



О Т З Ы В

Официального оппонента — Шнейдера Михаила Наумовича, доктора физико-математических наук (Принстонский университет, США) 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. изучались разряды в воздухе, инициированные электрическими полями, созданными искусственно заряженными аэрозольными облаками в приложении к изучению длинной искры, молнии и внутриоблачных разрядов. В процессе изучения разрядов, инициированных искусственно заряженным аэрозольным облаком, были впервые открыты внутри заряженных облаков аэрозоля новые классы высокопроводящих плазменных каналов и их сетей («необычные плазменные образования»). Также Костинским А.Ю. проводились исследования положительных и отрицательных лидеров длинных искр с помощью генератора импульсных сверхвысоких напряжений (ГИН-6 МВ) и высокоскоростных камер с усилением изображения. Кроме того, во всех экспериментах применялись специально разработанные методы исследований, в частности осциллографическое измерение токов (с помощью малоиндуктивных шунтов), электрических полей (с помощью быстрых антенн) и слабых потоков оптического излучения (с помощью фотоэлектронных умножителей). Чтобы исследовать «необычные плазменные образования» внутри аэрозольных облаков, а также длинные искры, Костинский А.Ю. предложил применять инфракрасные (ИК) камеры среднего ИК-диапазона, камеры с усилением изображения, скоростные камеры и микроволновую диагностику разрядов. Данные исследования, а также экспериментальные результаты последнего десятилетия в области физики молнии и внутриоблачных грозных разрядов послужили для аналитических оценок и численных расчетов для создания качественной гипотезы инициации молнии в грозовых облаках. Внутри этой качественной гипотезы был предложен механизм возникновения такого малоизученного явления, как компактные внутриоблачные разряды (КВР). При построении моделей также активно использовались современные представления о физике убегающих электронов в электрических полях грозового облака, а также физике широких атмосферных ливней космических лучей.

Актуальность работы. Актуальность исследований разрядов внутри искусственно заряженных аэрозольных облаков определяется возможным существенным сходством с инициацией молний и внутриоблачных разрядов в грозовых облаках. Проблемы инициации молнии и КВР внутри грозовых облаков до сих пор остаются одними из самых актуальных проблем атмосферного электричества. В результате исследований плазменных образований в электрических полях заряженного аэрозольного облака, представленных в диссертации Костинского А.Ю., появились реальные «кандидаты на должность» важных отсутствующих звеньев в цепочке преобразований плазмы от первого события в инициации молнии до появления отрицательного лидера, наблюдаемого наземным оптическим и радиофизическим оборудованием. При фиксировании радиофизическими методами развития положительных лидеров молнии внутри грозовых облаков крайне актуальным остается вопрос: с помощью каких механизмов движение

положительного лидера возможно наблюдать при построении карт движения радиоисточников в УКВ-области? Костинский А.Ю. с соавторами получили новые очень важные данные о ступенчатом развитии положительных лидеров длинной искры в электрических полях ГИН 6МВ, сопровождающихся мощными вспышками стримерной короны, активно излучающей в УКВ. Кроме этого, Костинский А.Ю. с соавторами в этих экспериментах впервые обнаружили плазменные образования перед каналом положительного лидера (не являющиеся прямым продолжением плазменного канала). Эти наблюдения, возможно, дают ключ к пониманию образования ступеней положительного лидера. Используя вышеперечисленные экспериментальные результаты Костинским А.Ю. с соавторами была предложена качественная гипотеза возникновения молнии в грозовых облаках от первого разрядного события, инициирующего молнию, через начальные изменения электрического поля до первых начальных импульсов пробоя, которые через несколько мс переходят в ступенчатый отрицательный лидер молнии. Актуальность такого подхода Костинского А.Ю. определяется последовательным использованием в физике молнии хорошо проверенных данных физики низкотемпературной плазмы высокого давления, физики газового разряда, физики длинной искры, что позволило построить непротиворечащую широкому спектру экспериментальных данных последовательность перехода плазмы во все более сложные плазменные образования во время развития молнии. На наш взгляд такой подход является крайне актуальным для физики молнии и КВР. Результаты, полученные в диссертации актуальны, на наш взгляд, так как могут касаться и других сильно заряженных аэрозольных и многофазных сред. Такие разряды могут возникать, как у жерла извергающихся вулканов, так и в шлейфах вулканического пепла, в торнадо и мощных пылевых бурях. Нельзя исключить, что подобные типы разрядов могут возникать и в атмосферах других планет. Поэтому диссертация Костинского А.Ю., актуальна, не только для понимания ключевых процессов физики грозовых облаков, но полученные в ней результаты имеют серьезный прикладной потенциал.

