

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

Булатов Алексей Андреевич

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)
«Развитие радиофизических методов исследования динамики грозových
разрядов»

Аспирант:

Булатов Алексей Андреевич

Научный руководитель:

к. ф.-м. н., зав. лаб. 260
Шлюгаев Ю. В.

Направление подготовки:

03.06.01 Физика и астрономия

Направленность (профиль) подготовки:

01.04.03 Радиофизика

Форма обучения: очная

Нижний Новгород — 2018

Актуальность темы диссертации

Одним из хорошо известных, но недостаточно изученных явлений, сопровождающих молнию, является повторение стадии обратного удара. Для значительной части отрицательных разрядов типа облако-земля характерно повторение главной стадии молнии один или несколько раз [1]. Повторные компоненты молний имеют исключительную важность для задач молниезащиты. Из-за мультипликативности обратного удара импульс максимального тока может повторяться многократно за короткий промежуток времени, выводя из строя устройства, не рассчитанные на многократные перегрузки. В настоящее время существуют лишь качественные теории, объясняющие механизм возникновения повторных обратных ударов [2], что обуславливает актуальность натуральных исследований таких событий и статистическая обработка полученных данных.

Универсальным и мощным средством натурального наблюдения молний являются грозопеленгационные системы (ГПС) — аппаратно-программные комплексы, определяющие координаты и точное время молниевых вспышек на определённой территории. Помимо исследования молний, такие системы необходимы для широкого круга прикладных задач: мониторинга молниевой активности, краткосрочного прогноза быстроразвивающихся конвективных явлений, изучения климатологии молний, обеспечения безопасности движения воздушных судов, предупреждения развития опасных атмосферных событий [3]. Грозопеленгационные сети, совместно аэроэлектрическими наблюдениями [4], являются основой для задачи усвоения геоэлектрических метеоанализов, исследований глобальной электрической цепи и климатологии молнии [5, 6].

В рамках данного диссертационного исследования разработана с нуля и введена в эксплуатацию региональная грозопеленгационная система OpenLDS. Проведено исследование точности системы и определена её погрешность. На основе показаний ГПС за конвективные сезоны 2014-2017 г. исследована зависимость количества гроз от типа местности. Подтверждено наличие городского эффекта над Н. Новгородом. Исследованы статистические характеристики множественных обратных ударов, и выдвинуты гипотезы, объясняющие полученные закономерности.

Одним из центральных вопросов исследования атмосферного электричества является описание процессов инициации и развития молнии. Несмотря на существенный прогресс физики газового разряда во второй половине XX века, современные модели молний носят скорее качественный характер [1], и базовые механизмы до сих пор вызывают разногласия. В данной диссертационной работе совмещается моделирование молний из первых принципов с натурными наблюдениями посредством разработанной системы грозопеленгации.

Инициация молниевых разрядов является одной из самых удивительных загадок атмосферного электричества и возглавляет список десяти наиболее важных нерешенных проблем, связанных с исследованием молниевых разрядов [7]. До сих пор не существует единой точки зрения на то, как в грозовом облаке формируется достаточно длинный для поддержания собственного развития лидерный, максимальная напряженность электрического поля в котором на порядок ниже поля пробоя воздуха [8].

На текущий момент наибольшее влияние имеет несколько основных теорий зарождения молнии. Первая — инициация стримеров с гидрометеорами [9, 10, 11]. Недостаток данного механизма состоит в том, что для обеспечения устойчивого развития стримерной системы необходимо наличие либо области с электрическим полем, превосходящим максимально наблюдаемые облачные поля [11], либо гидрометеора с аномально боль-

шим аспектным отношением [12], либо — предварительной ионизации [13, 14].

Вторая гипотеза основана на предложенном Гуревичем [15] механизме пробоя на высокоэнергичных убегающих электронах, эффективная сила трения для которых убывает в интервале энергий от 0.1 кэВ до 1 МэВ. При подходящем месте возникновения затравочных убегающих электронов, появляющихся под действием ионизации нейтральных молекул частицами космических лучей, может возникнуть электронная лавина. Предполагается, что пробоем на убегающих электронах способен создать плазменное пятно, поляризация на границах которого приводит к существенному усилению поля [16]. Несмотря на то, что максимальные измеренные поля в грозовом облаке достаточны для развития пробоя на убегающих электронах, необходимая протяженность области сильного поля достигает километра [17], что противоречит данным наблюдений. Данный механизм модифицируется в работе [18] за счёт позитронной петли положительной обратной связи, что ослабляет требования на пространственный масштаб электрического поля.

