

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»
(ИПФ РАН)

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)**

**«Процессы коллективной зарядки в нижней атмосфере и их описание в численных
мезомасштабных моделях»**

Аспирант: Дементьева Светлана Олеговна

(подпись аспиранта)

**Научный руководитель:
Мареев Евгений Анатольевич, д.ф.-м.н.,
член-корр. РАН, зав. отделением Геофизических
исследований ИПФ РАН**

(подпись научного руководителя)

Направление подготовки:
03.06.01 Физика и астрономия

Направленность (профиль) подготовки:
01.04.03 Радиофизика

Форма обучения: очная

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

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 нерешенными: роль различных физических процессов в облаках разных типов и на разных этапах развития, роль различных механизмов в возникновении молниевых вспышек, исследование стадии инициации молнии, учет молниевой активности в оперативном мониторинге, формирование электрического поля в турбулентной среде.

Многие атмосферные явления, в том числе грозы, пылевые бури, снежные метели, сопровождаются переносом электрического заряда соударяющимися макроскопическими частицами (например, гидрометеорами или частицами песка и пыли) 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 посвящен задачам, близким к указанной. Так, например, в работах [1, 2] рассматривалось влияние турбулентности на мелкомасштабные флуктуации электрического поля в пограничном слое атмосферы, при этом турбулентная диффузия пространственного заряда, включенная в некоторые численные модели, обычно 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 учетом 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. Модель, содержащая неполное или неверное описание электрических процессов, не сможет точно воспроизводить наблюдаемые грозовые явления. В работах [7] собраны основные характерные параметры грозы, которым должны удовлетворять модели грозовой электризации. Одним из наиболее распространенных 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 них 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 соотношения 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 твердой фазе [11–13], однако, такой подход не может претендовать на высокую точность, и, следовательно, для совершенствования методов прогнозирования молниевых вспышек необходим прямой расчет электрических параметров. Существует ряд локальных моделей, удовлетворяющих перечисленным ранее характеристикам грозы. Например, модель Straka Atmospheric Model (SAM) [14–17], которая описывает процессы, происходящие на масштабах от нескольких метров до нескольких сотен метров, включающая несколько схем зарядки. Однако локальные модели 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, основанную на работах [4, 5, 18]. Первый опыт применения данной параметризации описан 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 параметризация, разработанная автором данной работы, были начаты одновременно и независимо.

Наряду с качественным прогнозом молниевой активности, существует и другая причина необходимости численного моделирования электрических параметров грозовых облаков. Натурные измерения электрических параметров грозовых облаков довольно сложны и дороги. Наиболее распространенным видом экспериментальных исследований в этой области являются баллонные наблюдения, при которых в воздух поднимается аэростат с закрепленными измерительными приборами. Зачастую аэростаты теряются, либо становятся непригодными к последующим запускам. Другим видом экспериментальных исследований являются самолетные наблюдения, но внутри грозовых облаков они не применяются из соображений безопасности.

Экспериментальные исследования воздействия турбулентности на процессы электризации на данный момент также не являются полными и требуют дальнейшего проведения 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 заряда, однако измерения электрического поля в данных экспериментах не проводились. Баллонные измерения, описанные, например, в работах [22–24], наоборот содержат

подробную информацию об электрических параметрах грозовых облаков, но опускают измерения характеристик турбулентности. В связи с изложенными трудностями проведения экспериментальных исследований, одним из наиболее перспективных инструментов становится численное моделирование возникающих эффектов, которое также может быть осуществлено в рамках мезомасштабных моделей, дополненных параметризациями электрических процессов.

Цели и задачи работы

Целью данной работы является теоретическое исследование процессов коллективной зарядки в нижней атмосфере и численное описание данных процессов в мезомасштабных моделях прогноза состояния атмосферы. Для достижения этой 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 исследование влияния турбулентности на процессы коллективной зарядки, проведение оценок вклада турбулентности в процессы электризации многокомпонентных турбулентных сред;
3. Разработка параметризаций процессов коллективной зарядки в грозовых облаках для численных мезомасштабных моделей, создание алгоритмов, способствующих минимизации времени расчетов (необходимых в первую очередь в задачах 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 полученных при моделировании с использованием мезомасштабной численной модели, дополненной разработанной параметризацией, пространственных распределений электрических параметров грозовых облаков, анализ точности прогноза электрических процессов, сравнение с другими методиками прогноза молниевой активности.

