

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

**на диссертационную работу Сыроева Артема Андреевича «Исследование физических механизмов инициации молниевых разрядов и распространения ступенчатого отрицательного лидера молнии», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы.**

Несмотря на более чем 250-ти летнюю историю изучения, грозное электричество по-прежнему остается одним из самых интригующих объектов геофизических исследований. Суть интриги заключается в том, что наблюдаемые в грозовых облаках электрические поля имеют пиковые значения на порядок меньшие, чем порог пробоя воздуха на этих высотах. Кроме того, до сих пор не понятно, какие физические механизмы обеспечивают распространение различных типов молниевых разрядов. Вместе с тем существует множество обстоятельств, которые делают поиск физических механизмов инициации и развития молнии чрезвычайно актуальным. Это, прежде всего, глобальные изменения климата, сопровождающиеся усилением грозовой активности на планете, а также уязвимость элементов слаботочной электроники навигационных систем и систем жизнеобеспечения для мощного электромагнитного воздействия молниевых разрядов. Поэтому не случайно проблемы инициации и развития молнии находятся в верхней части списка десяти наиболее важных, по мнению ведущих специалистов, нерешенных проблем атмосферного электричества.

В своей диссертационной работе А.А. Сыроев смело пытается найти решение этих «наболевших» проблем. Диссертация посвящена исследованию двух наиболее значимых вопросов современной физики молниевых разрядов. Первая задача связана с теоретическим исследованием нового физического механизма инициации молнии и обоснованием его реализуемости в условиях типичного грозового облака. Вторая направлена на выяснение причин ступенчатого способа распространения отрицательного лидера молнии и решается с помощью разработанной автором численной модели, впервые учитывающей многие особенности, отсутствующие в предыдущих подходах.

Диссертационная работа представлена на 136 страницах текста и содержит 23 рисунка и 10 таблиц. Список литературы состоит из 165 наименований, включая 27 публикаций автора по теме диссертации. Диссертация состоит из подробного введения в проблемы атмосферного электричества, двух основных глав, содержащих выносимый на защиту

материал, заключения, содержащего основные результаты и выводы работы, и списка цитируемых источников.

**Во введении** дан критический анализ существующих моделей инициации молниевых разрядов и соответственно формулируются цели и задачи диссертационной работы и обосновывается их актуальность.

**В первой главе** предлагается принципиально новый механизм инициации молнии в облаке, который можно рассматривать как индуцированный шумом кинетический переход. Приведён обзор основных альтернативных гипотез, обсуждена возможность их реализации. Сформулирована последовательность процессов, приводящих к формированию лидера молнии в грозовом облаке, развивающаяся на трёх пространственно-временных масштабах. Автор впервые обратил внимание на важность эффектов отлипания электронов от отрицательных ионов, что позволило уточнить величину однородного поля пробоя воздуха в условиях грозового облака. Показано, что учет отлипания делает его на 15-30% меньше традиционно принятого значения, определяемого балансом ударной ионизации и прилипания электронов к нейтралам. Введено важное понятие эффективной частоты ионизации с учётом потерь облачных ионов на гидрометеорах и показано, что экспоненциальный рост концентраций заряженных частиц начинается в условиях, когда отношение частоты ионизации к частоте прилипания составляет величину, не превышающую единицу. Введено понятие центра производства ионов, ассоциированного с мелкомасштабными коронными разрядами, возникающими при столкновениях (сближениях) гидрометеоров. На следующем этапе рассмотрен механизм формирования и поляризации ионных пятен, появляющихся в объёме грозового облака как конечный результат развития данных центров. Дополнительно предложен усиливающий эти эффекты кумулятивный механизм роста ионной компоненты (появления заполняющих объём активной части грозового облака областей повышенной ионной проводимости) за счёт образования новых ионизационных центров поверх останков старых, обладающих повышенным уровнем ионизации. Определено пороговое значение пространственно-временной частоты столкновений гидрометеоров, при превышении которого области повышенной ионной проводимости становятся источниками положительных стримеров. Показано, что при наличии достаточно большой, но вполне достижимой разности потенциалов внутри активной части грозового облака заполняющие её объём стримерные системы объединяются в единый канал самоподдерживающегося «зародыша» молнии. Обосновывается возможность реализации предложенного механизма в условиях типичного грозового облака. Интересен вопрос о том, что происходит в случае, когда стримеры уже существуют, взаимодействуют между собой, но их объединения еще не происходит. По-видимому, в этом состоянии и генерируется

широкополосный электромагнитный шум, предшествующий развитию молниевых разрядов (и часто являющийся его предвестником), регистрируемый во многих наземных и спутниковых наблюдениях, в частности, на отечественном микроспутнике «Чибис».

