

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 процесса инициации молниевых разрядов и механизма распространения ступенчатого отрицательного лидера молнии»**

**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  
2020

## **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 лидеров молнии, моделируемых в главе 2. Особую научную ценность главе 2 данного исследования придаёт факт того, что недавние экспериментальные результаты многочисленных исследований (см., например, [2, 3, 4, 5, 6]), посвящённых высокоскоростной съёмке молниевых разрядов, нуждаются в теоретическом осмыслении и создают богатую базу для численного моделирования.

Кроме чисто научного интереса, связанного с решением двух наиболее важных вопросов современной 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% [7].

## **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 глава моделирует полный цикл образования ступени отрицательного лидера и даёт ответы на вопросы о том, чем обусловлен ступенчатый характер его распространения и каким образом на периферии его стримерной короны формируются пространственные стемы, потенциальные зародыши пространственных лидеров. Более конкретно задачи работы можно сформулировать следующим образом:

- Уточнить величину порогового поля пробоя воздуха в условиях грозового облака в однородном и неоднородном случаях;
- Определить физический механизм, отвечающий за инициацию и устойчивый рост стримеров в безэлектродной среде грозового облака;
- Изучить условия, при которых параллельно развивающиеся стримерные системы могут объединиться в способный к самостоятельному росту лидерный канал;
- На основе численной модели изучить особенности формирования лидера молнии в облаке за счёт объединения токов десятков тысяч взаимодействующих между собой стримерных систем;
- Разработать численную модель ступенчатого отрицательного лидера молнии с учётом асимметрии полей развития положительных и отрицательных стримеров с целью поиска физического механизма, отвечающего за формирование ступени отрицательного лидера и делающего ступенчатый способ распространения более предпочтительным;

- Определить физическую причину формирования пространственных стемов на периферии стримерной короны отрицательного лидера.

## 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, [8, 9, 10, 11, 12, 13]). 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 решётки 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, способных объединиться в канал лидера молнии, не были, насколько известно автору, описаны ни в одной опубликованной работе.

Описанная во второй главе модель развития ступенчатого отрицательного лидера молнии не имеет аналогов, так как, насколько известно автору, ни одна из опубликованных ныне моделей развития молнии не учитывает ни асимметрию пороговых полей роста 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. Ещё одной особенностью данной модели является воспроизведение процесса формирования пространственных стемов на периферии стримерной короны отрицательного лидера. Оно становится возможным благодаря рассмотрению коллективной динамики заряда головок отрицательных стримеров, формирующих корону лидера. Поскольку ранее никто не пытался искать причину возникновения пространственных стемов с точки зрения пространственно-временного шума, базовыми элементами которого являются заряженные 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 методы теоретического анализа и численного моделирования, 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 и, в частности, изучаемых в данной работе ступенчатых отрицательных лидеров молнии. 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 чрезвычайной 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, представленная в главе 2 численная модель напрямую направлена на изучение механизма распространения ступенчатого отрицательного лидера молнии, что ещё больше увеличивает научную значимость работы. 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.

### **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 уве-

личением 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.
- 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.
- 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.
- С помощью разработанной автором численной модели, впервые учитывающей асимметрию пороговых полей роста положительных и отрицательных стримеров, был 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.
- Ступенчатый характер развития отрицательного лидера обусловлен асимметрией пороговых полей развития положительных и отрицательных стримеров.
- 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 новой ступени.

### **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. раздел 1.6).

Разработанная в данном исследовании численная модель развития отрицательного ступенчатого лидера молнии была верифицирована путём сравнения морфологии и параметров модельных разрядов с имеющимися в соответствующей литературе [14, 15, 16, 3, 17] сведениями и данными натурных наблюдений [2, 3, 4, 5, 6]. При этом предсказываемые моделью морфология и наблюдаемые 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. Кроме того, робастность модели к вариациям входных параметров была подтверждена многочисленными тестами (см. раздел 2.7).

