

*На правах рукописи*



СЫСОЕВ Артем Андреевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ  
ИНИЦИАЦИИ МОЛНИЕВОГО РАЗРЯДА  
И РАСПРОСТРАНЕНИЯ СТУПЕНЧАТОГО  
ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ЛИДЕРА МОЛНИИ**

25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2020

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

Научный руководитель: Иудин Дмитрий Игоревич, доктор физико-математических наук, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (г. Нижний Новгород)

Официальные оппоненты: Зелёный Лев Матвеевич, доктор физико-математических наук, академик РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт космических исследований Российской академии наук»;

Соколов Дмитрий Дмитриевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова»

Защита состоится «21» января 2021 г. в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.069.01 при ИПФ РАН (603950 г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ИПФ РАН.

Автореферат разослан «10» ноября 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук

 А. И. Малеханов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

На настоящий момент вопросы, связанные с изучением процесса инициации молнии, а также физических механизмов, отвечающих за распространение различных типов молниевых разрядов, в том числе и отрицательных ступенчатых лидеров, входят в число до конца нерешённых, но наиболее принципиальных проблем физики атмосферного электричества. Показательно, что авторы недавнего обзора [1] ставят именно эти задачи на первое и второе места сформулированного ими списка десяти наиболее актуальных вопросов физики молнии соответственно. Основная интрига процесса инициации молниевых разрядов заключается в том, что, согласно измерениям, максимальная напряжённость электрического поля внутри грозового облака на порядок ниже диэлектрической прочности воздуха [2]. При этом все предложенные на данный момент гипотезы либо ограничиваются описанием процесса возникновения одиночного положительного стримера, либо требуют реализации каких-либо экстремальных условий, что не позволяет принять ни одну из них в качестве ведущей. Если говорить об особенностях развития разрядов разной полярности, то благодаря начавшимся в первой половине прошлого века оптическим наблюдениям хорошо известно, что отрицательные лидеры молнии, в отличие от непрерывно растущих положительных, всегда распространяются ступенчатым образом. Данная особенность наблюдается также в многочисленных лабораторных экспериментах с длинной искрой отрицательной полярности. Однако причина столь сложного способа развития отрицательных лидеров до сих пор остаётся неизвестной. При этом особый интерес вызывает происходящий перед головкой отрицательного лидера процесс возникновения изолированных от него биполярных пространственных лидеров, играющих ключевую роль в формировании ступеней. Дополнительную мотивацию данному исследованию придаёт факт того, что недавние экспериментальные результаты многочисленных работ (см., например, [3–7]), посвящённых высокоскоростной съёмке молниевых разрядов отрицательной полярности, нуждаются в теоретическом осмыслении и создают богатую базу для численного моделирования.

Кроме чисто научного интереса, связанного с решением наиболее важных вопросов физики молнии, полученные в данной работе знания об особенностях развития ступенчатых отрицательных лидеров молнии будут иметь прикладную ценность, связанную с совершенствованием методов молниезащиты. Особенную важность их изучению придаёт факт того, что среди разрядов типа облако – земля на долю отрицательных лидеров приходится примерно 90% [8].

## **Цели и задачи диссертации**

Целью данной работы является теоретическое исследование физического механизма инициации молнии в безэлектродном грозовом облаке и причин ступенчатого способа распространения отрицательного лидера молнии. Для достижения указанных целей были решены следующие задачи:

1. Определение величины однородного порогового поля пробоя воздуха с учётом ключевых для атмосферного воздуха плазмохимических процессов;
2. Определение физического механизма, отвечающего за инициацию и устойчивый рост стримеров в безэлектродной среде грозового облака, с их последующим объединением в способный к самостоятельному росту лидерный канал и установление необходимых для реализации данного механизма условий;
3. Разработка численной модели ступенчатого отрицательного лидера молнии с учётом асимметрии пороговых полей развития положительных и отрицательных стримеров с целью поиска физического механизма, отвечающего за формирование ступени отрицательного лидера и делающего ступенчатый способ его распространения более предпочтительным, и определения физической причины формирования пространственных стемов (зачатков пространственных лидеров) на периферии стримерной короны отрицательного лидера.

## **Научная новизна**

В диссертации теоретически исследован ряд ключевых вопросов физики молнии и получены следующие научные результаты:

1. Величина однородного поля пробоя воздуха определена с учётом происходящих между электронами и атмосферными ионами плазмохимических процессов. Показано, что учёт отлипания электронов от отрицательных ионов заметно понижает порог пробоя воздуха, причём влияние данного эффекта усиливается с увеличением высоты над уровнем моря.
2. Представлен принципиально новый механизм инициации молнии в облаке. Основными инновационными особенностями предложенного механизма является описание цепочки происходящих на различных пространственно-временных масштабах процессов формирования и эволюции в облаке областей повышенной ионной проводимости, в конце концов приводящих к возникновению заполняющих объём активной части облака стримерных систем. Установлен критерий работоспособности предложенного механизма и показано, что он выполняется в условиях типичного грозового облака. Определены условия, при которых возникающие в грозовом облаке стримерные системы объединяются в способный к самостоятельному росту горячий хорошо проводящий лидерный канал.
3. Разработана модель развития ступенчатого отрицательного лидера молнии, впервые учитывающая как асимметрию пороговых полей роста по-

ложительных и отрицательных стримеров, так и возможность возникновения пространственных стемов перед новообразованной головкой отрицательного лидера. Модель является первым реализованным подходом с «метаболизмом», под которым в данном случае понимается возможность объединения нескольких каналов в один. В рамках представленной модели впервые воспроизведён процесс формирования пространственных стемов на периферии стримерной короны отрицательного лидера. Показано, что пространственные стемы, потенциальные зачатки пространственных лидеров, возникают в результате динамики пространственно-временного шума, базовыми элементами которого являются заряженные головки остановившихся отрицательных стримеров, образующих вспышку короны отрицательного лидера.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Научная значимость работы определяется, прежде всего, самими объектами исследования. Как уже было отмечено, до сих пор не ясно, каким образом происходит процесс инициации молнии в грозовом облаке и какие физические механизмы отвечают за ступенчатый механизм распространения отрицательных лидеров молнии.

Представленная в диссертации модель развития отрицательного лидера не только объясняет причину присущего ему ступенчатого механизма распространения, но и имеет большую практическую ценность с точки зрения совершенствования методов молниезащиты. Особенную важность изучению именно отрицательных лидеров придаёт факт того, что среди разрядов типа облако-земля на их долю приходится около 90%. Кроме того, модель впервые позволила детально воспроизвести процесс формирования чехла заряда вокруг лидерного канала, знание структуры которого критически важно на главной стадии развития молнии, начинающейся после контакта её канала с землёй. Дело в том, что представляющий особую опасность импульс тока возвратного удара, амплитуда которого может составлять десятки и сотни тысяч ампер, связан именно с разрядкой чехла канала молнии. Далее, поскольку представленные в работе модели развития разрядов описывают динамику текущих по их каналам токов, они могут быть применены к расчёту производимого ими электромагнитного излучения.

