

«УТВЕРЖДАЮ»  
Директор ФГБУ «ГГО»  
В.М. Катцов  
« 2 » декабря 2020 г.



## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Сысоева 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

### **Актуальность темы исследования.**

В диссертации рассматривается классическая модель разряда от грозового облака. Особое внимание уделяется формированию отрицательного стримера, а затем лидера. Исходным началом является коронный разряд от совокупности гидрометеоров.

В настоящее время вопросы, связанные с изучением процесса возникновения молниевых разрядов, а также физических механизмов, отвечающих за распространение различных типов молниевых разрядов, в том числе и отрицательных ступенчатых лидеров, входят в число важных проблем физики грозового разряда. Основная проблема процесса возникновения молниевых разрядов заключается в том, что, согласно измерениям, максимальная напряженность электрического поля внутри грозового облака на порядок ниже диэлектрической прочности воздуха. Также из оптических наблюдений следует, что отрицательные лидеры молний, в отличие от непрерывно растущих положительных, всегда распространяются ступенчатым образом. Это наблюдается также в лабораторных условиях при экспериментах с длинной искрой.

Кроме научного интереса, связанного с решением теоретических задач физики молний, полученные в диссертации результаты имеют прикладное значение, связанное с совершенствованием методов молниезащиты. Целью настоящей работы является теоретическое исследование физического механизма возникновения молнии в безэлектродном грозовом облаке и причин ступенчатого распространения отрицательного лидера молнии.

### **Структура и содержание диссертации**

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

В главе 1 предлагается новый механизм возникновения молнии в грозовом облаке, формулируется система пяти дрейфово-диффузионных уравнений, описывающих эволюцию концентраций электронов, положительных ионов и трех типов отрицательных ионов, среди которых можно выделить легкие нестабильные, которые вносят значительный вклад в процесс отлипания электронов, и стабильные тяжелые, вклад которых в процесс отлипания мал при малых концентрациях атомарного кислорода. Эта система уравнений линеаризуется, сохраняя при этом основные плазмохимические реакции модели. Поскольку система предполагается однородной, то из нее следует характеристическое уравнение, среди корней которого находится положительный корень, указывающий на рост возмущений в системе, при этом уточняется величина предпробойного поля, величина которого, по мнению диссертанта, уменьшается при учете отлипания электронов. Показывается, что учет основных плазмохимических процессов, среди которых важную роль играет отлипание электронов от отрицательных ионов, приводит к существенному падению поля пробоя по

сравнению с общепринятым значением. Сделан вывод, что в этом случае развитие разряда происходит при меньших полях и на меньших высотах.

В этой же главе рассматривается упрощенная система двух эволюционных уравнений для электронов и суммарной концентрации всех отрицательных ионов. Здесь вводится понятие эффективной частоты ионизации с учетом потерь облачных ионов на гидрометеорах и показывается, что экспоненциальный рост концентрации заряженных частиц имеет место, когда частота ионизации гораздо меньше частоты прилипания. В этой главе вводится понятие центра производства ионов, связанных с мелкомасштабными коронными разрядами, которые возникают при сближениях гидрометеоров. Показано, что характерный размер возникающих центров порядка радиуса гидрометеора. Обсуждается механизм формирования и поляризации ионных пятен в грозовом облаке, появляющихся вследствие развития центров ионизации. В облаке также возникают области повышенной проводимости. Введение коэффициента адвективной диффузии позволяет описать расплывание ионного пятна в пространстве и во времени. Появляются ионные кластеры, поляризующиеся во внешнем поле и дающие начало положительным, а затем и отрицательным стримерам, которые образуют биполярные стримерные системы, сливающиеся в лидер молнии. Рассмотрена задача численного моделирования зарождения горячего лидерного канала, обсуждаются современные представления о механизме формирования лидера молнии.

Глава 2 посвящена распространению и ветвлению ступенчатого отрицательного лидера молнии. Проводится постановка задачи, приводится обзор существующих моделей молниевых разрядов, в которых рассмотрен ступенчатый механизм распространения отрицательного лидера молнии, дается описание модели. Для реализации модели используется методика расчета электрического потенциала и напряженности электрического поля, основанная на уравнении Пуассона. Показана возможность описания в рамках модели асимметрии развития положительных и отрицательных

разрядов. При формировании ступени отрицательного лидера возникает поляризация разрядных структур, усиливающая поле на ее границах и образуется чехол заряда лидерного канала. Проводится сравнение результатов моделирования с данными натурных измерений и литературными данными.

В заключении приведены основные результаты исследований.

### **Научная новизна**

В диссертации теоретически исследован ряд задач физики молний и получены следующие результаты:

1. Величина однородного поля пробоя определена с учетом происходящих между электронами и атмосферными ионами плазмохимических процессов. Показано, что учет отлипания электронов от отрицательных ионов снижает порог пробоя воздуха, причем влияние данного эффекта усиливается с увеличением высоты над уровнем моря.

