

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

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

**«Исследование инициации и механизмов распространения различных типов
молниевых разрядов»**

Аспирант:

Сысоев Артем Андреевич

Научный руководитель:

Иудин Д. И.

д. ф.-м. н., д. б. н.,
доцент по специальности,
внс лаб. 261

Направление подготовки:

05.06.01 Науки о Земле

Направленность (профиль) подготовки:

25.00.29 Физика атмосферы и гидросферы

Форма обучения: очная

Нижний Новгород
2019

Актуальность темы диссертации

В недавнем обзоре [1] был представлен список десяти наиболее важных открытых вопросов, касающихся физики молнии. Возглавляет данный список рассматриваемая в главе 1 данной работы проблема инициации молнии в облаке. На втором месте стоит вопрос о том, какие физические механизмы отвечают за распространение различных типов молниевых разрядов, в том числе и отрицательных ступенчатых и возвратных лидеров молнии, моделируемых в главах 2 и 4 соответственно. Особую научную ценность главам 2 и 4 данного исследования придаёт факт того, что недавние экспериментальные результаты многочисленных исследований (см., например, [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]), посвящённых высокоскоростной съёмке молниевых разрядов, нуждаются в теоретическом осмыслении и создают богатую почву для численного моделирования.

Кроме чисто научного интереса, полученные в данной работе знания об особенностях развития молниевых разрядов различных типов будут иметь прикладную ценность, связанную с совершенствованием методов молниезащиты. В этой связи особенно важной является часть работы, посвящённая моделированию положительных лидеров молнии с учётом присущих им возвратных лидеров. Хотя известно, что среди разрядов типа облако-земля положительные составляют всего лишь около 10% [11], связанные с ними импульсы тока возвратного удара могут иметь десятикратно большую амплитуду тока (до 300 кА [11] против 30 кА типичных для отрицательного лидера [12, с. 7]) и гораздо большую фазу непрерывного тока, что делает положительные молниевые разряды на землю гораздо более опасными с точки зрения потенциального экономического ущерба по сравнению с наиболее распространёнными отрицательными.

Цели и задачи диссертационной работы

Основная цель данной работы состоит в попытке пролить свет на два наиболее интригующих вопроса физики молнии, обозначенных выше. Первая глава работы посвящена подробному описанию механизма инициации молнии в облаке, начиная от столкновения гидрометеоров и заканчивая слиянием многочисленных стримерных систем в хорошо проводящий лидерный канал. Вторая и третья главы раскрывают механизм образования ступеней отрицательного лидера. В том числе, в деталях анализируется процесс формирования пространственных стемов, зародышей пространственных лидеров, на периферии стримерной короны отрицательного лидера. Целью четвёртой главы является объяснение механизма возникновения так называемых возвратных лидеров молнии. Более конкретно задачи работы можно сформулировать следующим образом:

- Уточнить величину порогового поля пробоя воздуха в условиях грозового облака;
- Определить механизм, отвечающий за инициацию и устойчивый рост стримеров в безэлектродной среде грозового облака;
- На основе численной модели обосновать возможность формирования лидера молнии в облаке за счёт объединения токов десятков тысяч взаимодействующих между собой стримерных систем;
- Разработать численную модель отрицательного ступенчатого лидера молнии с учётом асимметрии полей развития положительных и отрицательных стримеров с целью поиска физического механизма, отвечающего за формирование ступени отри-

пательного лидера и делающего ступенчатый способ распространения более предпочтительным;

- Взяв за основу дрейфово-диффузионные уравнения, описывающие эволюцию электронов и положительных и отрицательных ионов, разработать мелкомасштабную численную модель формирования пространственных стемов на периферии стримерной короны отрицательного лидера и на её основе определить физический механизм, приводящий к их возникновению;
- Разработать численную модель биполярного лидера молнии в облаке с учётом асимметрии полей развития положительных и отрицательных стримеров и термодинамики разрядных каналов с целью поиска физического механизма, отвечающего за возникновение возвратных лидеров, сопровождающих развитие положительной части молнии.

Методы исследования

Как уже было отмечено выше, даже в том случае, когда известны точные дифференциальные уравнения, описывающие эволюцию разряда, очень редко удается найти их аналитические решения. Разумной альтернативой традиционному подходу служит физически обоснованная феноменологическая модель на базе сети стохастических клеточных автоматов, содержащая ограниченное число параметров, варьирование которых позволяет описать широкий круг наблюдаемых явлений (см., например, [13, 14, 15, 16, 17, 18]). В связи с этим, используемый в данной работе подход к решению обозначенных задач осуществляется через представление исследуемой разрядной структуры в виде сети клеточных автоматов, в которой каждому узлу модельной решетки поставлено в соответствие зависящее от дискретного времени поведение отдельного элемента-автомата. Переход к сети клеточных автоматов целесообразен также по причине того, что, согласно данным натурных измерений, широкомасштабная динамика геофизических систем очень часто облекается в универсальную форму скейлинга, когда в достаточно широком диапазоне пространственно-временных интервалов явление характеризуется свойством самоподобия. Самоподобие характерно и для крупномасштабной электрической структуры грозового облака, и для морфологии молниевых разрядов, и для его электромагнитной эмиссии. Последнее обстоятельство делает актуальным применение методов фрактальной геометрии. А используемым в численном моделировании математическим образом фрактальных структур как раз и являются перколяционные кластеры и фрактальные графы.

По мнению автора, применяемый в данной работе метод математического моделирования, включающий в себя разумный набор параметризаций основных физических процессов, является наиболее перспективным способом изучения таких сложных систем, к которым безусловно относятся любые атмосферные разряды в целом и молнии в частности.

Научная новизна работы

Представленный в первой главе работы механизм инициации молнии в облаке принципиально отличается от всех предложенных ранее подходов. Такие базовые элементы

предложенного механизма, как определение пробойного поля в условиях грозового облака, формирование областей повышенной ионной проводимости и механизм их дальнейшей эволюции, в конце концов приводящий к возникновению заполняющих объём облака стримерных систем, не были, насколько известно автору, описаны ни в одной опубликованной работе.