Еще один механизм, соединяющий идею пробоя на убегающих электронах с инициацией положительных стримерных систем с поверхности гидрометеоров, предложен Петерсеном [19]. Предполагается, что пробоем на убегающих электронах создаёт предварительную ионизацию, что необходимо для возникновения положительных стримеров с гидрометеоров, поляризованных локальным полем. Возникающий пучок положительных стримеров накапливает отрицательный заряд в точке своего основания, локально усиливая поле и создавая условия для возникновения противоположно направленных отрицательных стримеров. Отрицательные стримеры теперь уже биполярной стримерной системы, прогреваясь, формируют канал пространственного лидера и, участвуя в процессе разделения заряда, усиливают поле на периферии разрядной структуры, провоцируя появление вторичной системы положительных стримеров, развивающихся подобным образом. Затем, положительные стримеры вторичной системы сливаются с отрицательными стримерами первичной, создавая единый канал, прогреваемый токами выравнивания потенциала. В результате многократного повторения данного процесса перекрывающаяся и сливающаяся цепочка биполярных стримерных систем формирует канал лидера молнии.

В работе [20] был предложен принципиально новый механизм зарождения молнии, основанный на индуцированном шумом кинетическом переходе, происходящем в стохастическом поле заряженных гидрометеоров. Неравновесный фазовый переход порождает пятна ионной плазмы с линейными размерами, достигающими нескольких дециметров, и временем жизни порядка нескольких десятков миллисекунд. Подчеркивается, что резкий рост ионной проводимости происходит в экспоненциально редких компактных областях пространства на фоне исчезающе малых изменений средней проводимости среды. В результате поляризации, обусловленной крупномасштабным электрическим полем грозы, поле на концах плазменных пятен усиливается до величины, достаточной для инициации положительных стримеров. По мере роста концентрации пятен ионной плазмы, коллективная динамика положительных стримерных систем обеспечивает появление лидерного канала в соответствии с качественной картиной описанных ранее сценариев Леба и Петерсона.

Для подтверждения той или иной гипотезы инициации молниевых разряда необходимо построение численной модели, основанной на идеях гипотезы. Модель должна воспроизводить все основные наблюдаемые процессы как качественно, так и количественно. Следует заметить, что в силу высокой геометрической сложности, а также

большого разброса пространственных и временных масштабов, построение аналитической модели процесса инициации молнии, претендующей более чем на качественное описание, невозможно.

В данном диссертационном исследовании представлена мелкомасштабная транспортная модель формирования древа электрического разряда в грозовом облаке, реализованная в виде программного пакета. Модель обладает рядом инновационных особенностей, существенно отличающих её от целого ряда аналогичных работ. К ним относятся отсутствие привязки к пространственной сетке, беспрецедентно высокое пространственно-временное разрешение, учет асимметрии развития положительных и отрицательных стримеров, учет временной эволюции параметров разрядных каналов и параметризация стримерно-лидерного перехода, сформулированная в терминах температуры канала и опирающаяся на хорошо изученный механизм ионизационно-перегревной неустойчивости. В рамках применяемого подхода хорошо проводящий и разогретый лидерный канал формируется за счёт объединения токов десятков тысяч стримерных каналов, изначально обладающих пренебрежимо малой проводимостью и температурой канала, не отличающейся от температуры окружающей среды. Модельное билидерное древо имеет электродинамические характеристики, промежуточные между лабораторной длиной искры и развитой молнией. Морфологические характеристики и электрические параметры разрядного древа зарождающегося модельного лидера молнии подтверждаются современными данными о развитии молниевых разрядов.

Цели и задачи диссертационной работы

Данная работа совмещает две цели, которые можно классифицировать, как экспериментальную и теоретическую. Экспериментальная подразумевает создание необходимого инструмента (грозопеленгационной системы) и анализ статистических характеристик молниевых разрядов в регионе. Теоретическая часть включает в себя разработку модели инициации молниевых разрядов от момента возникновения первых дециметровых проводящих областей до устойчивого развития билидера.

Для экспериментального исследования молниевой активности, а также изучения мультипликативности обратного удара поставлены и решены задачи:

1. Изучение существующих грозопеленгационных систем и методов пеленгации молний.
2. Разработка региональной грозопеленгационной системы с открытым исходным кодом OpenLDS. Создание необходимого программного обеспечения.
3. Анализ данных грозопеленгационной системы, полученных за конвективные сезоны 2014–2017 гг.

Для моделирования процесса инициации молнии и валидации модели поставлены и решены следующие задачи:

1. Изучение существующих подходов к моделированию процесса инициации молнии.
2. Разработка транспортной самоорганизующейся модели инициации молнии, создание программного пакета, выполняющего расчёты.

3. Настройка параметров модели, проведение численных экспериментов. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными. Анализ полученных результатов.