**Вторая глава** диссертационной работы посвящена моделированию распространения и ветвления ступенчатого отрицательного лидера молнии с помощью разработанной автором численной модели. Вначале обсуждаются современные представления о механизме распространения ступенчатого отрицательного лидера молнии.

Автором впервые детально рассмотрены эффекты, связанные с учётом асимметрии характерных полей развития положительных и отрицательных стримеров. Модель имеет высокое пространственно-временное разрешение, достаточно аккуратно учтены динамика развития электрических параметров разрядных каналов и возможность их одновременного роста и отмирания в различных частях разрядного древа. Развита автором модель впервые позволила описать процесс формирования чехла заряда вокруг лидерного канала. Оценка погонного заряда чехла лидера принципиально важна с точки зрения главной стадии развития молнии, на которой данный заряд стекает в землю, формируя мощный импульс тока возвратного удара. В рамках предложенной модели впервые удалось детально воспроизвести полный цикл формирования ступени отрицательного лидера молнии. На базе современных теоретических представлений о физике молниевых разрядов и имеющихся данных высокоскоростной съёмки натуральных отрицательных лидеров молнии проведена верификация модели и показана высокая степень соответствия модельных и экспериментальных данных. Выполненное автором моделирование распространения и ветвления ступенчатого отрицательного лидера молнии позволило ответить на сакраментальный вопрос – почему отрицательные лидеры в воздухе всегда распространяются ступенчатым образом. Обсуждаются надёжность и перспективы дальнейшего развития представленной модели.

**В заключении** сформулированы основные результаты работы. Кроме того, в конце каждой главы содержится раздел «выводы», содержательно суммирующий полученные в ней результаты. Это существенно облегчает читателю знакомство с обширными и разноплановыми результатами, полученными в диссертации.

Представленная диссертационная работа оформлена в соответствии с предъявляемыми к кандидатским диссертациям требованиями, написана грамотным и понятным языком, что подтверждает высокий уровень научной квалификации, глубину понимания актуальных задач физики атмосферного электричества и способность диссертанта получать значимые научные результаты. В своих исследованиях автор проявил основательное знакомство с современными методами математической физики: теорией перколяции,

теорией графов и др. Уверенное применение этих методов позволило развить новые подходы к классическим проблемам физики атмосферного электричества.

Реализация представленного в работе сценария инициации молнии не предполагает выполнения каких-либо экстремальных условий (что было характерно для большинства предшествующих моделей). Это, несомненно, указывает на его достоверность, обусловленную тем, что предсказываемые им морфология и параметры модельных разрядов хорошо согласуются с результатами натуральных наблюдений.

Новизна диссертационной работы заключается в том, что в ней был представлен принципиально новый механизм инициации молнии, способный работать в условиях типичного грозового облака. Это позволило преодолеть «мучительное» противоречие теорий молниевых разрядов: в грозовых облаках электрические поля имеют пиковые значения на порядок меньшие, чем порог пробоя воздуха на этих высотах.

Кроме того, в работе представлена достаточно детально разработанная модель развития ступенчатого отрицательного лидера молнии, в рамках которой был впервые детально воспроизведён полный цикл формирования ступени отрицательного лидера. Модель неплохо воспроизводит и процесс возникновения пространственных стемов на периферии стримерной короны отрицательного лидера, и трансформацию части из них в пространственные лидеры. Результаты диссертационной работы позволили значительно улучшить наше понимание физической природы ступенчатого механизма распространения отрицательного лидера молнии.

Автору удалось свежим взглядом, свободным от привычных парадигм предыдущих подходов, взглянуть на 2 ключевые проблемы теории атмосферного электричества:

- механизма инициации молниевых разрядов;
- распространения ступенчатого отрицательного лидера молнии.

С практической точки зрения, эти результаты (особенно модель распространения ступенчатого отрицательного лидера) важны с точки зрения совершенствования методов молниезащиты. Это особенно важно в связи с тем, что среди разрядов типа облако-земля на долю отрицательных лидеров приходится примерно 90%. В этом, на взгляд оппонента, состоит теоретическая и практическая значимость работы.

При написании столь масштабной диссертационной работы трудно избежать некоторых **недостатков**.

Основной корпус моих замечаний и вопросов **по первой главе** связан с понятием гидрометеоров (ГДМ), которые обеспечивают ключевые эффекты, необходимые для развития механизмов, рассмотренных в диссертации. Я согласен, что физика образования ГДМ и их взаимодействия с окружающей

плазмой не являются непосредственно предметом диссертации, но считаю, что автору было бы нужно более четко постулировать свойства ГДМ важные для проводимых им расчетов.