Описанная во второй главе модель развития ступенчатого отрицательного лидера не имеет аналогов, так как, насколько известно автору, ни одна из опубликованных ныне моделей развития молнии не учитывает ни асимметрию характерных полей развития положительных и отрицательных стримеров, ни возможность возникновения пространственных стемов перед новообразованной головкой отрицательного лидера. Более того, представленная во второй главе модель является первым реализованным подходом с “метаболизмом”, под которым в данном случае понимается возможность объединения нескольких каналов в один. Поскольку описанная в четвёртой главе модель эволюции биполярного лидера молнии развивает идеи модели отрицательного ступенчатого лидера, она обладает той же степенью научной новизны. Более того, для корректного описания особенностей развития впервые воспроизведенных в рамках численной модели возвратных лидеров молнии в модель была включена термодинамика разрядных каналов, что также не имеет аналогов в литературе. Данное нововведение придаёт модели ещё одно принципиально новое свойство, условно называемое “памятью”, которое заключается в том, что вновь возникающие разрядные структуры в процессе роста воспроизводят траектории своих ранее затухших предшественников, каналы которых в течение какого-то времени после отмирания все ещё сохраняют остаточный прогрев. Что касается представленной в третьей главе модели формирования пространственных стемов на периферии стримерной короны отрицательного лидера, можно с уверенностью сказать, что она не имеет аналогов в науке, так как впервые, насколько известно автору, рассматривает коллективную динамику заряда головок остановившихся отрицательных стримеров. Поскольку ранее никто не пытался искать причину возникновения пространственных стемов с точки зрения пространственно-временного шума, базовыми элементами которого являются головки остановившихся отрицательных стримеров, полученные с помощью данной модели результаты также являются принципиально новыми.

Таким образом, можно с уверенностью сказать, что как используемые в работе подходы, так и полученные с помощью них научные результаты, являются принципиально новыми.

Научная значимость результатов исследования

Научная значимость поставленных задач определяется, прежде всего, самими объектами исследования. Как уже было отмечено, несмотря на всю развитость современной науки, до сих пор не ясно, каким образом происходит процесс инициации молнии в безэлектродной диэлектрической облачной среде и какие физические механизмы отвечают за распространение различных типов молниевых разрядов. На первостепенную важность данных проблем указывает факт того, что они занимают две первые позиции в списке десяти наиболее важных вопросов, касающихся физики молнии [1].

Подчеркнём, что на настоящий момент, несмотря на огромное количество экспериментальных данных, теоретическое описание различных типов молниевых разрядов во многом находится на стадии сбора информации. Это прежде всего обусловлено чрез-

вычайной сложностью процесса развития искрового разряда в воздухе, объединяющего в себе такие области знаний, как электродинамика, плазмохимия, термодинамика и статистическая физика с одной стороны, и фрактальный анализ — с другой. В связи с этим любая научная работа, направленная на осмысление собранных экспериментальных данных, приобретает особую значимость. Поскольку в данной работе предлагается принципиально новый механизм инициации молнии, который, к тому же, выгодно отличается от предшествующих подходов тем, что может работать в типичных для грозового облака условиях без привлечения каких-либо дополнительных труднодостижимых предположений, можно с уверенностью сказать, что настоящее исследование обладает научной ценностью. Кроме того, представленные в последних трёх главах численные модели напрямую направлены на изучение механизмов распространения отрицательного ступенчатого и возвратного лидеров молнии, что ещё больше увеличивает научную значимость работы. Далее, поскольку представленные в работе модели развития лидеров молнии описывают динамику текущих по разрядному дереву токов, они могут быть применены к расчёту электромагнитного излучения различных типов молниевых разрядов.

Основные положения, выносимые на защиту

На защиту диссертационной работы выносятся следующие положения:

- Учёт отлипания электронов от отрицательных ионов существенно понижает пороговое поле пробоя воздуха, причём влияние данного эффекта усиливается с увеличением высоты над уровнем моря.
- Процесс инициации молниевых разрядов в безэлектродном 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.
- 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, выступающих в роли центров ионизации.
- Предлагаемый в данной работе механизм инициации молнии в облаке является более предпочтительным по сравнению с другими гипотезами, так как, в отличие от них, не требует выполнения каких-либо экстремальных для грозового облака условий.
- Ступенчатый характер развития отрицательного лидера связан с асимметрией пороговых полей развития положительных и отрицательных стримеров.
- Формирование пространственных стемов происходит на периферии стримерной короны отрицательного лидера в областях с повышенной пространственно-временной частотой поступления заряда остающихся головок отрицательных стримеров.

- Характерное время формирования пространственных стемов растёт с увеличением высоты над уровнем моря.
- Учёт остаточного прогрева затухшего лидерного канала приводит к существенному падению приведённого поля в нём, что создаёт благоприятные условия для формирования биполярных возвратных лидеров.
- Возникновение возвратных лидеров происходит на периферии затухшей ветви основного положительного канала, где электрическое поле в меньшей степени ослаблено чехлом заряда лидерного канала.

Достоверность полученных результатов

Достоверность представленного в первой главе механизма инициации молнии в облаке обеспечивается уже самим фактом того, что реализация предложенного подхода не предполагает выполнения каких-либо экстремальных условий, будь то наличие высокоэнергичных частиц солнечного ветра, протяженных областей с нереалистично большой напряженностью электрического поля, повышенного уровня предионизации облачной среды или вытянутых гидрометеоров дециметрового масштаба, необходимых для предшествующих подходов. Описанный сценарий не требует напряжённостей электрических полей, превышающих максимальные измеренные в облаке значения, и становится жизнеспособным при величине пространственно-временной частоты столкновений гидрометеоров, превышающей пороговое значение, равное $10^{-1} \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$, которое легко может быть достигнуто в типичном грозовом облаке (см. пункт 1.6).

Разработанные в данном исследовании численные модели развития отрицательного ступенчатого и биполярного лидеров молнии верифицированы путём сравнения морфологии и параметров модельных разрядов с имеющимися в соответствующей литературе [12, 19, 20, 3, 21] сведениями и данными натурных наблюдений [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. При этом предсказываемые моделью морфология и наблюдаемые параметры лидеров обеих полярностей хорошо согласуются с имеющимися на сегодняшний день данными. Модели успешно воспроизводят ряд таких сложных по своей физической природе явлений, как цикл формирования ступеней отрицательного лидера и все возможные сценарии развития возвратных лидеров молнии, не говоря уже об электростатической стороне эволюции разрядных каналов. Кроме того, робастность модели развития отрицательного ступенчатого лидера молнии к вариациям входных параметров была подтверждена многочисленными тестами (см. раздел 2.7).

