

На правах рукописи



Дементьева Светлана Олеговна

**ПРОЦЕССЫ КОЛЛЕКТИВНОЙ ЗАРЯДКИ
В НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЕ
И ИХ ОПИСАНИЕ
В ЧИСЛЕННЫХ МЕЗОМАСШТАБНЫХ МОДЕЛЯХ**

01.04.03 – радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2019

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

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: Горбунов Михаил Евгеньевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук;

Фадеев Ростислав Юрьевич, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительной математики Российской академии наук

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта Российской академии наук

Защита состоится «30» сентября 2019 г. в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.069.02 при ИПФ РАН (603950 г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46).

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

Автореферат разослан «28» июня 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук



Э. Б. Абубакиров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Среди вопросов, связанных с электродинамикой нижней атмосферы на стадии формирования конвективного облака и интенсивной грозовой активности, можно отметить несколько важных фундаментальных проблем, которые остаются на данный момент нерешёнными: влияние различных физических процессов на развитие облаков разных типов, роль различных механизмов электризации в возникновении молниевых вспышек, исследование стадии инициации молнии, учёт молниевой активности в оперативном мониторинге, формирование электрического поля в турбулентной среде.

Многие атмосферные явления, в том числе грозы, пылевые бури, снежные метели, извержения вулканов, сопровождаются переносом электрического заряда соударяющимися макроскопическими частицами (например, гидрометеорами, частицами песка, пыли, вулканического пепла) в потоках воздуха с высоким уровнем турбулентности. Несмотря на значимость проблемы влияния турбулентности на рост крупномасштабного электрического поля, ранее в литературе ей не уделялось достаточного внимания, однако ряд исследований был посвящён задачам, близким к указанной. Так, например, в работах [1, 2] рассматривалось влияние турбулентности на мелкомасштабные флуктуации электрического поля в пограничном слое атмосферы. При этом обычно турбулентная диффузия пространственного заряда, включённая в некоторые численные модели, играет деструктивную роль в генерации электрического заряда. Аналитические и численные модели роста крупномасштабного электрического поля в грозовых облаках в отсутствие турбулентности, в том числе с учётом влияния аэрозольных частиц на электрические процессы, были развиты в работах [3–6].

Описание процессов грозовой электризации является сложной и важной задачей как с точки зрения теории, так и с точки зрения численного моделирования. В работе [7] собраны характерные параметры грозы, которым должны удовлетворять модели грозовой электризации. Одним из наиболее распространённых методов прогноза локальных атмосферных явлений является численное моделирование, базирующееся на применении мезомасштабных моделей прогноза погоды [8–10]. В настоящее время существует довольно много численных мезомасштабных моделей, самыми известными из которых являются WRF (Weather Research and Forecasting model), MM5 (The Fifth-Generation Mesoscale Model), GEM (Global Environmental Multiscale Model), COSMO (Consortium for Small-scale Modeling). При всём многообразии моделей параметризации электрических процессов до сих пор не включены ни в одну из них. Это связано, в первую очередь, с тем, что задача параметризации электрических процессов, наблюдаемых в мезомасштабных атмосферных явлениях, является достаточно сложной, так как требует оптимального соот-

ношения полноты описания электрических процессов и возможности высокоскоростных вычислений. Существует несколько подходов для прогнозирования молниевой активности с помощью косвенных неэлектрических параметров, основанных на доказанной связи вспышек с вертикальным потоком гидрометеоров в твёрдой фазе [11–13], однако, такой подход не может претендовать на высокую точность, и, следовательно, для совершенствования методов прогнозирования молниевых вспышек необходим прямой расчёт электрических параметров. Существует ряд локальных моделей, удовлетворяющих перечисленным в работе [7] характеристикам грозы. Например, модель Straka Atmospheric Model (SAM) [14, 15], которая описывает процессы, происходящие на масштабах от нескольких метров до нескольких сотен метров, включающая в себя несколько схем зарядки, трёхмерные нестационарные модели конвективных облаков [16, 17], описывающие гидродинамические, термодинамические, микрофизические и электрические процессы в облаках. Однако локальные модели, подходящие для моделирования отдельных облаков, не подходят для прогноза мезомасштабных событий.

Среди исследователей, занимающихся разработкой и внедрением параметризаций электрических процессов для задач прогноза молниевой активности, в первую очередь, стоит отметить группу американских ученых, разработавшую параметризацию WRF_ELEC, основы которой описаны в работах [4, 18], а первый опыт применения продемонстрирован в работе [19]. Группа исследователей из Китая использует собственную модель электризации, которая также основана, главным образом, на работе [4]. Опыт применения разработанной модели описан в статье [6]. Следует отметить, что указанные параметризации, как и параметризации, разработанные автором данной работы, о которых будет сказано в следующих главах, начали разрабатываться одновременно и независимо и на данный момент работают в режиме обработки данных расчётов прогнозной модели.

Наряду с качественным прогнозом молниевой активности, существует и другая причина востребованности численного моделирования электрических параметров грозовых облаков. Натурные измерения электрических параметров грозовых облаков довольно сложны и дороги. Наиболее распространённым видом экспериментальных исследований в этой области являются баллонные и аэрозондовые наблюдения. Зачастую при проведении исследований баллоны теряются, либо становятся непригодными к последующим запускам. Другим видом экспериментальных исследований являются самолётные наблюдения, но внутри грозовых облаков они применяются редко из соображений безопасности.

Экспериментальные исследования воздействия турбулентности на процессы электризации на данный момент также не являются полными и требуют проведения дальнейших работ по одновременному измерению как электрических, так и турбулентных характеристик конвективных облаков. В работах [20, 21] описаны эксперименты с измерением турбулентных параметров

облаков, электрической проводимости и пространственного распределения электрического заряда, однако измерения электрического поля в данных экспериментах не проводились. Баллонные измерения, описанные, например, в работах [22–24], наоборот, включают подробную информацию об электрических параметрах грозовых облаков, но не содержат измерения характеристик турбулентности. В связи с трудностями проведения экспериментальных исследований, одним из наиболее перспективных инструментов становится численное моделирование, которое может быть осуществлено в рамках мезомасштабных моделей, дополненных параметризациями электрических процессов.

Цели и задачи диссертации

Целью данной работы является теоретическое исследование процессов коллективной зарядки гидрометеоров и аэрозольных частиц в нижней атмосфере и численное описание данных процессов в мезомасштабных моделях прогноза состояния атмосферы. Говоря о зарядке гидрометеоров и аэрозольных частиц, мы называем её коллективной, подчёркивая важность для этого процесса нелинейных эффектов, связанных с наличием колебаний конечной амплитуды, взаимодействие которых с частицами существенно влияет на макроскопические свойства среды (см. для сравнения [25, 26]). Для достижения указанной цели был поставлен и решён ряд задач:

1. Аналитическое исследование процессов установления электрического поля и заряда в конвективном облаке, формулировка базовых уравнений для разработки численной параметризации электрических процессов;

2. Теоретическое описание влияния турбулентности на процессы коллективной зарядки, проведение оценок вклада турбулентности в процессы электризации многокомпонентных турбулентных сред (грозовые облака, пылевые бури, снежные метели);

3. Разработка параметризаций процессов электризации в грозовых облаках для численных мезомасштабных моделей, создание алгоритмов, способствующих минимизации времени расчётов (необходимых для оперативного прогноза), интеграция разработанных параметризаций с численной мезомасштабной моделью, верификация и апробация разработанных параметризаций и алгоритмов;

4. Изучение методов прогноза молниевой активности во время грозовых событий, анализ пространственных распределений электрических параметров грозовых облаков, полученных при моделировании с использованием мезомасштабной численной модели, дополненной разработанной параметризацией, сравнение результатов расчёта электрических параметров с другими методами прогноза молниевой активности.

