

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Дементьевой Светланы Олеговны «Процессы коллективной зарядки в нижней атмосфере и их описание в численных мезомасштабных моделях», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 — радиофизика.

Диссертационная работа Дементьевой С.О. посвящена теоретическим исследованиям и численному моделированию процессов зарядки гидрометеоров и аэрозольных частиц с учетом нелинейных эффектов, вызванных турбулентными флуктуациями плотности и скорости движения среды. В работе решаются задачи аналитического описания процессов формирования облачного заряда и создаваемого им электрического поля, включая влияние турбулентности на коллективную зарядку в грозовых облаках, пылевых бурях и снежных метелях, разработка физических параметризаций и численных моделей для встраивания в мезомасштабные модели циркуляции атмосферы, а также исследование методов прогноза молниевой активности и проверка разработанных параметризаций.

Целью диссертационной работы являлась разработка новых подходов к прогнозированию молниевой активности на основе выявления наиболее важных физических механизмов, ответственных за процессы коллективной зарядки, и их параметризации для использования в моделях численного прогноза. Для этого было проведено теоретическое исследование индукционного и безындукционного механизмов генерации и разделения заряда в тропосфере. Было показано, что турбулентные флуктуации могут приводить к систематическим эффектам в процессах коллективной зарядки. Были выбраны важнейшие физические механизмы и необходимые приближения, позволяющие построить параметризацию электрических процессов в атмосфере. Была разработана методика определения распределения электрического заряда по пространственно-временному распределению массовых долей гидрометеоров. Были выработаны критерии отбора грозовых событий на основе данных модели WRF.

Актуальность диссертационной работы обусловлена важностью задачи описания, моделирования и прогнозирования молниевой активности, которая на настоящий момент еще далека от исчерпывающего решения. Решение этой задачи требует глубокого понимания роли различных физических процессов в развитии различных типов облаков, коллективной электризации и формирования электрического поля в турбулентной среде.

Диссертационная работа представлена на 145 страницах машинописного текста и содержит 52 рисунка и 1 таблицу. Список литературы состоит из 176 наименований, включая 30 ссылок на публикации диссертанта. Диссертация состоит из введения, обзора литературы, четырёх глав, содержащих материал, выносимый на защиту, заключения, содержащего основные результаты и выводы, и списка цитируемых источников.

Во введении достаточно подробно излагаются цели и задачи диссертационной работы и обосновывается их актуальность.

В первой главе приведён обзор экспериментальных исследований процессов электризации в грозовых облаках, эволюции представлений о распределении электрического заряда в грозовых облаках и существующих параметризаций процессов электризации, используемых в мезомасштабных численных моделях циркуляции атмосферы. В частности, наблюдения позволили сделать вывод о том, что реальные грозовые облака обладают многослойной структурой, хотя в моделировании обычно ограничиваются двух- или трех-слойным приближением. Основные механизмы генерации включают в себя индукционный и безындукционный. Индукционный механизм предполагает разделение зарядов при столкновении частиц разного размера, поляризованных во внешнем поле. Безындукционный механизм предполагает разделение зарядов за счет разных физико-химических свойств сталкивающихся частиц. Эти механизмы были предметом многочисленных экспериментальных и теоретических исследований. В частности, для более простого индукционного механизма были получены простые выражения максимально возможного заряда

крупной частицы, падающей в среде более мелких частиц. Однако эта теория приводит к переоценке напряженности поля в грозовом облаке. На данный момент считается, что важнейшую роль играют безындукционные механизмы. В работе дано описание процесса установления электрического заряда в облаке. Для этого используется уравнение баланса заряда при процессах электризации, дополненное уравнениями Максвелла и законом Ома. Показано, что индукционный механизм приводит к неограниченному росту электрического поля. Проанализирована зависимость максимального заряда на частицах при индукционном механизме от относительной скорости крупных и мелких частиц. Далее обсуждаются вопросы численного прогноза грозовых явлений. Поскольку развитие конвективных облаков и грозовые фронты являются мезомасштабными, то для их моделирования подходят именно мезомасштабные прогностические модели. Отмечается, что из современных мезомасштабных моделей лишь WRF можно использовать свободно, и по этой причине для численного моделирования были выбрана именно она.