Научная новизна работы

В рамках данной работы были получены некоторые новые результаты. Отметим основные из них:

1. Получено аналитическое решение 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 исследование влияния турбулентности на процессы коллективной зарядки. Выявлены условия, при которых наблюдается положительный вклад в процессы коллективной зарядки облаков. Выполнены оценки вклада турбулентности в процессы электризации грозовых облаков, снежных облаков и облаков пыли.
 3. Предложен метод прогноза молниевой активности, основанный на прямом расчете электрических параметров атмосферы, который позволил перейти на качественно новый уровень в вопросах 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 работы

Описание процессов грозовой электризации является сложной и важной задачей как с точки зрения теории, так и с точки зрения численного моделирования. Модель, содержащая неполное или неверное описание электрических процессов, не сможет точно воспроизводить наблюдаемые грозовые явления. Задача параметризации электрических процессов, наблюдаемых в мезомасштабных атмосферных явлениях, для прогноза с использованием мезомасштабных моделей является достаточно сложной, так как требует оптимального соотношения полноты описания электрических процессов и возможности высокоскоростных вычислений. Отметим, что современные модели до сих пор не содержат встроенных параметризаций электрических процессов.

Детальное исследование воздействия турбулентности на электризацию грозовых облаков и численное моделирование данных явлений будут полезны для понимания физических механизмов, играющих первостепенную роль в грозовой электродинамике. Численная реализация влияния турбулентности на электрические процессы позволит существенно

улучшить качество моделирования электрических процессов в конвективных облаках и за счет 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 в многокомпонентных турбулентных средах может быть использован для сред, отличных от рассмотренных в данной работе.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Турбулентность играет существенную роль в процессах электризации многокомпонентных сред, вызывая значительный рост крупномасштабного электрического поля. В зависимости от параметров среды турбулентная компонента тока зарядки может достигать значений, близких к значению тока зарядки в той же среде без турбулентности.
2. Разработанные на основе аналитических исследований процессы установления электрического поля и заряда в конвективном облаке параметризации электрических процессов могут применяться совместно с мезомасштабной моделью WRF в задачах моделирования и прогноза грозовых событий.
3. Метод прогноза грозовых событий, основанный на анализе электрических параметров, полученных с помощью разработанных параметризаций электрических процессов и мезомасштабной модели WRF, позволяет предсказывать возникновение грозовых очагов с существенно большей точностью, нежели это возможно с использованием косвенных метеорологических индексов.
4. Результаты моделирования электрических параметров реальных грозовых событий с учетом влияния турбулентных эффектов на процессы электризации зависят от интенсивности грозового события и уровня турбулентности 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 деятельности и менее интенсивном турбулентном перемешивании кластер грозовых ячеек может разделяться на одиночные ячейки.

Методы исследования и степень достоверности результатов

Для решения задач, поставленных в рамках данной работы, применяются методы аналитического решения задач электродинамики, а также методы численного моделирования

процессов коллективной зарядки в нижней атмосфере. Для физического обоснования разработанной параметризации выполняется теоретическое описание процессов электризации в конвективных системах, в том числе с учетом турбулентности, в ходе которого выявляются главные физические механизмы электризации облаков, которые необходимо включить 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 Weather Research and Forecasting (WRF). Моделирование тестового грозового облака проводилось с помощью встроенного 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, развернутой на территории Нижегородской области), данным гронопеленгационных 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.

Публикации и апробация результатов

Данная работа выполнена в Институте прикладной физики РАН. Результаты работы опубликованы в 5 статьях в ведущих рецензируемых российских и зарубежных журналах [A1-A5], обсуждались на семинарах Института прикладной физики РАН и Гидрометцентра России (2016 г.), докладывались на следующих российских и международных конференциях [A6-A27]:

- I International Scientific Conference “Science of the Future”, Saint Petersburg, Russia, 17-20 September 2014;
- 18-ая Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы», Борок, 29 сентября – 3 октября 2014;
- 19-ая Международная школа-конференция молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы», Туапсе, 25-29 мая 2015;
- XX Нижегородская сессия молодых ученых, Нижний Новгород, 19-22 мая 2015;
- 26th General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG-2015), Prague, Czech Republic, 22 June - 2 July 2015;
- XVII Научная школа «НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ – 2016», Нижний Новгород, 27 февраля - 4 марта 2016;

- European Geosciences Union General Assembly 2016, Vienna, Austria, 17-22 April 2016;
- XXI Нижегородская сессия молодых ученых, Нижний Новгород, 17-20 мая 2016;
- 20-ая Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы», Нижний Новгород, 24-26 мая 2016;
- International Conference “Frontiers of Nonlinear Physics” (FNP 2016), Nizhny Novgorod - Saint Petersburg, 17-23 July 2016;
- XXII Нижегородская сессия молодых ученых, Нижний Новгород, 17-20 мая 2016;
- 21-ая Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы», Борок, 6-10 июня 2017;
- 3-я Всероссийская конференция «Глобальная электрическая цепь», Борок, 25-29 сентября 2017.
- XVIII Научная школа «НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ – 2018», Нижний Новгород, 26 февраля - 4 марта 2018;
- XVI International Conference on Atmospheric Electricity (ICAE 2018), Nara, Japan, 17-22 June 2018.