Методы исследования

В основе работы региональной грозопеленгационной системы лежат разностно-дальномерный метод позиционирования разрядов и метод пересечения пеленгов. Программное обеспечение ГПС разработано автором и реализовано преимущественно на языке C++ с применением современных технологий программирования и библиотек. Связь между пеленгаторами и центральным сервером ГПС осуществляется через сеть Интернет. Для анализа данных ГПС применены базовые методы математической статистики и разработано вспомогательное ПО на языке Python.

В основе модели инициации молнии лежит описание электрической цепи в виде динамического графа, вложенного в трехмерное пространство. Для описания газоразрядных процессов в элементах цепи применены параметризации процесса ионизации и прилипания электронов, а также параметризация ионизационно-перегревной неустойчивости. Расчёт электрических полей выполняется в приближении электростатики. Для выполнения расчётов разработан оригинальный программный пакет на языке C++ с применением современных технологий программирования и библиотек. Расчёт эволюции динамических переменных выполняется методом Рунге-Кутты 4 порядка. Для оптимизации расчёта электрического поля применено восьмеричное разбиение пространства (частный случай k-дерева для размерности 3) [21].

Научная новизна работы

Разработанная грозопеленгационная система OpenLDS обладает наибольшей чувствительностью и точностью на территории Нижегородской области среди всех систем, данные которых доступны для научного изучения. OpenLDS — единственная известная автору ГПС с открытым исходным кодом.

Впервые проведены исследования мультипликативности обратного удара в средней полосе России, основанные на данных грозопеленгационной системы на основе выборки мощностью более 1,5 млн. молний за 4 конвективных сезона.

Транспортная самоорганизующаяся модель молнии, представленная в работе, обладает рядом уникальных особенностей по сравнению с моделями, известными автору. К числу таких особенностей относятся отсутствие пространственной сетки, неограниченная степень ветвления дерева разряда и произвольная ориентация проводников, беспрецедентно высокое пространственно-временное разрешение, учет асимметрии развития положительных и отрицательных стримеров, учет временной эволюции параметров разрядных каналов и самосогласованное моделирование стримерно-лидерного перехода. Модель является развитием работы [22], однако реализована с нуля и базируется на новых принципах.

Научная значимость результатов

Разработанная региональная ГПС OpenLDS имеет широкое практическое и фундаментальное применение вне контекста данной работы, являясь самостоятельным инструментом получения информации о молниях на покрываемой территории (см. раздел

1). Полученные статистические характеристики повторных обратных ударов позволяют расширить понимание процессов, предваряющих и сопровождающих развитие стреловидного лидера, а также механизмов сбора заряда в облаке.

В рамках диссертационного исследования впервые предложена численная модель процесса инициации молнии начиная от образования первых дециметровых проводящих областей и заканчивая устойчивым развитием билидера. Модель верифицирована через воспроизводимые качественные эффекты, а также через макроскопические параметры, известные из натуральных наблюдений.

Построенная модель доказывает возможность описания процесса превращения дециметровых проводящих областей в устойчивый билидер исключительно за счёт коллективных эффектов усиления поля и нагрева стримерных пучков под действием электростатической индукции. Привлечение гидрометеоров, пробоя на убегающих электронах, а также позитронной положительной обратной связи не требуется на данном этапе развития разряда. Модель согласуется с принципами, предложенными Д. И. Иудиным в работах [20, 22]. Модель может быть использована для расчёта излучения в процессе инициации молнии.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Региональная многопунктовая грозопеленгационная система (ГПС) под названием OpenLDS разработана и введена в эксплуатацию. На протяжении конвективных сезонов 2014–2017 гг. осуществляется мониторинг молниевой активности на территории Нижегородской и смежных областей. Точность позиционирования молний ГПС составляет около 3 км.
2. Проведён статистический анализ молниевой активности по данным ГПС на территории Нижегородской области. Количество гроз существенно зависит от типа местности и изменяется более, чем в 2,7 раз на территориях, удалённых на 20 км, что сравнимо с размером грозового фронта. На основе полученных данных выдвинута гипотеза о влиянии мощных ТЭЦ на снижение количества гроз.
3. Исследованы статистические характеристики повторных компонент обратного удара молнии на основе данных ГПС. Показано, что условная вероятность возникновения каждого последующего повторного обратного удара увеличивается до компоненты №8, далее остаётся приблизительно неизменной на уровне 0,5, что свидетельствует о том, что средняя многокомпонентная молния не способна нейтрализовать большую часть доступного заряда и что прерывание цепочки повторных разрядов обеспечивается деградацией канала, а не нехваткой заряда в облаке.
4. На основе показаний ГПС определено, что средний интервал между повторными ударами растёт линейно во времени от 76 мс до 110 мс, что свидетельствует об усложнении процесса сбора заряда для каждой последующей компоненты.
5. Разработана транспортная самоорганизующаяся численная модель развития молнии на стримерно-лидерной стадии. Модель реалистично описывает процесс инициации разряда от момента возникновения первых дециметровых проводящих областей до устойчивого развития билидера. Модель воспроизводит основные качественные и количественные эффекты, не заложенные явно в её изначальные принципы.

