


«УТВЕРЖДАЮ»

 Проректор
Московского государственного
университета имени М. В. Ломоносова
профессор А. А. Федянин



« » 2022 г.

О Т З Ы В

ведущей организации — Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» на диссертацию Костинского Александра Юльевича «Плазменные структуры и объемные сети каналов, как составляющие последовательного механизма инициации молнии в грозовых облаках», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.29 — физика атмосферы и гидросферы.

В работе Костинского А.Ю. экспериментально исследовался новый класс горячих плазменных образований, представляющих собой сети взаимодействующих плазменных каналов и двунаправленных лидеров, внутри заряженных искусственных облаков водного аэрозоля. Исследования проводились с помощью уникального экспериментального стенда ГИН-6 МВ, а также установки, позволяющей создать искусственное заряженное облако водного аэрозоля. Кроме того, применялись специально разработанные методы, в частности осциллографическое измерение токов, электрических полей и потоков оптического излучения. Для изучения неизвестных типов разрядов внутри аэрозольных облаков, а также длинной искры, создаваемой электрическими полями генераторов импульсных напряжений и заряженными искусственными аэрозольными облаками впервые были применены инфракрасные (ИК) камеры среднего ИК-диапазона, камеры с усилением изображения, скоростные камеры и микроволновая диагностика разрядов. Наиболее важные результаты, такие, как обнаружение внутри аэрозольных облаков нового класса плазменных объектов — «необычных плазменных образований» или разрядов, инициированных протяженными проводящими объектами в электрическом поле аэрозольного облака, были получены путем использования не менее двух независимых методик измерений. На основе результатов наблюдений плазменных образований и разрядов в заряженных аэрозольных облаках с

помощью численного моделирования и аналитических оценок была построена качественная модель инициации молнии в грозовых облаках, а также был предложен механизм инициации компактных внутриоблачных разрядов. При этом учитывались современные экспериментальные данные по физике молнии, компактных внутриоблачных разрядов (КВР) и физике широких атмосферных ливней космических лучей.

Актуальность работы. Исследование разрядов и плазменных образований в заряженных аэрозольных облаках представляется весьма актуальным, поскольку подобные явления могут быть сходными с процессами, ответственными за зарождение разрядов в грозовых облаках. Несмотря на то, что молнии изучаются на протяжении сотен лет, до сих пор в физике молниевых разрядов остается множество нерешенных проблем, среди которых особо следует выделить проблему зарождения молнии внутри грозовых облаков без присутствия протяженных проводящих объектов. В результате исследований, представленных в диссертации А.Ю. Костинского, удалось обнаружить ключевые недостающие звенья в цепи плазменных переходов на начальной стадии процесса инициации горячих проводящих плазменных каналов и выяснить механизм их инициации внутри искусственных положительно и отрицательно заряженных аэрозольных облаков. На примере таких облаков были изучены механизмы возникновения квази-сквозной фазы и фазы квазиобратного удара при взаимодействии плазменных каналов, исследованы структура двунаправленных лидеров и инициация плазменных образований при движении протяженного проводника около и внутри облака положительно и отрицательно заряженного водного аэрозоля. Применительно к моделированию ступенчатого развития молнии был изучен процесс образования ступеней положительного и отрицательного лидера длинной искры. На основе указанных результатов был построен качественный механизм инициации молнии в грозовых облаках от события, инициирующего молнию, до первых начальных импульсов пробоя, переходящих в ступенчатый отрицательный лидер в отсутствие в облаке или рядом с ним протяженных проводящих объектов, а также построен механизм инициации КВР. Кроме того, данные исследования являются актуальными в связи с активным изучением в последнее время новых явлений, относящихся к атмосферной физике высоких энергий, таких, как пучки энергичных электронов и вспышки гамма-излучения из атмосферы Земли. Последние связывают именно с компактными внутриоблачными разрядами. Помимо грозовых облаков в атмосфере Земли разряды типа молниевых могут иметь место в других аэрозольных средах, например, в облаках вулканического пепла, атмосферах других планет, а также в скоплениях большого количества заряженных пылевых частиц и капель в производственных помещениях и транспортных средствах (танкеры, железнодорожные цистерны). Это подчеркивает

актуальность диссертации А.Ю. Костинского, как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения.

Содержание и завершённость диссертации. Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения, словаря терминов, списка литературы и списка публикаций по теме диссертации. Во введении объясняется актуальность выбранной темы, представлен обзор литературы по теме диссертации, формулируются цели и задачи исследования, обосновывается научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Также во введении рассмотрены методология и методы исследования, приведен объем и структура работы, указаны положения, выносимые на защиту, обосновывается степень достоверности результатов работы и личный вклад автора, а также приведен список конференций, на которых были доложены результаты диссертации в качестве апробации результатов работы.