Вторая глава посвящена рассмотрению влияния турбулентности на процессы коллективной зарядки. Турбулентность как фактор, способствующий процессам коллективной зарядки, ранее в моделях не учитывалась. В некоторых моделях учитывается турбулентный перенос заряда, роль которого в указанных процессах деструктивна. С другой стороны, экспериментальные данные говорят о корреляции роста электрического поля с флуктуациями скорости частиц в потоке. В рассматриваемой работе для изучения влияния турбулентности используется модель среды, содержащей два типа частиц: снежная крупа размером в несколько миллиметров и мелкие льдинки размером до 100 микрон. Также используется модель горизонтального «плоского конденсатора». Анализ задачи начинается с уравнения баланса всех токов: зарядки, проводимости, диффузии и смещения. Для учета влияния турбулентности применяется так называемое двухмасштабное приближение: все пространственные поля представляются как сумма крупномасштабной (детерминированной) и мелкомасштабной (флуктуирующей) компонент. Далее записывается уравнение эволюции заряда на крупных и мелких частицах и вычисляется передаточная функция, описывающая влияние турбулентности на флуктуации скорости движения частиц. В уравнение эволюции заряда одним из коэффициентов является средняя частота столкновений, зависящая от вертикальной компоненты скорости движения частиц. Поскольку заряд частиц зависит от их скорости, а ток равен произведению заряда на скорость, можно сделать вывод о том, что скорость входит в выражение для тока квадратичным образом, и, следовательно, ее флуктуации будут приводить к систематическому эффекту. Как показано в работе, турбулентность усиливает ток зарядки как для индукционного, так и для безындукционного механизма. В работе получены условия, при которых турбулентность может вызывать экспоненциальный рост напряженности поля. В целом же, при реалистичных параметрах турбулентности для условий больших кучево-дождевых облаков относительный вклад турбулентности в ток зарядки в предположении безындукционного механизма может достигать 70%.

В третьей главе рассмотрено представление атмосферных электрических процессов в моделях численного прогноза погоды. В современных моделях электрические явления не учитываются ни в явном виде, ни даже в виде параметризаций. Поэтому прогнозирование молниевой активности строится на косвенных параметрах. Тем не менее, современные модели в сочетании с возросшими вычислительными мощностями позволяют выполнять прямые расчеты атмосферных электрических процессов. Диссертанткой был разработан новый подход к расчету напряженности электрического поля внутри облака на базе мезомасштабной модели WRF. Важность численного моделирования этих процессов определяется сложностью и дороговизной их непосредственных наблюдений при помощи аэростатов или самолетов.

Трудность построения параметризаций электрических процессов состоит в том, что разрешение модели WRF является достаточно грубым (1 км по горизонтали и 0,5 км по вертикали) с точки зрения описания грозовых облаков. Параметризация, разработанная

диссертанткой, использует параметризацию микрофизических процессов модели WRF, описывающих твердые гидрометеоры. Основным механизмом разделения зарядов считается безындукционный механизм. Параметризация использует связь между полем плотности электрического заряда и распределением массовых долей гидрометеоров. Для каждого класса гидрометеоров принимается, что плотность заряда пропорциональна массовой концентрации, при этом каждый вертикальный столб грозового облака в целом электрически нейтрален. Далее вводятся коэффициенты вертикального перемешивания, описывающие интенсивность электризации. Поле потенциала вычисляется квазистатически, как решение уравнения Пуассона. Для этого был разработан эффективный алгоритм численного решения уравнения Пуассона. Из поля потенциала несложно получить такие важные величины, как разность потенциалов между облаком и Землей и электрическое поле.