Научная новизна

В рамках данной работы был получен ряд новых результатов. Отметим основные из них:

1. На основе аналитических исследований уравнений, описывающих эволюцию электрического поля и заряда в конвективных облаках, выявлены базовые механизмы электризации, которые необходимо учитывать при численном описании процессов коллективной зарядки в облаках.

2. Впервые проведено исследование влияния турбулентности на процессы коллективной электрической зарядки. Выявлены условия, при которых наблюдается положительный вклад турбулентности в рост крупномасштабного электрического поля. Выполнены оценки вклада турбулентности в процессы электризации грозовых облаков, снежных облаков и облаков пыли.

3. Предложен новый для задач оперативного мониторинга метод прогноза молниевой активности, основанный на прямом расчёте электрических параметров атмосферы, позволивший перейти на новый уровень прогнозирования грозовых событий.

4. Разработаны параметризации электрических процессов в грозовых облаках, подходящие для работы с численными мезомасштабными моделями.

5. Проведена интеграция разработанных параметризаций с численной мезомасштабной моделью WRF, позволившая прогнозировать возникновение молниевых разрядов на основе анализа результатов моделирования пространственного распределения разности потенциалов и вертикального профиля электрического поля.

6. Моделирование грозовых событий с использованием разработанных параметризаций электрических процессов позволило детально исследовать особенности эволюции конвективных облаков при различном уровне турбулентности и различной интенсивности грозовой деятельности.

Теоретическая и практическая значимость

Описание процессов грозовой электризации является сложной и важной задачей как с точки зрения теории, так и с точки зрения численного моделирования. Модель, содержащая неполное описание электрических процессов, не сможет точно воспроизводить и прогнозировать наблюдаемые грозовые явления. Задача разработки параметризаций электрических процессов для прогноза (в том числе оперативного) мезомасштабных атмосферных явлений с использованием численных моделей осложняется тем, что требует оптимального соотношения полноты описания электрических процессов и возможности высокоскоростных вычислений. Отметим, что современные мезомасштабные модели до сих пор не содержат встроенных параметризаций электрических процессов.

Детальное исследование воздействия турбулентности на электризацию грозовых облаков и численное моделирование данных явлений полезны для

понимания физических механизмов, играющих первостепенную роль в грозовой электродинамике. Численный расчёт возмущений электрических параметров, возникающих за счёт турбулентных эффектов, позволит существенно улучшить качество моделирования электрических процессов в конвективных облаках и за счёт этого увеличить достоверность и точность численного прогноза явлений, связанных с формированием и развитием конвективных облаков. Это, в свою очередь, будет способствовать увеличению точности краткосрочного прогноза молниевой активности на региональных масштабах, что является актуальной и важной задачей для различных практических приложений. Кроме того, разработанный в данной работе метод оценки роли турбулентности может быть использован для широкого спектра задач, касающихся электризации многокомпонентных сред, в том числе в задачах астрофизики, геофизики и при проектировании технологических установок.

Методы исследования и степень достоверности результатов

Для решения задач, поставленных в рамках данной работы, применяются аналитические методы решения задач электродинамики, а также методы численного моделирования процессов коллективной зарядки в нижней атмосфере. Для физического обоснования разработанной параметризации выполнено теоретическое описание процессов электризации в конвективных системах, в том числе с учётом турбулентности, в ходе которого выявляются главные физические механизмы электризации облаков, которые должны быть включены в параметризацию. Моделирование тестовых примеров и реальных грозовых событий проводилось с использованием разработанных автором параметризаций электрических процессов, подробно описанных в настоящей работе, и численной модели прогноза погоды WRF. Моделирование тестового грозового облака проводилось с помощью встроенного тестового примера грозовой супер-ячейки модели WRF. Достоверность полученных результатов подтверждается качественным соответствием результатов аналитических оценок и численного моделирования. Кроме того, результаты исследования апробированы и верифицированы по данным наземных систем наблюдения за электрическими параметрами атмосферы (в частности, данным сети электростатических флюксометров, развёрнутой на территории Нижегородской области), данным грозопеленгационных сетей, данным метеостанций и метеорологического радиолокатора, расположенного в Нижнем Новгороде. Результаты настоящего исследования также сравниваются с результатами работ, в том числе экспериментальных, других исследовательских групп.

Положения, выносимые на защиту:

1. Применение параметризаций безындукционного разделения зарядов в облаках, разработанных на основе аналитических исследований процессов

установления электрического поля и заряда в конвективном облаке, позволяет проводить корректное численное моделирование грозовых событий.

2. Турбулентность играет существенную роль в процессах электризации дисперсных многофазных сред (грозовые облака, пылевые бури, снежные метели), влияя на динамику крупномасштабного электрического поля. В зависимости от параметров среды средняя величина компоненты тока зарядки, обусловленной турбулентностью, может достигать значений, близких к значению тока зарядки в ламинарном потоке.

3. Метод прогноза грозовых событий, основанный на анализе электрических параметров, рассчитанных с помощью разработанных параметризаций электрических процессов и мезомасштабной модели WRF, позволяет предсказывать возникновение грозовых очагов с большей достоверностью по сравнению с использованием косвенных метеорологических индексов.

4. Результаты моделирования электрических параметров реальных грозовых событий с учётом влияния турбулентных эффектов на процессы электризации существенно зависят от интенсивности грозового события и скорости диссипации турбулентной энергии в грозовом облаке. При больших электрических полях и сильном турбулентном перемешивании наблюдается объединение грозовых ячеек, расположенных недалеко друг от друга, в кластер, в то время как при более слабой грозовой активности и менее интенсивном турбулентном перемешивании кластер грозовых ячеек разделяется на одиночные ячейки.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы опубликованы в 6 статьях в ведущих рецензируемых российских и зарубежных журналах [A1–A6], 6 трудах Российских и международных конференций [A7–A12], 18 тезисах и абстрактах [A13–A30], обсуждались на семинарах Института прикладной физики РАН и Гидрометцентра России (2016 г.), докладывались на следующих российских и международных конференциях: I International Scientific Conference “Science of the Future” (Санкт-Петербург, 2014); 18-я, 20-я, 21-я всероссийские школы-конференции молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы» (Борок, 2014, 2017; Нижний Новгород, 2016); 19-я Международная школа-конференция молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы» (Туапсе, 2015); XX, XXI, XXII Нижегородские сессии молодых ученых (Нижний Новгород, 2015, 2016, 2017); 26th General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics IUGG-2015 (Прага, Чехия, 2015); XVII Научная школа «НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ – 2016» (Нижний Новгород, 2016); European Geosciences Union General Assembly EGU-2016 (Вена, Австрия, 2016); VI International Conference “Frontiers of Nonlinear Physics” FNP-2016 (Нижний Новгород – Санкт-Петербург, 2016); 3-я Всероссийская конференция «Глобальная элек-

трическая цепь» (Борок, 2017); XVIII Научная школа «НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ – 2018» (Нижний Новгород, 2018); XVI International Conference on Atmospheric Electricity ICAE-2018 (Нара, Япония, 2018).