### **Методы исследования и степень достоверности результатов**

Для выполнения аналитических задач диссертационной работы применяются методы решения уравнений, описывающих эволюцию концентраций электронов и положительных и отрицательных ионов, совместно с уравнениями электродинамики, а также элементы теории перколяций. Достоверность представленного в работе сценария инициации молнии обеспечивается тем, что его реализация не предполагает выполнения каких-либо экстремальных условий. Описанный в работе механизм не требует напряжённостей

электрических полей и масштабов, на которых существуют данные поля, превышающих максимальные измеренные в облаке значения, и становится жизнеспособным при величине пространственно-временной частоты столкновений гидрометеоров большей, чем  $0.1 \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$ , что легко достигается в типичном грозном облаке.

Для решения задачи численного моделирования разрядного древа, являющегося классическим примером фрактального объекта, были задействованы методы теории графов, а сама феноменологическая модель была построена на базе сети стохастических клеточных автоматов. Такая модель содержит ограниченное число параметров, варьирование которых позволяет описать широкий круг наблюдаемых явлений (см., например, [9–12]). Достоверность представленной в работе численной модели развития отрицательного ступенчатого лидера молнии обеспечивается тем, что она была верифицирована путём сравнения морфологии и параметров модельных разрядов с имеющимися в соответствующей литературе [4, 13–16] сведениями и результатами натуральных наблюдений [3–7]. Предсказываемые моделью параметры отрицательных лидеров хорошо согласуются с имеющимися на сегодняшний день данными. Модель успешно воспроизводит ряд таких сложных по своей физической природе явлений, как полный цикл формирования ступени отрицательного лидера и формирование чехла заряда лидерного канала, не говоря уже об электростатической стороне эволюции разрядных каналов.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Учёт отлипания электронов от отрицательных ионов заметно понижает пороговое поле пробоя воздуха, причём влияние данного эффекта усиливается с увеличением высоты над уровнем моря.

2. Процесс инициации молнии представляет собой ряд последовательных переходов на всё большие пространственно-временные масштабы: сначала происходит переход от мелкомасштабных коронных разрядов, возникающих при столкновениях (сближениях) гидрометеоров, к метровым стримерным разрядам, после чего коллективное взаимодействие биполярных стримерных систем приводит к формированию лидерного канала длиной в десятки метров. При этом промежуточным звеном при переходе от электронных лавин к биполярным стримерным системам являются дециметровые области повышенной ионной проводимости, повсеместно возникающие в объёме грозного облака как конечный результат развития коронных разрядов, выступающих в роли центров ионизации.

3. Для инициации молнии в грозном облаке необходимо выполнение двух основных условий: 1) пространственно-временная частота столкновений (сближений) гидрометеоров, приводящих к образованию коронных разрядов, должна превышать порог, равный  $0.1 \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$ ; 2) разность потенциалов между границами активной зоны облака, ориентированными перпендикулярно мак-

роскопическому электрическому полю, должна быть не меньше, чем 3 МВ. Поскольку предлагаемый в работе механизм инициации молнии не требует выполнения каких-либо экстремальных для типичного грозового облака условий, он является более предпочтительным по сравнению с альтернативными гипотезами.

4. Детально воспроизведён полный цикл формирования ступени отрицательного лидера молнии с учётом возникновения на границе его стримерной короны пространственных стемов и трансформации части из них в пространственные лидеры.

5. Ступенчатый характер развития отрицательного лидера обусловлен асимметрией пороговых полей распространения положительных и отрицательных стримеров.

6. Формирование пространственных стемов происходит на периферии стримерной зоны отрицательного лидера, где крупномасштабное внешнее поле усиливается полем пространственного заряда, неоднородно распределяемого перед новообразованной головкой лидера во время вспышки короны отрицательных стримеров, происходящей в конце формирования каждой ступени.

#### **Апробация результатов работы**

Основные результаты работы опубликованы в 4 статьях в ведущих рецензируемых российских и зарубежных журналах [A1–A4], 11 трудах Российских и международных конференций [A5–A15], 12 тезисах и абстрактах [A16–A27]; обсуждались на семинарах Института прикладной физики РАН; докладывались автором диссертации и его соавторами на следующих российских и международных конференциях: XVII, XVIII, XIX научные школы «Нелинейные волны» (Нижний Новгород, 2016, 2018, 2020); XX, XXIII все-российские школы-конференции молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы» (Нижний Новгород, 2016; Борок, 2020); VI Международная конференция «Frontiers of Nonlinear Physics» (Нижний Новгород – Санкт-Петербург, 2016); Генеральные Ассамблеи Европейского Геофизического Союза EGU-2017, EGU-2019, EGU-2020 (Вена, Австрия, 2017, 2019, 2020); Международная конференция «Topical Problems of Nonlinear Wave Physics» (Москва – Санкт-Петербург, 2017); Первая международная конференция по физике и метеорологии молнии ISLP&M (Пекин, Китай, 2017); Международные конференции «Thunderstorms and Elementary Particle Acceleration» (пос. Бюракан, Армения, 2017, 2018, 2019); VI Российская конференция по молниезащите (Санкт-Петербург, 2018); XVI Международная конференция по атмосферному электричеству ICAE 2018 (Нара, Япония, 2018); 23-я Нижегородская сессия молодых ученых (технические, естественные, математические науки) (Нижний Новгород, 2018); 15-я ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе» (Москва, 2020). Кроме

того, выступления автора на XXI Конкурсе работ молодых учёных ИПФ РАН и на XXIII Нижегородской сессии молодых учёных (технические, естественные, математические науки) были отмечены поощрительной премией и дипломом отделения Академии информатизации образования по Нижегородской области соответственно.

### **Личный вклад автора**

Все результаты, изложенные в диссертации и вошедшие в работы [A1–A27], получены лично автором или при его непосредственном участии. Автор принимал активное участие в выборе направления исследований, постановке задач и поиске путей их решения. Автор решал задачу поиска зависимости однородного критического поля пробоя воздуха от высоты и реализовывал алгоритм формирования лидера молнии в результате коллективного взаимодействия множества одновременно развивающихся стримерных систем, а также участвовал в формулировке ряда положений первой главы работы. Разработка представленной во второй главе численной модели и анализ полученных с помощью неё результатов были выполнены автором лично в творческом взаимодействии со старшими членами научного коллектива. При подготовке представленных результатов к публикации совместно с соавторами в работах [A3, A5, A9, A11, A12, A15–A21, A23–A25, A27] вклад автора диссертации был определяющим, в работах [A1, A2, A4, A6–A8, A10, A13, A14, A22, A26] автор играл существенную роль в формулировке и интерпретации результатов.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертация состоит из введения, двух основных глав, заключения и списка литературы из 165 наименований, включая 27 публикаций автора по теме диссертации, 4 из которых опубликованы в рецензируемых научных журналах. Общий объём диссертации составляет 136 страниц, включая 10 таблиц и 23 рисунка.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Во **Введении** приведено обоснование актуальности темы настоящего исследования, обсуждена степень изученности рассматриваемых в работе явлений, 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.