## **Публикации и апробация результатов**

Большая часть результатов исследований по теме диссертации опубликована в высокорейтинговых рецензируемых научных журналах [13, 18, 19, 20, 21]. На момент написания диссертации направлена ещё одна статья, посвящённая моделированию процесса инициации молнии в грозовом облаке [22]. Результаты работы докладывались и обсуждались на научных семинарах Института прикладной физики РАН, а также на многочисленных конференциях как лично автором [23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32], так и его коллегами [33, 34, 35, 36, 37]. Кроме того, выступления автора на XXI-ом Конкурсе работ молодых учёных 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 работы. Разработка представленной во второй главе численной модели и анализ полученных с помощью неё результатов были выполнены автором лично при 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, двух основных глав, заключения и списка цитированной литературы из 144 наименований (включая 5 статей с участием автора, опубликованных в рецензируемых научных журналах). Общий объём диссертации составляет 147 страниц, включая 11 таблиц и 25 рисунков.

## Краткое содержание работы

В **первой главе** работы предлагается принципиально новый механизм инициации молнии в облаке, развивающий идеи, заложенные в работе [38].

В разделе 1.1 приводится подробный обзор существующих на настоящий момент альтернативных гипотез с акцентом на трудностях, 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 грозового облака в однородном случае и показывается, что учёт отлипания электронов от отрицательных ионов приводит к существенному падению пробойного поля по сравнению с традиционно принятым значением, причём данный эффект усиливается с увеличением высоты над уровнем моря (см. Рисунок 1). Фактически это означает, что размножение носителей заряда начинается уже в подпороговом (в традиционном смысле) электрическом поле.

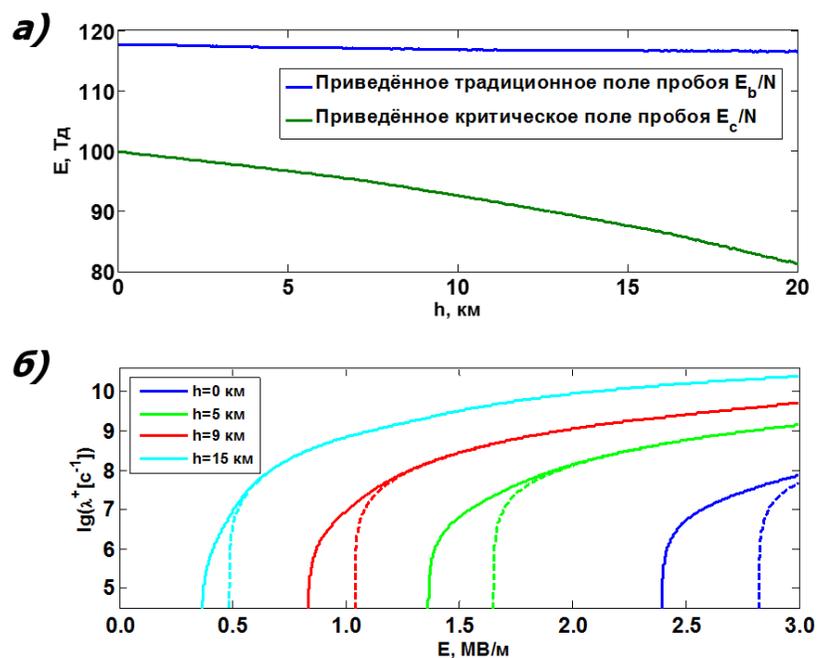


Рис. 1: Зависимости традиционного  $E_b/N$  и полученного в диссертационной работе критического  $E_c/N$  приведённых полей пробоя воздуха от высоты над уровнем моря (а) и зависимость инкремента  $\lambda^+$  роста концентраций носителей заряда от напряжённости электрического поля  $E$  при нескольких значениях высоты над уровнем моря (б). В секции (б) рисунка сплошными и пунктирными линиями обозначены зависимости, соответствующие найденному в работе критическому и традиционному пробойным полям соответственно.

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 по-

являющихся в объёме грозового облака как конечный результат развития данных ионизационных центров. Описан механизм роста ионной компоненты за счёт образования новых вспышек поверх обладающих предиионизацией останков старых, который начинает работать при значении пространственно-временной частоты соударений (сближений) гидрометеоров, приводящих к возникновению коронных разрядов, большей, чем  $\mathfrak{M}_c = \mathfrak{N}_c/\mathfrak{S} \approx 0.1 \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$ . 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. Обосновано 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 1.5 посвящён анализу процесса зарождения лидера молнии в облаке на базе двух альтернативных численных моделей. В пункте 1.5.2 раздела описана опубликованная в работе [19] мелкомасштабная 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 слабым лабораторным лидером и развитым молниевым каналом. Пункт 1.5.3 данного раздела развивает идеи представленной в предыдущем пункте 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  $6 \cdot 10^4 \text{ В/м}$  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  $6 \cdot 10^4 \text{ В/м}$ , 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, который можно считать зародышем молнии (см. Рисунок 2).