Для обеспечения оперативного прогноза был разработан алгоритм косвенного отбора грозových событий на основе поставляемых моделью WRF данных о радиолокационной отражаемости. Критерием наличия грозových событий является превышение этой величиной определенного порога в течение достаточного времени на достаточной площади. Была также разработана модифицированная параметризация, учитывающая турбулентность.

В четвертой главе рассмотрена задача прогноза молниевой активности. Наиболее простой подход к прогнозу основан на использовании различных индексов. В основе этого подхода лежит экспериментально установленная корреляция между грозowymi событиями и потоками твердых гидрометеоров. В частности, используется индекс молниевой активности, являющейся мерой потенциального накопления заряда. Этот параметр является функцией вертикальной компоненты скорости ветра и массовых долей гидрометеоров. Тем не менее, ни один индекс не может быть универсальным предиктором. Кроме того, в модельных расчетах этот индекс может существенно варьироваться в зависимости от параметризации микрофизики. В работе отмечено, что качество прогноза молниевой активности можно улучшить, дополнив прогностическую модель прямым расчетом электрических процессов, пользуясь описанной ранее параметризацией. Такой расчет позволяет вычислить разность потенциалов между облаком и Землей являющейся гораздо лучшим предиктором, чем используемые индексы. В работе показано, что получаемые таким образом электрические поля хорошо согласуются с наблюдениями.

Было выполнено моделирование реальных грозových событий в Нижегородской области с использованием разработанных параметризаций электрических процессов в модели WRF. Была проведена калибровка алгоритма отбора грозových событий на основе сравнения данных моделирования при помощи модели WRF и реальных наблюдений. Отмечается хорошее соответствие расчетов с данными грозопеленгационной сети WWLLN. Сравнение результатов моделирования с учетом и без учета турбулентности показало, что турбулентность способствует объединению грозových ячеек в кластеры.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Представленная диссертационная работа оформлена в соответствии с требованиями, написана грамотно и ясно, подтверждает высокий уровень научной квалификации, глубокие знания актуальных задач физики и способность получать значимые научные результаты.

Достоверность представленных результатов обеспечивается тем, что в работе использованы известные физические модели, проверенные математические методы и проведена верификация новых методов на основе сравнения данных численного моделирования с реальными наблюдениями.

Новизна диссертационной работы заключается в том, что в ней выявлены важнейшие механизмы электризации, впервые исследовано влияние турбулентности процессы коллективной зарядки, предложен новый метод прогноза молниевой активности, разработаны и интегрированы в численную мезомасштабную модель параметризации электрических процессов в грозových облаках, на материале численного моделирования исследованы

особенности эволюции конвективных облаков при различном уровне турбулентности и различной интенсивности грозовой деятельности.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в улучшении понимания физических механизмов, определяющих процессы грозовой электродинамики, разработке подходов к их эффективному численному моделированию и улучшении качества прогнозирования молниевой активности.

При оценке диссертационной работы следует отметить некоторые недостатки:

Во введении не очень внятно сформулирована цель работы. Утверждается, что целью является «теоретическое исследование процессов коллективной зарядки гидрометеоров и аэрозольных частиц в нижней атмосфере», но не говорится, в чем состоит цель теоретического исследования. Правильнее было бы сказать, что цель работы состоит в разработке новых подходов к прогнозированию молниевой активности на основе выявления наиболее важных физических механизмов, ответственных за процессы коллективной зарядки, и их параметризации для использования в моделях численного прогноза.

Вместо термина «нижняя атмосферы» привычнее было бы писать «тропосфера». Во второй главе появляются такие понятия, как «(комплексная) амплитуда турбулентной скорости» и «амплитуда коррелятора возмущений вертикальной турбулентной скорости». Первая величина также называется «Фурье-образом турбулентной скорости» – и такая терминология не вызывает возражений. Что касается «амплитуды коррелятора», то, поскольку «амплитуда» – это в данном случае Фурье-образ, этот термин расшифровывается как «Фурье-образ корреляционной функции», т.е. «спектральная плотность мощности случайного процесса», и именно таким термином и следовало пользоваться в контексте описания турбулентности.