Что касается предложенного в третьей главе механизма формирования пространственных стемов, прямое сравнение результатов моделирования с экспериментом невозможно по причине отсутствия необходимых для этого данных измерений в объёме стримерной зоны не только отрицательного лидера молнии, но даже лабораторной длинной искры отрицательной полярности. Вместо этого в пунктах 3.3 и 3.4 представлен ряд рассуждений и оценок, подтверждающих реализуемость описанного подхода в натуральных условиях.

Публикации и апробация результатов

Часть результатов исследований по теме диссертации опубликована в статье [18] в высокорейтинговом рецензируемом журнале. На момент написания диссертации на-

правлены ещё четыре статьи: три по вопросу инициации молнии в грозовом облаке [22, 23, 24] и одна по моделированию процесса ступенчатого развития отрицательно-го лидера молнии [25]. Результаты работы докладывались автором и обсуждались на научных семинарах Института прикладной физики РАН, а также на многочисленных конференциях как лично автором [26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33], так и его коллегами [34, 35, 36, 37, 38]. Кроме того, выступления автора на XXI-ом Конкурсе работ молодых ученых ИПФ РАН и на XXIII-ей 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

Автор принимал активное участие в выборе направления исследований по теме диссертации, постановке задач и поиске путей их решения. Автор принимал участие в расчётах и формулировке ряда положений первой главы данной работы. Разработка представленных в последних трёх главах численных моделей и анализ полученных с помощью них результатов были выполнены автором лично при моральной поддержке со стороны старших членов научного коллектива. Силами автора выполнена значительная часть работы по подготовке результатов исследований к публикации.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх основных глав, заключения, списка цитированной литературы из 149 наименований (включая 1 статью с участием автора, опубликованную в рецензируемом научном журнале). Общий объём диссертации составляет 211 страниц, включая 14 таблиц и 48 рисунков.

Краткое содержание работы

В **первой главе** работы предлагается принципиально новый механизм инициации молнии в облаке, развивающий идеи, заложенные в работе [39].

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

Раздел 1.2 посвящён краткому описанию последовательности анализируемых в главе процессов, приводящих к формированию зародыша молнии.

В разделе 1.3 на основе анализа системы дрейфово-диффузионных уравнений, описывающих эволюцию концентраций электронов, положительных и трёх типов отрицательных ионов, уточняется концепция пробойного электрического поля в условиях грозового облака и показывается, что учёт отлипания электронов от отрицательных ионов приводит к существенному падению пробойного поля (см. Рисунок 1).

В разделе 1.4 вводятся понятия центров производства ионов, ассоциированных с мелкомасштабными коронными разрядами, возникающими при столкновениях (сближениях) гидрометеоров, и областей повышенной ионной проводимости, повсеместно появляющихся в объёме грозового облака как конечный результат развития данных ионизационных центров. Описан механизм роста ионной компоненты за счёт образования новых вспышек поверх обладающих предионизацией остатков старых, который начинает работать при значении пространственно-временной частоты соударений гидрометеоров

большой, чем $\mathcal{M}_c = \mathcal{V}_c / \mathcal{S} \approx 0.1 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$. Показано, что ионные кластеры, поляризуясь во внешнем электрическом поле, становятся плацдармом для возникновения сперва положительных, а затем и отрицательных стримеров. Обсуждается механизм положительной обратной связи, посредством которого биполярные стримерные системы заполняют значительную часть объёма грозового облака.

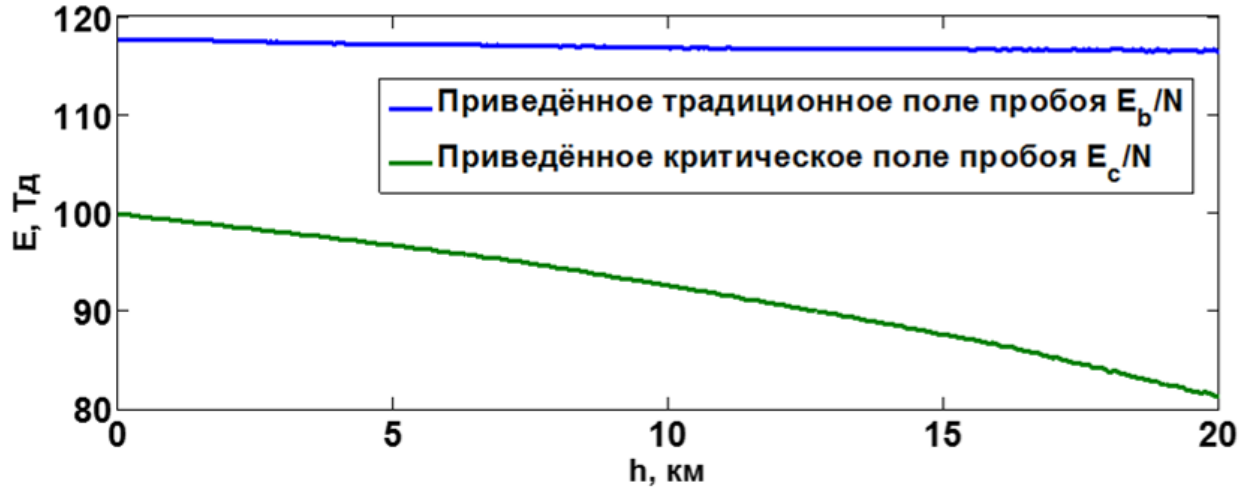


Рис. 1: Зависимости традиционного E_b/N и полученного в данной работе критического E_c/N приведённых полей пробоя воздуха от высоты над уровнем моря.

В разделе 1.5 описана численная транспортная модель искрового разряда, 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 слаботочным лабораторным лидером и развитым молниевым каналом.

В разделе 1.6 подводятся итоги главы и подчёркивается факт того, 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.

Вторая глава работы посвящена моделированию распространения и ветвления ступенчатого отрицательного лидера молнии на основе разработанной автором численной модели.

В разделе 2.2 приводится формулировка модели. В частности, поясняется постановка задачи и описывается, каким образом алгоритм учитывает асимметрию характерных полей развития положительных и отрицательных стримеров и временную эволюцию параметров разрядных каналов и какие положения модели позволяют воспроизвести полный цикл процессов формирования ступени отрицательного лидера (см. Рисунок 2).