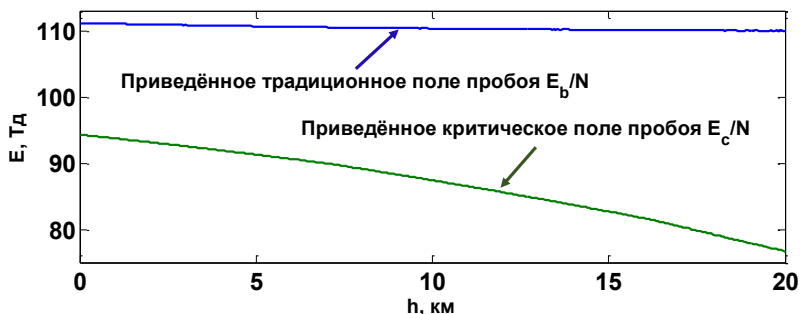


В **Главе 1** предлагается принципиально новый механизм инициации молнии в облаке, развивающий идеи, заложенные в работе [17].

В **разделе 1.1** приводится подробный обзор существующих на настоящий момент альтернативных гипотез с акцентом на трудностях, с которыми они сталкиваются.

В **разделе 1.2** приводится общая формулировка исследуемой в **Главе 1** задачи. При этом основное внимание уделяется выделению трёх пространственно-временных масштабов внутри грозового облака, на которых разворачивается анализируемая последовательность процессов, приводящих к формированию «зародыша» молнии.

В **разделе 1.3** уточняется традиционная концепция поля пробоя воздуха, описанная в **параграфе 1.3.1** и базирующаяся на поиске электрического поля, при котором наступает равенство между частотами ударной ионизации и прилипания электронов к нейтралам. В **параграфе 1.3.2** формулируется система пяти дрейфово-диффузионных уравнений, описывающих эволюцию концентраций электронов, положительных и трёх типов отрицательных ионов. Среди рассматриваемых отрицательных ионов можно выделить легкие нестабильные ( $O^-$  и  $O_2^-$ ), которые вносят значительный вклад в процесс отлипания, и стабильные тяжелые ( $O_3^-$ ), вклад которых с точки зрения отлипания пренебрежимо мал при малых концентрациях атомарного кислорода. В **параграфе 1.3.3** данная система уравнений сводится к линеаризованному виду, отражающему основные плазмохимические реакции модели. Методом поиска условий, при которых у данной линеаризованной системы (в отсутствие неоднородности) появляется первый положительный корень характеристического уравнения, уточняется величина однородного пробойного поля грозового облака. Показывается, что учёт основных плазмохимических процессов, среди которых важнейшую роль играет отлипание электронов от отрицательных ионов, приводит к существенному падению поля пробоя по сравнению с традиционно принятым значением, причём данный эффект заметно усиливается с увеличением высоты над уровнем моря (см. Рисунок 1). Фактически это означает, что разряд начинает развиваться в подпороговых (в традиционном смысле) полях: к моменту, когда частота ионизации сравнивается с частотой прилипания, уже существует достаточно большое количество не только ионов, но и электронов. Таким образом, развитие разряда начинается при меньших полях и на меньших высотах по сравнению с традиционно принятым подходом. В **параграфе 1.3.4** в результате рассмотрения упрощённой системы двух эволюционных уравнений для концентраций электронов и объединённых в единое сообщество отрицательных ионов вводится понятие эффективной частоты ионизации с учётом потерь облачных ионов на гидрометеорах и показывается, что экспоненциальный рост концентраций заряженных частиц начинается в условиях, когда отношение частоты ионизации к частоте прилипания составляет величину, заведомо меньшую единицы.



**Рис. 1.** Зависимости традиционного  $E_b/N$  и полученного в диссертационной работе критического  $E_c/N$  приведенных полей пробоя воздуха от высоты над уровнем моря

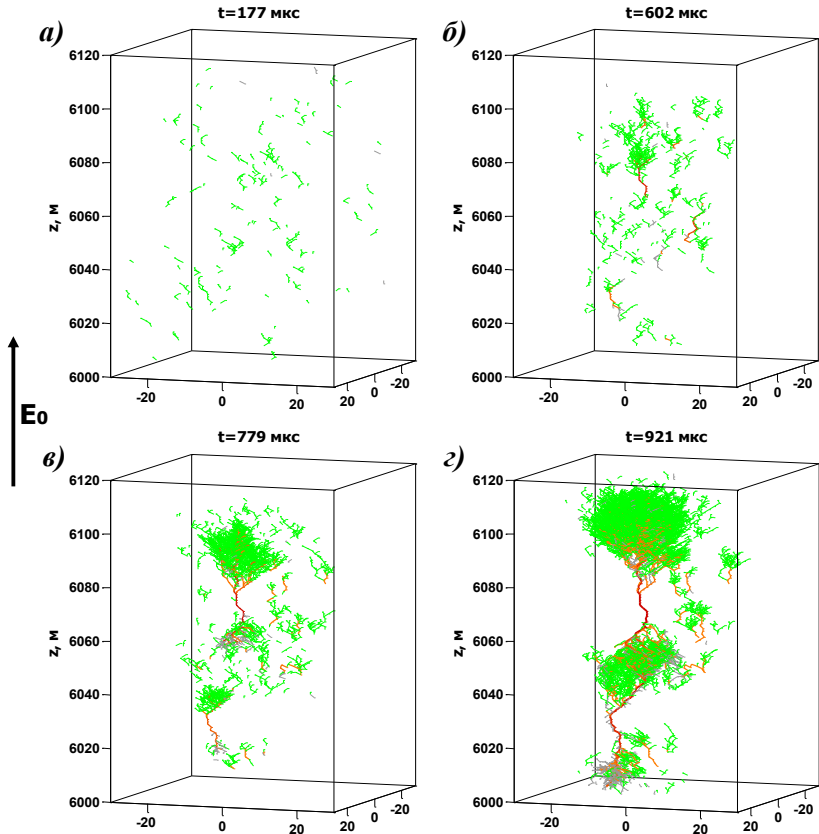
В разделе 1.4 в результате ряда аналитических преобразований показывается, что исходная система дрейфово-диффузионных уравнений может быть без потери смысла сведена к анализу единственного уравнения для концентрации только отрицательных ионов (**параграф 1.4.1**). Физически это означает, что на пороге пробоя электроны являются промежуточным звеном: появляясь в результате ударной ионизации, они практически мгновенно (за время порядка 10 нс) прилипают к нейтралам, отдавая свой заряд гораздо более долгоживущим отрицательным ионам, и впоследствии освобождаются благодаря отлипанию в сильных полях, становясь триггером развития разряда. В **параграфе 1.4.2** вводятся понятия центров производства ионов, ассоциированных с мелкомасштабными (единицы миллиметров) коронными разрядами, возникающими при столкновениях (сближениях) гидрометеоров, и обсуждается механизм формирования и поляризации ионных пятен, повсеместно появляющихся в объёме грозового облака как конечный результат развития ионизационных центров. В **параграфе 1.4.3** описан кумулятивный механизм роста ионной компоненты (появления заполняющих объём активной части грозового облака областей повышенной ионной проводимости) за счёт образования новых ионизационных центров поверх обладающих повышенным уровнем предиионизации останков старых. В **параграфе 1.4.4** вводится понятие коэффициента адвективной диффузии, отвечающего за быстрое расплывание ионного пятна в результате дрейфа ионов в сильном мелкомасштабном стохастическом поле, создаваемом крупными заряженными гидрометеорами. Знание данного коэффициента диффузии позволяет оценить размер и время жизни ионного пятна. Тогда, взяв из теории направленных перколяций критическое значение безразмерного фактора заполнения для 3D+1 случая, можно найти величину пороговой пространственно-временной частоты появления центров ионизации, превышение которой приводит к появлению в облаке макроскопического кластера повышенной ионной проводимости. Оценённое таким образом значение, равное  $0.1 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ , на несколько порядков меньше наблюдаемой в облаке пространственно-временной частоты столкновений гидроме-