Личный вклад автора

Все результаты, изложенные в диссертации и вошедшие в работы [A1–A30], получены лично автором или при его непосредственном участии. При подготовке представленных результатов к публикации совместно с соавторами в работах [A1, A4–A7, A10, A12, A13, A15–A30] вклад автора диссертации был определяющим, в работах [A2, A3, A8, A9, A11, A14] автору принадлежат разделы, связанные с описанием и моделированием процессов электризации в атмосфере и прогнозом грозовых событий.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Список литературы состоит из 176 наименований, включая 30 публикаций автора по теме диссертации. Общий объём диссертации составляет 145 страниц и включает 52 рисунка и 1 таблицу.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** приведено обоснование актуальности темы настоящего исследования, сформулированы основные цели и задачи работы, отмечена научная новизна проведённого исследования, его теоретическая и практическая значимость, перечислены основные положения, выносимые на защиту, указаны методы исследования и степень достоверности результатов, описаны структура и объём диссертации, а также отмечены публикации и личный вклад автора.

В **Главе 1** рассмотрены основные понятия и базовые механизмы образования заряда на частицах при коллективной зарядке в нижней атмосфере. Приведены современные представления о зарядовой структуре облака. Изложено аналитическое описание роста электрического поля и заряда в грозовых облаках на основе упрощённой модели, приведённой в работе [27]. Продемонстрированы основные подходы к моделированию электрических процессов в атмосфере. Описаны существующие модели электризации, рассмотрены характеристики мезомасштабных численных моделей и указаны трудности, возникающие при описании процессов электризации в мезомасштабных прогнозных моделях.

В **разделе 1.1** приводится описание экспериментальных исследований зарядовой структуры облаков. Первые экспериментальные исследования электрического поля грозовых облаков, в ходе которых было обнаружено, что верхняя часть конвективного облака заряжена положительно, а нижняя отри-

цательно (т.е. грозовое облако имеет дипольную зарядовую структуру), были проведены в 20-е годы 20-го века [28]. В более поздних экспериментах [29] была обнаружена дополнительная область положительного заряда вблизи нижней границы облака, что поменяло представление о зарядовой структуре облака с дипольного на трёхполосное («трёхслойное»). Более современные исследования [30] показали, что реальная структура грозовых облаков ещё сложнее, однако при моделировании конвективных систем, как правило, можно ограничиться трёхполосной структурой.

В разделе 1.2 обсуждаются основные механизмы электризации облаков. В 1885 году одновременно и независимо были предложены теории индукционной и безындукционной электризации грозовых облаков [31, 32]. Характерной особенностью индукционного механизма зарядки является разделение электрического заряда при столкновении двух частиц, поляризованных во внешнем электрическом поле. Безындукционный механизм зарядки подразумевает разделение электрического заряда за счёт различия физико-химических свойств соударяющихся частиц. В современном представлении безындукционная зарядка соударяющихся льдинок и снежной крупы в присутствии мелких водяных капель является доминантным механизмом разделения зарядов в грозовых облаках. Трибоэлектризация (обмен зарядом между двумя летящими, например, в ветропесчаном потоке, частицами при контакте друг с другом) – общепринятый механизм зарядки пылевых бурь. В классификации индукционных и безындукционных механизмов трибоэлектризация может быть отнесена к безындукционным в силу зависимости разделяемого заряда от состава частиц в потоке и их относительной скорости.

В разделе 1.3 рассматриваются процессы установления электрического поля и заряда в облаке. Приводится аналитическое описание роста электрического поля и заряда на крупных частицах в грозовых облаках на основе упрощённой одномерной модели, описанной в работе [27]. Данная модель построена на решении уравнения баланса электрических токов и уравнения эволюции электрического заряда на крупных частицах:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \nu(\hat{Q} + \beta E_z) - (\nu\gamma + \gamma_0)Q, \quad (1)$$

где Q – заряд, накапливаемый на большой частице, \hat{Q} – заряд, возникающий на большой частице за одно соударение с маленькой при безындукционном механизме зарядки, ν – частота столкновений одной большой частицы со всеми маленькими, β – эффективность индукционных процессов, E_z – вертикальная компонента электрического поля, слагаемое $(\nu\gamma + \gamma_0)$ описывает потери заряда на больших частицах.

Полученные аналитические выражения для электрического поля и заряда на крупных частицах позволили провести анализ эволюции электрического

поля и заряда при различных механизмах зарядки и параметрах частиц в облаке.

В **разделе 1.4** рассматриваются возможные подходы к прогнозу атмосферных явлений, в которых наблюдается коллективная зарядка частиц, в численных мезомасштабных моделях. Перечисляются характерные параметры гроз, которым должна удовлетворять модель электризации. Рассматриваются базовые понятия численного моделирования атмосферы, в том числе классификация прогнозов и моделей по пространственным и временным масштабам. Приводится краткий обзор существующих на данный момент моделей электризации.

Таким образом, в Главе 1 в рамках одномерной упрощенной модели, описывающей эволюцию электрического поля и заряда в конвективных облаках, выявлены базовые механизмы электризации (безындукционное разделение заряда на твердых гидрометеорах) и определены характерные электрические параметры (максимальный заряд на больших частицах, время установления заряда), которые необходимо учитывать при численном описании процессов коллективной зарядки в облаках. Материалы, полученные в Главе 1, опубликованы в работах [A2, A7, A8, A16, A18].

Глава 2 посвящена эффектам воздействия турбулентности на электризацию многокомпонентных сред. Приводится описание разработанной аналитической модели генерации и роста крупномасштабного электрического поля. Исследуются условия, при которых турбулентность вносит положительный вклад в процессы коллективной зарядки. Проводятся количественные оценки вклада турбулентности в процессы электризации конвективного облака, снежной бури и пылевой бури.

В **разделе 2.1** рассматриваются современные подходы и проводимые исследования влияния турбулентности на различные процессы в атмосфере.

В **разделе 2.2** формулируется задача и приводятся основные уравнения, необходимые для описания эволюции электрического поля (**параграф 2.2.1**), тока зарядки (**параграф 2.2.2**), электрического заряда (**параграф 2.2.3**), а также уравнения движения частиц (**параграф 2.2.4**) в турбулентной многокомпонентной среде.

Данная задача решается в приближении двухкомпонентной среды, содержащей две фракции частиц, отличающиеся своими физико-химическими свойствами. Общий вид рассматриваемой среды показан на Рисунке 1. Анализ турбулентных эффектов в облаках представляет собой сложную задачу, связанную с описанием большого количества флуктуирующих физических параметров. Для её решения в данном исследовании используется двухмасштабное приближение, в котором основные параметры разделяются по пространственным и временным масштабам. При этом флуктуирующие параметры (такие как электрическое поле, ток зарядки, относительная скорость частиц и их заряды) представляются в виде сумм средних значений и флуктуаций. Также в данном разделе приводятся представления зарядов на больших и

маленьких частицах и относительной скорости частиц в предположении однородной стационарной колмогоровской турбулентности.

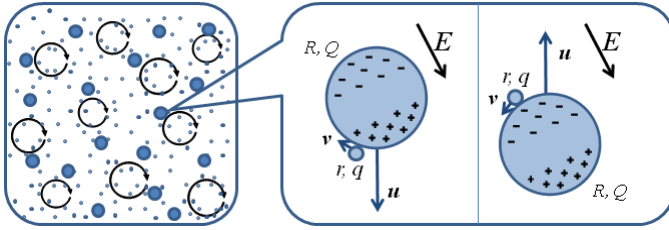


Рис. 1. Рассматриваемая система. Крупный масштаб: два типа соударяющихся частиц в турбулентной среде (турбулентные вихри показаны схематически); мелкий масштаб: маленькая частица, сталкивающаяся с большой частицей во внешнем электрическом поле

В квазигидродинамическом приближении эволюция заряда на частицах снежной крупы и льдинках определяется следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dQ}{dt} = -\Delta Q \cdot v_Q - v_{iQ} \cdot Q \\ \frac{dq}{dt} = \Delta Q \cdot v_q - v_{iq} \cdot q \end{cases}, \quad (2)$$

где Q и q – заряды на больших и маленьких частицах, v_Q и v_q – их средние частоты столкновений, v_{iQ} и v_{iq} – коэффициенты прилипания ионов к частицам, ΔQ – заряд, передаваемый частицами за соударение.