В разделе 2.3 детально описываются результаты моделирования, включающие морфологию, общие характеристики отрицательного лидера и параметры его ступеней. Кроме того, анализируются свойства стримерной короны лидера и формирующихся на её периферии пространственных стемов / лидеров. Здесь же приводится сравнение ре-

зультатов моделирования с данными натурных измерений и имеющимися в литературе сведениями и делается вывод о высокой степени их сходства (см. также раздел 2.5).

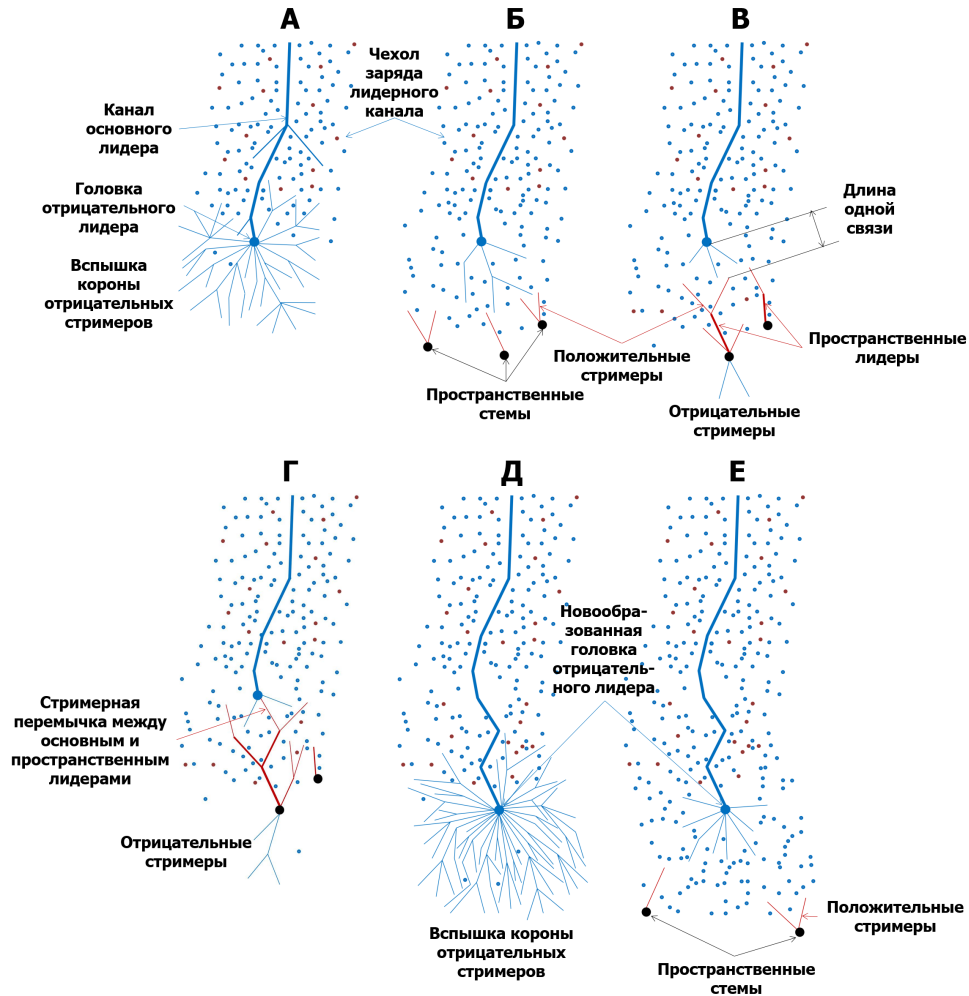


Рис. 2: Схема воспроизведённого в рамках модели цикла формирования ступени отрицательного лидера. Полный цикл (А-Е) обычно длится несколько десятков микросекунд. Тёмно-красный и голубой цвета отвечают положительной и отрицательной полярностям соответственно. Более жирные линии отвечают большим проводимостям каналов. Чёрные кружки символизируют пространственные стемы. Положительные и отрицательные пространственные заряды обозначены тёмно-красными и голубыми точками соответственно.

В разделе 2.4 делается вывод о том, что ступенчатый характер распространения отрицательного лидера связан с асимметрией пороговых полей развития положительных и отрицательных стримеров, причём возникновение пространственных стемов на периферии стримерной зоны лидера происходит под влиянием поля пространственного заряда, распределяемого в пространстве перед новообразованной головкой лидера в ходе вспышки короны отрицательных стримеров, завершающей формирование каждой новой ступени.

В разделе 2.7 описываются результаты дополнительных тестовых расчётов, которые

позволяют говорить о робастности модели к изменениям её входных параметров.

Третья глава продолжает изучение ступенчатого отрицательного лидера молнии на гораздо более мелких миллиметровых масштабах, на которых происходит формирование пространственных стемов, и описывает один из возможных механизмов данного процесса на базе методов, используемых в главе 1.

В разделе 3.2 приводится постановка задачи. В частности, подробно описываются геометрия и электрические параметры стримерной короны отрицательного лидера и элементов пространственно-временного шума (см. Рисунок 3), в роли которых выступают заряженные головки остановившихся отрицательных стримеров. Обсуждаются основные уравнения модели, центральным звеном которых является анализируемая в разделе 1.3 первой главы система дрейфово-диффузионных уравнений, описывающая эволюцию концентраций электронов, положительных и трёх типов отрицательных ионов, к правой части которой добавляются шумовые члены.