Также очень актуальными, на наш взгляд является предложенный в диссертации новый подход к роли широких атмосферных ливней космических лучей (ШАЛ) в инициации молнии. В диссертации удалось фактически придать новую жизнь идее Гуревича А.В. с соавторами. В интерпретации Костинского А.Ю. с соавторами ШАЛ являются триггером «поджигающим» объемную инициацию молнии и КВР, а не прямым инициатором молнии. Актуальной и новой также является изложенная в диссертации идея синхронного «поджига» благодаря ШАЛ множества стримерных вспышек в объеме около кубического километра. Это позволяет понять, как могут за кратчайший промежуток времени (40-3000 мкс) с момента начала первых плазменных процессов КВР и начальные импульсы пробоя обеспечить токи в десятки кА и переток зарядов порядка 0.1-1.5 Кл.

Содержание и завершённость диссертации. Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения, словаря терминов, списка литературы и списка публикаций по теме диссертации. Во введении представлен подробный обзор литературы по теме диссертации, обосновывается актуальность выбранных целей и задач исследования, научная новизна. Рассматривается теоретическая и практическая значимость работы. Кроме того, во введении приведены методология и методы исследования, объем и структура работы, положения, выносимые на защиту диссертации. Также обосновывается степень достоверности результатов работы и личный вклад автора. В качестве апробации результатов работы, приведен список российских и международных конференций, на которых были доложены основные результаты диссертации. Данные конференции являются ведущими конференциями в данной области исследований.

В первой главе диссертации рассмотрены впервые обнаруженный в воздухе атмосферного давления новый класс плазменных образований внутри искусственно отрицательно заряженных облаков водного аэрозоля субмикронных размеров. Так как ранее не наблюдались подобные плазменные структуры, то их называли «необычными плазменными образованиями». Стоит

обратить внимание, данные плазменные структуры образовывались в подпороговых электрических полях, примерно в 3-6 раз меньших, чем необходимы для пробоя воздуха. Данные образования оказались сетями каналов с «иерархической структурой» размером в несколько десятки сантиметров. Самые яркие из этих каналов имели проводимость и температуру сравнимую с температурой хорошо изученных положительных лидеров. Также в главе рассматриваются возможности объяснения некоторых плазменных процессов при возникновении молнии с помощью обнаруженных плазменных образований. В главе подробно описана экспериментальная установка, ключевым элементом которой являлась скоростная матричная (со считыванием изображения со всех пикселей одновременно, в отличие от болометрических тепловизоров) инфракрасная камера среднего ИК-диапазона (3-5 мкм). Так как средний размер капель аэрозоля был на порядок меньше, чем длины волн, на которых работала ИК-камера, то удавалось, как пишет автор диссертации, «видеть внутри облака». Эта методика и позволила открыть новый класс плазменных явлений в существенно подпороговых электрических полях. Также важную роль играли фиксирование плазменных процессов с помощью высокоскоростной камеры видимого диапазона с усилением изображения и прямое измерение тока восходящих лидеров с токоприемника. Так как разряды возникали самопроизвольно, то синхронизация аппаратуры осуществлялась по уровню тока или света, исходящего от разрядов, или по электромагнитному излучению разряда, фиксируемому небольшой антенной.