Раздел 2.3 посвящён анализу особенностей процессов зарядки, возникающих ввиду турбулентного перемешивания, при индукционном (**параграф 2.3.1**) и безындукционном (**параграф 2.3.2**) механизмах разделения заряда. Выявлено, что независимо от знака относительной скорости частиц как при индукционной, так и при безындукционной зарядке вклад турбулентных флуктуаций в электрические процессы может быть положительным. При этом были получены следующие аналитические оценки различных компонент тока зарядки:

$$J_{z \text{ ind}} = \pi^2/3 \cdot SnNr^2 v_r^{-1} U_z^2 \cdot E, \quad (3)$$

$$J_{z \text{ non-ind}} = \delta q_{\text{non-ind}} SnNv_r^{-1} U_z^2, \quad (4)$$

где $J_{z \text{ ind}}$ и $J_{z \text{ non-ind}}$ – токи зарядки при индукционном и безындукционном механизмах разделения зарядов соответственно, $\delta q_{\text{non-ind}}$ – заряд, передавас-

мый за соударение частиц при безындукционном механизме, который в упрощенной форме может считаться постоянным при заданном размере частиц, а может учитывать зависимость от относительной скорости частиц. Описание других параметров представлено в тексте диссертации.

В разделе 2.4 приведённый теоретический подход применяется к процессам коллективной зарядки в конвективном облаке (параграф 2.4.1), снежной буре (параграф 2.4.2) и пылевой буре (параграф 2.4.3), представляющих естественные турбулентные многокомпонентные слабопроводящие среды. Для конвективного облака и снежной бури при индукционном механизме разделения зарядов существует диапазон параметров, при которых электрическое поле растёт экспоненциально в присутствии турбулентности. На рисунке 2 выделены области параметров конвективных облаков и снежных бурь, в которых наблюдается экспоненциальный рост электрического поля, вызванный турбулентным перемешиванием.

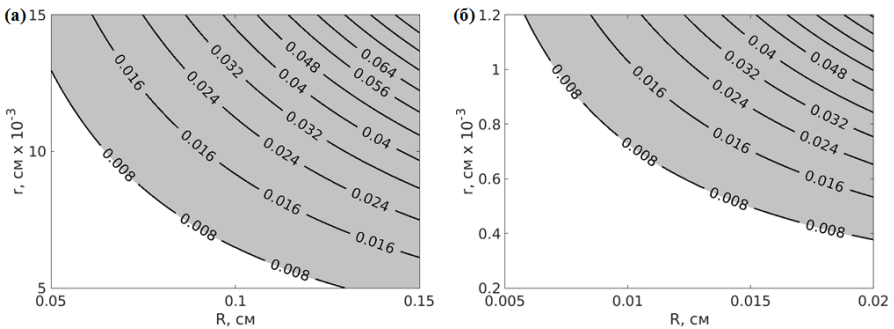


Рис. 2. Зависимость коэффициента пропорциональности флуктуационной компоненты среднего тока зарядки электрическому полю от размеров частиц при индукционном механизме разделения заряда. В выделенной области параметров (а) конвективного облака и (б) снежной бури за счёт турбулентного перемешивания возникает экспоненциальный рост электрического поля

При безындукционной зарядке в конвективных облаках имеет место линейный рост электрического поля; вклад турбулентности может существенно сказываться в ряде частных случаев. В частности, при рассмотрении состояний, близких к порогу пробоя, а также огромных кучево-дождевых облаков учёт интенсивной турбулентности является обязательным. На рисунке 3 представлены графики роста электрического поля во времени при индукционном и безындукционном механизмах разделения заряда в облаке без учёта турбулентности и в облаке с глубокой конвекцией (скорость диссипации турбулентной энергии $700 \text{ см}^2/\text{с}^3$). Пересечение с линией электрического поля пробоя обозначает возникновение молниевых разрядов.

Для безындукционного механизма в снежных бурях зарядки имеет место линейный во времени рост электрического поля за счёт того, что компонента тока зарядки, связанная с флуктуациями заряда и относительной скорости, для столь малых частиц вносит существенный вклад в ток зарядки. При этом оба механизма усиливают процессы электризации снежных бурь.

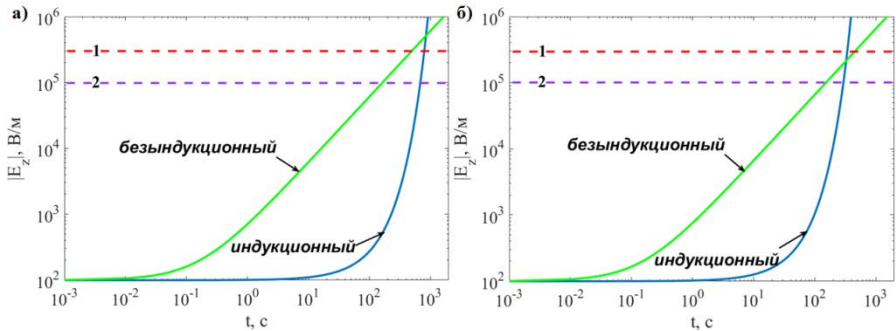


Рис. 3. График роста электрического поля во времени при индукционном и безындукционном разделении заряда (а) в облаке без учёта турбулентности и (б) в кучевом облаке с глубокой конвекцией. Линия (1) соответствует максимальному измеренному электрическому полю в грозовом облаке 300 кВ/м [27]; линия (2) соответствует полю пробоя в концепции пробоя на убегающих электронах на высоте около 6 км [33]

При трибоэлектрическом механизме разделения зарядов в пылевых бурях имеет место линейный во времени рост электрического поля, компонента тока зарядки, связанная с флуктуациями относительной скорости и электрического заряда, вносит существенный вклад в суммарный ток зарядки.

Таким образом, в Главе 2 проведено детальное исследование влияния турбулентности на процессы коллективной зарядки в грозовых, снежных и пылевых облаках; выявлены условия, при которых турбулентность усиливает средний ток зарядки, что приводит к интенсификации крупномасштабного разделения зарядов. Результаты, полученные в Главе 2, опубликованы в работах [A4, A5, A11, A17, A21, A22, A28, A29].

В Главе 3 рассматривается проблема прогноза природных явлений, связанных с интенсивными процессами электризации, в численных мезомасштабных моделях. Для решения задач прогноза молниевой активности предлагается применять новый подход, основанный на прямом расчёте электрических параметров грозовых облаков.

В разделе 3.1 приводятся задачи, для решения которых необходимо развивать численные модели электризации, среди которых стоит особо отметить задачи долгосрочного прогноза и оперативного мониторинга молниевой активности, а также исследование характеристик грозовых облаков для дополнения картины натуральных наблюдений. Кроме того, в данном разделе рассматривается современное состояние данной проблемы на мировом уровне.

В разделе 3.2 представлено краткое описание численной мезомасштабной модели WRF, используемой при моделировании в данной работе. Отмечено, что современные мезомасштабные модели прогноза погоды до сих пор не содержат встроенных параметризаций электрических процессов. Также в данном разделе приведено описание параметризаций микрофизики модели WRF, которые будут использованы в Главе 4.