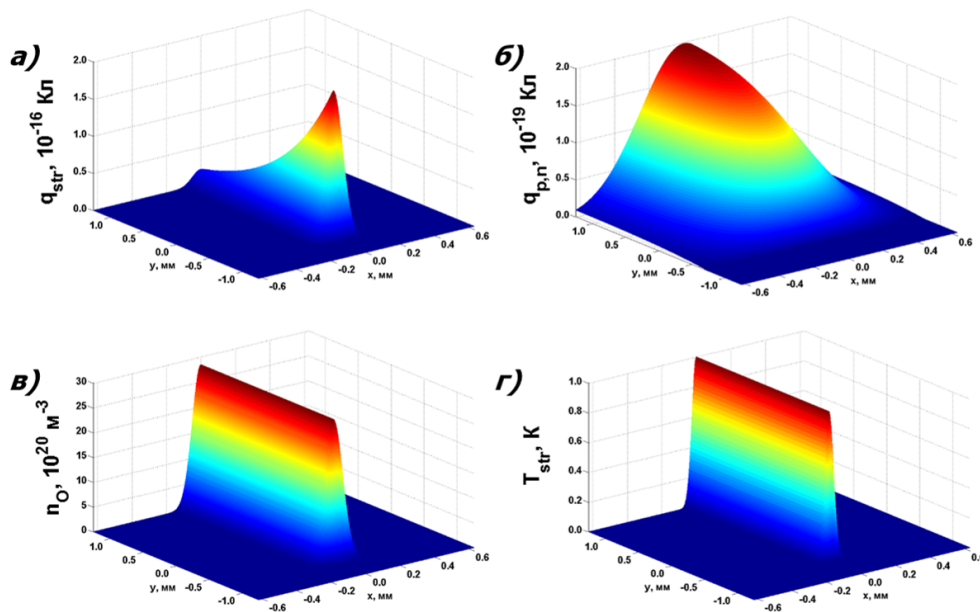


Рис. 3: Пространственное распределение останков отрицательного стримера, являющихся базовыми элементами пространственно-временного шума и приведённых для нулевой высоты над уровнем моря. Отрицательный заряд (а) преимущественно сосредоточен в области головки остановившегося стримера и экспоненциально быстро убывает при удалении от неё. Стримерный след состоит из равного количества положительных и отрицательных ионов (б) и атомарного кислорода (в) и имеет повышенную по сравнению с окружающим воздухом температуру (г).

В разделе 3.3 представлены результаты моделирования и описан механизм формирования центров ионизации, предшествующих появлению пространственных стемов, в основе которого лежит совокупное действие процессов ионизации и диффузии (см. Рисунок 4). Показано, что появление данных центров происходит на периферии стримерной короны отрицательного лидера в условиях сильно неоднородного стохастического электрического поля, создаваемого хаотически распределёнными в пространстве кластерами отрицательного заряда, выносимыми в объём стримерной короны головками отрицательных стримеров. Установлено, что необходимым условием реализации предло-

женного механизма является высокое (на общем фоне) значение локальной интенсивности пространственно-временного шума. Получена зависимость времени формирования предшествующих пространственным стемам плазменных образований от интенсивности пространственно-временного шума.

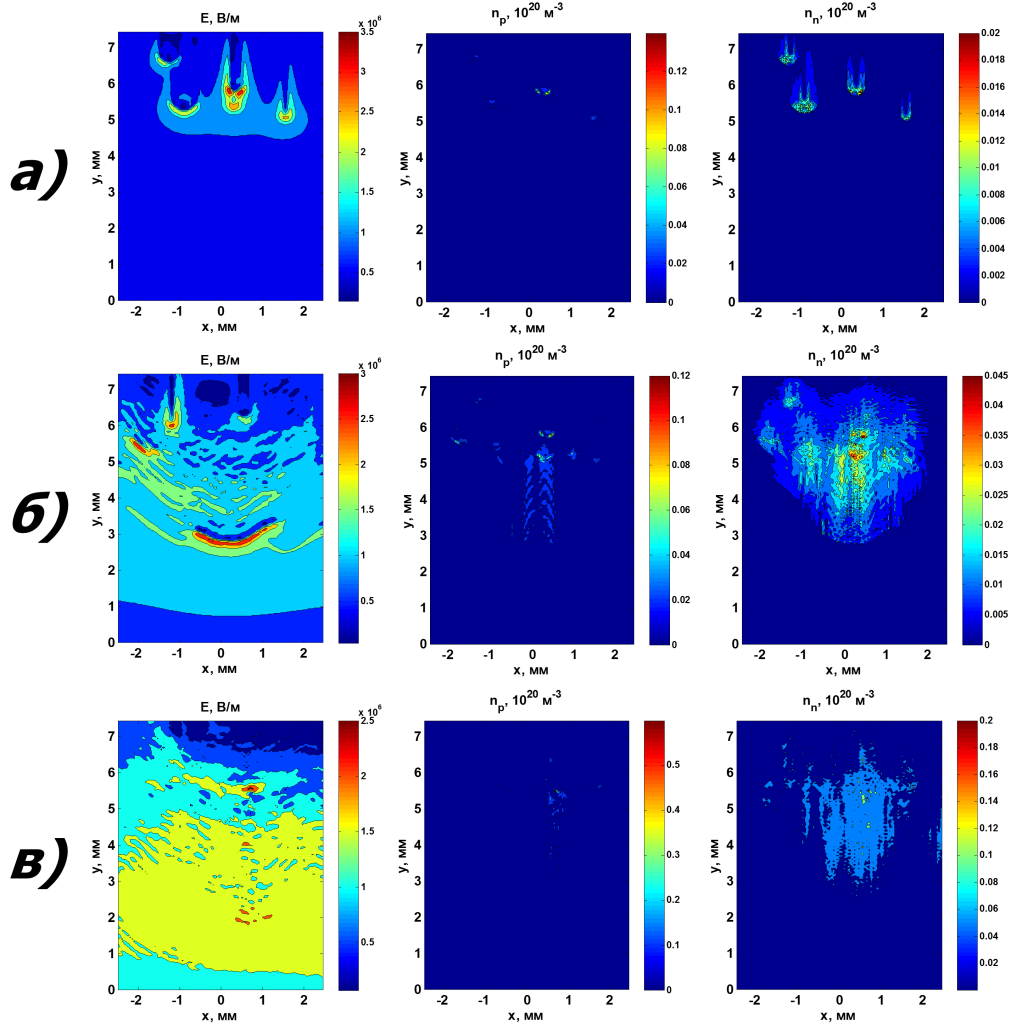


Рис. 4: Три стадии формирования предшественника пространственного стема: (а, 12.5 нс от начала моделирования) первые головки отрицательных стримеров останавливаются в доступной для них области модельного объёма и своим зарядом порождают волны ионизации; (б, 55.2 нс от начала моделирования) локальный рост концентрации положительных и отрицательных ионов, порождаемых многочисленными волнами ионизации; (в, 159.6 нс от начала моделирования) возникающая вследствие поляризации область положительного заряда становится аналогом анода, способного дать начало положительным стримерам. На рисунке представлены нормированные на 10^{20} м^{-3} концентрации положительных n_p и отрицательных n_n ионов и электрическое поле E . Результаты представлены для высоты $h = 3 \text{ км}$ и интенсивности пространственно-временного шума $\eta = 8.6 \cdot 10^6 \text{ Кл}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{с}^{-1}$.