Личный вклад автора

Все изложенные результаты получены лично автором диссертации или при его непосредственном участии. При подготовке изложенных результатов к публикации совместно с соавторами вклад автора диссертации был определяющим.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Список литературы состоит из 162 наименований, включая 27 публикаций автора по теме диссертации. Общий объём диссертации составляет 142 страницы и включает 55 рисунков и 1 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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 упрощенной модели, приведенной в работе [25]. 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 отрицательно (т.е. грозовое облако имеет дипольную структуру), были проведены в 20-ые годы 20-го века с использованием баллонных измерений [26]. В более поздних экспериментах [27] была обнаружена дополнительная область положительного заряда вблизи нижней границы облака, что поменяло представления о зарядовой структуре облака с дипольного на трёхполосное. Более современные исследования [28] показали, что реальная структура грозовых облаков ещё сложнее, однако при моделировании конвективных систем 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 [29, 30]. 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 счет различия физико-химических свойств соударяющихся частиц. В современном представлении безындукционная зарядка соударяющихся льдинок и снежной крупы в присутствии мелких водяных капель соответствует является доминантным механизмом разделения заряда 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 в грозовых облаках на основе упрощенной одномерной модели, описанной в работе [25]. Данная модель построена на уравнение эволюции электрического заряда на крупных частицах

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \nu(Q_0 + \beta E_z) - (\nu\gamma + \gamma_0)Q, \quad (1)$$

с помощью которой получены аналитические значения для электрического поля и заряда на больших частицах, где Q_0 - заряд, возникающий на большой частице за соударение при безындукционном механизме зарядки, V - частота столкновений одной большой частицы со всеми маленькими, β - эффективность индукционных процессов, E_z - вертикальная компонента электрического поля, $(\nu\gamma + \gamma_0)$ описывает потери заряда на больших частицах, $\psi \approx \pi^2/2$ - коэффициент эффективности индукционных процессов..

В **разделе 1.4** рассматриваются возможные подходы к прогнозу атмосферных явлений, в которых наблюдается коллективная зарядка частиц, в численных мезомасштабных моделях. Приводятся характерные параметры гроз, которым должна удовлетворять модель электризации. Одним из наиболее распространенных методов прогноза локальных атмосферных явлений является численное моделирование, базирующееся на применении мезомасштабных моделей прогноза погоды. В данной работе численное моделирование и прогноз основаны на использовании модели WRF. При этом следует отметить, что современные модели до сих пор не содержат встроенных параметризаций электрических процессов. Также в данном разделе приведено описание параметризаций микрофизики модели WRF, которые будут исследованы в Главе 4.

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** формулируются задача и основные уравнения, необходимые для описания эволюции электрического поля, тока зарядки, электрического заряда, а также уравнения движения частиц 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. Также в данном разделе приводятся представления зарядов на больших и маленьких частицах и относительной скорости частиц в предположении однородной стационарной Колмогоровской турбулентности.

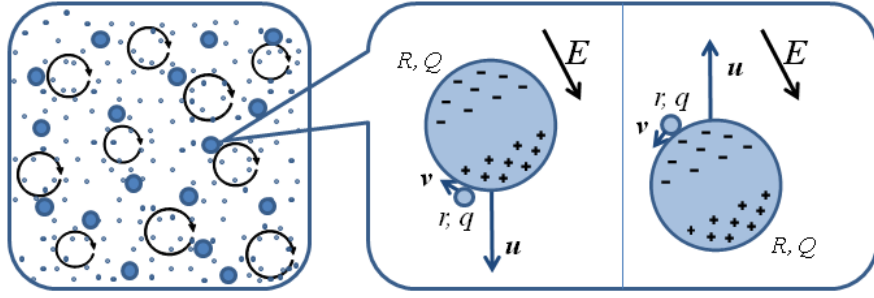


Рисунок 1 - Рассматриваемая система. Крупный масштаб: два типа соударяющихся частиц в турбулентной среде (турбулентные вихри показаны схематически); мелкий масштаб: маленькая частица, сталкивающаяся с большой частицей во внешнем электрическом поле