Во второй главе диссертации рассматривается вопрос: каков может быть механизм возникновения «необычных плазменных образований» в поле отрицательного облака. Путем довольно сложных экспериментов удалось обнаружить по крайней мере один механизм. Было показано, что «необычные плазменные образования» возникают внутри длинной положительной стримерной вспышки, которая поднимается с заземленной плоскости к аэрозольному облаку в поле отрицательно заряженного облака. Высказывается гипотеза, что физическим механизмом преобразования холодной плазмы стримеров в горячую проводящую плазму «необычных плазменных образований» может быть ионизационно-перегревная неустойчивость, хорошо известная из-за потери генерации газоразрядных газовых лазеров высокого давления. Использовалась та же экспериментальная установка, что и в первой главе, но была добавлена микроволновая диагностика плазмы разрядов. В этой главе, кроме того, полученные экспериментальные результаты сравниваются с более ранними экспериментами, где, возможно, также фиксировались физические проявления «необычных плазменных образований», но их тогда не выделили в отдельный класс и проявления были единичными, так как не использовалась ИК-методика измерений. Несмотря на эти различия, удастся согласовать полученные результаты с экспериментами прошлых лет.

В третьей главе исследовалось взаимодействие (сквозная фаза) нисходящего отрицательного лидера (нижняя часть двунаправленного внутриоблачного лидера) и восходящего с заземленной плоскости положительного лидера. Данное взаимодействие рассматривалось в контексте контакта отрицательной молнии с восходящими положительными лидерами, стартующими с наземных сооружений. В главе дано описание той же экспериментальной установки, что и в первых двух главах. Кроме использованной ранее аппаратуры, в экспериментальный комплекс была включена скоростная цветная камера видимого диапазона с CMOS матрицей. В результате экспериментов впервые удалось зафиксировать контакт нисходящего отрицательного и восходящего положительного лидера. Кроме того, впервые удалось во время сквозной фазы лидеров, зафиксировать ветвление лидеров внутри общей стримерной зоны. Полученные в главе результаты также сравниваются с результатами предыдущих исследований в аэрозольном заряженном облаке и с исследованиями контакта лидеров в длинной искре, созданной генераторами импульсных сверхвысоких напряжений, а также с контактом отрицательного нисходящего лидера молнии с восходящим заземленным положительным лидером.

В четвертой главе рассматриваются результаты исследования «необычных плазменных образований», инициированных в электрическом поле облака положительно заряженного

аэрозоля. Эти плазменные образования также были обнаружены внутри облака, благодаря ИК-камере, фиксирующей изображение в диапазоне 3-6 мкм. Кроме «необычных плазменных образований» внутри положительного облака были обнаружены двунаправленные лидеры. В главе впервые приведены верхние (отрицательные) части двунаправленных лидеров, которые взаимодействуют с сетями каналов, пронизывающих практически все облако. Сети «необычных плазменных образований», пронизывающих облако являются довольно неожиданным результатом, который требует более глубокого осмысления. Но и каналы двунаправленных лидеров, скорее всего, были образованы контактом нескольких более мелких каналов, судя по ярким местам энерговыделения, характерного для контакта плазменных каналов. В данной главе также дан подробный обзор небольшого числа экспериментов прошлых лет с положительно заряженным аэрозольным облаком. Эти эксперименты хорошо согласуются с новыми данными.