теоров. Иными словами, для реализации предложенного механизма достаточно, чтобы каждое сотое-тысячное сближение гидрометеоров приводило к появлению коронного разряда. В **параграфе 1.4.5** показано, что рост ионной компоненты в облаке имеет нелинейное ограничение. При этом стационарный уровень концентрации ионов на полюсах областей повышенной ионной проводимости может достигать настолько высоких значений (до  $10^{20} \text{ м}^{-3}$ ), что формирующиеся в облаке ионные кластеры, поляризуясь во внешнем электрическом поле, становятся плацдармом для возникновения сперва положительных, а затем и отрицательных стримеров.

В **разделе 1.5** обсуждается механизм положительной обратной связи, посредством которого биполярные стримерные системы заполняют значительную часть объёма грозового облака. Показано, что за счёт поляризации рядных каналов данный процесс становится возможным даже во внешнем электрическом поле, меньшем, чем пороговое поле роста положительных стримеров. Здесь же обосновывается утверждение о том, что если разность потенциалов между границами активной зоны облака, ориентированными перпендикулярно внешнему электрическому полю, превышает 3 МВ, то стримерная активность приводит к формированию лидера молнии.

**Раздел 1.6** описывает финальную стадию предложенного в работе механизма инициации молнии и посвящён численному моделированию процесса зарождения горячего лидерного канала в облаке на базе двух альтернативных моделей. В **параграфе 1.6.1** обсуждаются современные представления о механизме формирования лидера молнии в грозовом облаке с акцентом на недавнем эксперименте с искусственным аэрозольным облаком [18], в котором были зарегистрированы так называемые необычные плазменные образования (unusual plasma formations), которые, по всей видимости, являются недостающим переходным звеном от стримерной формы разряда к лидерной. В **параграфе 1.6.2** описана мелкомасштабная численная транспортная модель искрового разряда [A4], на базе которой был воспроизведён процесс возникновения и последующего слияния многочисленных биполярных стримерных систем с формированием горячего хорошо проводящего лидерного канала, способного к самостоятельному поддержанию своего дальнейшего распространения. Показано, что характеристики формирующегося таким образом молодого лидера молнии ставят его в промежуточное положение между слаботорочным лабораторным лидером и развитым молниевым каналом. **Параграф 1.6.3** развивает идеи представленной в предыдущем параграфе транспортной модели на случай одновременной инициации множества стримерных систем, появляющихся по всему объёму модельного пространства. Показано, что на типичной для инициации молнии высоте, равной 6-и км над уровнем моря, при внешнем поле меньшем примерно 60 кВ/м объединения отдельных стримерных каналов в молниевый лидер не происходит. В данном режиме выделенное направление роста стримеров отсутствует, в результате чего их активность приводит лишь к хаотическому разделению пространственного

заряда без усиления внешнего поля. При этом недостаточная степень поляризации каналов делает их устойчивый рост невозможным: они появляются и спустя непродолжительное время гибнут, не успев трансформироваться в лидерный канал. При внешних полях, превышающих 60 кВ/м, степени направленности роста разрядных каналов и их поляризации во внешнем поле оказывается достаточно для формирования множества параллельно развивающихся биполярных стримерных систем, ориентированных приблизительно в одном направлении и постепенно объединяющихся в единый лидерный канал «молодой» молнии (см. Рисунок 2).



**Рис. 2.** Иллюстрация динамики эволюции стримерных систем во внешнем электрическом поле  $E_e=60$  кВ/м, достаточном для формирования лидера молнии. На стадии *а* модельный объём заполнен разделёнными в пространстве положительными стримерами (тонкие каналы), стартующими из областей повышенной ионной проводимости. На стадии *б* некоторые из них поляризуются достаточно для того, чтобы трансформироваться в способные к самостоятельному росту двунаправленные лидерные (толстые) каналы, которые срастаются друг с другом на стадии *в*, формируя полноценный лидер молнии на стадии *г*

В разделе 1.7 подводятся итоги Главы 1 и подчёркивается, что предлагаемый в работе механизм является жизнеспособным в типичных для грозового облака условиях, так как, в отличие от всех других существующих на данный момент подходов, не требует выполнения каких-либо экстремальных условий. Общая схема предлагаемого в Главе 1 механизма инициации молнии представлена на Рисунке 3.