Раздел 3.3 посвящён разработке параметризации электрических процессов. Приводится физическое обоснование разработанной параметризации, разбирается вопрос о том, какие параметры известны, а какие необходимо найти, а также приводится алгоритм численной реализации разработанной параметризации. В параметризацию были заложены следующие физические механизмы: основными носителями заряда являются льдинки и снежная крупа; основным механизмом разделения зарядов в грозовом облаке является безындукционный механизм; в грозовом облаке присутствует точка реверса. Распределение заряда в облаке восстанавливается по микрофизическим характеристикам, а распределение электрического потенциала, в свою очередь, находится путём решения уравнения Пуассона:

$$\Delta\varphi(x, y, z, t) = -\frac{1}{\varepsilon_0}(\rho_{\text{гр}}(x, y, z, t) + \rho_{\text{ice}}(x, y, z, t)), \quad (5)$$

где φ – электрический потенциал, $\rho_{\text{гр}}$ и ρ_{ice} – плотности электрического заряда на снежной крупе и льдинках соответственно.

В разделе 3.4 разбирается проблема заблаговременности численных прогнозов. Для уменьшения времени численного счёта проведена разработка вспомогательного алгоритма отбора грозовых событий по косвенным параметрам. Косвенными параметрами для экспресс-анализа результатов работы модели WRF были приняты радиолокационная отражаемость 55 дБЗ и выше, горизонтальный размер облака 50 км² и более, продолжительность грозового события 20 минут и более. Разработанный блок косвенного отбора грозовых событий позволяет существенно уменьшить период времени, для которого необходим расчёт электрических параметров, и тем самым сократить время, необходимое для проведения расчёта.

В разделе 3.5 выполняется внедрение теоретических результатов, полученных в Главе 2, в параметризацию электрических процессов. На основании оценок, проведённых в рамках аналитического исследования влияния турбулентности на электрические процессы, на этапе восстановления распределения электрических зарядов в конвективном облаке для областей с высокой радиолокационной отражаемостью задаётся повышенный уровень электризации.

В разделе 3.6 просуммированы все разработки, описанные в Главе 3, направленные на создание нового подхода к прогнозированию грозовых событий, основанного на прямом расчёте электрических параметров. Приведена

структура алгоритма прогноза молниевой активности на основе разработанной параметризации электрических процессов и численной модели WRF.

Таким образом, в Главе 3 предложен метод прогноза молниевой активности, основанный на прямом расчёте электрических параметров, и разработаны параметризации безындукционной зарядки твёрдых гидрометеоров в грозовых облаках (с учётом и без учёта влияния турбулентности на процессы электризации), подходящие для работы с численными мезомасштабными моделями. Результаты, полученные в Главе 3, опубликованы в работах [A1, A2, A7, A9, A10, A13–A16, A20, A23, A24, A26, A27].

В **Главе 4** рассмотрены два основных подхода к прогнозированию молниевой активности – индексный метод и прямой расчёт электрических параметров. Продемонстрированы результаты реализации этих подходов. Проведён анализ результатов численного моделирования и сравнение рассчитанных параметров с имеющимися данными измерений и наблюдений.

В **разделе 4.1** рассматривается вопрос о необходимости точного прогноза грозовых событий, являющихся опасными или неблагоприятными (в зависимости от используемой классификации) явлениями погоды.

В **разделе 4.2** демонстрируется метод прогноза молниевой активности с применением косвенных индексов. Рассмотрены индексы K, CAPE, CPTP, а также детально рассмотрен индекс LPI (**параграф 4.2.1**), являющийся на настоящий момент одним из современных и наиболее перспективных индексов.

В **разделе 4.3** представлены результаты моделирования тестовой грозовой ячейки модели WRF, рассчитываемой на территории 80 км x 80 км в течение двух часов, необходимого для верификации разработанных и описанных в Главе 3 параметризаций и алгоритмов. На примере этой ячейки проводится расчёт индекса LPI (**параграф 4.3.1**) и электрических параметров облака (**параграф 4.3.2**) - разности потенциалов, электрического поля. Результаты расчёта LPI продемонстрировали ряд недостатков (неуниверсальность, недооценивание опасных районов) индексного подхода по сравнению с прямым расчётом электрических параметров. Для анализа полученных результатов проведено сравнение с данными экспериментальных работ.

Раздел 4.4 посвящён моделированию реальных грозовых событий на территории Нижегородской области. В данном разделе приводятся результаты апробации всех разработанных блоков нового метода прогноза молниевой активности, которые подробно описаны в Главе 3, - базовой параметризации электрических процессов (**параграф 4.4.1**), косвенного отбора грозовых событий (**параграф 4.4.2**). Проводится сравнение полученных результатов с данными метеорологического радиолокатора, наземных метеостанций, сети электростатических флюксметров и грозопеленгационной сети WWLLN (**параграф 4.4.3**). Демонстрируются результаты моделирования и прогноза электрических параметров грозовых событий с использованием базовой (без учёта турбулентности) и модифицированной (с учётом турбулентных эффектов) параметризаций электрических процессов (**параграф 4.4.4**). В качестве ос-

новых исследуемых характеристик были выбраны разность потенциалов между электрически активной зоной облака и землёй, а также вертикальный профиль электрического поля.

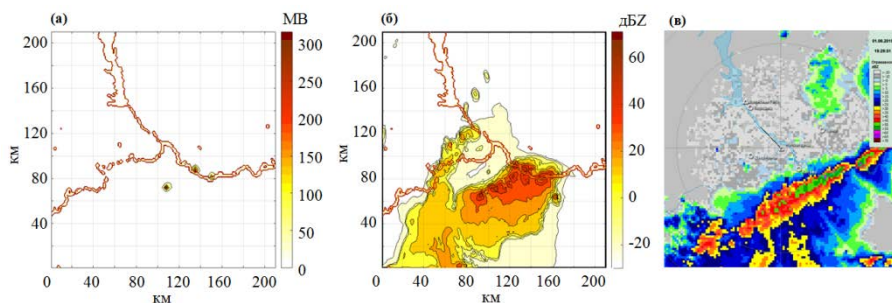


Рис. 4. Пример результатов прогноза и анализа грозового события 01.06.2015, 19:30 UTC в Нижегородской области: результаты моделирования (а) разности потенциалов и (б) радиолокационной отражаемости; (в) карта наблюдений метеорадара. Расчётная область 210 x 210 км (Нижний Новгород в центре)

Моделирование и прогноз электрических параметров грозовых событий с использованием базовой и модифицированной параметризаций электрических процессов продемонстрировали хорошую соответствие наблюдаемым параметрам. Для сравнительного анализа, который проводился для оценки качества прогноза, использовались данные метеорологического радиолокатора, наземных метеостанций, сети электростатических флюксометров и грозопеленгационной сети WWLLN. Моделирование электрических параметров гроз с различными фильтрами отбора грозовых событий показало необходимость тщательного выбора предъявляемых требований. Величина порогового значения радиолокационной отражаемости для расчётов грозовых событий на территории Нижегородской области при помощи модели WRF оказалась равной 55 dBZ, в то время как меньшие значения, которые встречаются в литературе по анализу радарных данных, приводили к некорректному выделению гроз из большого массива данных.

Одним из важных результатов интеграции разработанных параметризаций электрических процессов с численной мезомасштабной моделью WRF стала возможность моделирования и расчёта электрических параметров грозовых облаков при различной интенсивности турбулентного перемешивания. Проведённые с учётом указанных процессов исследования показали, что турбулентность может приводить к различным изменениям структуры грозовых ячеек и фронтов. Так, например, было выявлено, что для довольно слабых грозовых ячеек характерно увеличение разности потенциалов с соответствующим увеличением областей с высоким уровнем разности потенциалов; для гроз средней интенсивности наблюдается сужение области высоких по-

тенциалов, разъединение возникающих вокруг максимумов разности потенциалов ячеек с интенсификацией электрических процессов внутри каждой образовавшейся ячейки. Для наиболее интенсивных гроз можно отметить не только увеличение разности потенциалов и усиление процессов электризации, но также и тенденцию к объединению двух максимумов разности потенциалов в одну ячейку. При этом увеличение электрического поля за счёт турбулентного воздействия носит нелинейный характер. Характерные картины радиолокационной отражаемости, разности потенциалов и электрического поля с учётом и без учёта турбулентности, полученные для грозы, происшедшей на территории Нижегородской области, изображены на рисунке 5.