– Физические свойства ГДМ (снежная крупа, кристаллы льда и водяные капли ведь взаимодействуют с окружающей средой по-разному)?

– Геометрические свойства ГДМ (автор постоянно оперирует понятиями большие и малые гидрометеоры, но какова реальная функция распределения ГДМ по размерам, ведь размеры ГДМ имеют принципиальное значение для оценки интенсивности флуктуирующих электрических микрополей)?

– Как оцениваются при столь большом разнообразии ГДМ потери на них отрицательных ионов? Насколько отличаются эти величины в грозовом и обычном облаке?

– Механизмы зарядки ГДМ, ведь с ними взаимодействуют не только отрицательные, но и положительные ионы?

Еще несколько вопросов связано с моделью образования и взаимодействия стримеров.

– Уравнение (145) – критерий коронного разряда? Для какого типа ГДМ он оценен (крупа, снежинки, капли)? Каково место этого этапа в иерархии процессов, символически представленной на Рис. 1.13?

– Из обсуждения лавинно-стримерного перехода неясно, как влияют эффекты прилипания-отлипания, обсуждавшиеся в предыдущих разделах, на развитие электронной лавины?

– Важное уравнение (1.60) – достаточное условие для формирования лидер-канала – обосновывается фактически лишь ссылками на разнообразные эксперименты. Хотелось бы здесь увидеть хотя бы общее, но физическое обоснование этого критерия.

– Асимметрия положительных и отрицательных стримеров – важное явление, обсуждаемое в диссертации. Остается неясным, насколько отличаются значения критических полей  $E_c$  для положительных и отрицательных стримеров, получаемые из основного уравнения (1.62)? Действительно ли вдвое, как отмечено ранее в тексте на основе эксперимента?

**Во второй главе** диссертационной работы была представлена численная модель развития отрицательного лидера молнии. Из представленных рисунков, да и из самой схемы вероятностной модели следует, что воспроизводимая в рамках моделирования разрядная структура является фрактальной. В связи с этим возникает вопрос, были ли предприняты попытки оценить фрактальную размерность модельных разрядов при различных значениях питающих токов? Наверняка должны существовать работы, в которых подобные оценки были проделаны как для

модельных, так и для натуральных молниевых разрядов. Сравнение величины фрактальной размерности разрядов, полученных в рамках модели диссертанта, с результатами других работ могло бы быть неплохим дополнением к верификации модели. Эта оценка могла бы иметь и общефизическое значение, ведь процессы, напоминающие электрический разряд в атмосфере, происходят и в других средах, например, в хвосте магнитосферы Земли при развитии суббури, где эволюция поперечных токов также может носить фрактальный характер.

Далее, из результатов работы следует, что импульс тока ступени молнии достигает нескольких кило ампер и длится несколько десятых долей микросекунды. Данный ток должен создавать существенное переменное магнитное поле и, как следствие, вихревое электрическое. Однако модель построена в квазиэлектростатическом приближении и никак не учитывает данное обстоятельство. На мой взгляд, автор должен был либо учесть вихревую компоненту электрического поля, либо объяснить, почему без этого можно обойтись. Кроме того, хотелось бы понять, может ли представленная модель быть применена к описанию биполярного молниевых разряда в целом и его положительной части в частности?

Можно сделать еще ряд мелких замечаний:

– На рисунке 1.1, по -видимому, перепутаны обозначения сплошных и пунктирных линий.

– При обсуждении наземных экспериментов по инициации разрядов вводится новая сущность UPS (unusual plasma structures). Как эти структуры связаны с реальными структурами, возникающими при разряде в атмосфере? Ведь согласно принципу Оккама, при описании новых явлений – пока не исчерпаны остальные возможности – необходимо избегать введения новых понятий.

В целом, несмотря на сделанные замечания, диссертация Сысоева А.А. представляет собой законченное и яркое исследование, обладающее оригинальностью и научной значимостью. Работа выполнена на высоком профессиональном уровне. Квалификация автора проявляется на этапе теоретического анализа рассматриваемых проблем, при постановке задач численного моделирования и на стадии верификации полученных результатов. Сделанные в работе выводы являются обоснованными и имеют прикладной потенциал.

Автореферат работы Сысоева А.А. соответствует содержанию диссертации, достаточно полно отражает её структуру и даёт возможность сделать заключение о её высоком научном уровне. Основные положения диссертации в достаточной мере нашли отражение в 27 работах автора, 4 из которых опубликованы в ведущих российских и зарубежных изданиях.