Раздел 2.3 посвящен анализу особенностей процессов зарядки, возникающих ввиду турбулентного перемешивания, при индукционном и безындукционном 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

$$J_{ind} = \frac{\pi^2}{3} \frac{r^2 S n}{v_r} E \cdot N U_z^2 = A_0 \frac{v_i}{v_r} E \cdot U_z^2, \quad (2)$$

$$J''_{non-ind\ const} = -\zeta \frac{v_i}{v_r} \langle U_1^2 \rangle = -\zeta \frac{v_i}{v_r} b \left(1 - \frac{v_1}{v_2} \right)^2 (\varepsilon / k_0)^{2/3}, \quad (3)$$

$$J''_{non-ind\ non-const} = -\zeta \left(p + \frac{v_i}{v_r} \right) \langle U_1^2 \rangle = -\zeta \left(p + \frac{v_i}{v_r} \right) b \left(1 - \frac{v_1}{v_2} \right)^2 (\varepsilon / k_0)^{2/3}, \quad (4)$$

где J_{ind} – индукционный ток зарядки, $J''_{non-ind\ const}$ – флуктуационная компонента безындукционного тока зарядки при постоянном значении переносимого частицами заряда, $J''_{non-ind\ non-const}$ – флуктуационная компонента безындукционного тока зарядки при зависимости переносимого заряда от параметров среды. Описание других параметров представлено в полном тексте настоящей работы.

В **разделе 2.4** приведенный теоретически подход применяется к процессам коллективной зарядки в конвективном облаке, снежной буре и пылевой буре, представляющих естественные турбулентные многокомпонентные слабопроводящие среды. Для конвективного облака при индукционном механизме разделения зарядов существует диапазон параметров, при которых электрическое поле растет экспоненциально в присутствии турбулентности. При безындукционной зарядке 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 в огромных кучево-дождевых облаках учет интенсивной турбулентности является обязательным.

Для индукционного механизма разделения заряда в снежных бурях существует диапазон параметров снежной бури, при котором наблюдается экспоненциальный во времени рост электрического поля за счет турбулентности. Для безындукционного механизма зарядки имеет место линейный во времени рост электрического поля за счет 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. На рисунке 2 жёлтым цветом выделены области параметров конвективных облаков и снежных бурь, в которых наблюдается экспоненциальный рост электрического поля, вызванный турбулентным перемешиванием.

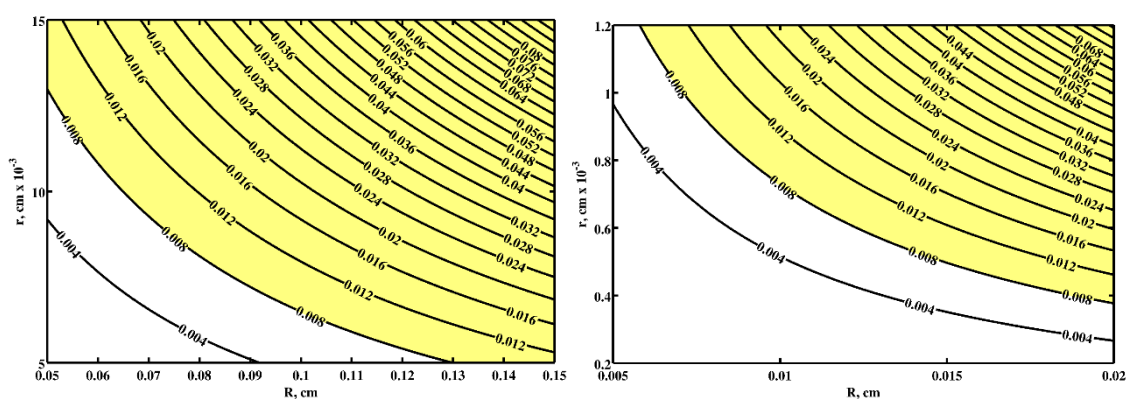


Рисунок 2 - Область параметров конвективного облака (слева) и снежной бури (справа), в которой при индукционном механизме разделения заряда возникает экспоненциальный рост электрического поля, вызванный турбулентным перемешиванием (выделены желтым)

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

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 расчете электрических параметров грозовых облаков.

В **разделе 3.1** приводятся задачи, для решения которых необходимо развивать численные модели электризации, а также современное состояние данной проблемы на мировом уровне.

Раздел 3.2 посвящен 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 в данной параметризации 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 путем решения обратного уравнения Пуассона. Основной задачей численных методов стала разработка метода быстрого решения обратного уравнения Пуассона, который был реализован на языке разреженных матриц в программном пакете Matlab.

В **разделе 3.3** разбирается проблема заблаговременности численных прогнозов. Для частичного решения данной проблемы проведена разработка вспомогательного алгоритма отбора грозовых событий по косвенным параметрам, который способствует уменьшению времени численного счета. Косвенными параметрами для экспресс-анализа результатов работы модели WRF были приняты радиолокационная отражаемость 55 дБ и выше, горизонтальный размер облака 50 км² и более, продолжительность грозового события 20 минут и более.