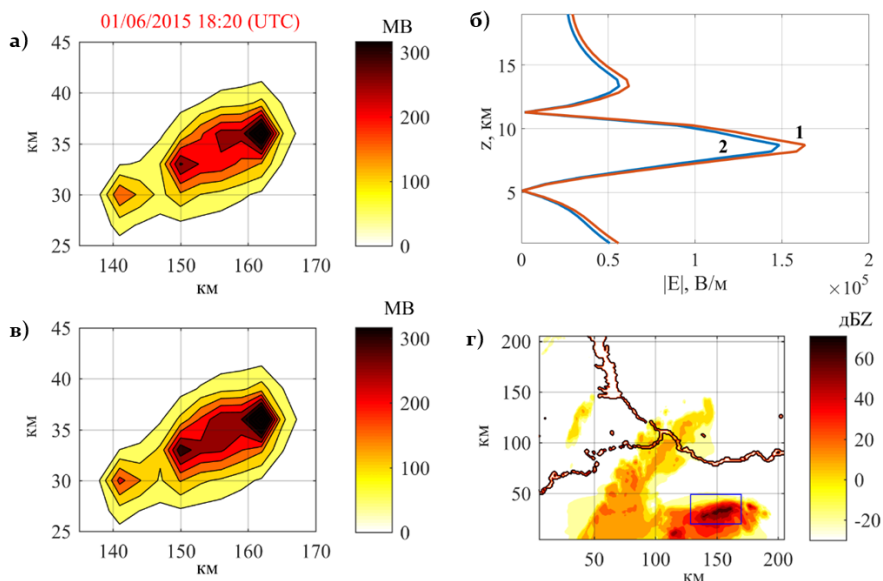


Рис. 5. Результаты моделирования грозы на территории Нижегородской области: (а) разность потенциалов между электрически активной зоной облака и землёй, полученная при моделировании с помощью разработанной параметризации электрических параметров без учёта турбулентности; (б) вертикальный профиль электрического поля с учётом (линия 1) и без учёта (линия 2) турбулентности; (в) разность потенциалов между электрически активной зоной облака и землёй, полученная при моделировании с помощью разработанной параметризации электрических параметров с учётом турбулентности; (г) максимальная радиолокационная отражаемость

Таким образом, в Главе 4 проведена интеграция разработанных параметризаций с численной мезомасштабной моделью WRF, позволившая прогнозировать возникновение молниевую активность на основе анализов результатов моделирования пространственного распределения разности потенциалов

и вертикального профиля электрического поля, а моделирование грозových событий с учётом и без учёта влияния турбулентности на электрические процессы в облаках позволило детально исследовать особенности эволюции конвективных облаков при различном уровне турбулентности и различной интенсивности грозовой активности. Результаты, полученные в Главе 4, опубликованы в работах [A1, A3, A6, A10–A12, A16, A19, A20, A23–A26, A30].

В **Заключении** перечислены основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. На основе аналитического решения уравнений, описывающих эволюцию электрического поля и заряда в конвективных облаках в рамках упрощенной одномерной модели, выявлены базовые механизмы, которые необходимо учитывать при численном описании процессов коллективной зарядки в облаках.

2. Впервые проведено детальное исследование влияния турбулентности на процессы коллективной зарядки. Выявлены условия, при которых турбулентность усиливает средний ток зарядки, что приводит к интенсификации крупномасштабного разделения зарядов в дисперсной многофазной среде. Выполнены оценки вклада турбулентности в процессы электризации грозových облаков, снежных облаков и облаков пыли.

3. Предложен метод прогноза молниевой активности, основанный на прямом расчёте электрических параметров атмосферы, который позволил перейти на новый уровень в вопросах прогнозирования грозových событий.

4. Разработаны параметризации электрических процессов в грозových облаках, подходящие для работы с численными мезомасштабными моделями. Базовая параметризация описывает безындукционную зарядку твёрдых гидрометеоров, модифицированная параметризация также учитывает эффекты, связанные с воздействием турбулентности на процессы электризации.

5. Проведена интеграция разработанных параметризаций с численной мезомасштабной моделью WRF, позволившая прогнозировать возникновение молниевых разрядов на основе анализа результатов моделирования пространственного распределения разности потенциалов и вертикального профиля электрического поля. Результаты применения данного подхода превосшли по точности современные индексные методы.

6. Моделирование грозových событий с использованием базовой и модифицированной параметризаций электрических процессов позволило детально исследовать особенности эволюции конвективных облаков при различном уровне турбулентности и различной интенсивности грозовой деятельности. Показано, что при больших электрических полях и сильном турбулентном перемешивании наблюдается объединение грозových ячеек, расположенных недалеко друг от друга, в кластер, в то время как при более слабой

грозовой активности и менее интенсивном турбулентном перемешивании кластер грозových ячеек разделяется на одиночные ячейки.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Anisimov S.V., Mareev E.A., Shikhova N.M., Sorokin A.E., Dmitriev E.M.* On the electro-dynamical characteristics of the fog // *Atmospheric Research*. 2005. Vol. 76, № 1–4. P. 16–28.
2. *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. Vol. 20. P. 819–824.
3. *Kuettnner J.P., Sartor J.D., Levin Z.* Thunderstorm Electrification—Inductive or Non-Inductive? // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1981. Vol. 38, № 11. P. 2470–2484.
4. *Mansell E.R.* Charge structure and lightning sensitivity in a simulated multicell thunderstorm // *Journal of Geophysical Research*. 2005. Vol. 110, № D12. P. D12101.
5. *Mansell E.R., Ziegler C.L.* Aerosol Effects on Simulated Storm Electrification and Precipitation in a Two-Moment Bulk Microphysics Model // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2013. Vol. 70, № 7. P. 2032–2050.
6. *Zhao P., Yin Y., Xiao H.* The effects of aerosol on development of thunderstorm electrification: A numerical study // *Atmospheric Research*. 2015. V. 153, № 398. P.376–391.
7. *Mason B.J.* On the generation of charge associated with grauel formation in thunderstorms // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 1953. Vol. 79. P. 501–509.
8. *Pielke R.A.* *Mesoscale Meteorological Modeling*. Orlando: Academic Press, 1984. 622 p.
9. *Пененко В.В., Алоян А.Е.* Модели и методы для задач охраны окружающей среды. Новосибирск: Наука, 1985. 224 с.
10. *Старченко А.В.* Численное исследование локальных атмосферных процессов // *Вычислительные технологии*. 2005. Т. 10, № 553. С. 81–89.
11. *Petersen W.A., Rutledge S.A.* On the relationship between cloud-to-ground lightning and convective rainfall // *Journal of Geophysical Research*. 1998. Vol. 103, № D12. P. 14025–14040.
12. *Petersen W.A., Christian H.J., Rutledge S.A.* TRMM observations of the global relationship between ice water content and lightning // *Geophysical Research Letters*. 2005. Vol. 32, № 14. P. L14819.
13. *Губенко И.М., Рубинштейн К.Г.* Анализ результатов расчета грозовой активности с помощью индексов неустойчивости атмосферы по данным численной модели WRF-ARW // *Метеорология и гидрология*. 2015. № 1. С.27–37.
14. *Straka J.M., Anderson J.R.* Numerical simulations of microburst-producing storms: some results from storms observed during COHMEX // *Journal*

of the Atmospheric Sciences. 1993. Vol. 50. P. 1329–1348.