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. Обсуждается факт того, что предложенный в данной главе механизм формирования зародыша молнии в безэлектродном грозовом облаке не ограничивается возникновением одиночных положительных стримеров (как это делается в большинстве предшествующих работ), но также объясняет процесс формирования заполняющей активную часть грозового облака стримерной сети, элементы которой, объединяясь вдоль направления внешнего электрического поля, формируют молниевый канал.

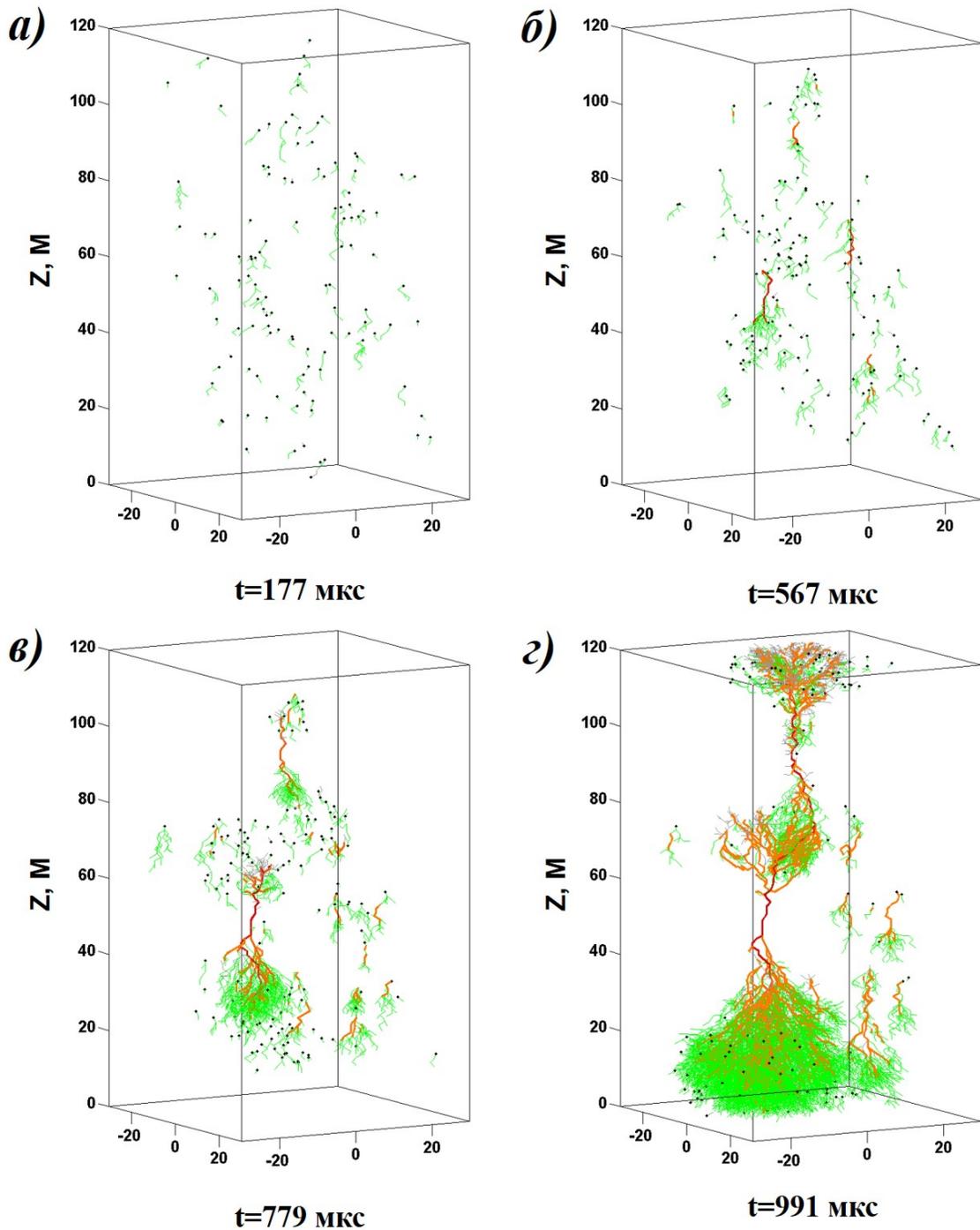


Рис. 2: Иллюстрация динамики эволюции одновременно развивающихся стримерных систем в случае наличия внешнего электрического поля  $E_e = 6 \cdot 10^4$  В/м, достаточного для формирования лидера молнии. На стадии (а) модельный объём заполнен разделёнными в пространстве положительными стримерами, стартующими из областей повышенной ионной проводимости. На стадиях (б) и (в) некоторые из них поляризуются достаточно для того, чтобы трансформироваться в способные к самостоятельному росту двунаправленные лидерные каналы, которые срастаются друг с другом на стадии (г), формируя полноценный лидер молнии.

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 3).