В **разделе 3.4** выполняется внедрение теоретических результатов, полученных в Главе 2, в параметризацию электрических процессов. На основании оценок, проведенных в рамках аналитического исследования влияния турбулентности на электрические процессы, на этапе восстановления распределения электрических зарядов в конвективном облаке для областей с высокой радиолокационной отражаемостью задается повышенный уровень электризации.

В **разделе 3.5** просуммированы все разработки, описанные в данной Главе 3, и приведена структура общего алгоритма прогноза молниевой активности на основе разработанной параметризации электрических процессов и численной модели WRF.

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

В **разделе 4.1** рассматривается вопрос необходимости точного прогноза грозовых событий, являющихся в некоторых классификациях опасными явлениями погоды.

В **разделе 4.2** демонстрируется метод прогноз молниевой активности с применением косвенных индексов. Рассмотрены индексы K, CAPE, CPTP, а также детально рассмотрен индекс LPI, 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, необходимое для верификации разработанных и описанных в Главе 3 параметризаций и алгоритмов. На примере

этой ячейки проводится расчет индекса LPI и электрических параметров (разности потенциалов, электрического поля). Результаты расчета LPI продемонстрировали недостатки (неуниверсальность, недооценивание опасных районов) индексного подхода по сравнению с прямым расчетом электрических параметров. Для анализа полученных результатов проводится сравнение с данными экспериментальных работ.

Раздел 4.4 посвящен 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. В качестве основных объектов исследования были выбраны разность потенциалов между электроактивной зоной облака и землей, а также вертикальный профиль электрического поля. Моделирование и прогноз электрических параметров грозовых событий с использованием базовой (без учета турбулентности) и модифицированной (с учетом турбулентных эффектов) параметризаций электрических процессов продемонстрировали хорошую корреляцию с наблюдаемыми параметрами. Для сравнительного анализа, который проводился для оценки качества прогноза, использовались данными 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 расчетов грозовых событий на территории Нижегородской области при помощи модели WRF оказалась равной 55 дБ, в то время как меньшие значения, которые встречаются в литературе по анализу радарных данных, приводили к некорректному выделению гроз из большого массива данных.

Одной из важных задач настоящей работы является интеграция турбулентных и электрических параметров в мезомасштабных моделях. Проведенные с учетом 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 напряжений, 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 счет турбулентного воздействия носит нелинейный характер. Характерные картины радиолокационной отражаемости, разности

потенциалов и электрического поля с учетом и без учета турбулентности, полученные для реальной грозы на территории Нижегородской области, изображены на рисунке 3.