В разделе 3.4 приводятся оценки, подтверждающие возможность реализации пред-

ложенного механизма в реальных условиях. Показывается, что предсказываемое моделью время формирования пространственных стемов растёт с увеличением высоты над уровнем моря. Обсуждаются сходства и различия описанных в работе механизмов инициации молнии в облаке и возникновения предшественников пространственных стемов на периферии стримерной короны отрицательного лидера.

Четвёртая глава развивает модельный подход главы 2 на случай описания развития биполярного лидера молнии, причём особое внимание уделяется положительной части разряда и ассоциированных с ней возвратных лидеров.

В разделе 4.1 обсуждается механизм развития положительного лидера молнии и описываются возможные сценарии эволюции биполярных возвратных лидеров (см. Рисунок 5), открытые путём анализа данных высокоскоростной съёмки.

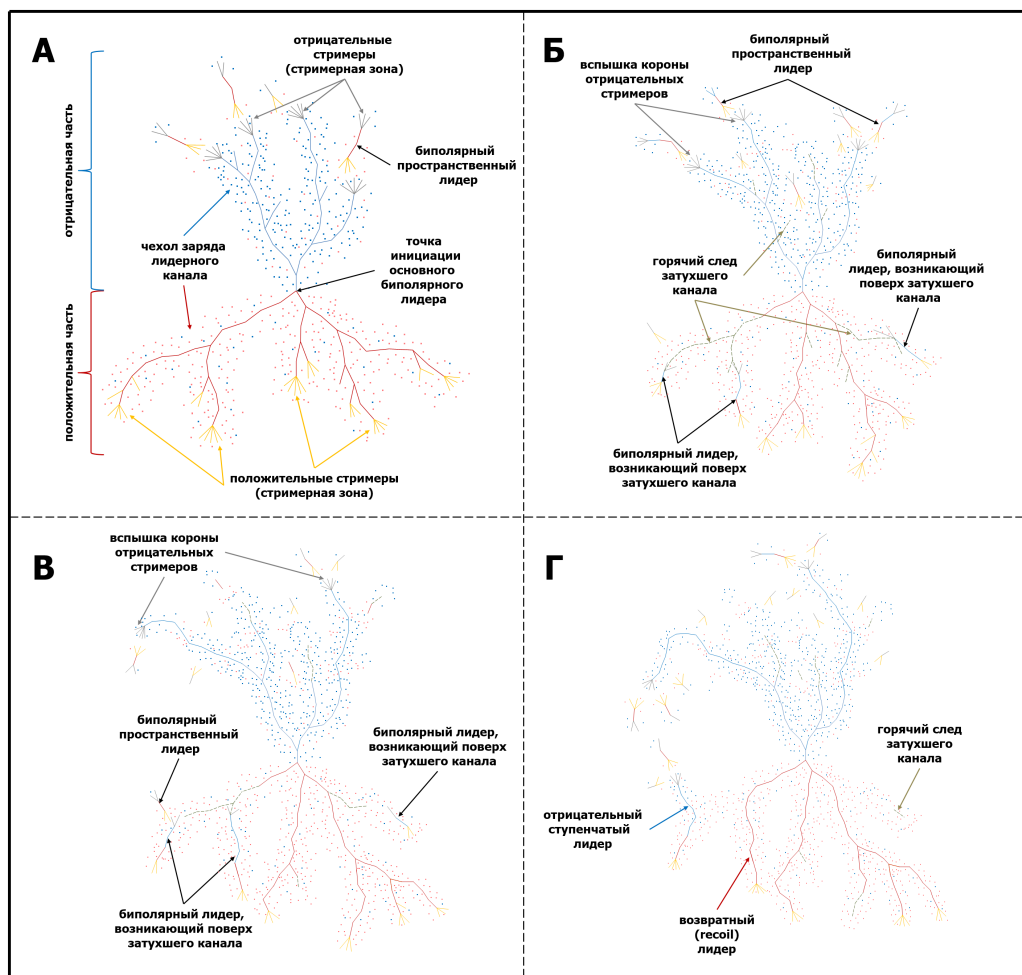


Рис. 5: Схематичное представление различных процессов, сопровождающих развитие биполярного лидера молнии. Эпизоды А–Г представлены в хронологическом порядке. Наиболее развитая отрицательная часть биполярного пространственного лидера, возникающего на конце горячего канала, оставшегося после затухания ветви основного положительного лидера, может либо стать возвратным лидером и породить “ступень”, либо сойти с траектории остаточного канала и превратиться в ступенчатый отрицательный лидер, либо отмереть.

В разделе 4.2 приводится постановка задачи, обсуждаются модификации, внесённые в базовую модель отрицательного ступенчатого лидера (см. вторую главу данной работы) и детально описывается наиболее важная для воспроизведения возвратных лидеров инновационная термодинамическая часть модели.

В разделе 4.3 описываются результаты моделирования, полученные для двух типов исходных распределений облачного заряда: “положительный монополь” и “инвертированный диполь”. Приводятся данные о трёхмерной пространственной структуре модельных разрядов, а также их общих и электрических параметрах. Визуализируются осциллограммы тока, напряжённости продольного электрического поля, проводимости и плотности мощности в исходном канале, отделяющем положительную часть разряда от отрицательной. Обсуждается степень соответствия модельных результатов имеющимся в литературе данным и результатам экспериментальных наблюдений.

В разделе 4.4 на базе анализа результатов моделирования приводятся подтверждения гипотезы о том, что возникновение возвратных лидеров молнии связано с наличием остаточного прогрева температуры затухшего канала, и обосновываются экспериментально наблюдаемые детали механизма их развития. Описывается появляющийся благодаря учёту термодинамики разрядных каналов эффект памяти, отвечающий за воспроизведение возвратных лидеров молнии. Обсуждаются недостатки модели и возможные пути их устранения.