6. На основе моделирования показано, что развитие молниевых разрядов на стримерно-лидерной стадии возможно за счёт коллективных эффектов под действием электростатической индукции и не требует привлечения иных механизмов.

Достоверность полученных результатов

Показания разработанной региональной грозопеленгационной системы OpenLDS верифицированы посредством сравнения с данными доплеровского метеорадиолокатора, а также с показаниями глобальной системы WWLLN. Погрешность позиционирования разряда оценена величиной 3 км.

Исследования мультипликативности обратного удара на основе данных ГПС основаны на достаточно мощной выборке, что обеспечивает надёжность статистических характеристик.

Построенная численная модель инициации молнии верифицирована посредством сравнения с результатами натуральных наблюдений по данным различных работ. Модель воспроизводит качественные явления, к которым относится реалистичная топология разрядного дерева, асимметрия развития билидера, инверсия заряда на концах лидера вблизи его оси и другие эффекты. Макроскопические параметры модели численно согласуются с известными значениями. Время развития разряда, ток канала лидера, погонный заряд чехла лидера, скорость распространения лидера соответствуют представленным в ряде работ (см. раздел 3.2). Программный код модели автоматически тестируется на ряде пробных задач при каждом изменении кодовой базы, также применяются регрессионные Unit-тесты.

Публикации и апробация результатов

Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 4 статьях в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК для публикации основных материалов [23, 24, 25, 26]. На момент написания диссертации направлена ещё одна статья по транспортной модели молнии [27]. Кроме того, результаты работы докладывались автором и обсуждались на научных семинарах Института прикладной физики РАН, а также на конференциях [28, 29, 30, 31, 32, 33] автором лично, и на конференциях [34, 35, 36, 37] коллегами автора.

Личный вклад автора

Автор принимал активное участие в выборе направления исследований по теме диссертации, постановке задач и поиске путей их решения. При выполнении диссертационной работы вклад автор внёс определяющий вклад в построение, настройку и валидацию модели молнии, разработку грозопеленгационной системы и реализацию всего необходимого программного обеспечения для решения поставленных задач. Силами автора также выполнена значительная часть работы по подготовке результатов к публикации.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитированной литературы из 73 наименований (включая 15 публикаций автора). Общий объём диссертации составляет 95 страниц, включая 18 рисунков.

Краткое содержание работы

Первая глава посвящена разработке региональной грозопеленгационной системы OpenLDS. Приведён краткий обзор существующих ГПС. Описаны основные принципы пеленгации молний. Описана структура и особенности разработанной системы OpenLDS. Представлены результаты валидации её показаний.

В разделе 1.2 представлен обзор существующих грозопеленгационных систем. Приведены характеристики наиболее значимых глобальных и региональных зарубежных ГПС, а также представлены основные отечественные исследования в области грозопеленгации и смежных методов натурного наблюдения молний.

В разделе 1.3 ставится задача грозопеленгации. Описывается принцип пространственно-временной кластеризации записей пеленгаторов. Формулируются разностно-дальномерный метод определения положения молний, метод пересечения пеленгов и общий подход к комбинированию различных методов. Приводится алгоритм решения задачи пеленгации, применяемый в разработанной системе. В разделе 1.4 описано техническое устрой-

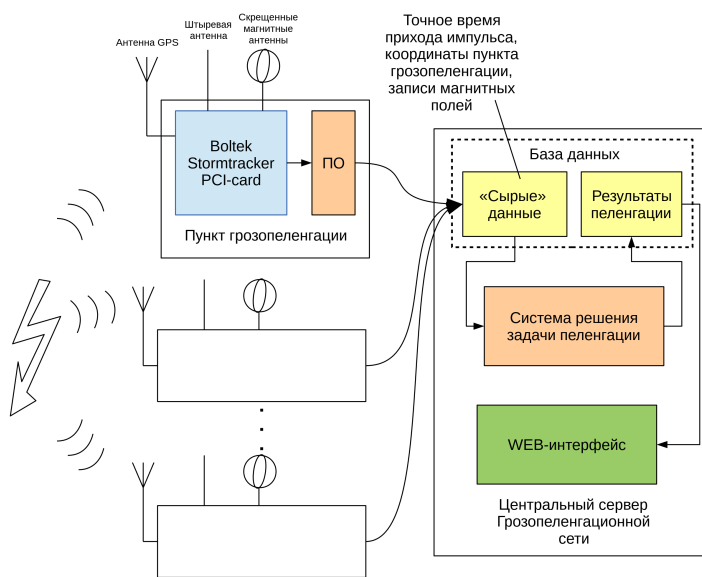


Рис. 1: Организация грозопеленгационной системы

ство и особенности программного обеспечения ГПС OpenLDS. Описана структура системы (см. рис. 1), приёмники-грозопеленгаторы, процессинговый сервер, а также технические характеристики ГПС. Представлен графический интерфейс OpenLDS.