Обсуждение 4-мерных спектральных плотностей турбулентной скорости, включая формулу (2.11), нуждается в более развернутом комментарии. В частности, стандартный подход, позволяющий выразить временные спектры через пространственные и тем самым понизить размерность, состоит в применении гипотезы замороженности. Используется ли она здесь? Уравнения (2.8) для Фурье-образов скоростей частиц, строго говоря, не следуют из динамических уравнений (2.7), поскольку те описывают перемещение Лагранжевой частицы, координаты которой меняются. При этом уравнение (2.8) записано так, как если бы уравнения (2.7) относились к фиксированной пространственной координате. Все это построение, таким образом, можно рассматривать как некоторое приближение. Но в тексте работы ничего об этом не говорится и, соответственно, не приводится никаких оценок применимости такого приближения.

Описание модифицированной параметризации электрических процессов в модели WRF с учетом турбулентности в разделе 3.5 крайне схематично.

Вопросы остаются после прочтения раздела 4.3.1, посвященному определению оптимальной для прогноза молниевой активности параметризации микрофизики. Во-первых, представляется, что при любых условиях оптимальной будет та параметризация микрофизики, которая лучше всего отвечает реальной микрофизике, тогда как в разделе речь идет исключительно о модельных расчетах. Во-вторых, раздел заканчивается утверждением «выбором параметризации микрофизики нельзя значительно улучшить или ухудшить прогноз грозоопасных явлений, основанный на анализе индекса молниевой активности», т.е. получается, что выбор этой параметризации большого значения не имеет.

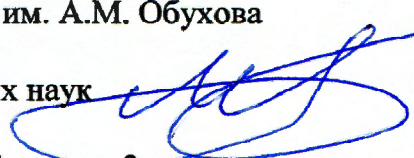
В целом, несмотря на сделанные замечания, диссертация Дементьевой С.О. представляет собой законченное исследование, научная значимость и оригинальность которого не вызывают сомнения. Работа выполнена на высоком профессиональном уровне. Автор демонстрирует высокую квалификацию на этапе теоретического анализа рассматриваемой проблемы, при работе с прогностической моделью, при разработке численных алгоритмов и при организации численного моделирования. Сделанные в диссертации выводы являются обоснованными и имеют высокую практическую значимость.

Автореферат работы Дементьевой С.О. соответствует содержанию, достаточно полно отражает структуру диссертации и даёт возможность сделать заключение о ее высоком научном уровне. Диссертационная работа в целом представляет собой законченный научный труд, основные положения диссертации в достаточной мере нашли отражение в 30 научных работах, опубликованных в ведущих рецензируемых российских и зарубежных научных изданиях, в том числе в 6 статьях, опубликованных в журналах из списка ВАК. Работа прошла апробацию на российских и международных конференциях. Таким образом, диссертация соответствует п. 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней» постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемых к диссертационным работам на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук.

Из вышеизложенного следует, что представленная к защите диссертационная работа Дементьевой С.О. полностью удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым на соискание учёной степени кандидата наук, а сама Дементьева С.О. заслуживает присуждения ей учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 — радиофизика.

Я, Горбунов Михаил Евгеньевич, выражаю своё согласие на обработку моих персональных, связанных с защитой диссертации.


Официальный оппонент,
заведующий лабораторией турбулентности
и распространения волн
Института физики атмосферы им. А.М. Обухова
Российской Академии Наук
доктор физико-математических наук


Горбунов Михаил Евгеньевич

119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 3
Телефон: +7 (495) 951-95-74
E-mail: gorbunov@ifaran.ru

Подпись Горбунова М.Е. заверяю.

Ученый секретарь
Института физики атмосферы им. А.М. Обухова
Российской Академии Наук
кандидат географических наук


Краснокутская Людмила Дмитриевна

06.09.2019