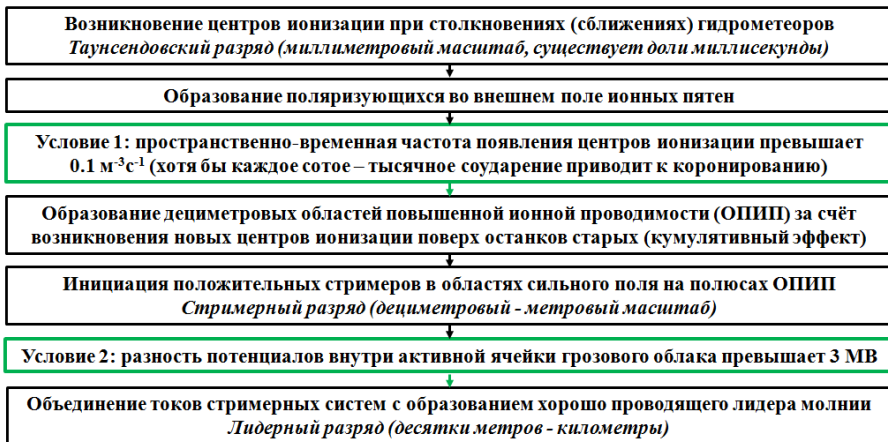


Рис. 3. Краткая схема предлагаемого в работе механизма инициации молнии в грозовом облаке

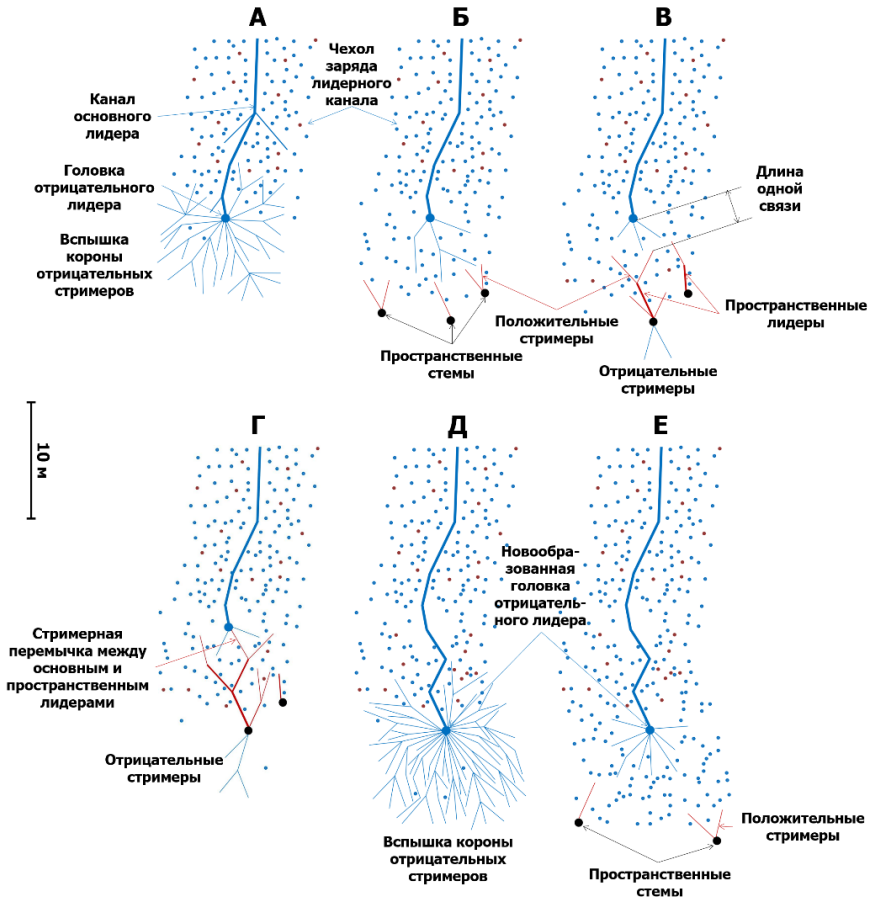
Таким образом, в Главе 1 предложен принципиально новый развивающийся на нескольких пространственно-временных масштабах механизм инициации молнии и обоснована возможность его реализации в условиях типичного грозового облака. Результаты, полученные в Главе 1, опубликованы в работах [A2, A4, A6, A8, A10, A13, A14, A22, A26].

Глава 2 посвящена моделированию распространения и ветвления ступенчатого отрицательного лидера молнии на основе разработанной автором численной модели, опубликованной в работе [A3].

В разделе 2.1 проводится постановка задачи: приводится краткий обзор существующих моделей молниевых разрядов и обсуждается современный уровень понимания физических основ ступенчатого механизма распространения отрицательного лидера молнии с акцентом на нерешённые на данный момент вопросы.

В разделе 2.2 приводится подробное описание модели. Поясняется общая постановка задачи (параграф 2.2.1), методика расчёта электрического потенциала и напряжённости электрического поля (параграф 2.2.2), формулируются современные представления об асимметрии развития положительных и отрицательных искровых разрядов, учёт которой впервые позволил успешно воспроизвести полный цикл формирования ступени отрицательного лидера

(параграф 2.2.3), описывается то, каким образом алгоритм учитывает асимметрию пороговых полей развития положительных и отрицательных стримеров (параграф 2.2.4) и временную эволюцию параметров разрядных каналов (параграф 2.2.5). В параграфе 2.2.6 обсуждаются ключевые положения модели, позволяющие воспроизвести полный цикл формирования ступени отрицательного лидера молнии (см. Рисунок 4). Среди них можно выделить



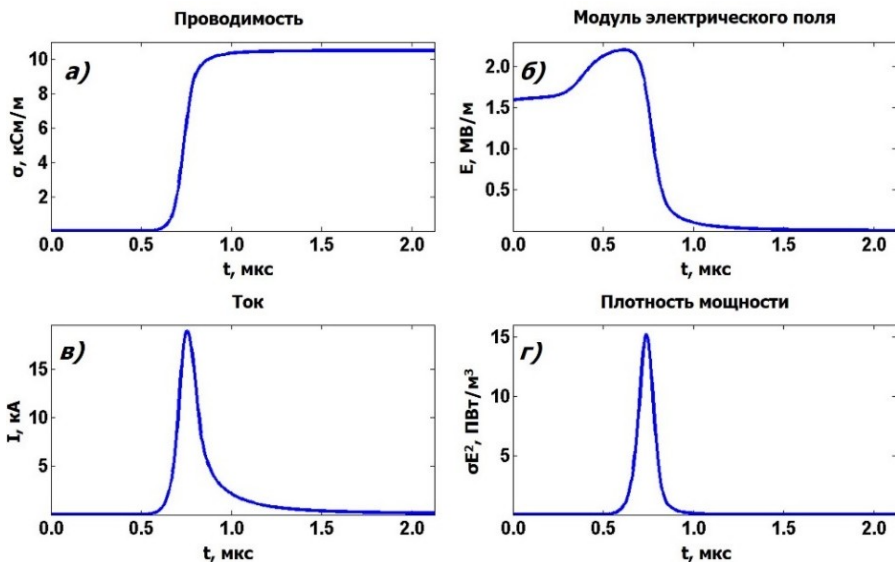
**Рис. 4.** Схема воспроизведённого в рамках модели цикла формирования ступени отрицательного лидера. Полный цикл (А – Е) обычно длится несколько десятков микросекунд. Более жирные линии отвечают большим проводимостям каналов. Расположенные перед головкой отрицательного лидера кружки символизируют пространственные стемы. Точками обозначены преимущественно отрицательные пространственные заряды чехла лидерного канала

поляризацию разрядных структур, усиливающую электрическое поле на их границах, и формирование чехла заряда лидерного канала за счёт отмирания неспособных к дальнейшему росту связей. Ключевой вклад в образование чехла заряда вокруг канала отрицательного лидера вносят вспышки корон отрицательных стримеров, завершающих формирование каждой ступени. Как показано в работе, именно распределяемый ими заряд и является причиной формирования пространственных стемов перед новообразованной головкой отрицательного лидера.