В разделе 1.5 приводится пример грозы, зарегистрированной ГПС 16 июля 2016 г, проходившей на территории Нижегородской области с 14:50 по 16:30 GMT. Представлена карта движения типичного грозового очага от возникновения до угасания. Приведены сведения о количестве обратных ударов в минуту.

В разделе 1.6 проведено сравнение данных OpenLDS с показаниями доплеровского метеорадиолокатора и грозопеленгационной системы WWLLN (см. рис. 2). Получены оценки сверху на погрешности OpenLDS и WWLLN на территории Нижегородской области. Показано наличие систематической погрешности у системы WWLLN.

Вторая глава посвящена анализу данных, полученных ГПС за конвективные сезоны 2014-2018 гг. Обработана информация более, чем об 1,5 млн. молний, более 100 тыс.

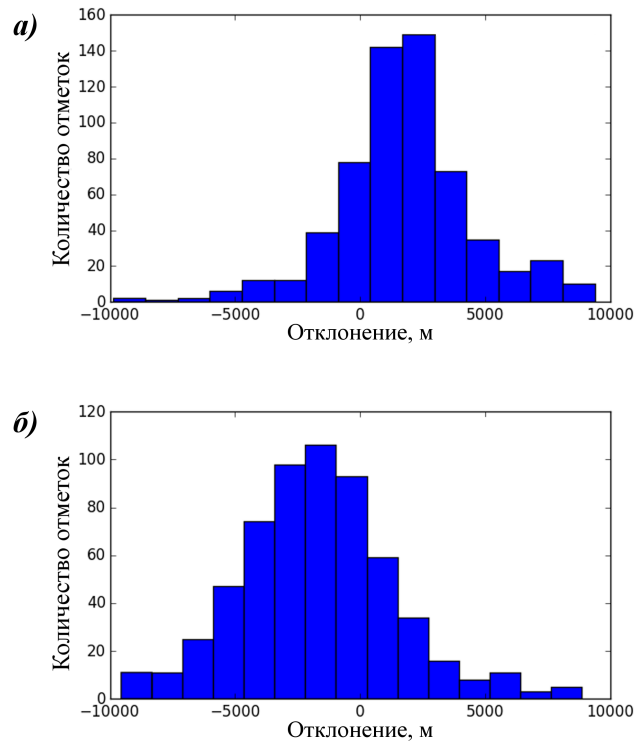


Рис. 2: Распределение различия показаний WWLLN и нижегородской ГПС по широте (а) и долготе (б)

из которых обладала повторными компонентами обратного удара.

В разделе 2.1 обсуждаются особенности распределения гроз на различных территориях нижегородской области. Показано существенное различие количества грозовых событий в зависимости от типа местности. Выдвинута гипотеза об отрицательном влиянии мощных ТЭЦ на грозовую активность на основе полученных данных.

В разделе 2.2 представлены результаты статистической обработки данных по повторным обратным ударам, зарегистрированным ГПС за время наблюдения. Показаны рост и насыщение условной вероятности возникновения каждого следующего повторного разряда (рис. 3). Показан рост среднего времени между повторными разрядами (рис. 4). На основе полученных результатов сделаны выводы.

Третья глава посвящена построению транспортной самоорганизующейся модели развития молнии от децетровых областей проводимости до устойчивого билидера. Приведен обзор существующих подходов к решению задачи инициации молнии.

В разделе 3.1 представлена постановка задачи. Приведены основные идеи модели — самоорганизующийся динамический граф, вложенный в трехмерное пространство. Описаны принципы эволюции динамических переменных системы и процессы бифуркации — возникновения новых компонент графа и исчезновения уже существующих. Детально описан процесс роста ветвления модельного разряда.

В разделе 3.2 представлены результаты численного моделирования развития молнии. Фрагмент смоделированного разрядного дерева представлен на рис. 5. Приведены пространственные распределения зарядов и температур, а также зависимость тока канала билидера от времени. Подробно описаны воспроизводимые процессы.