15. *Mansell E.R., MacGorman D.R., Ziegler C.L., Straka J.M.* Simulated three-dimensional branched lightning in a numerical thunderstorm model // *Journal of Geophysical Research*. 2002. Vol. 107, № D9. P. 4075.

16. *Ашабоков Б.А., Шаповалов А.В., Кулиев Д.Д., Продан К.А., Шаповалов В.А.* Численное моделирование термодинамических, микроструктурных и электрических характеристик конвективных облаков на стадии роста и максимального развития // *Известия вузов. Радиофизика*. 2013. Т. 56, № 11–12. С. 900–907.

17. *Синькевич А.А., Довгальюк Ю.А., Веремей Н.Е., Куров А.Б., Михайловский Ю.П., Богданов Е.В., Торопова М.Л., Игнатьев А.А., Аджиев А.Х., Малкарова А.М., Абшаев А.М., Гонпалакришнан В., Муругавел П., Павар С.Д.* Исследования развития грозо-градового облака. Часть 3. Численное моделирование эволюции облака // *Метеорология и гидрология*. 2017. № 8. С. 18–28.

18. *Mansell E.R., Ziegler C.L., Bruning E.C.* Simulated Electrification of a Small Thunderstorm with Two-Moment Bulk Microphysics // *Journal of Atmospheric Sciences*. 2010. Vol. 67, № 1. P. 171–194.

19. *Fierro A.O., Mansell E.R., MacGorman D.R., Ziegler C.L.* The Implementation of an Explicit Charging and Discharge Lightning Scheme within the WRF-ARW Model: Benchmark Simulations of a Continental Squall Line, a Tropical Cyclone, and a Winter Storm // *Monthly Weather Review*. 2013. Vol. 141. P. 2390–2415.

20. *Marlton G.J., Giles Harrison R., Nicoll K.A., Williams P.D.* Note: A balloon-borne accelerometer technique for measuring atmospheric turbulence // *Review of Scientific Instruments*. 2015. Vol. 86, № 1. P. 016109.

21. *Harrison R.G., Nicoll K.A., Ambaum M.H.P.* On the microphysical effects of observed cloud edge charging // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2015. Vol. 141, № 692. P. 2690–2699.

22. *Bateman M.G., Rust W.D., Smull B.F., Marshall T.C.* Precipitation charge and size measurements in the stratiform region of two mesoscale convective systems // *Journal of Geophysical Research*. 1995. Vol. 100, № D8. P. 16341.

23. *Marshall T.C., Rust W.D., Winn W.P., Gilbert K.E.* Electrical structure in two thunderstorm anvil clouds // *Journal of Geophysical Research*. 1989. Vol. 94, № D2. P. 2171–2181.

24. *Stolzenburg M., Marshall T.C., Krehbiel P.R.* Initial electrification to the first lightning flash in New Mexico thunderstorms // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2015. Vol. 120, № 21. P. 11,253–11,276.

25. *Кадомицев Б.Б.* Коллективные явления в плазме. М.: Наука, 1976. 240с.

26. *Мареев Е.А., Сорокин А.Е., Трахтенгерц В.Ю.* Эффекты коллективной зарядки в многопоточковой аэрозольной плазме // *Физика плазмы*. 1999. Т. 25, № 3. С. 123–134.

27. *Volland H.* Atmospheric Electrodynamics. Berlin: Springer, 1985. 221 p.

28. *Wilson C.T.R.* On some determinations of the sign and magnitude of elec-

tric discharges in lightning flashes // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1916. Vol. A92. P. 555–574.

29. *Simpson G., Scrase F.J.* The Distribution of Electricity in Thunderclouds // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1937. Vol. 161, № 906. P. 309–352.

30. *Stolzenburg M., Marshall T.C.* Charged precipitation and electric field in two thunderstorms // Journal of Geophysical Research. 1998. Vol. 103, № D16. P. 19777–19790.

31. *Elster J., Geitel H.* Ueber die Electricitätsentwicklung bei der Regenbildung // Annalen der Physik. 1885. Vol. 261, № 5. P. 121–131.

32. *Sohncke L.* Der Ursprung der Gewitter-Elektrizität und der gewöhnlichen Elektrizität der Atmosphäre. Jena: Verlag Fisher, 1885. 202 p.

33. *Marshall T.C., McCarthy M.P., Rust W.D.* Electric field magnitudes and lightning initiation in thunderstorms // Journal of Geophysical Research. 1995. Vol. 100, № D4. P. 7097–7103.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

A1. Дементьева С.О., Ильин Н.В., Мареев Е.А. Расчет электрического поля и индекса молниевой активности в моделях прогноза погоды // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51, № 2. С. 210–217.

A2. 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.

A3. Шаталина М.В., Дементьева С.О., Мареев Е.А. Мониторинг и моделирование грозových событий в Нижегородском регионе: интенсивная гроза 1-2 июня 2015 г. // Метеорология и гидрология. 2016. № 11. С. 81–87.

A4. Mareev E.A., Dementyeva S.O. The role of turbulence in thunderstorm, snowstorm, and dust storm electrification // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2017. V. 122, № 13. P. 6976–6988.

A5. Дементьева С.О., Мареев Е.А. О вкладе турбулентности в электризацию грозových облаков // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54, № 1. С. 28–35.

A6. Дементьева С.О., Мареев Е.А. Моделирование электрических параметров гроз с учетом турбулентных эффектов // Известия вузов. Радиофизика. 2018. Т. 61, № 8. С. 633–644.

A7. Dementyeva S.O., Ilin N.V., Mareev E.A. Prediction of lightning activity based on direct electric field calculations // Proceedings of the International Symposium "Topical Problems of Nonlinear Wave Physics" (NWP-2014). Nizhny Novgorod, Russia, 2014. P. 158–159.

A8. Mareev E.A., Volodin E.M., Ilin N.V., Dementyeva S.O. Lightning activity in the changing climate: aerosol significance // Proceedings of the 1st Pan-Eurasian Experiment (PEEX) Conference and 5th PEEX Meeting. Helsinki, Finland, 2015. P. 291–292.

A9. Bulatov A.A., Dementyeva S.O., Ilin N.V., Klimenko V.V., Kuterin F.A., Mareev E.A., Rakov V.A., Shatalina M.V., Shlyugaev Yu.V. Nowcasting System for Lightning/thunderstorms in the Upper Volga Region of Russia // Proceedings of the 24th International Lightning Detection Conference & 6th International Lightning Meteorology Conference. San Diego, California, USA, 2016.

A10. Dementyeva S.O., Ilin N.V., Shatalina M.V., Mareev E.A. Modeling of Electric Parameters of Real Thunderstorms in Numerical Weather Prediction Models // Proceedings of the VI International Conference "Frontiers of Nonlinear Physics" (FNP 2016). Nizhny Novgorod, Russia, 2016. P. 231–232.

A11. 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 // Труды научного конгресса 18-го Международного научно-промышленного форума ВЕЛИКИЕ РЕКИ'16. Нижний Новгород, Россия, 2016. С. 280–281.

A12. *Demytyeva S., Mareev E.* Effects of turbulence on thunderstorm electrification // Proceedings of the XVI International Conference on Atmospheric Electricity (ICAE2018). Nara city, Nara, Japan, 2018.