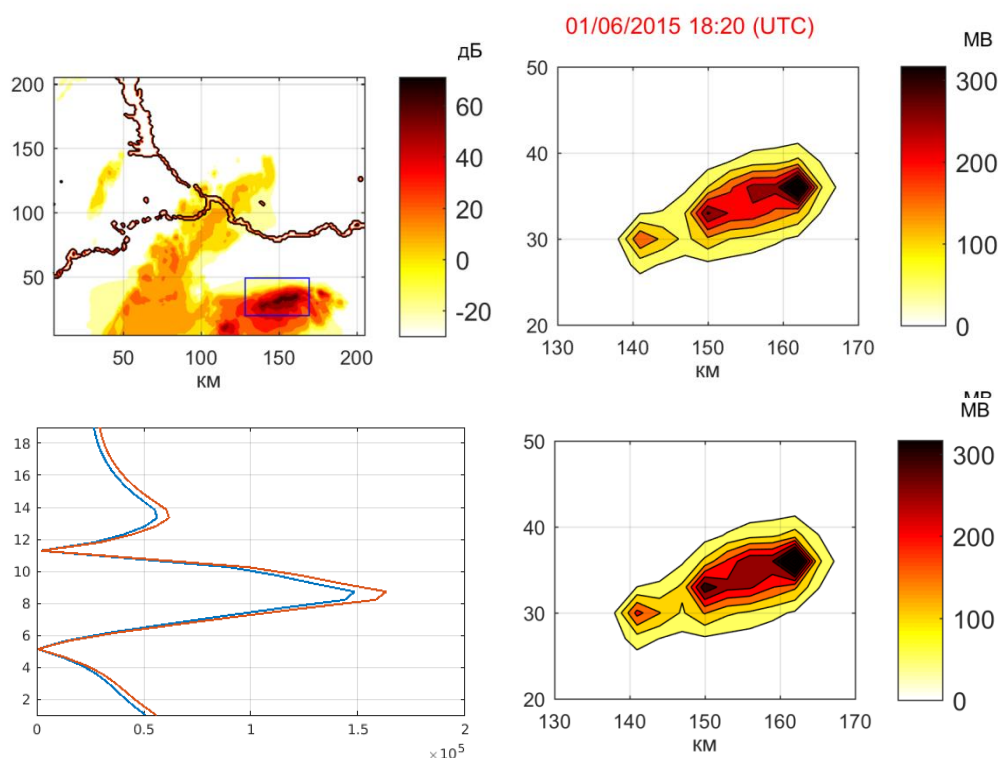


Рисунок 3 – Результаты моделирования грозы на территории Нижегородской области: (слева) - максимальная радиолокационная отражаемость и вертикальный профиль электрического поля (синяя линия – без учета турбулентности; оранжевая линия – с учетом турбулентности); (справа) - разность потенциалов между электроактивной зоной облака и землей, полученная при моделировании с помощью разработанной параметризации электрических параметров без учета турбулентности (сверху) и с учетом турбулентности (снизу).

В **Заключении** перечислены основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Получено аналитическое решение 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 исследование влияния турбулентности на процессы коллективной зарядки. Выявлены условия, при которых наблюдается положительный вклад в процессы коллективной зарядки облаков. Выполнены оценки вклада турбулентности в процессы электризации грозовых облаков, снежных облаков и облаков пыли.

3. Разработан метод оценки роли турбулентности в двухкомпонентных турбулентных средах, который может быть применен к различным средам, в том числе отличным от рассмотренных в данной работе.
4. Предложен метод прогноза молниевой активности, основанный на прямом расчете электрических параметров атмосферы, который позволил перейти на качественно новый уровень в вопросах прогнозирования грозовых событий.
5. Разработаны параметризации электрических процессов в грозовых облаках, подходящие для работы с численными мезомасштабными моделями. Базовая параметризация описывает безындукционную зарядку твердых гидрометеоров, модифицированная параметризация также учитывает эффекты, связанные с воздействием турбулентности на процессы электризации
6. 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 превзошли по точности современные индексные методы.
7. Моделирование грозовых 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, что до сих пор представляет трудности для экспериментального изучения в виду необходимости измерения большого количества параметров (электрического поля, зарядов, проводимости, скорости диссипации турбулентной энергии и др.).

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

A2. Мареев Е.А. Российские исследования атмосферного электричества в 2011–2014 гг. / Мареев Е.А., Стасенко В.Н., Булатов А.А., Дементьева С.О., Евтушенко А.А., Ильин Н.В., Кутерин Ф.А., Слюняев Н.Н., Шаталина М.В. // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана – 2016. – Т. 52 – № 2 – С.175–186.

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

- A4. Mareev E.A. The role of turbulence in thunderstorm, snowstorm, and dust storm electrification / Mareev E.A., Demytyeva S.O. // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* – 2017. – V. 122 – № 13 – P.6976–6988.
- A5. Дементьева С.О. О вкладе турбулентности в электризацию грозовых облаков / Дементьева С.О., Мареев Е.А. // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана* – 2018. – Т. 54 – № 1 – С.28–35.
- A6. Дементьева С.О. Расчет электрических параметров грозового облака в численных моделях высокого разрешения // XVIII Всероссийская школа-конференция молодых учёных «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы» – 2014. – 52–53с.
- A7. Мареев Е.А. Прогноз молниевой активности на основе прямых расчетов электрических полей в мезомасштабных моделях // VII Всероссийский метеорологический съезд – 2014. – 24–25с.
- A8. Дементьева С.О. О роли турбулентности при электризации в дисперсных многофазных средах // XVIII Научной школы «Нелинейные Волны – 2018» – 2018. – 39–40с.
- A9. Demytyeva S.O. Prediction of lightning activity based on direct electric field calculations // International Symposium "Topical Problems of Nonlinear Wave Physics" (NWP-2014) – 2014. – 158–159p.
- A10. Mareev E.A. Lightning activity in the changing climate: aerosol significance // Proceedings of the 1st Pan-Eurasian Experiment (PEEX) Conference and 5th PEEX Meeting – 2015. – 291–292p.
- A11. Bulatov A.A. Nowcasting System for Lightning/thunderstorms in the Upper Volga Region of Russia // 24th International Lightning Detection Conference & 6th International Lightning Meteorology Conference – 2016.
- A12. Demytyeva S.O. Modeling of Electric Parameters of Real Thunderstorms in Numerical Weather Prediction Models // VI International Conference “Frontiers of Nonlinear Physics” (FNP 2016) – 2016. – 231–232p.
- A13. Demytyeva S.O. Calculation of Lightning Potential Index (LPI) for different microphysics parameterizations based on WRF model and its comparative analysis with electrical parameters // 15th International Conference on Atmospheric Electricity (ICAE 2014) – 2014. – P-04-05.
- A14. Demytyeva S.O. Development of new tools for lightning activity forecast using numerical weather prediction models // I International Scientific Conference “Science of the Future” – 2014.
- A15. Demytyeva S.O. Calculations of electric field in numerical weather prediction models Prague, Czech Republic, – 2015. – IUGG-0620с.
- A16. Дементьева С.О. Модель электрического динамо в турбулентной среде // XVII Научная школа «Нелинейные Волны – 2016» – 2015. – 110с.
- A17. Demytyeva S. Forecasting of Real Thunderstorms based on Electric Parameters Calculations in Numerical Weather Prediction Models / Demytyeva S., Ilin N., Shatalina M., Mareev E. // *Geophysical*