В разделе 3.3 представлены интерпретация и обсуждение результатов моделирова-

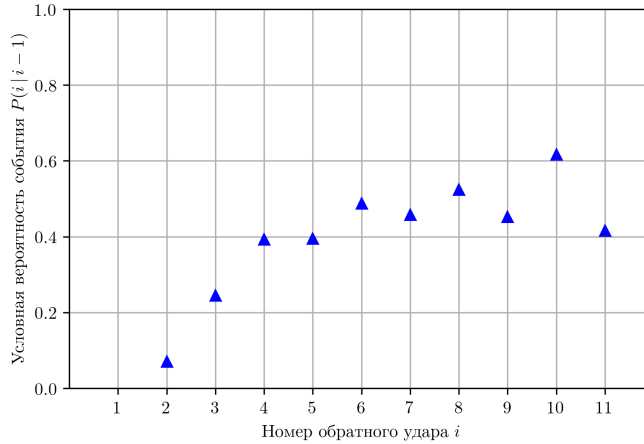


Рис. 3: Условные вероятности возникновения повторных обратных ударов

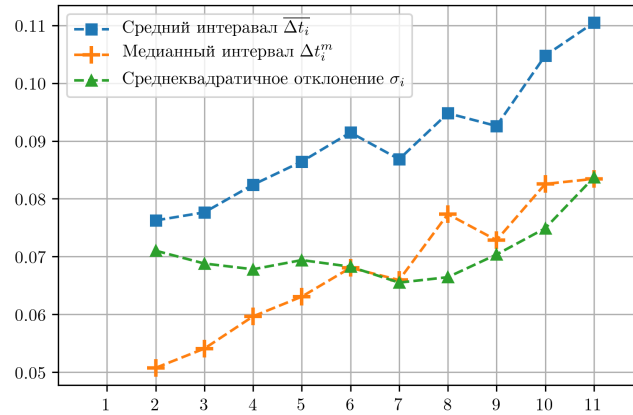


Рис. 4: Зависимость среднего, медианного значений временного интервала и его стандартного отклонения от номера повтора компоненты разряда

ния. Проводится сравнение полученных данных с известными экспериментальными и теоретическими сведениями.

В разделе 3.4 описываются особенности технической реализации транспортной модели. Приведён алгоритм работы программы. Представлен используемый способ оптимизации расчёта электрических полей: восьмеричное разбиение пространства. Описаны особенности программного кода модели.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

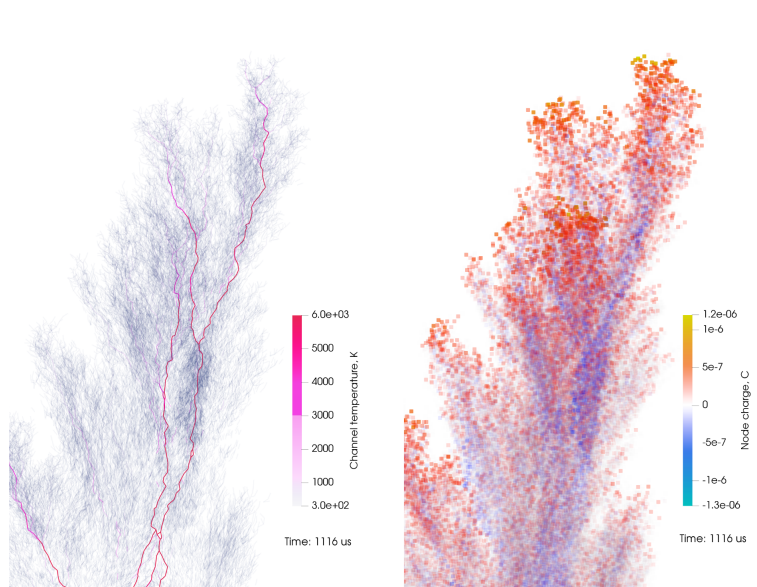


Рис. 5: Увеличенный фрагмент конца положительной части лидерного канала, визуализирующий структуру проводящих связей и распределение пространственного заряда в момент времени $t = 1116$ мкс от начала моделирования.

Оглавление

Введение	4
1 Региональная широкополосная грозопеленгационная система	17
1.1 Классификация грозопеленгационных систем	19
1.2 Существующие системы грозопеленгации	21
1.2.1 Зарубежные и международные ГПС	21
1.2.2 Отечественные ГПС и исследования на их основе	24
1.3 Постановка и решение задачи многопунктовой грозопеленгации	26
1.3.1 Пространственно-временная кластеризация	27
1.3.2 Метод пересечения пеленгов	28
1.3.3 Разностно-дальномерный метод	29
1.3.4 Решение задачи пеленгации	30
1.4 Устройство грозопеленгационной системы	30
1.5 Пример работы ГПС	33
1.6 Валидация показаний ГПС	35
2 Исследование молниевой активности по данным ГПС	42
2.1 Особенности распределения молний на территории Нижегородской области	43
2.2 Статистические характеристики повторных разрядов	46
2.2.1 Определение повторных компонент молний	47
2.2.2 Повторяемость обратного удара	48
2.2.3 Статистика временных интервалов	50
2.2.4 Обсуждение результатов	50
2.3 Выводы	53
3 Численная модель стримерно-лидерной стадии молнии	55
3.1 Постановка задачи	60
3.1.1 Эволюция динамических переменных	63
3.1.2 Бифуркации	65
3.1.3 Генерация события возникновения узлов модельного графа	69
3.2 Результаты моделирования	70
3.3 Обсуждение результатов моделирования	73
3.4 Технические аспекты модели	77
3.4.1 Алгоритм	77
3.4.2 Оптимизация расчёта электрического поля	79
3.4.3 Программный код	80
3.5 Выводы	81