В разделе 2.3 детально описываются результаты моделирования, включающие морфологию (параграф 2.3.1) и многочисленные характеристики (параграф 2.3.2) модельных лидеров при трёх рассматриваемых значениях питающего тока, равных 100, 200 и 300 А. В параграфе 2.3.3 приводятся и обсуждаются осциллограммы процессов, сопровождающих формирование ступени модельного лидера в различных участках его канала (см. Рисунок 5). Анализируются свойства стримерной короны лидера и формирующихся на её периферии пространственных стемов/лидеров (параграф 2.3.4). Приводится сравнение результатов моделирования с данными натурных измерений и имеющимися в литературе сведениями (см. Таблицу) и делается вывод о высокой степени их сходства. Показывается, что модель хорошо воспроизводит некоторые явно не заложенные в её алгоритм процессы. В частности, предсказываемая моделью скорость распространяющихся вверх по каналу импульсов светимости, лежащая в диапазоне от  $7 \cdot 10^7$  до  $8 \cdot 10^7$  м/с, и характерная длина, на которой амплитуда данных импульсов уменьшается в 10 раз, равная 30 м, хорошо согласуются со средними значениями  $6.7 \cdot 10^7$  м/с и 50 м, полученными в работе [16]. Далее, модель воспроизводит все три сценария формирования ступени отрицательного лидера, описанные в исследовании [5].

### Основные геофизически значимые характеристики моделируемых отрицательных лидеров с питающими токами 100, 200 и 300 А

Тип значения	3D скорость роста, $10^5$ м/с	Пауза между ступенями, мкс	3D длина ступени, м	Заряд ступени, мКл	Погонный заряд ветви, мКл/м
Минимальное	1.81	21.6	8.6	1.83	325
Максимальное	2.75	51.8	9.2	2.11	563
Среднее	2.30	37.4	9.0	1.97	437
Эксперимент	0.9–19.8	16–25	1.3–19.8	1.0–4.0	20–1000



**Рис. 5.** Пример эволюции проводимости (а), модуля напряжённости продольного электрического поля (б), тока (в) и плотности мощности (г) энерговыделения в канале, служившем стримерной перемычкой между пространственным и основным отрицательным лидерами, на протяжении процесса формирования ступени

В разделе 2.4 подробно описываются результаты дополнительных тестовых расчётов, в которых изучался отклик модели на изменение её входных параметров и которые позволяют сделать вывод о робастности модели к данным изменениям.

В разделе 2.5 делается вывод о том, что ступенчатый характер распространения отрицательного лидера связан с асимметрией пороговых полей роста положительных и отрицательных стримеров. Получается, что из-за большего порогового поля роста отрицательному лидеру «выгоднее подождать», пока навстречу ему прорастёт положительная часть пространственного лидера, которая способна расти в меньших полях. В момент объединения двух каналов отрицательный лидер скачкообразно прирастает с образованием ступени. Здесь же обосновывается утверждение о том, что возникновение пространственных стемов на периферии стримерной зоны отрицательного лидера происходит под влиянием поля пространственного заряда, распределяемого в пространстве перед новообразованной головкой лидера в ходе вспышки короны отрицательных стримеров, завершающей формирование каждой ступени.



В разделе 2.6 подводятся итоги Главы 2 с акцентом на полученных в ней научных результатах и обосновании высокой предсказательной силы представленной модели.

Таким образом, в Главе 2 представлена численная модель развития ступенчатого отрицательного лидера молнии, в рамках которой был впервые воспроизведён полный цикл формирования его ступени, включая возникновение пространственных стемов и трансформацию части из них в пространственные лидеры. Результаты, полученные в Главе 2, опубликованы в работах [A1, A3, A5, A7, A9, A11, A12, A15–A21, A23–A25, A27].

В **Заключении** подводятся итоги работы и обозначаются перспективы дальнейшего развития представленных в ней подходов.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Найдена величина однородного поля пробоя воздуха в условиях грозового облака. Показано, что учёт отлипания электронов от отрицательных ионов заметно понижает порог пробоя, причём влияние данного эффекта усиливается с ростом высоты над уровнем моря.

2. Показано, что процесс инициации молниевых разрядов в грозовом облаке представляет собой ряд последовательных переходов на всё большие пространственно-временные масштабы: сначала происходит переход от мелкомасштабных коронных разрядов, возникающих при столкновениях (сближениях) гидрометеоров, к метровым стримерным разрядам, после чего коллективное взаимодействие биполярных стримерных систем приводит к формированию лидера молнии длиной в десятки метров. При этом промежуточным звеном при переходе от электронных лавин к биполярным стримерным системам являются дециметровые области повышенной ионной проводимости, повсеместно возникающие в объёме грозового облака как конечный результат развития коронных разрядов (центров ионизации).

3. Показано, что для инициации молнии в грозовом облаке необходимо выполнение двух условий: 1) пространственно-временная частота столкновений (сближений) гидрометеоров, приводящих к образованию коронных разрядов, должна превышать порог, равный  $0.1 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ ; 2) разность потенциалов между границами активной зоны облака, ориентированными перпендикулярно внешнему электрическому полю, должна быть не меньше, чем 3 МВ. Поскольку предлагаемый в данной работе механизм инициации молнии не требует выполнения каких-либо экстремальных для грозового облака условий, он является более предпочтительным по сравнению с конкурирующими гипотезами.

4. Разработана численная модель развития ступенчатого отрицательно-го лидера молнии, впервые учитывающая асимметрию пороговых полей роста положительных и отрицательных стримеров. Модель позволила детально

воспроизвести полный цикл формирования ступени отрицательного лидера молнии с учётом возникновения на границе его стримерной короны пространственных стемов и трансформации части из них в пространственные лидеры. С помощью модели удалось установить, что ступенчатый характер развития отрицательного лидера обусловлен асимметрией пороговых полей развития положительных и отрицательных стримеров. При этом было показано, что формирование пространственных стемов происходит на периферии стримерной зоны отрицательного лидера, где крупномасштабное внешнее поле усиливается полем пространственного заряда, неоднородно распределяемого перед новообразованной головкой лидера во время вспышки короны отрицательных стримеров, происходящей в конце формирования каждой ступени.

### СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dwyer J. R., Uman M. A.* The physics of lightning // *Phys. Rep.* 2014. V. 534, № 4. P. 147–241.
2. *Marshall T. C., McCarthy M. P., Rust W. D.* Electric field magnitudes and lightning initiation in thunderstorms // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100, № D4. P. 7097–7103.
3. *Petersen D. A., Beasley W. H.* High-speed video observations of a natural negative stepped leader and subsequent dart-stepped leader // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2013. V. 118, № 21. P. 12,110–12,119.
4. *Hill J. D., Uman M. A., Jordan D. M.* High-speed video observations of a lightning stepped leader // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116, № D16117.
5. *Qi Q., Lu W., Ma Y., Chen L., Zhan Y., Rakov V. A.* High-speed video observations of the fine structure of a natural negative stepped leader at close distance // *Atmos. Res.* 2016. V. 178-179. P. 260–267.
6. *Tran M. D., Rakov V. A., Mallick S.* A negative cloud-to-ground flash showing a number of new and rarely observed features // *Geophys. Res. Lett.* 2014. V. 41, № 18. P. 6523–6529.
7. *Jiang R., Qie X., Zhang H., Liu M., Sun Z., Lu G., Wang Z., Wang Y.* Channel branching and zigzagging in negative cloud-to-ground lightning // *Sci. Rep.* 2017. V. 7, № 3457.
8. *Rakov V. A.* A review of positive and bipolar lightning discharges // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2003. V. 84, № 6. P. 767–776.
9. *Петров Н. И., Петрова Г. Н.* Математическое моделирование траектории лидерного разряда и молниепоражаемости изолированных и заземленных объектов // *ЖТФ.* 1995. Т. 65, вып. 5. С. 41–58.
10. *Dulzon A. A., Lopatin V. V., Noskov M. D., Pleshkov O. L.* Modelling the development of the stepped leader of a lightning discharge // *Tech. Phys.* 1999. V. 44, № 4. P. 394–398.

11. *Iudin D. I., Davydenko S. S.* Fractal model of a compact intracloud discharge. I. features of the structure and evolution // Radiophys. Quantum Electron. 2015. V. 58, № 7. P. 477–496.
12. *Davydenko S. S., Iudin D. I.* Fractal model of a compact intracloud discharge. II. specific features of electromagnetic emission // Radiophys. Quantum Electron. 2016. V. 59, № 7. P. 560–575.
13. *Rakov V. A., Uman M. A.* Lightning: Physics and effects. New York: Cambridge University Press, 2005. 687 p.
14. *Campos L. Z. S., Saba M. M. F., Warner T. A., Pinto O., Krider E. P., Orville R. E.* High-speed video observations of natural cloud-to-ground lightning leaders – a statistical analysis // Atmos. Res. 2014. V. 135-136. P. 285–305.
15. *Krider E., Weidman C., Noggle R. C.* The electric field produced by lightning leader steps // J. Geophys. Res. 1977. V. 82, № 6. P. 951–960.
16. *Wang D., Takagi N., Watanabe T., Rakov V. A., Uman M. A.* Observed leader and return-stroke propagation characteristics in the bottom 400 m of a rocket-triggered lightning channel // J. Geophys. Res. Atmos. 1999. V. 104, № D12. P. 14369–14376.
17. *Iudin D. I.* Lightning-discharge initiation as a noise-induced kinetic transition // Radiophys. Quantum Electron. 2017. V. 60, № 5. P. 374–394.
18. *Kostinskiy A. Y., Syssoev V. S., Bogatov N. A., Mareev E. A., Andreev M. G., Makalsky L. M., Sukharevsky D. I., Rakov V. A.* Observation of a new class of electric discharges within artificial clouds of charged water droplets and its implication for lightning initiation within thunderclouds // Geophys. Res. Lett. 2015. V. 42, №19. P. 8165–8171.

### **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

- A1. *Iudin D. I., Rakov V. A., Mareev E. A., Iudin F. D., Syssoev A. A., Davydenko S. S.* Advanced numerical model of lightning development: Application to studying the role of LPCR in determining lightning type // J. Geophys. Res. Atmos. 2017. V. 122, № 12. P. 6416–6430.
- A2. *Iudin D. I., Rakov V. A., Syssoev A. A., Bulatov A. A., Hayakawa M.* Formation of decimeter-scale, long-lived elevated ionic conductivity regions in thunderclouds // NPJ Clim. Atmos. Sci. 2019. V. 2, № 46.
- A3. *Syssoev A. A., Iudin D. I., Bulatov A. A., Rakov V. A.* Numerical simulation of stepping and branching processes in negative lightning leaders // J. Geophys. Res. Atmos. 2020. V. 125, № 7. P. e2019JD031360.
- A4. *Булатов А. А., Иудин Д. И., Сысоев А. А.* Самоорганизующаяся транспортная модель искрового разряда в грозовом облаке // Изв. ВУЗов Радиофизика. 2020. Т. 63, вып. 2. С. 125–154.
- A5. *Syssoev A. A., Iudin D. I., Davydenko S. S., Rakov V. A.* Modeling development of negative lightning stepped leader // Proceedings of the VI International

Conference «Frontiers of Nonlinear Physics» (FNP 2016). Nizhny Novgorod, Russia, 2016. P. 242–243.

A6. *Bulatov A. A., Syssoev A. A., Davydenko S. S., Iudin D. I.* Bidirectional leader development numerical simulation // Proceedings of the International Symposium «Topical Problems of Nonlinear Wave Physics» (NWP-2017). Nizhny Novgorod, Russia, 2017. P. 104.

A7. *Kuterin F. A., Syssoev A. A., Iudin D. I.* The main negative leader tip and space stems numerical modeling // Ibid. P. 125.

A8. *Iudin D. I., Rakov V. A., Syssoev A. A., Bulatov A. A.* Percolation effects and scalar-impurity advection in a turbulent flow: implications for lightning initiation problem // Proceedings of the International Symposium «Thunderstorm and Elementary Particle Acceleration» (TEPA-2017). Byurakan, Armenia, 2017.

A9. *Сысоев А. А., Иудин Д. И., Давыденко С. С., Раков В. А.* Моделирование развития ступенчатого отрицательного лидера молнии // VI Российская конференция по молниезащите: сборник докладов. Санкт-Петербург, 2018. С. 97–124.

A10. *Иудин Д. И., Раков В. А., Сысоев А. А., Булатов А. А.* Физика молнии: сценарий инициации // Там же. С. 78–79.

A11. *Syssoev A. A., Iudin D. I., Davydenko S. S., Rakov V. A.* Modeling the stepping mechanism of development of negative lightning leader // Proceedings of the XVI International Conference on Atmospheric Electricity (ICAE 2018). Nara, Japan, 2018.