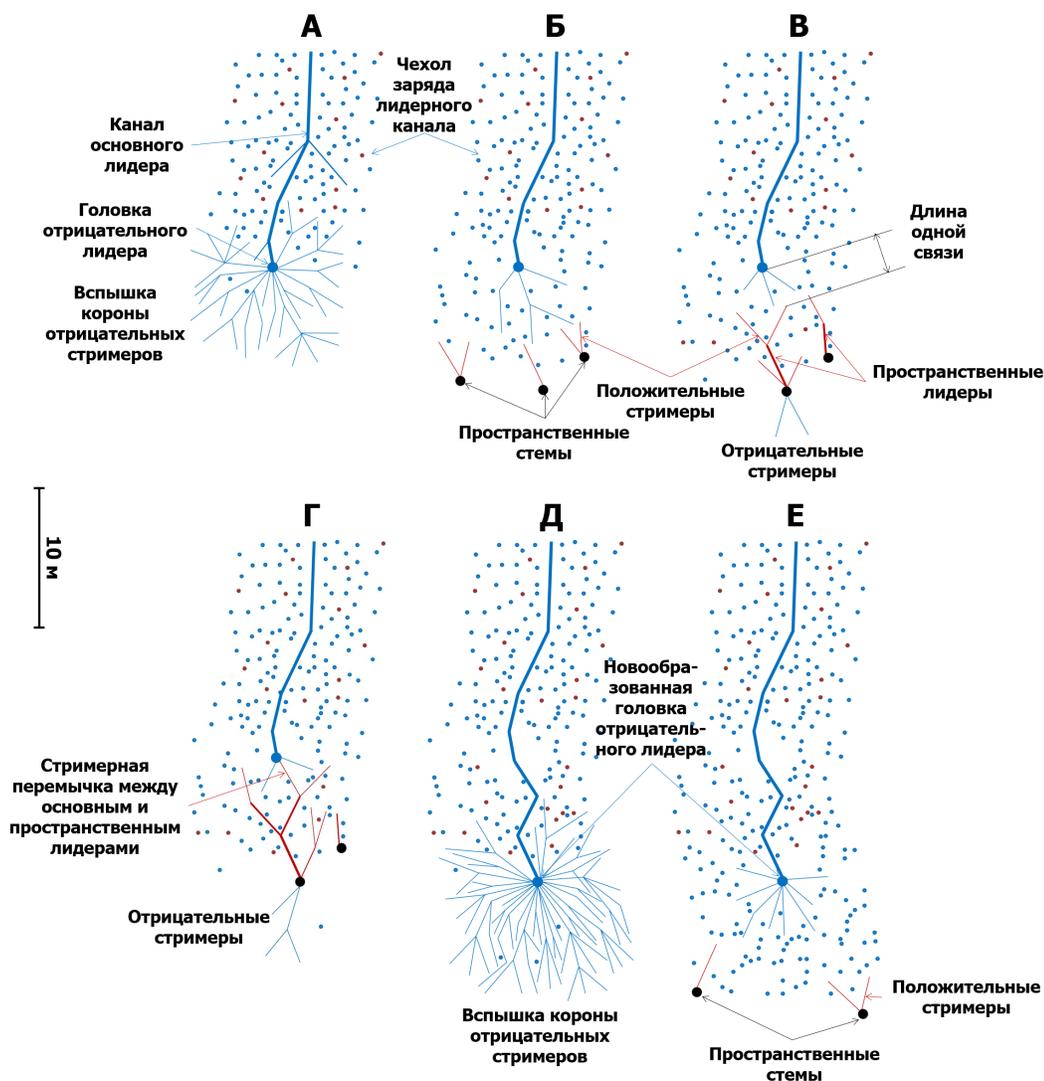


Рис. 3: Схема воспроизведённого в рамках модели цикла формирования ступени отрицательного лидера. Полный цикл (А-Е) обычно длится несколько десятков микросекунд. Тёмно-красный и голубой цвета отвечают положительной и отрицательной полярностям соответственно. Более жирные линии отвечают большим проводимостям каналов. Чёрные кружки символизируют пространственные стемы. Положительные и отрицательные пространственные заряды обозначены тёмно-красными и голубыми точками соответственно.

В разделе 2.3 детально описываются результаты моделирования, включающие морфологию и характеристики модельных лидеров. Приводятся осциллограммы процессов, сопровождающих формирование ступени модельного лидера (см. Рисунок 4). Кроме того, анализируются свойства стримерной короны лидера и формирующихся на её периферии пространственных стемов / лидеров. Здесь же приводится сравнение результатов моделирования с данными натурных измерений и имеющимися в литературе сведениями (см. Таблицу 1) и делается вывод о высокой степени их сходства (см. также раздел 2.5).

Таблица 1: Основные геофизически значимые характеристики модельных отрицательных ступенчатых лидеров, представленных на Рисунках 2.6 и 2.6(I).