В пятой главе представлены результаты физического лабораторного моделирования высотно-иницированных триггерных молний, а также молний, инициированных ракетой с заземленным проводом (триггерных молний) с помощью отрицательно и положительно заряженного облака. В направлении аэрозольного облака из арбалета выпускался болт (моделирующий летательный аппарат) или болт с заземленным проводом, моделирующий триггерную молнию. В результате этих экспериментов продемонстрирована возможность лабораторного моделирования приближения к заряженному облаку летательных аппаратов и инициации высотно-иницированных триггерных молний, а также триггерных молний. С помощью высокоскоростной камеры исследованы динамика восходящего к хвосту болта положительного лидера и инициация, и одновременное распространение положительного лидера с кончика болта. В частности, получены параметры токов стримерных вспышек восходящих положительных лидеров. Также изучены, благодаря ИК-камере внутри отрицательно заряженного облака «необычные плазменные образования», инициированные положительными лидерами, которые также представляют собой сети каналов. Внутри положительно заряженного облака «необычные плазменные образования» были инициированы болтом. Они значительно отличались по форме от «необычных плазменных образований» отрицательного облака.

В шестой главе приведены эксперименты, в которых исследовалось ступенчатое положительного лидера, которое сравнивается с хорошо известным ступенчатым развитием отрицательного лидера. Конечным моментом развития ступени являются мощные стримерные вспышки. Глава характеризуется подробным обзором проблемы ступенчатого положительного лидера, который до настоящего времени плохо изучен. Описан экспериментальный стенд ГИН-БМВ, который позволял проводить эксперименты в промежутках вплоть до 10 м, а также описано измерительное оборудование. Зафиксированы ступени положительного лидера длиной более 1 м. Кроме того, впервые удалось зафиксировать перед каналом положительного лидера плазменные образования, сходные со спейс-стемами или спейс-лидерами в длинной отрицательной искре.

В седьмой главе дано качественное описание возможного механизма инициации молнии на основе результатов, полученных в предыдущих главах, а также данных радиофизических и оптических исследований молнии последних лет. Отмечается, что такой механизм может являться цепочкой преобразований и усложнения плазменных образований. Механизм начинается с инициирующего молнию события (это может быть компактный внутриоблачный разряд или его более слабый аналог), за которым следует начальное изменение электрического поля (во время которого, предположительно, происходят многочисленные контакты небольших плазменных образований), с последующими несколькими начальными импульсами пробоя (которые, предположительно, являются контактами довольно больших плазменных сетей), в результате стартует большой устойчиво распространяющийся отрицательный лидер молнии. Рассматриваются различные аспекты проблемы инициации молнии в грозовых облаках и различные подходы к этой проблеме. В главе даются также краткие определения и пояснения основным физическим явлениям, которые используются для механизма инициации молнии.

Наиболее важным выводом главы представляется положение, согласно которому молния инициируется не в одном месте, развиваясь впоследствии до большого двунаправленного лидера, а является следствием коллективного, объемного процесса, который призван обеспечить значительные токи и заряды начальных импульсов пробоя, следующих очень быстро за начальным событием инициации молнии. Для обеспечения в свою очередь этого объемного процесса требуется агент, который синхронизирует появления множества стримерных вспышек, распределенных по объему. Таким агентом в механизме предполагаются ШАЛ, усиленные в электрическом поле облака. Анализ роли ШАЛ посвящена следующая глава.

В восьмой главе приведена предварительная оценка объемного развития множества стримерных вспышек, инициированных ШАЛ во время инициации молнии. Этим объясняется инициация и динамика КВР. Дается довольно остроумное объяснение того, как обычные стримерные вспышки (основные источники УКВ-излучения внутри облака) могут обеспечить скорость радиосигналов, близкую к скорости света. Предполагается, что это фазовая скорость инициации («поджига») стримерных вспышек. Важная роль ШАЛ в данном механизме определяется тем, что именно ШАЛ может синхронизовать инициацию множества стримерных вспышек в большом объеме в пределах нескольких мкс. Таким образом снимается противоречие между физической природой типичных стримерных вспышек, которые не могут двигаться в воздухе атмосферного давления со скоростями выше $5 \cdot 10^6$ м/с и зафиксированной радиоинтерферометрами скоростями радиоисточников около 10^8 м/с. Рассматриваются также проблемы, возникающие при попытке объяснить инициацию стримеров в грозном облаке, исключительно поляризованными и ли заряженными гидрометеорами.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Диссертация Костинского А.Ю. написана грамотно и с соблюдением научного стиля изложения. Все материалы в тексте представлены подробно и понятно. Данная диссертация является серьезным и завершенным научным исследованием в области физики длинной искры и физики плазмы в электрических полях аэрозольных облаков и молниевых разрядов. Автореферат полностью и точно отражает содержание диссертации.