Заключение	85
Список литературы	86

Литература

- [1] V. A. Rakov. *The Physics of Lightning* // *Surveys in Geophysics*, **34**, 3 (2013).
- [2] Vladimir A. Rakov, Martin A. Uman. *Lightning: Physics and effects*: Cambridge University Press (2005), pp. 687.
- [3] Л. Т. Матвеев. *Курс общей метеорологии. Физика атмосферы*. — Ленинград: Гидрометиздат (1984), pp. 751.
- [4] С. В. Анисимов, К. В. Афиногенов, Н. М. Шихова. *Динамика электричества невозмущенной атмосферы средних широт: от наблюдений к скейлингу* // *Известия ВУЗов. Радиофизика*, **LVI**, 11-12, pp. 787–802 (2013).
- [5] Е. А. Мареев. *Достижения и перспективы исследований глобальной электрической цепи* // *УФН*, **180**, 5, pp. 527–534 (2010).
- [6] E. Williams, E. A. Mareev. *Recent progress on the global electrical circuit* // *Atmospheric Research*, **135-136**, 1, pp. 208–227 (2014).
- [7] Joseph R. Dwyer, Martin A. Uman. *The physics of lightning* // *Physics Reports*, **534**, 4, pp. 147–241 (2014).
- [8] Thomas C. Marshall, Michael P. McCarthy, W. David Rust. *Electric field magnitudes and lightning initiation in thunderstorms* // *Journal of Geophysical Research*, **100**, D4, pp. 7097–7103 (1995).
- [9] Leonard B. Loeb. *The mechanisms of stepped and dart leaders in cloud-to-ground lightning strokes* // *Journal of Geophysical Research*, **71**, 20, pp. 4711–4721 (1966).
- [10] C.T. Phelps. *Positive streamer system intensification and its possible role in lightning initiation* // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, **36**, 1, pp. 103–111 (1974).
- [11] R. F. Griffiths, C. T. Phelps. *A model for lightning initiation arising from positive corona streamer development* // *Journal of Geophysical Research*, **81**, 21, pp. 3671–3676 (1976).
- [12] Anna Dubinova, Casper Rutjes, Ute Ebert, Stijn Buitink, Olaf Scholten, Gia Thi Ngoc Trinh. *Prediction of Lightning Inception by Large Ice Particles and Extensive Air Showers* // *Physical Review Letters*, **115**, 1, pp. 015002 (2015).
- [13] Samaneh Sadighi, Ningyu Liu, Joseph R. Dwyer, Hamid K. Rassoul. *Streamer formation and branching from model hydrometeors in subbreakdown conditions inside thunderclouds* // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **120**, 9, pp. 3660–3678 (2015).