В первой главе рассмотрен новый класс электрических разрядов в облаках искусственно заряженных капель водного аэрозоля, обсуждаются последствия открытия таких разрядов для инициирования молнии в грозовых облаках. В этой главе также приведено описание экспериментов, в которых впервые наблюдались «необычные плазменные образования» внутри облаков искусственно заряженного водного аэрозоля с использованием высокоскоростной инфракрасной камеры, работающей в сочетании с высокоскоростной камерой видимого диапазона и измерениями тока и свечения разрядов в оптическом диапазоне.

Во второй главе диссертации представлены результаты экспериментов по инициации «необычных плазменных образований» внутри положительной стримерной вспышки, поддерживаемой электрическим полем отрицательно заряженного облака водного аэрозоля. Дано подробное описание экспериментальной установки, использовавшейся для исследования причин возникновения «необычных плазменных образований». Благодаря дополнению экспериментальной установки микроволновой диагностикой, были получены указания на то, что механизм возникновения «необычных плазменных образований» может быть обусловлен горячими плазменными каналами внутри длинной положительной стримерной вспышки. В главе также обсуждаются полученные результаты с данными предыдущих экспериментов, в которых также фиксировались физические проявления «необычных плазменных образований». Показано, что новые результаты хорошо согласуются с полученными ранее и позволяют непротиворечиво объяснить результаты ранних экспериментов, которые не имели однозначных интерпретаций.

В третьей главе проведен анализ результатов исследования взаимодействия между положительными и отрицательными лидерами в электрических разрядах метрового масштаба, генерируемых электрическими полями облака отрицательно заряженного водного аэрозоля, обсуждаются

возможные последствия таких взаимодействий для процесса контакта молнии с наземными объектами. В главе дано описание экспериментальной установки, дополненной оптической скоростной камерой видимого диапазона с CMOS матрицей и модифицированной для данной научной задачи схемой измерений. Также представлены результаты экспериментов, в частности, впервые приведены два снимка сквозной фазы лидеров, показывающие значительное разветвление лидера внутри общей стримерной зоны. Полученные результаты сравниваются с данными более ранних работ, в которых с помощью других методик исследовался контакт двух лидеров, инициированных в электрическом поле облака искусственно заряженного аэрозоля, а также с имеющимися экспериментальными результатами по длинной искре и молнии

В четвёртой главе представлены результаты исследования плазменных образований, включая двунаправленных лидеров, инициированных в электрическом поле положительно заряженного водного аэрозоля. Эти плазменные образования были обнаружены внутри облака, благодаря инфракрасным камерам, фиксирующим изображение в диапазоне 3-6 мкм. В данной главе также дан подробный обзор предыдущих экспериментов с положительно заряженным аэрозольным облаком, в котором ранее удалось обнаружить подобные плазменные образования.

В пятой главе представлены результаты моделирования в лабораторных экспериментах аналогов высотно-инициированных триггерных молний и «классических» триггерных молний в электрическом поле отрицательно и положительно заряженного облака водного аэрозоля. Дано описание экспериментальной установки и схемы экспериментов, в ходе которых в направлении заряженного облака выпускался арбалетный болт (моделирующий летательный аппарат) с заземленным проводом и без него. В результате этих экспериментов впервые продемонстрирована возможность моделирования в лабораторных условиях высотно-инициированных триггерных молний и триггерных молний с помощью инициации болтом арбалета разрядов в электрическом поле облака отрицательно заряженного водного аэрозоля. Также приведены результаты исследований особенностей инициирования положительных лидеров триггерных молний. В частности, получены параметры токов стримерных вспышек восходящих положительных лидеров.

В шестой главе рассматриваются эксперименты, в которых исследовалось ступенчатое развитие отрицательного и положительного лидера, приводящее к мощной вспышке стримерной короны, в том числе проводились исследования длинных искр, инициированных генераторами импульсных напряжений, в целях моделирования развития отрицательных и положительных каналов молний. Дано подробное введение в проблему ступенчатого развития отрицательного и положительного лидера молнии и положительного лидера длинной искры. Приводится подробное описание экспериментальной установки, в которой длинные искры образовывались в

электрическом поле генератора Маркса импульсных напряжений ГИН-6МВ в воздушных промежутках стержень-плоскость, длина которых составляла от 4 до 6 м для отрицательных искр и от 5 до 10 м для положительных искр. Также обсуждаются результаты экспериментов и их возможная роль в понимании процессов распространения молнии и внутриоблачных разрядов.