Значимость полученных автором диссертации результатов определяется важностью поднимаемых проблем для многих заряженных многофазных сред, процессы внутри которых сложно изучать. В диссертации предлагаются интересные экспериментальные методики, которые могут использоваться и для других аэрозольных заряженных сред. Одной из основных проблем для понимания процессов разрядных процессов в многофазных средах является проблема инициации разрядов. Поэтому обнаружение необычных плазменных образований внутри заряженных аэрозольных облаков может являться указанием на механизмы и в других многофазных средах, например в извержениях вулканов около жерла. Важно также, что в диссертации обнаружено, что необычные плазменные образования являются сетями, причем пронизывающими значительные объемы облака. Также важным результатом нам представляется создание в данной работе качественной модели инициации молнии, построенной на рассмотрении последовательных преобразований плазменных объектов. Насколько мы понимаем, это сделано впервые и является серьезной ступенью на пути к пониманию инициации молнии. Еще одним значимым результатом диссертации является построение полуколичественной модели КВР. Значимо, что в модели КВР удалось непротиворечивым образом объяснить противоречащие друг другу экспериментальные данные по КВР.

Научная новизна и практическая ценность. Впервые обнаружены внутри положительно и отрицательно искусственно заряженных аэрозольных облаков новые типы плазменных образований, которые являлись иерархическими сетями плазменных каналов, некоторые из которых имели свойства близкие к свойствам горячих и проводящих положительных лидеров. Впервые был найден один из возможных механизмов возникновения необычных плазменных

образований. Они возникали внутри длинной стримерной вспышки, скорее всего благодаря механизму ионизационно-перегревной неустойчивости. Впервые обнаружено, что в месте контакта положительных и отрицательных лидеров нагрев в несколько раз выше, чем для других участков канала, что говорит о неравномерности течения тока по взаимодействующим лидерам. Впервые обнаружено, что большие части аэрозольного облака могут быть пронизаны множеством каналов и сетей, что может иметь следствия для процессов в грозových облаках. Впервые удалось с помощью протяженного проводящего плазменного объекта инициировать внутри заряженных аэрозольных облаков сети плазменных каналов, а также инициировать лидеры длиной в метры при приближении проводящего объекта к аэрозольному облаку. Впервые во время возникновения больших ступеней положительного лидера длинной искры в стримерной зоне обнаружено плазменное образование, похожее на те, которые всегда наблюдаются в стримерной зоне отрицательного лидера. Впервые показано морфологическое сходство стримерных вспышек при образовании ступеней положительного и отрицательного лидеров длинной искры. Впервые предложен качественный механизм инициации молнии в грозových облаках, который начинается с иницилирующего события, впоследствии следует начальную стадию увеличения электрического поля, за которой следуют начальные импульсы пробоя, которые становятся источником ступенчатого отрицательного лидера. Впервые механизм инициации молнии представлен, как последовательная цепочка переходов плазмы из одного состояния в другое более сложное.

Полученные в диссертации результаты могут использоваться другими исследователями для улучшения понимания механизмов инициации молнии и КВР, а также лучшего предсказания опасных геофизических явлений, так как электрические процессы являются самыми легко фиксируемыми физическими явлениями. Практическую ценность может иметь предложенный метод обнаружения наиболее турбулентных областей грозového облака по очень сильным изменениям электрического поля, связанного с начальными импульсами пробоя грозовой молнии. Это обуславливает практическую ценность полученных в диссертации Костинского А.Ю. результатов.