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

Оглавление

Введение	5
1 Инициация молнии в облаке	17
1.1 Введение	17
1.2 Формулировка задачи	21
1.3 Уточнение концепции однородного электрического поля пробоя воздуха .	24
1.3.1 Традиционная концепция поля пробоя воздуха	24
1.3.2 Основные уравнения и реакции	25
1.3.3 Уточнение концепции однородного поля пробоя	31
1.3.4 Эффективная частота ионизации	34
1.4 Переход от лавин к стримерам	37
1.4.1 Динамика отрицательных ионов	37
1.4.2 Центры производства ионов	38
1.4.3 Эффект взаимного перекрыwania центров производства ионов . .	40
1.4.4 Критическая частота возникновения центров производства ионов	42
1.4.5 Механизм формирования стримеров	46
1.4.6 Взаимодействие стримеров в грозовом облаке	52
1.5 Численное моделирование процесса формирования лидера молнии в облаке	59
1.5.1 Идеологическая основа модели	59
1.5.2 Постановка задачи	61
1.5.3 Рост и распад разрядных каналов	62
1.5.4 Эволюция динамических переменных	66
1.5.5 Результаты	68
1.5.6 Анализ результатов моделирования	72
1.6 Выводы	76
2 Моделирование отрицательного ступенчатого лидера молнии	81
2.1 Введение	81
2.2 Формулировка модели	82
2.2.1 Постановка задачи	82
2.2.2 Распределение электрического поля и потенциала	83
2.2.3 Пороговые поля инициации и распространения разряда	85
2.2.4 Базовый алгоритм развития лидера	88
2.2.5 Моделирование ступенчатого механизма развития отрицательного лидера	94
2.3 Результаты	98
2.4 Обсуждение	114

2.5	Выводы	119
2.6	Приложение А. Асимметрия полярностей	121
2.7	Приложение Б. Проверка чувствительности модели к изменению входных параметров	122
3	Механизм формирования предшественников пространственных стемов на периферии стримерной короны отрицательного лидера	130
3.1	Введение	130
3.2	Постановка задачи	132
3.2.1	Морфологические и электрические особенности стримерной зоны отрицательного лидера	132
3.2.2	Параметры элементов пространственно-временного шума	139
3.2.3	Основные уравнения модели	143
3.3	Результаты	150
3.4	Обсуждение	159
3.5	Выводы	163
3.6	Приложение А. Метод обеспечения корректности счёта	164
4	Моделирование биполярного лидера молнии	169
4.1	Введение	169
4.2	Описание модели	172
4.2.1	Постановка задачи	172
4.2.2	Описание термодинамики разрядного канала	174
4.3	Результаты	181
4.3.1	Результаты моделирования для исходного распределения облачного заряда типа “положительный монополь”	181
4.3.2	Результаты моделирования для исходного распределения облачного заряда типа “инвертированный диполь”	185
4.4	Обсуждение	189
4.5	Выводы	193
	Заключение	195
	Список литературы	197

Литература

- [1] Joseph R. Dwyer, Martin A. Uman. *The physics of lightning* // Physics Reports, **534**, 4, pp. 147–241 (2014).
- [2] Danyal A. Petersen, William H. Beasley. *High-speed video observations of a natural negative stepped leader and subsequent dart-stepped leader* // Journal of Geophysical Research: Atmospheres, **118**, 21, pp. 12,110–12,119 (2013).
- [3] J. D. Hill, M. A. Uman, D. M. Jordan. *High-speed video observations of a lightning stepped leader* // Journal of Geophysical Research, **116**, D16 (2011).
- [4] Qi Qi, Weitao Lu, Ying Ma, Luwen Chen, Yijun Zhang, Vladimir A. Rakov. *High-speed video observations of the fine structure of a natural negative stepped leader at close distance* // Atmospheric Research, **178-179**, pp. 260–267 (2016).
- [5] M. D. Tran, V. A. Rakov, S. Mallick. *A negative cloud-to-ground flash showing a number of new and rarely observed features* // Geophysical Research Letters, **41**, 18, pp. 6523–6529 (2014).
- [6] Rubin Jiang, Xiushu Qie, Hongbo Zhang, Mingyuan Liu, Zhuling Sun, Gaopeng Lu, Zhichao Wang, Yu Wang. *Channel branching and zigzagging in negative cloud-to-ground lightning* // Scientific Reports, **7**, 1 (2017).
- [7] T. A. Warner, M. M. F. Saba, R. E. Orville. *Characteristics of upward leaders from tall towers* // 22th International Lightning Detection Conference, Vaisala, Boulder, Colo (2012).
- [8] Marcelo M. F. Saba, Kenneth L. Cummins, Tom A. Warner, E. Philip Krider, Leandro Z. S. Campos, Mauricio G. Ballarotti, Osmar Pinto Jr., Stacy A. Fleenor. *Positive leader characteristics from high-speed video observations* // Geophysical Research Letters, **35**, 7 (2008).
- [9] Vladislav Mazur, Lothar Ruhnke, Tom Warner, Richard Orville. *Recoil leader formation and development* // Journal of Electrostatics, **71**, pp. 763–768 (2013).
- [10] Shanfeng Yuan, Rubin Jiang, Xiushu Qie, Zhuling Sun, Dongfang Wang, Abhay Srivastava. *Development of Side Bidirectional Leader and Its Effect on Channel Branching of the Progressing Positive Leader of Lightning* // Geophysical Research Letters, **46**, 3, pp. 1746–1753 (2019).
- [11] V. A. Rakov. *A Review of Positive and Bipolar Lightning Discharges* // Bulletin of the American Meteorological Society, **84**, 6, pp. 767–776 (2003).