A13. *Demytyeva S.O., Ilin N.V.* Calculation of Lightning Potential Index (LPI) for different microphysics parameterizations based on WRF model and its comparative analysis with electrical parameters // Proceedings of the 15th International Conference on Atmospheric Electricity (ICAE 2014). Norman, Oklahoma, USA, 2014. P-04-05.

A14. *Мареєв Е.А., Дементьева С.О., Ильин Н.В.* Прогноз молниевой активности на основе прямых расчетов электрических полей в мезомасштабных моделях // Материалы VII Всероссийского метеорологического съезда. Санкт-Петербург, Россия, 2014. С. 24–25.

A15. *Demytyeva S.O., Ilin N.V., Mareev E.A., Rakov V.A.* Development of new tools for lightning activity forecast using numerical weather prediction models // Proceedings of the I International Scientific Conference “Science of the Future”. St. Petersburg, Russia, 2014.

A16. *Дементьева С.О., Ильин Н.В., Мареєв Е.А.* Расчет электрических параметров грозового облака в численных моделях высокого разрешения // Тезисы докладов 18-ой Всероссийской школы-конференции молодых учёных «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы». Борок, Россия, 2014. С. 52–53.

A17. *Дементьева С.О., Мареєв Е.А., Евтушенко А.А.* Модель электрического динамо в турбулентной среде // Тезисы докладов 19-ой Международной школы-конференции молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы». Туапсе, Россия, 2015. С. 110.

A18. *Дементьева С.О.* О динамике разделения зарядов в грозовых облаках // 20-ая Нижегородская сессия молодых ученых. Естественные и математические науки: материалы докладов. Нижний Новгород, Россия, 2015. С. 13–14.

A19. *Demytyeva S.O., Ilin N.V., Mareev E.A.* Calculations of electric field in numerical weather prediction models // Proceedings of the 26th General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG-2015). Prague, Czech Republic, 2015. IUGG-0620.

A20. *Ильин Н.В., Дементьева С.О., Мареєв Е.А.* Моделирование и анализ конвективных генераторов с помощью численных моделей высокого разрешения // Материалы 2-ой Всероссийской конференции «Глобальная электрическая цепь». Борок, Россия, 2015. С. 8.

A21. *Дементьева С.О.* Модель электрического динамо в турбулентном пограничном слое // Тезисы докладов XVII Научная школа «Нелинейные Волны – 2016». Нижний Новгород, Россия, 2016. С. 50.

A22. *Demytyeva S., Mareev E.* A Model of the Turbulent Electric Dynamo in Multi-Phase Media // Geophysical Research Abstracts. Vienna, Austria, 2016. V. 18. EGU2016-875.

A23. *Dementyeva S., Ilin N., Shatalina M., Mareev E.* Forecasting of Real Thunderstorms based on Electric Parameters Calculations in Numerical Weather Prediction Models // Geophysical Research Abstracts. Vienna, Austria, 2016. V. 18. EGU2016-855.

A24. *Дементьева С.О.* Прогноз реальных грозовых событий, основанный на расчете электрических параметров в численных моделях прогноза погоды // 21-ая Нижегородская сессия молодых ученых. Естественные и математические науки: материалы докладов. Нижний Новгород, Россия, 2016. С. 15–16.

A25. *Дементьева С.О.* Прогнозирование грозовых событий в численных мезомасштабных моделях // 20-ая Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы». Нижний Новгород, Россия, 2016. С. 30.

A26. *Дементьева С.О.* Моделирование конвективных событий с учетом влияния турбулентности на электризацию грозовых облаков // 22-ая Нижегородская сессия молодых ученых. Естественные и математические науки: материалы докладов. Нижний Новгород, Россия, 2017. С. 20–22.

A27. *Дементьева С.О., Мареев Е.А.* Динамика токов зарядки в грозовом облаке и их учет в численном прогнозе реальных конвективных событий // Тезисы докладов 21-ой Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы». Борок, Россия, 2017. С. 68–69.

A28. *Дементьева С.О.* Влияние турбулентности на электрические процессы в конвективных облаках // Материалы 3-ей Всероссийской конференции «Глобальная электрическая цепь». Борок, Россия, 2017. С. 40–41.

A29. *Дементьева С.О.* О роли турбулентности при электризации в дисперсных многофазных средах // Тезисы докладов XVIII Научной школы «Нелинейные Волны – 2018». Нижний Новгород, Россия, 2018. С. 39–40.

A30. *Дементьева С.О., Мареев Е.А.* Моделирование электрических процессов в грозовых облаках с учетом турбулентных эффектов // Тезисы докладов 22-ой Международной школы-конференции молодых учёных "Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы" (САТЭП-2018). Майкоп, Россия, 2018. С. 87.

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение	4
Глава 1. Описание процессов электризации в конвективных системах ..	18
1.1. Обзор экспериментальных исследований пространственного распределения заряда в конвективных системах	18
1.2. Механизмы генерации и разделения заряда в нижней атмосфере	20
1.3. Процессы установления электрического поля и заряда в облаке	26
1.4. Об учёте процессов электризации в численных моделях	33
Глава 2. Влияние турбулентности на процессы коллективной зарядки ..	37
2.1. Учёт турбулентности в современных моделях электризации	37
2.2. Формулировка задачи и основные уравнения	39
2.2.1. Описание электрического поля	40
2.2.2. Описание тока зарядки	41
2.2.3. Описание электрического заряда	43
2.2.4. Уравнения движения и представление турбулентности	43
2.3. Процессы зарядки при различных механизмах разделения заряда	45
2.3.1. Индукционный механизм	46
2.3.2. Безындукционный механизм	48
2.4. Процессы зарядки в турбулентных многокомпонентных слабопроводящих средах	51
2.4.1. Конвективное облако	51
2.4.2. Снежная буря	61
2.4.3. Пылевая буря	64
Глава 3. Представление электрических процессов в численных мезомасштабных моделях	66
3.1. О значимости развития численных моделей коллективной зарядки ..	66
3.2. Краткое описание численной мезомасштабной модели WRF	68
3.3. Параметризация электрических процессов в атмосфере	72
3.4. Алгоритм косвенного отбора грозовых событий	77
3.5. Учёт турбулентности в параметризации электрических процессов ..	80
3.6. Алгоритм прогноза молниевой активности с применением параметризации электрических процессов	81
Глава 4. Прогноз молниевой активности и моделирование грозовых событий	83
4.1. О необходимости прогноза грозовых событий	83
4.2. Прогноз индексным методом	84
4.2.1. Индекс молниевой активности	85
4.3. Моделирование тестовых примеров грозовых ячеек	88
4.3.1. Расчёт индекса молниевой активности LPI	88
4.3.2. Расчёт электрических параметров	90
4.4. Моделирование реальных грозовых событий на территории Нижегородской области	93

4.4.1. Расчёт электрических параметров грозовых событий с использованием базовой параметризации электрических процессов.....	96
4.4.2. Апробация и калибровка алгоритма косвенного отбора грозовых событий	112
4.4.3. Валидация по данным сети WWLLN	114
4.4.4. Учёт влияния турбулентности на процессы электризации в грозовом облаке	116
Заключение.....	126
Список литературы.....	128

Дементьева Светлана Олеговна

**ПРОЦЕССЫ КОЛЛЕКТИВНОЙ ЗАРЯДКИ
В НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЕ
И ИХ ОПИСАНИЕ
В ЧИСЛЕННЫХ МЕЗОМАСШТАБНЫХ МОДЕЛЯХ**

Автореферат

Подписано к печати 17.06.2019.
Формат 60 × 90 $\frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 1,75.
Тираж 100 экз. Заказ № 42 (2019).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН?
603950, г. Н. Новгород, ул. Ульянова, 46