В седьмой главе дано качественное описание возможного механизма инициации молнии. Отмечается, что такой механизм является комплексным процессом и охватывает основные этапы инициации и развития молнии, начиная с иницирующей молнию самого первого события, за которым следует изменение начального электрического поля, с последующими несколькими начальными импульсами пробоя вплоть до старта большого отрицательного лидера, надежно регистрируемого радиофизическими системами и общепризнано считающегося «молнией». Рассматривается проблема инициации молнии в грозовых облаках, а также даются краткие определения основным физическим явлениям, которые учитываются при построении механизма инициации молнии. Приводятся экспериментальные и теоретические основания этого механизма, излагаются основные условия и явления, которым должен удовлетворять и которые должен объяснять механизм инициации молнии, чтобы соответствовать известным в настоящее время экспериментальным и теоретическим данным.

В восьмой главе дается оценка динамики инициирования стримерных вспышек, обеспечивающих пространственно-временной профиль и скорость распространения фазовой волны максимальных сигналов очень высокой частоты при развитии КВР. Рассматриваются заряды и электрические поля модельных заряженных гидрометеоров, которые могут инициировать стримеры и коронный разряд. Дается оценка возможности инициации коронного и стримерного разряда с поверхности заряженных гидрометеоров малых размеров, оценивается время жизни воздушных электродов с точки зрения инициации электронных лавин фоновыми космическими лучами до прохождения широкого атмосферного ливня через этот объем грозового облака. В данной главе также показано, что благодаря механизму, основанному на комбинации широкого атмосферного ливня и лавин релятивистских убегающих электронов, возможна синхронная инициация стримерных вспышек в сильном электрическом поле грозового облака.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Диссертация А.Ю. Костинского написана грамотно и с соблюдением научного стиля изложения. Все материалы в тексте представлены подробно и понятно. Данная диссертация является серьёзным и завершённым научным исследованием в области физики плазменных образований в аэрозольных облаках и молниевых разрядов. Автореферат полностью и точно отражает содержание диссертации.

Значимость полученных автором диссертации результатов определяется их важностью не только для физики грозовых облаков, но и для физики других заряженных аэрозольных и многофазных сред, таких как выбросы заряженного вулканического пепла, торнадо и пылевые бури, молнии на других планетах солнечной системы. Основной проблемой для указанных разделов физики и геофизики является выяснение механизма инициации молниевых разряда. В этом плане ключевым результатом работы является обнаружение внутри заряженных искусственных облаков водного аэрозоля нового класса горячих плазменных образований, которые представляют собой сети взаимодействующих плазменных каналов и двунаправленных лидеров, часто пронизывающих значительную часть аэрозольного облака. Построение в данной работе качественной модели инициации молнии от первого иницирующего события через начальную стадию увеличения электрического поля до стадии, включающей начальные импульсы пробоя, является важным шагом к решению этой проблемы. Другим важным результатом данной работы, имеющим большую значимость, является построение полуколичественной модели КВР, дающей непротиворечивую интерпретацию их наблюдаемых физических свойств.

Научная новизна и практическая ценность. Впервые получены указания на существование внутри положительно и отрицательно заряженных искусственных водных аэрозольных облаков нового типа электрических разрядов, представляющих собой сети плазменных каналов размером 10-30 см, нагретых до температуры восходящего положительного лидера. При этом показано, что подобные «необычные плазменные образования» иницируются внутри восходящей положительной стримерной вспышки до появления других плазменных образований в электрическом поле аэрозольного облака, а также показано значительное разветвление лидеров внутри общей стримерной зоны. Впервые обнаружено, что яркость инфракрасного излучения в области контакта восходящего и нисходящих лидеров примерно в 5 раз выше, чем для участков образовавшегося единого канала ниже или выше этой области. Впервые с помощью инфракрасной камеры исследована положительная часть двунаправленного лидера, находящийся внутри отрицательно заряженного облака водного аэрозоля, а также впервые исследован процесс инициации стримерных вспышек и лидеров при движении протяженного проводника около и внутри искусственного облака положительно и отрицательно заряженного водного аэрозоля. Впервые во время образования ступеней положительного лидера длинной искры перед ним в зоне стримерной короны обнаружено плазменное образование, сходное с теми, которые обычно наблюдаются в стримерной зоне отрицательного лидера. Впервые показано морфологическое сходство ступеней положительного и отрицательного лидеров длинной искры. Впервые предложен последовательный качественный механизм инициации молнии в грозовых облаках от иницирующего молнию события через

начальную стадию увеличения электрического поля до первых начальных импульсов пробоя, которые переходят в ступенчатый отрицательный лидер. Впервые предложен механизм инициации КВР, который дает непротиворечивое объяснение спектру излучения таких разрядов, характерному для стримерных вспышек, и скорости распространения источников радиоизлучения внутри грозового облака близкой к скорости света. Впервые предложена последовательная цепочка переходов плазмы из одного состояния в другое на протяжении всего процесса инициации молнии.