Обоснованность и достоверность выводов и заключений. Полученные в работе Костинского А.Ю. результаты и выводы хорошо обоснованы. В проведённых 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 экспериментам с отрицательно заряженным аэрозольным облаком, а положительно заряженному облаку уделено гораздо меньше внимания. Однако, как мы можем видеть на некоторых рисунках, размещённых в диссертации, стримерные вспышки и лидеры в поле положительного облака исходят прямо из самого облака по направлению к заземленной плоскости. Важно было бы также выяснить механизм инициации внутри положительно заряженного аэрозольного облака.

2. В главах 1 и 3 обсуждение результатов, полученных в более ранних работах по тематике глав, находится в конце глав, в отдельных разделах. Логичнее их было перенести во введение к главам.

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

Заключение. Диссертация А.Ю. Костинского «Плазменные структуры и объемные сети каналов, как составляющие последовательного механизма инициации молнии в грозовых 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 ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.29 — физика атмосферы и гидросферы.

Отзыв составил:

д.ф.-м.н. М.Н. Шнейдер

Mikhail Shneider

Михаил Наумович Шнейдер (Mikhail N. Shneider)

д.ф.-м.н., физика и химия плазмы (защита в 1997, Институт Высоких Температур, АН России, Москва)

Mikhail Shneider, Ph.D., D.Sc.
Senior Research Scholar (Research Professor)
The Department of Mechanical and Aerospace Engineering
Princeton University
D-418 Engineering Quad,
Olden Street, Princeton, NJ 08544-5263
Tel: 1-609-258-1022
e-mail: shneyder@princeton.edu
m.n.shneider@gmail.com

Список избранных научных трудов за последние 5 лет:

1. M.N.Shneider , M. Pekker, “Liquid Dielectrics in an Inhomogeneous Pulsed Electric Field”, IOP Publishing, Bristol, UK, 2016; “Liquid Dielectrics in an Inhomogeneous Pulsed Electric Field (Second Edition). Dynamics, cavitation and related phenomena”, IOP Publishing, Bristol, UK, 2020
2. M.N. Shneider, V.V.Semak, Ponderomotive convection in water induced by a cw laser, 120, 244902 (2016)
3. F.K. Popov, M.N. Shneider, Sound produced by an oscillating arc in a high-pressure gas, J. Appl. Phys. 122, 053303 (2017)
4. M.N. Shneider, Ponderomotive perturbations of low density low-temperature plasma under laser Thomson scattering diagnostics, Physics of Plasmas 24, 100701 (2017)
5. X. Zhang, M.N. Shneider, Dynamic modeling of carbon nanofiber growth in strong electric fields via plasma-enhanced chemical vapor deposition, J. Appl. Phys. 125, 203304 (2019)
6. H. Zhong, M. N. Shneider, M.S. Mokrov, Y. Ju, Thermal-Chemical Instability of Weakly Ionized Plasma in a Reactive Flow, J. Phys. D: Appl. Phys. 52, 484001 (2019)
7. C. A. Galea, M. N. Shneider, A. Dogariu, R. B. Miles, Magnetically Induced Depolarization of Microwave Scattering from a Laser-Generated Plasma, Phys. Rev. Applied, 12, 034055 (2019)
8. A.Yu. Starikovskiy, N.L. Aleksandrov, M.N. Shneider, Simulation of decelerating streamers in inhomogeneous atmosphere with implications for runaway electron generation, J. Appl. Phys. 129, 063301 (2021)

9. Z. Zhang, M.N. Shneider, R.B. Miles, Coherent microwave scattering from resonance enhanced multi-photon ionization (Radar REMPI): A review, *Plasma Sources Sci. Technol.* 30, 103001 (2021)
10. D. Feng, A. Diallo, M.N. Shneider, Two-color scattering for the measurement of neutrals at the edge of fusion devices, *Rev. Sci. Instrum.* 92, 063515 (2021)