2. Представлен новый механизм возникновения молнии в грозовом облаке. Основными особенностями этого механизма является то, что он начинается с формирования в облаке областей повышенной ионной проводимости и, в конечном итоге, приводит к возникновению в облаке стримерных систем. Определены условия, при которых возникающие в грозовом облаке стримерные системы объединяются, образуя проводящий лидерный канал.

3. Разработана модель развития ступенчатого отрицательного лидера молнии, учитывающая асимметрию пороговых полей роста положительных и отрицательных стримеров. Показана также возможность объединения нескольких лидерных каналов в один.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Научная значимость определяется, прежде всего, самим объектом исследования. До сих пор не ясно, каким образом происходит процесс

возникновения молнии в грозовом облаке и какие физические механизмы определяют ступенчатый механизм отрицательных лидеров молнии. Представленная в диссертации модель развития отрицательного лидера не только объясняет причину его ступенчатого распространения, но имеет и практическую ценность с точки зрения совершенствования методов молниезащиты. На долю разрядов этого типа приходится 90% от всего количества разрядов облако-земля.

**К основным недостаткам диссертационной работы** можно отнести:

1. В работе используются жаргонные выражения, а также некоторые понятия, смысл которых не расшифрован. Например: «активные геофизические системы» (стр. 5), «активная атмосфера» (стр. 5), «основные инновационные особенности предложенного механизма» (стр. 8), «чехол канала молнии» (стр. 9), «мелкомасштабные коронные разряды» (стр. 12), «грозовые тучи» (стр. 20), «концентрация льдинок» (стр. 42) и др.

2. Инициализация разрядных процессов начинается с коронных разрядов в облаках, об этом диссертант неоднократно пишет в работе. Однако, автор работы недостаточно знаком с результатами исследований, выполненных в этой области. В частности, не понятно, почему в работе рассматривается только один источник коронных разрядов, обусловленный сближением гидрометеоров. Ничего не говорится о разрядах с крупных кристаллов и кристаллических частиц осадков. Отсутствуют (почти полностью) ссылки на работы в ГГО в этой области. При этом в работах ГГО было показано, что в типичном грозовом облаке число актов коронирования за счет сближения гидрометеоров составляет  $10 \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$ . Одним из положений, выносимых на защиту, является то, что для инициализации разряда частота коронных разрядов должна превышать  $0.1 \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$ . Возникает вопрос о том, как это соотносится с тем, что давно известно?

3. Коронный разряд от двух сталкивающихся гидрометеоров имеет все же лабораторную природу. Как работает этот механизм в облачных

условиях, не совсем ясно. Совершенно другая динамическая ситуация. Может быть, наиболее благоприятная ситуация – это создание из гидрометеоров вытянутой конфигурации вдоль электрического поля.

4. Из системы дрейфово-диффузионных уравнений диссертант определяет условия начала разряда, связанного с отлипанием электронов от отрицательных ионов и определяет напряженность электрического поля, необходимую для разряда. При этом не понятно, как эта напряженность электрического поля определяется.

Указанные замечания не снижают ценности диссертационной работы. Диссертация выполнена на актуальную тему, обладает научной новизной и содержит решение задач, связанных с исследованием физических механизмов возникновения молниевых разрядов и распространением ступенчатого отрицательного лидера. Необходимо отметить высокий профессиональный уровень представленной работы.

Основные научные результаты опубликованы в рецензируемых журналах. Автореферат соответствует содержанию диссертационной работы.

### **Заключение**


Диссертационная работа «Исследование физических механизмов инициации молниевых разрядов и распространения ступенчатого отрицательного лидера молнии» является завершённой научно-квалификационной работой и удовлетворяет требованиям пунктов 9 и 10 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор – Сысоев Артём Андреевич – достоин присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы.

Отзыв на диссертацию и автореферат обсужден и одобрен на заседании семинара отдела Геофизического мониторинга и исследований ФГБУ «ГГО», протокол № 9 от 2.12.2020 г.

Главный научный сотрудник  
Федерального государственного бюджетного учреждения  
«Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова  
доктор физико-математических наук по специальности 25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы

 Морозов В.Н.

Главный научный сотрудник  
Федерального государственного бюджетного учреждения  
«Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова  
доктор технических наук по специальности 25.00.30 – метеорология, климатология, агрометеорология

 Синькевич А.А.

194021, Россия, Санкт-Петербург, ул.Карбышева, дом 7  
+7(812)297-43-90, <http://voikovmgo.ru>, [director@main.mgo.rssi.ru](mailto:director@main.mgo.rssi.ru)  
Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова»

Личную подпись Морозова В.Н. и Синькевича А.А. заверяю

Ученый секретарь ФГБУ «ГГО»  Шанина И.Н.