- [14] Qiheng Cai, Jaroslav Jánský, Victor P. Pasko. *Initiation of positive streamer corona in low thundercloud fields* // Geophysical Research Letters, **44**, 11, pp. 5758–5765 (2017).
- [15] A.V. Gurevich, G.M. Milikh, R. Roussel-Dupre. *Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm* // Physics Letters A, **165**, 5-6, pp. 463–468 (1992).
- [16] A.V. Gurevich, K.P. Zybin, R.A. Roussel-Dupre. *Lightning initiation by simultaneous effect of runaway breakdown and cosmic ray showers* // Physics Letters A, **254**, 1-2, pp. 79–87 (1999).
- [17] Aleksandr V. Gurevich, Kirill P. Zybin. *Runaway breakdown and electric discharges in thunderstorms* // Uspekhi Fizicheskikh Nauk, **171**, 11, pp. 1177 (2001).
- [18] J. R. Dwyer. *The initiation of lightning by runaway air breakdown* // Geophysical Research Letters, **32**, 20, pp. L20808 (2005).
- [19] Danyal Petersen, Matthew Bailey, William H. Beasley, John Hallett. *A brief review of the problem of lightning initiation and a hypothesis of initial lightning leader formation* // Journal of Geophysical Research, **113**, D17, pp. D17205 (2008).
- [20] D. I. Iudin. *Lightning-Discharge Initiation as a Noise-Induced Kinetic Transition* // Radiophysics and Quantum Electronics, **60**, 5, pp. 374–394 (2017).
- [21] Jon Louis Bentley. *Multidimensional binary search trees used for associative searching* // Communications of the ACM, **18**, 9, pp. 509–517 (1975).
- [22] D. I. Iudin, V. A. Rakov, E.A. Mareev, F. D. Iudin, A. A. Syssoev, S. S. Davydenko. *Advanced numerical model of lightning development: Application to studying the role of LPCR in determining lightning type* // Journal of Geophysical Research: Atmospheres, **122**, 12, pp. 6416–6430 (2017).
- [23] В. В. Клименко, Е. А. Мареев, М. В. Шаталина, Ю. В. Шлюгаев, В. В. Соколов, А. А. Булатов, В. П. Денисов. *О статистических характеристиках электрических полей грозовых облаков в атмосфере* // Известия вузов. Радиофизика, **56**, 11-12 (2013).
- [24] Е. А. Мареев, В. Н. Стасенко, А. А. Булатов, С. О. Дементьева, А. А. Евтушенко, Н. В. Ильин, Ф. А. Кутерин, Н.Н. Шаталина М. В. Слюняев. *Российские исследования атмосферного электричества в 2011 - 2014 гг.* // Известия РАН. Физика атмосферы и океана., **52**, 2, pp. 175–186 (2016).
- [25] А. А. Булатов, Ф. А. Кутерин, Ю. В. Шлюгаев. *Региональная сеть пассивной грозопеленгации в Нижегородской области* // Метеорология и гидрология, pp. 113–121 (2017).
- [26] А. А. Булатов, Ф. А. Кутерин, Ю. В. Шлюгаев. *Особенности распределения молниевой активности на территории Нижегородской области по данным региональной грозопеленгационной системы за 2014-2016 гг.* // Энергетик, pp. 26–29 (2017).

- [27] А. А. Булатов, Д. И. Иудин, А. А. Сысоев. *Самоорганизующаяся транспортная модель искрового разряда и её применение к вопросу инициации молнии в облаке* // Известия вузов. Радиофизика (2018).
- [28] Ф. А. Кутерин, Ю. В. Шлюгаев, А. А. Булатов. *Организация базы данных многопунктовой грозопеленгации для мониторинга грозоопасности* // IV международная конференция по молниезащите, pp. 278–282, Издательство Политехнического университета, Санкт-Петербург (2014).
- [29] А. А. Булатов, Ю. В. Шлюгаев, Ф. А. Кутерин. *Многопунктовая грозопеленгационная система в Нижегородской области* // Состав атмосферы, атмосферное электричество, климатические процессы, pp. 11, п. Борок, Ярославская обл. (2014).
- [30] А. А. Булатов, Ю. В. Шлюгаев. *Исследование молниевой активности в Нижегородской области с использованием разработанной нижегородской грозопеленгационной системы* // V Российская конференция по молниезащите, pp. 85–91, Издательство Политехнического университета, Санкт-Петербург (2016).
- [31] А. А. Булатов, Д. И. Иудин, А. А. Сысоев. *Численное моделирование инициации молнии* // VI Российская конференция по молниезащите, Санкт-Петербург (2018).
- [32] А. А. Булатов, Д. И. Иудин. *Численное моделирование двунаправленного лидера* // Состав атмосферы, атмосферное электричество, климатические процессы, pp. 67, п. Борок, Ярославская обл. (2017).
- [33] A. A. Bulatov, A. A. Syssoev, S. S. Davydenko, D. I. Iudin. *Bidirectional Leader Development Simulation* // Topical Problems of Nonlinear Wave Physics: Nonlinear Phenomena in the Atmosphere and Ocean, pp. 104, Moscow - St.-Petersburg, Russia (2017).
- [34] F. A. Kuterin, A. A. Bulatov, Yu. V. Shlyugaev. *The Development of the Lightning Detection Network based on Boltek StormTracker hardware* // International Conference on Atmospheric Electricity, pp. P-12-17, Norman, OK, U.S.A. (2014).
- [35] Yu.V. Shlyugaev, E.A. Mareev, F.A. Kuterin, A.A. Bulatov. *Comprehensive study of regional thunderstorm activity in a wide frequency range* // 32nd International Conference on Lightning Protection, pp. 1964–1966, IEEE, Shanghai, China (2014).
- [36] D. I. Iudin, V. A. Rakov, A. A. Syssoev, A. A. Bulatov. *Percolation effects and scalar-impurity advection in a turbulent flow: implications for lightning initiation problem* // Thunderstorms and Elementary Particle Acceleration, Byurakan, Armenia (2017).
- [37] D. I. Iudin, A. A. Syssoev, A. A. Bulatov, V. A. Rakov, M. Hayakawa. *A new hypothetical scenario of lightning initiation* // The 1st International Symposium on Lightning Physics and Lightning Meteorology, Beijing, China (2017).