Research Abstracts – 2016. – V. 18 – EGU2016-855.

A18. Dementyeva S. A Model of the Turbulent Electric Dynamo in Multi-Phase Media / Dementyeva S., Mareev E. // Geophysical Research Abstracts – 2016. – V. 18 – EGU2016-875.

A19. Dementyeva S. Effects of turbulence on thunderstorm electrification // XVI International Conference on Atmospheric Electricity (ICAE2018) – 2018.

A20. Дементьева С.О. О динамике разделения зарядов в грозовых облаках // 20-ая Нижегородская сессия молодых ученых. Естественные и математические науки – 2015. – 13–14с.

A21. Ильин Н.В. Моделирование и анализ конвективных генераторов с помощью численных моделей высокого разрешения // 2-ая Всероссийская конференция «Глобальная электрическая цепь» – 2015. – 8с.

A22. Дементьева С.О. Модель электрического динамо в турбулентном пограничном слое // 19-ая Международная школа-конференция молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы» – 2016. – 50с.

A23. 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 – 2016. – 15–16с.

A24. Дементьева С.О. Прогнозирование грозовых событий в численных мезомасштабных моделях // 20-ая Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы» – 2016. – 30с.

A25. Дементьева С.О. Моделирование конвективных событий с учетом влияния турбулентности на электризацию грозовых облаков // 22-ая Нижегородская сессия молодых ученых. Естественные и математические науки – 2017. – 20–22с.

A26. Дементьева С.О. Динамика токов зарядки в грозовом облаке и их учет в численном прогнозе реальных конвективных событий // 21-ая Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы» – 2017. – 68–69с.

A27. Дементьева С.О. Влияние турбулентности на электрические процессы в конвективных облаках // 3-я Всероссийская конференция «Глобальная электрическая цепь» – 2017. – 40–41с.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Anisimov S. V. Universal spectra of electric field pulsations in the atmosphere / Anisimov S. V., Mareev E.A., Shikhova N.M., Dmitriev E.M. // Geophysical Research Letters – 2002. – V. 29 – № 24 – P.70-1-70-4.

2. Anisimov S.V. On the electro-dynamical characteristics of the fog / Anisimov S.V., Mareev E.A., Shikhova N.M., Sorokin A.E., Dmitriev E.M. // Atmospheric Research – 2005. – V. 76 – № 1-4 – P.16-28.