- [12] Vladimir A. Rakov, Martin A. Uman. *Lightning: Physics and effects*. — New York: Cambridge University Press (2005).
- [13] В. Р. Кухта, В. В. Лопатин, М. Д. Носков. *Применение фрактальной модели к описанию развития разряда в конденсированных диэлектриках* // ЖТФ, **65**, стр. 63–75 (1995).
- [14] Н. И. Петров, Г. Н. Петрова. *Математическое моделирование траектории лидерного разряда и молниепоражаемости изолированных и заземленных объектов* // ЖТФ, **65**, стр. 41–58 (1995).
- [15] A. A. Dulzon, V. V. Lopatin, M. D. Noskov, O. L. Pleshkov. *Modelling the development of the stepped leader of a lightning discharge* // Tech. Phys., **44**, 4, pp. 394–398 (1999).
- [16] D. I. Iudin, S. S. Davydenko. *Fractal Model of a Compact Intracloud Discharge. I. Features of the Structure and Evolution* // Radiophysics and Quantum Electronics, **58**, 7, pp. 477–496 (2015).
- [17] S. S. Davydenko, D. I. Iudin. *Fractal Model of a Compact Intracloud Discharge. II. Specific Features of Electromagnetic Emission* // Radiophysics and Quantum Electronics, **59**, 7, pp. 560–575 (2016).
- [18] 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).
- [19] Leandro Z.S. Campos, Marcelo M.F. Saba, Tom A. Warner, Osmar Pinto, E. Philip Krider, Richard E. Orville. *High-speed video observations of natural cloud-to-ground lightning leaders – A statistical analysis* // Atmospheric Research, **135-136**, pp. 285 – 305 (2014).
- [20] E Krider, C Weidman, R Carl Noggle. *The electric field produced by lightning leader steps* // Journal of Geophysical Research, **82**, 6, pp. 951–960 (1977).
- [21] D. Wang, N. Takagi, T. Watanabe, V. A. Rakov, M. A. Uman. *Observed leader and return-stroke propagation characteristics in the bottom 400 m of a rocket-triggered lightning channel* // Journal of Geophysical Research: Atmospheres, **104**, D12, pp. 14369–14376 (1999).
- [22] А. А. Булатов, Д. И. Иудин, А. А. Сысоев. *Самоорганизующаяся транспортная модель искрового разряда в грозовом облаке* // Известия вузов. Радиофизика (2019).
- [23] Д. И. Иудин, В. А. Раков, А. А. Сысоев, А. А. Булатов. *Динамика ионов в грозовом облаке* // Известия вузов. Радиофизика (2019).
- [24] D. I. Iudin, V. A. Rakov, A. A. Syssoev, A. A. Bulatov, M. Hayakawa. *Formation of decimeter-scale, long-lived elevated ionic conductivity regions in thunderclouds* // Nature Communications (2019).

- [25] A. A. Syssoev, D. I. Iudin, A. A. Bulatov, S. S. Davydenko, V. A. Rakov. *Numerical simulation of stepping and branching processes in negative lightning leaders* // Journal of Geophysical Research: Atmospheres (2019).
- [26] А. А. Сысоев. *Моделирование развития отрицательного ступенчатого лидера молнии* // сборник тезисов молодых учёных “Нелинейные волны - 2016”, стр. 139, ИПФ РАН, Нижний Новгород (2016).
- [27] А. А. Сысоев, Д. И. Иудин, С. С. Давыденко, В. А. Раков. *Моделирование развития отрицательного ступенчатого лидера молнии* // сборник тезисов докладов XX всероссийской школы-конференции молодых учёных “Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты”, стр. 49, ИПФ РАН, Нижний Новгород (2016).
- [28] A. A. Syssoev, D. I. Iudin, S. S. Davydenko, V. A. Rakov. *Modeling development of negative lightning stepped leader* // proceedings of International Symposium “Frontiers of Nonlinear Physics 2016”, pp. 242–243, IAP RAS, Nizhny Novgorod (2016).
- [29] А. А. Сысоев, Д. И. Иудин, С. С. Давыденко, В. А. Раков. *Моделирование механизма ступенчатого развития отрицательного лидера молнии* // тезисы докладов XXI Всероссийской школы-конференции молодых ученых “Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы”, стр. 79–80, Филигрань, Ярославль (2017).
- [30] А. А. Сысоев, Д. И. Иудин, С. С. Давыденко, В. А. Раков. *Моделирование динамики развития отрицательного ступенчатого лидера молнии* // сборник тезисов докладов молодых учёных “Нелинейные волны - 2018”, стр. 186, ИПФ РАН, Нижний Новгород (2018).
- [31] А. А. Сысоев, Д. И. Иудин, С. С. Давыденко, В. А. Раков. *Моделирование развития ступенчатого отрицательного лидера молнии* // сборник докладов VI Российской конференции по молниезащите, стр. 97–124, Издательство Политехнического университета, Санкт-Петербург (2018).
- [32] A. A. Syssoev, D. I. Iudin, S. S. Davydenko, V. A. Rakov. *Modeling the stepping mechanism of development of negative lightning leader* // proceedings of XVI International Conference on Atmospheric Electricity, pp. 1–35, Nara city, Japan (2018).
- [33] А. А. Сысоев, Д. И. Иудин, С. С. Давыденко, В. А. Раков. *Моделирование нисходящего ступенчатого отрицательного лидера молнии* // сборник докладов XXIII Нижегородской сессии молодых учёных (технические, естественные, математические науки), стр. 50–51, Нижегородский государственный инженерно-экономический институт (Княгинино), Нижний Новгород (2018).
- [34] A. A. Bulatov, A. A. Syssoev, S. S. Davydenko, D. I. Iudin. *Bidirectional leader development numerical simulation* // proceedings of International Symposium “Topical Problems of Nonlinear Wave Physics”, pp. 104, IAP RAS, Nizhny Novgorod (2017).
- [35] F. A. Kuterin, A. A. Syssoev, D. I. Iudin. *The main negative leader tip and space stems numerical modeling* // proceedings of International Symposium “Topical Problems of Nonlinear Wave Physics”, pp. 125, IAP RAS, Nizhny Novgorod (2017).

- [36] Д. И. Иудин, В. А. Раков, А. А. Сысоев, А. А. Булатов. *Физика молнии: сценарий инициации* // сборник докладов VI Российской конференции по молниезащите, стр. 78–79, Издательство Политехнического университета, Санкт-Петербург (2018).
- [37] D. I. Iudin, A. A. Syssoev, N. A. Popov. *Generation of stems in streamer corona of negative leader* // proceedings of XVI International Conference on Atmospheric Electricity, pp. 1–31, Nara city, Japan (2018).
- [38] D. I. Iudin, V. A. Rakov, N. A. Popov, A. A. Syssoev, A. A. Bulatov. *Collective dynamics of charged hydrometeors in thunderclouds and lightning initiation* // proceedings of XVI International Conference on Atmospheric Electricity, pp. 1–31, Nara city, Japan (2018).
- [39] D. I. Iudin. *Lightning-Discharge Initiation as a Noise-Induced Kinetic Transition* // Radiophysics and Quantum Electronics, **60**, 5, pp. 374–394 (2017).