S. V., Mareev E.A., Bakastov S.S. On the generation and evolution of aeroelectric structures in the surface layer // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1999. V. 104, № D12. P. 14359–14367.
- Anisimov S. V., Bakastov S.S., Mareev E.A. Spatiotemporal structures of electric field and space charge in the surface atmospheric layer // *Journal of Geophysical Research*. 1994. V. 99, № D5. P. 10603.
- Анисимов С.В. Мареев Е.А. Аэроэлектрические структуры в атмосфере // *Доклады РАН*. 2000. Т. 371, № 1. С. 101–104.
- Anisimov S. V., Mareev E.A., Shikhova N.M., Dmitriev E.M. Universal spectra of electric field pulsations in the atmosphere // *Geophysical Research Letters*. 2002. V. 29, № 24. P. 70–74.
- Анисимов С.В., Мареев Е.А. Спектры пульсаций электрического поля приземной атмосферы // *Доклады РАН*. 2001. Т. 381, № 1. С. 107–112.
- Анисимов С.В., Мареев Е.А., Шихова Н.М., Дмитриев Э.М. Механизмы формирования спектра пульсаций электрического поля приземной атмосферы // *Известия вузов. Радиофизика*. 2001. Т. 44, № 7. С. 562–576.
- Обухов А.М. Турбулентность и динамика атмосферы. – Л.: Гидрометеоздат, 1988. 413 с.
- Зилитинкевич С.С. Атмосферная турбулентность и планетарные пограничные слои. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 256 с.
- Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1982. 624 с.
- Kubicki M., Michnowski S., Myslek-Laurikainen B. Seasonal and daily variations of atmospheric electricity parameters registered at the Geophysical Observatory at Swider (Poland) during 1965–2000 // *Proceedings of the 13th International Conference on Atmospheric Electricity*. August 13–17, Beijing, China. 2007. P. 50–54.
- Rycroft M.J., Odzimek A., Arnold N.F., Füllekrug M., Kulak A., Neubert T. New model simulations of the global atmospheric electric circuit driven by thunderstorms and electrified shower clouds: The roles of lightning and sprites // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2007. V. 69, № 17–18. P. 2485–2509.
- Slyunyaev N.N., Mareev E.A., Kalinin A. V., Zhidkov A.A. Influence of Large-Scale Conductivity Inhomogeneities in the Atmosphere on the Global Electric Circuit // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2014. V. 71, № 11. P. 4382–4396.
- Zhou L., Tinsley B.A. Global Circuit Model with Clouds // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2010. V. 67, № 4. P. 1143–1156.
- Анисимов С.В., Шихова Н.М., Афиногенов К.В. Динамика электричества невозмущенной атмосферы средних широт: от наблюдений к скейлингу // *Известия вузов. Радиофизика*. 2013. Т. 56, № 11–12. С. 787–802.

24

- A1. Анисимов С.В., Шихова Н.М., Мареев Е.А., Шаталина М.В. Структуры и спектры турбулентных пульсаций аэроэлектрического поля // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39, № 5. С. 766–781.
- A2. Мареев Е.А., Трахенгерц В.Ю., Иудин Д.И., Сорокин А.Е., Шаталина М.В. Современные проблемы исследования грозового электричества // Проектирование и технология электронных средств. 2004. Специальный выпуск. С. 7–16.
- A3. Шаталина М.В., Мареев Е.А., Анисимов С.В., Шихова Н.М. Моделирование динамики электрического поля методом пробных структур // Известия вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48, № 8. С. 648–660.
- A4. Анисимов С.В., Мареев Е.А., Шаталина М.В., Шихова Н.М. Время релаксации электрического заряда и спектры пульсаций электрического поля приземной атмосферы // Геофизические исследования. 2010. Т. 9, № 2. С. 25–46.
- A5. Anisimov S. V., Mareev E. A., Shikhova N. M., Shatalina M. V., Galichenko S. V., Zilitinkevich S. S. Aeroelectric structures and turbulence in the atmospheric boundary layer // Nonlinear Processes in Geophysics. 2013. V. 20, № 5. P. 819–824.
- A6. Клименко В.В., Мареев Е.А., Шаталина М.В., Шлюгаев Ю.В., Соколов В.В., Булатов А.А., Денисов В.П. О статистических характеристиках электрических полей грозовых разрядов в атмосфере // Известия вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 11–12. С. 864–874.
- A7. Шаталина М.В., Дементьева С.О., Мареев Е.А. Шаталина М.В. Мониторинг и моделирование грозовых событий в Нижегородском регионе: интенсивная гроза 1-2 июня 2015 г. // Метеорология и гидрология. 2016. № 11. С. 81–87.
- A8. 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. Российские исследования атмосферного электричества в 2011–2014 гг. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52, № 2. С. 175–186.
- A9. Шаталина М.В., Мареев Е.А., Клименко В.В., Кутерин Ф.А., Николл К.А. Экспериментальное исследование суточных и сезонных вариаций атмосферного электрического поля // Известия вузов. Радиофизика. 2019 (принята в печать).
- A10. 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.
- A11. 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.