3. Kuettner J.P. Thunderstorm Electrification—Inductive or Non-Inductive? / Kuettner J.P., Sartor J.D., Levin Z. // *Journal of the Atmospheric Sciences* – 1981. – V. 38 – № 11 – P.2470–2484.
4. Mansell E.R. Charge structure and lightning sensitivity in a simulated multicell thunderstorm / Mansell E.R. // *Journal of Geophysical Research* – 2005. – V. 110 – № D12 –D12101.
5. Mansell E.R. Aerosol Effects on Simulated Storm Electrification and Precipitation in a Two-Moment Bulk Microphysics Model / Mansell E.R., Ziegler C.L. // *Journal of the Atmospheric Sciences* – 2013. – V. 70 – № 7 – P.2032–2050.
6. Zhao P. The effects of aerosol on development of thunderstorm electrification: A numerical study / Zhao P., Yin Y., Xiao H. // *Atmospheric Research* – 2015. – V. 153 – № 398 – P.376–391.
7. Mason B.J. On the generation of charge associated with grauel formation in thunderstorms / Mason B.J. // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* – 1953. – V. 79 – P.501–509.
8. Pielke R.A. *Mesoscale Meteorological Modeling* / R. A. Pielke – Orlando: Academic Press, 1984.– 622p.
9. Пененко В.В. Модели и методы для задач охраны окружающей среды / В. В. Пененко, А. Е. Алюян – Новосибирск: Наука, 1985.– 224с.
10. Старченко А.В. Численное исследование локальных атмосферных процессов / Старченко А.В. // *Вычислительные технологии* – 2005. – Т. 10 – № 553 – С.81–89.
11. Petersen W.A. On the relationship between cloud-to-ground lightning and convective rainfall / Petersen W.A., Rutledge S.A. // *Journal of Geophysical Research* – 1998. – V. 103 – № D12 – P.14025–14040.
12. Petersen W.A. TRMM observations of the global relationship between ice water content and lightning / Petersen W.A., Christian H.J., Rutledge S.A. // *Geophysical Research Letters* – 2005. – V. 32 – № 14.
13. Cecil D.J. Three Years of TRMM Precipitation Features. Part I: Radar, Radiometric, and Lightning Characteristics / Cecil D.J., Goodman S.J., Boccippio D.J., Zipser E.J., Nesbitt S.W. // *Monthly Weather Review* – 2005. – V. 133 – P.543–566.
14. Straka J.M. Hail growth in a highly glaciated central High Plains multi-cellular hailstorm / Straka J.M. – 1989.
15. Straka J.M. Numerical simulations of microburst-producing storms: some results from storms observed during COHMEX / Straka J.M., Anderson J.R. // *Journal of Atmospheric Sciences* – 1993. – V. 50 – P.1329–1348.
16. Mansell E.R. Simulated three-dimensional branched lightning in a numerical thunderstorm model / Mansell E.R., MacGorman D.R., Ziegler C.L., Straka J.M. // *Journal of Geophysical Research* – 2002. – V. 107 – № D9 – P.4075.
17. Straka J.M. A bulk microphysics parameterization with multiple ice precipitation categories / Straka J.M., Mansell E.R. // *Journal of Applied Meteorology* – 2005. – V. 44 – P.445–466.

18. Mansell E.R. Simulated Electrification of a Small Thunderstorm with Two-Moment Bulk Microphysics / Mansell E.R., Ziegler C.L., Bruning E.C. // *Journal of the Atmospheric Sciences* – 2010. – V. 67 – № 1 – P.171–194.
19. Fierro A.O. 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 / Fierro A.O., Mansell E.R., MacGorman D.R., Ziegler C.L. // *Monthly Weather Review* – 2013. – V. 141 – P.2390–2415.
20. Marlton G.J. Note: A balloon-borne accelerometer technique for measuring atmospheric turbulence / Marlton G.J., Giles Harrison R., Nicoll K.A., Williams P.D. // *Review of Scientific Instruments* – 2015. – V. 86 – № 1 – P.016109.
21. Harrison R.G. On the microphysical effects of observed cloud edge charging / Harrison R.G., Nicoll K.A., Ambaum M.H.P. // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* – 2015. – V. 141 – № 692 – P.2690–2699.
22. Bateman M.G. Precipitation charge and size measurements in the stratiform region of two mesoscale convective systems / Bateman M.G., Rust W.D., Smull B.F., Marshall T.C. // *Journal of Geophysical Research* – 1995. – V. 100 – № D8 – P.16341.
23. Marshall T.C. Electrical structure in two thunderstorm anvil clouds / Marshall T.C., Rust W.D., Winn W.P., Gilbert K.E. // *Journal of Geophysical Research* – 1989. – V. 94 – № D2 – P.2171.
24. Stolzenburg M. Initial electrification to the first lightning flash in New Mexico thunderstorms / Stolzenburg M., Marshall T.C., Krehbiel P.R. // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* – 2015. – V. 120 – № 21 – P.11,253–11,276.
25. Volland H. *Atmospheric Electrodynamics* / H. Volland – Berlin: Springer, 1985.– 221p.
26. Wilson C.T.R. On some determinations of the sign and magnitude of electric discharges in lightning flashes / Wilson C.T.R. // *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* – 1916. – V. A92 – P.555–574.
27. Simpson G. The Distribution of Electricity in Thunderclouds / Simpson G., Scrase F.J. // *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* – 1937. – V. 161 – № 906 – P.309–352.
28. Stolzenburg M. Charged precipitation and electric field in two thunderstorms / Stolzenburg M., Marshall T.C. // *Journal of Geophysical Research* – 1998. – V. 103 – № D16 – P.19777–19790.
29. Elster J. Ueber die Electricitätsentwicklung bei der Regenbildung / Elster J., Geitel H. // *Annalen der Physik* – 1885. – V. 261 – № 5 – P.121–131.
30. Sohncke L. *Der Ursprung der Gewitter-Elektrizität und der gewöhnlichen Elektrizität der Atmosphäre* / L. Sohncke – Jena: Verlag Fisher, 1885.– 202p.