Номер ветви	3D скорость роста <sup>а</sup> , $10^5$ м/с	Пауза между ступенями, мкс	3D длина ступени, м	Перенесенный ступенью заряд, мКл	Погонная плотность заряда <sup>б</sup> , мкКл/м
1	2.14	29.1	9.0	1.99	369
2	1.88	44.0	8.8	1.92	524
3	2.27	46.2	8.9	1.83	504
Лидер с питающим током 100 А					
Лидер с током 200 А					
1	2.23	36.3	9.1	2.04	379
2	2.33	24.6	8.8	1.92	408
3	2.15	43.8	9.2	1.99	563
Лидер с током 300 А					
1	2.72	24.2	9.2	1.88	325
2	2.70	21.6	9.1	2.05	406
3	1.81	51.8	8.8	2.01	398
4	2.11	45.7	8.9	2.01	346
5	2.20	43.2	8.6	2.11	493
6	2.62	41.2	9.1	1.88	524
7	2.75	32.7	9.1	1.94	442
Среднее	2.30	37.4	9.0	1.97	437
Данные экспериментов	2.00	5.0–50.0	$\approx 10.0$	1.00–4.00	500–1000

<sup>а</sup> Скорость индивидуальной ветви лидера (включающей только каналы с проводимостью  $\geq 1$  См/м) рассчитывалась как отношение её длины ко времени, в течение которого происходило удлинение ветви.

<sup>б</sup> При расчёте погонной плотности заряда отдельных ветвей лидера подразумевалось, что каждый пространственный заряд принадлежит чехлу только одной из ветвей, то есть не учитывается дважды или большее число раз.