Полученные в диссертации результаты можно в дальнейшем использовать для понимания механизмов инициации молнии и КВР, которые являются мощными электрическими явлениями и генераторами потоков релятивистских частиц, что позволит лучше предсказывать опасные явления, которые могут приводить к гибели людей и животных, нарушать работу линий электропередачи и связи и представлять опасность для самолетов и других летательных аппаратов. В частности, выявленная в работе связь между инициацией молний, КВР, начальными импульсами пробоя и областями облака с наибольшей турбулентностью позволит предложить методики обнаружения наиболее сильных турбулентностей в грозовых облаках, с помощью детектирования электромагнитных сигналов, характерных для указанных выше явлений. Это обуславливает практическую ценность полученных в диссертации Костинского А.Ю. результатов, поскольку электромагнитные разряды типа молниевых и КВР могут происходить не только в природных образованиях, но и в местах скопления большого количества заряженных пылевых частиц и капель в производственных помещениях и транспортных средствах.

Обоснованность и достоверность выводов и заключений.

Полученные в работе Костинского А.Ю. результаты и выводы хорошо обоснованы. В проведенных экспериментах использовано надёжное и многократно прошедшее апробацию оборудование. Выполненные численные расчёты и теоретические заключения базируются на серьёзной научной и справочной литературе. Результаты, представленные в диссертации, доложены на 13 международных и всероссийских конференциях. Также результаты диссертации опубликованы в 11 статьях в журналах, индексируемых системами Web of Science и Scopus. Из этих статей 6 опубликованы в журналах из квартиля Q1. В опубликованных статьях и в автореферате результаты представленной диссертации отражены достаточно полно.

Замечания к диссертационной работе.

1. В диссертации большое внимание уделяется, так называемым, компактным внутриоблачным разрядам (КВР). В последнее время именно с КВР связывают вспышки гамма-излучения, наблюдающиеся из атмосферы Земли.

Хотя анализ подобных явлений находится за пределами целей и задач данной диссертации, в обзоре литературы, посвященном КВР, следовало бы отметить возможную роль КВР в развитии высокоэнергичных процессов, которые могут иметь место во время грозových разрядов.

2. Вывод главы 8 о том, что только широкие атмосферные ливни (ШАЛ) могут дать необходимое число электронов и позитронов для синхронной инициации стримерных вспышек представляется излишне категоричным. До сих пор не получены прямые подтверждения связи ШАЛ и грозových разрядов. Поэтому, несмотря на то что, действительно, электронно-позитронный компонент ШАЛ может обеспечить развитие лавин убегающих электронов в полях грозových облаков, влияние ШАЛ на инициацию молниевых разрядов следует рассматривать как одну из возможных гипотез.

3. В диссертации имеется ряд опечаток, иногда используются жаргонные и не общепринятые термины. Надписи на некоторых рисунках, в частности, В5, В7, В8, В12, В14, В16, В17, В20, В23 – В34, В37, В38, В42 – В44, 3.1, 3.8, 3.9, 3.11, 3.19, 5.7, 5.9 – 5.12, 5.16, 5.22, 6.1 – 6.4, 6.7 – 6.17, 6.21, 6.22, 7.3, 7.4, 7.11, 7.12, 7.14 и в таблице 6 на с. 208 даны на английском языке, также в некоторых случаях приводятся англоязычные единицы измерений.

Указанные замечания не снижают научной ценности, новизны и актуальности результатов, представленных в диссертации А.Ю. Костинского.

Заключение. Таким образом, диссертация А.Ю. Костинского «Плазменные структуры и объемные сети каналов, как составляющие последовательного механизма инициации молнии в грозových облаках» соответствует всем критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук, установленным в «Положении о порядке присуждения ученых степеней», утверждённом постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842 с дополнениями от 21 апреля 2016 год № 335, а сам Костинский Александр Юльевич, безусловно, заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.29 — физика атмосферы и гидросферы.

Отзыв составил
профессор физического факультета МГУ,
в.н.с. ОКН НИИЯФ МГУ,
д.ф.м.н.



С.И. Свертилов

Результаты диссертации рассмотрены и одобрены на заседании Семинара
ОКН НИИЯФ МГУ, 26.01.2022.

Заведующий ОКН НИИЯФ МГУ,
д.ф.м.н.



В.В. Калегает

Директор НИИЯФ МГУ
профессор, член-корр. РАН



Э. Э. Боос

Сведения о ведущей организации:
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский государственный университет имени
М.В.Ломоносова»,
119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1
тел. +7 (495) 939-10-00
e-mail: info@rector.msu.ru