- A12. Shatalina M. V., Mareev E. A., Anisimov S. V., Shikhova N. M. Recovery of space charge distribution by the method of test structure S // Proceedings of the 13th International Conference on Atmospheric Electricity, 2007, August 13–17, Beijing, China. P. 174–177.
- A13. 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.
- A14. Shatalina M. V., Mareev E. A., Klimenko V. V. Aeroelectric structures diagnostics using ground-based observations // 38th COSPAR Scientific Assembly Proceedings, Bremen, Germany, 18–25 July, 2010. A11-0202.
- A15. Mareev E. A., Klimenko V. V., Shlyugaev Yu. V., Shatalina M. V., Iudin D. I. Radio-physical methods of analysis for thunderstorm field perturbations // 2011 XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium, Istanbul, Turkey 13–20 Aug. 2011. P. 1–4.
- A16. Shlyugaev, Yu. V., Klimenko, V. V., Mareev, E. A., Sokolov, V. V., Shatalina, M. V. Electromagnetic Signatures of Extreme Meteorological Events in the Upper Volga Region Diagnostics // Proc. XIV Int. Conf. on Atmos. Electr. ICAE2011, Rio de Janeiro, Brazil, Aug 2011, 4 p.
- A17. Klimenko V. V., Mareev E. A., Shlyugaev Yu V., Denisov V. P., Shatalina M. V., Shirokov E. A. Spectral / Statistical Characteristics of Electric Field Perturbations and their Implications for Thunderstorm Generator Diagnostics // Proc. XIV Int. Conf. on Atmos. Electr. ICAE2011 Rio de Janeiro, Brazil, Aug. 2011. 4 p.
- A18. Шаталина М. В., Мареев Е. А., Клименко В. В., Шлюгаев Ю. В. Система мониторинга экстремальных метеорологических явлений в Нижегородском регионе // "Великие реки 2011". Труды конгресса 13-го Международного научно-промышленного форума: в 3-х томах. С. 266–268.
- A19. Ильин Н. В., Евтушенко А. А., Кутерин Ф. А., Мареев Е. А., Шаталина М. В., Анисимов С. В. Конвективный перенос электрического заряда в пограничном слое атмосферы и его диагностика // Труды VII-й Российской конференции по атмосферному электричеству. Санкт-Петербург, 2012. С. 90–92.
- A20. Шаталина М. В., Клименко В. В., Франк-Каменецкий А. В. Низкочастотные спектры вариаций атмосферного электрического поля // Труды VII-й Российской конференции по атмосферному электричеству. Санкт-Петербург, 2012. С. 259–261.
- A21. Шлюгаев Ю. В., Клименко В. В., Мареев Е. А., Панютин А. А., Соколов В. В., Шаталина М. В. Мониторинг опасных метеорологических явлений в Верхне-Волжском регионе // Труды VII-й Российской конференции по атмосферному электричеству. Санкт-Петербург, 2012. С. 263–267.
- A22. Клименко В. В., Мареев Е. А., Шаталина М. В. Об уровне флуктуаций атмосферного электрического поля в области периодов $T = 1–100$ суток. // Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений: VI меж-

дународная 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.

- A23. Ильин Н. В., Евтушенко А. А., Кутерин Ф. А., Мареев Е. А., Шаталина М. В. Глобальные электрические цепи планет земной группы // Материалы конференции «Глобальная электрическая цепь». Всероссийская конференция, Борок, 28 октября – 1 ноября 2013 г., 2013. С. 10–11.
- A24. Dementyeva S. O., Ilin N. V., Shatalina M. V., Mareev E. A. Modeling of Electric Parameters of Real Thunderstorms in Numerical Weather Prediction Models, Nizhny Novgorod // VI International Conference "Frontiers of Non-linear Physics" (FNP 2016), Nizhny Novgorod, Russia, 17–23 July 2016. P. 231–232.
- A25. Dementyeva S., Ilin N., Shatalina M., Mareev E. Thunderstorms based on Electric Parameters Calculations in Numerical Weather Prediction Models // Geophysical Research Abstracts 2016. EGU2016-855.
- A26. Шаталина М.В., Мареев Е.А., Шлюгаев Ю.В., Ильин Н.В., Кутерин Ф.А., Дементьева С.О., Булатов А.А. Региональные аспекты климатологии молнии // 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.
- A27. Шаталина М. В., Клименко В. В., Мареев Е.А. Сезонная изменчивость электрического поля в приземном слое атмосферы // Глобальная электрическая цепь. Материалы Третьей Всероссийской конференции, Борок, Россия, 25–29 сентября, 2017. С. 94.
- A28. Shatalina M. V., Klimenko V. V. On the Impact of Disturbed Weather Regions on the Global Electric Circuit // 2nd URSI Atlantic Radio Science Conference, May 28 – June 1, Gran Canaria, Spain, IEEE, 2018. 1 p.
- A29. Shatalina M. V., Klimenko V. V., Mareev E. A. Ionospheric Potential Shielding by the Cloud Layer // Proceedings of XVI International Conference on Atmospheric Electricity, 17–22 June, Nara city, Nara, Japan, 2018. P-01-03.

ШАТАЛИНА Мария Викторовна

КВАЗИСТАЦИОНАРНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ И СТРУКТУРЫ В АТМОСФЕРЕ

Автореферат

Ответственный за выпуск
М. В. Шаталина

Подписано к печати 16.04.2019

Формат 60 × 90 ¹/₁₆. Усл. печ. л. 1,75. Тираж 100 экз.