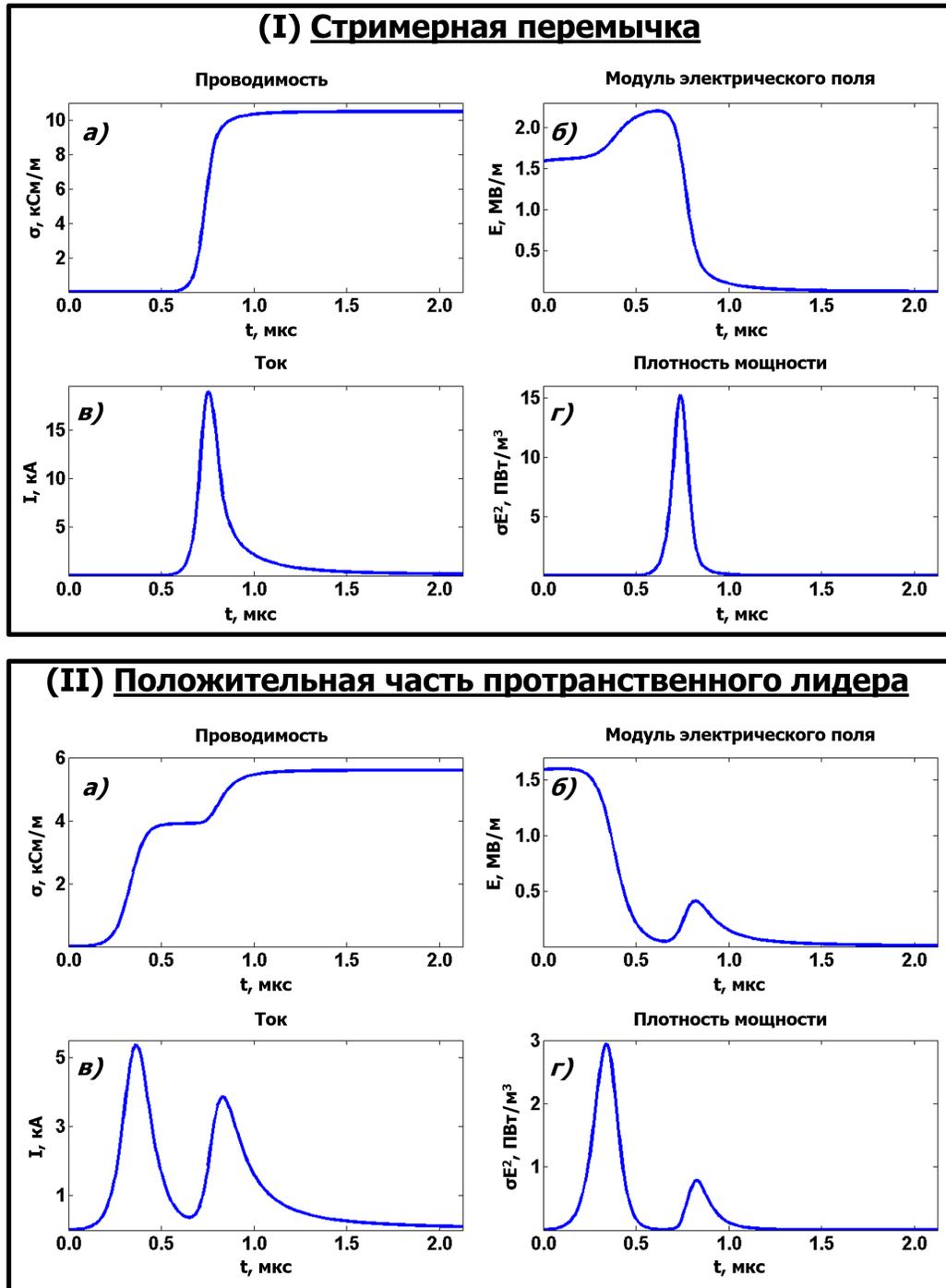


Рис. 4: Типичный пример временной эволюции (а) проводимости, (б) модуля напряжённости продольного электрического поля, (в) тока и (г) плотности мощности энерговыделения (I) в канале, служившем стримерной перемычкой между пространственным и основным отрицательным лидерами, и (II) в канале положительной части пространственного лидера, одним из концов которого является пространственный стем, на протяжении процесса формирования ступени отрицательного лидера с питающим током 200 А. Временной масштаб соответствует шагу модельного времени (2.12 мкс).

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.

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

# Оглавление

<b>Введение</b>	<b>4</b>
<b>1 Инициация молнии в облаке</b>	<b>15</b>
1.1 Введение . . . . .	15
1.2 Формулировка задачи . . . . .	19
1.3 Уточнение концепции однородного электрического поля пробоя воздуха .	23
1.3.1 Традиционная концепция поля пробоя воздуха . . . . .	23
1.3.2 Основные уравнения и реакции . . . . .	24
1.3.3 Уточнение концепции однородного поля пробоя . . . . .	29
1.3.4 Эффективная частота ионизации . . . . .	32
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 перекрыwania центров производства ионов . .	38
1.4.4 Критическая частота возникновения центров производства ионов	40
1.4.5 Механизм формирования стримеров . . . . .	44
1.4.6 Взаимодействие стримеров в грозовом облаке . . . . .	50
1.5 Моделирование процесса формирования лидера молнии в грозовом облаке	57
1.5.1 Идеологическая основа использования модельного подхода . . . .	58
1.5.2 Первый метод моделирования . . . . .	59
1.5.3 Второй метод моделирования . . . . .	72
1.5.4 Заключение . . . . .	76
1.6 Выводы . . . . .	76
<b>2 Моделирование отрицательного ступенчатого лидера молнии</b>	<b>81</b>
2.1 Введение . . . . .	81
2.2 Формулировка модели . . . . .	83
2.2.1 Постановка задачи . . . . .	83
2.2.2 Распределение электрического поля и потенциала . . . . .	84
2.2.3 Пороговые поля инициации и распространения разряда . . . . .	87
2.2.4 Базовый алгоритм развития лидера . . . . .	90
2.2.5 Моделирование ступенчатого механизма развития отрицательного лидера . . . . .	96
2.3 Результаты . . . . .	101
2.3.1 Морфология модельных лидеров . . . . .	101
2.3.2 Основные характеристики модельных лидеров . . . . .	104
2.3.3 Динамика формирования ступеней . . . . .	108