A12. *Iudin D. I., Syssoev A. A., Popov N. A.* Generation of stems in streamer corona of negative leader // Ibid.

A13. *Iudin D. I., Rakov V. A., Popov N. A., Syssoev A. A., Bulatov A. A.* Collective dynamics of charged hydrometeors in thunderclouds and lightning initiation // Ibid.

A14. *Iudin D. I., Rakov V. A., Syssoev A. A., Bulatov A. A.* Thunderstorm electric field structural features and lightning initiation problem // Proceedings of the International Symposium «Thunderstorm and Elementary Particle Acceleration» (TEPA-2018). Byurakan, Armenia, 2018. P. 118–136.

A15. *Syssoev A. A., Iudin D. I., Bulatov A. A., Rakov V. A.* Numerical modeling of stepping process in negative lightning leaders // Proceedings of the International Symposium «Thunderstorm and Elementary Particle Acceleration» (TEPA-2019). Byurakan, Armenia, 2019.

A16. *Сысоев А. А.* Моделирование развития отрицательного ступенчатого лидера молнии // XVII Научная школа «Нелинейные волны – 2016»: тезисы докладов. Нижний Новгород, 2016. С. 139.

A17. *Сысоев А. А., Иудин Д. И., Давыденко С. С., Раков В. А.* Моделирование развития отрицательного ступенчатого лидера молнии // 20-я Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы»: тезисы докладов. Нижний Новгород, 2016. С. 49.

A18. *Сысоев А. А., Иудин Д. И., Давыденко С. С., Раков В. А.* Моделирование механизма ступенчатого развития отрицательного лидера молнии // 21-я Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы»: тезисы докладов. Нижний Новгород, 2017. С. 79–80.

A19. *Iudin D. I., Syssoev A. A., Davydenko S. S., Rakov V. A.* Modeling the stepping mechanism in negative lightning leaders // Geophysical Research Abstracts. Vienna, Austria, 2017. V. 19. EGU2017–18664.

A20. *Сысоев А. А., Иудин Д. И., Давыденко С. С., Раков В. А.* Моделирование динамики развития отрицательного ступенчатого лидера молнии // XVIII Научная школа «Нелинейные Волны – 2018»: тезисы докладов. Нижний Новгород, 2018. С. 186.

A21. *Сысоев А. А., Иудин Д. И., Давыденко С. С., Раков В. А.* Моделирование нисходящего ступенчатого отрицательного лидера молнии // 23-я Нижегородская сессия молодых учёных. Технические, естественные, математические науки: материалы докладов. Нижний Новгород, 2018. Т. 2. С. 50–51.

A22. *Iudin D. I., Rakov V. A., Syssoev A. A., Bulatov A. A.* Dynamics of ions in thunderclouds and lightning initiation // Geophysical Research Abstracts. Vienna, Austria, 2019. V. 21. EGU2019–2659.

A23. *Сысоев А. А., Иудин Д. И., Булатов А. А., Раков В. А.* Численное моделирование процесса развития ступенчатого отрицательного лидера молнии // 15-я ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе»: материалы докладов. Москва, 2020. С. 332.

A24. *Сысоев А. А., Иудин Д. И.* Формирование пространственных стемов на периферии стримерной короны отрицательного лидера // XIX Научная школа «Нелинейные волны – 2020»: тезисы докладов. Нижний Новгород, 2020. С. 247–248.

A25. *Syssoev A. A., Iudin D. I.* A possible mechanism of space stem precursors formation at the negative lightning leader corona streamer burst periphery // Geophysical Research Abstracts. Vienna, Austria (online), 2020. EGU2020–11022.

A26. *Iudin D. I., Rakov A. A., Syssoev A. A., Bulatov A. A.* Streamer network critical behavior and lightning initiation // Ibid. EGU2020–12799.

A27. *Сысоев А. А., Иудин Д. И.* Моделирование процесса формирования пространственного стема на периферии стримерной короны отрицательного лидера молнии // 23-я Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы»: тезисы докладов. Борок, 2020. С. 114–115.

## ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение.....	4
Глава 1. Инициация молнии в облаке.....	16
1.1. Обзор проблемы .....	16
1.2. Формулировка задачи .....	20
1.3. Уточнение концепции однородного электрического поля пробоя воздуха в условиях грозового облака.....	23
1.3.1. Традиционная концепция поля пробоя воздуха.....	23
1.3.2. Основные уравнения и реакции.....	24
1.3.3. Нахождение однородного поля пробоя грозового облака .....	29
1.3.4. Эффективная частота ионизации.....	33
1.4. Переход от лавин к стримерам .....	35
1.4.1. Динамика отрицательных ионов .....	35
1.4.2. Центры производства ионов .....	36
1.4.3. Эффект взаимного перекрывания центров производства ионов .....	38
1.4.4. Критическая частота возникновения центров производства ионов .....	39
1.4.5. Механизм формирования стримеров .....	43
1.5. Взаимодействие стримеров в грозовом облаке.....	49
1.6. Моделирование процесса формирования лидера молнии в грозовом облаке .....	56
1.6.1. Современные представления о процессе формирования лидера молнии .....	56
1.6.2. Первый метод моделирования .....	57
1.6.3. Второй метод моделирования.....	66
1.7. Выводы главы 1 .....	70
Глава 2. Моделирование отрицательного ступенчатого лидера молнии .....	74
2.1. Обзор проблемы .....	74
2.2. Формулировка модели .....	76
2.2.1. Постановка задачи .....	76
2.2.2. Распределение электрического поля и потенциала .....	77
2.2.3. Асимметрия полярностей.....	79
2.2.4. Пороговые поля инициации и распространения разряда .....	81
2.2.5. Базовый алгоритм развития лидера.....	84
2.2.6. Моделирование ступенчатого механизма развития отрицательного лидера .....	89
2.3. Результаты.....	93
2.3.1. Морфология модельных лидеров .....	93
2.3.2. Основные характеристики модельных лидеров .....	97
2.3.3. Динамика формирования ступеней .....	102

2.3.4. Некоторые дополнительные особенности развития модельных лидеров .....	107
2.4. Анализ чувствительности модели к изменению её входных параметров .....	109
2.5. Обсуждение .....	115
2.6. Выводы главы 2 .....	120
Заключение .....	123
Список литературы .....	125

СЫСОЕВ Артем Андреевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ  
ИНИЦИАЦИИ МОЛНИЕВОГО РАЗРЯДА  
И РАСПРОСТРАНЕНИЯ СТУПЕНЧАТОГО  
ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ЛИДЕРА МОЛНИИ**

Автореферат

Подписано к печати 23.10.2020 г.  
Формат  $60 \times 90^{1/16}$ . Усл. печ. л. 1,5.  
Тираж 100 экз. Заказ № 43(2020).

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