2.3.4	Некоторые дополнительные особенности развития модельных лидеров . . . . .	114
2.4	Обсуждение . . . . .	116
2.5	Выводы . . . . .	121
2.6	Приложение А. Асимметрия полярностей . . . . .	124
2.7	Приложение Б. Проверка чувствительности модели к изменению её входных параметров . . . . .	125
	<b>Заключение</b>	<b>132</b>
	<b>Список литературы</b>	<b>133</b>

# 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] V. A. Rakov. *A Review of Positive and Bipolar Lightning Discharges* // Bulletin of the American Meteorological Society, **84**, 6, pp. 767–776 (2003).
- [8] 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).
- [9] Н. И. Петров, Г. Н. Петрова. *Математическое моделирование траектории лидерного разряда и молниепоражаемости изолированных и заземленных объектов* // ЖТФ, **65**, стр. 41–58 (1995).
- [10] 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).
- [11] 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).

- [12] 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).
- [13] 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).
- [14] Vladimir A. Rakov, Martin A. Uman. *Lightning: Physics and effects*. — New York: Cambridge University Press (2005).
- [15] 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).
- [16] 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).
- [17] 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).
- [18] 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* //npj Climate and Atmospheric Science, **2**, 46, pp. 1–10 (2019).
- [19] А. А. Булатов, Д. И. Иудин, А. А. Сысоев. *Самоорганизующаяся транспортная модель искрового разряда в грозовом облаке* // Известия вузов. Радиофизика, принята к публикации (2019).
- [20] А. А. Syssoev, D. I. Iudin, A. A. Bulatov, V. A. Rakov. *Numerical simulation of stepping and branching processes in negative lightning leaders* // Journal of Geophysical Research: Atmospheres, accepted (2020).
- [21] Д. И. Иудин, В. А. Раков, А. А. Сысоев, А. А. Булатов. *Динамика ионов в грозовом облаке* // Известия вузов. Радиофизика, принята к публикации (2020).
- [22] А. А. Булатов, А. А. Сысоев, Д. И. Иудин. *Самоорганизующаяся транспортная модель электрического разряда и ее применение к вопросу инициации молнии в грозовом облаке* // Компьютерные исследования и моделирование, направлена (2020).
- [23] А. А. Сысоев. *Моделирование развития отрицательного ступенчатого лидера молнии* // сборник тезисов молодых учёных “Нелинейные волны - 2016”, стр. 139, ИПФ РАН, Нижний Новгород (2016).
- [24] 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).
- [25] 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).
- [26] 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).
- [27] 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).
- [28] 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).
- [29] 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).
- [30] 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).
- [31] А. А. Сысоев, Д. И. Иудин, А. А. Булатов, В. А. Раков. *Численное моделирование процесса развития ступенчатого отрицательного лидера молнии* // сборник абстрактов пятнадцатой ежегодной конференции “Физика плазмы в солнечной системе”, стр. 332, Москва (2020).
- [32] А. А. Сысоев, Д. И. Иудин. *Формирование пространственных стемов на периферии стримерной короны отрицательного лидера* // сборник тезисов XIX научной школы “Нелинейные волны-2020”, стр. 247–248, Нижний Новгород (2020).
- [33] 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).
- [34] 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).

- [35] 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).
- [36] 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).
- [37] 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).
- [38] D. I. Iudin. *Lightning-Discharge Initiation as a Noise-Induced Kinetic Transition* // Radiophysics and Quantum Electronics, **60**, 5, pp. 374–394 (2017).