

На правах рукописи



КОСТИНСКИЙ Александр Юльевич

**ПЛАЗМЕННЫЕ СТРУКТУРЫ И ОБЪЕМНЫЕ СЕТИ КАНАЛОВ,
КАК СОСТАВЛЯЮЩИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО-МЕХАНИЗМА
ИНИЦИАЦИИ МОЛНИИ В ГРОЗОВЫХ ОБЛАКАХ**

25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в Московском институте электроники и математики им. А.Н. Тихонова федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Научно-исследовательского университета Высшая школа экономики (МИЭМ НИУ ВШЭ)

Официальные оппоненты: Голубев Сергей Владимирович, доктор физико-математических наук (Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук, г. Нижний Новгород)
Зецер Юлий Израилович, доктор физико-математических наук (Федеральное государственное учреждение науки Институт динамики геосфер им. М.А.Садовского, г. Москва)
Шнейдер Михаил Наумович, доктор физико-математических наук (Принстонский университет, США);

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова

Защита состоится «21» февраля 2022 г. в «15.00» часов на заседании диссертационного совета Д 002.069.01 в ИПФ РАН по адресу: 603950 г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ИПФ РАН.

Автореферат разослан

«20» января 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук



А. И. Малеханов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В физике молнии нет более актуальной и запутанной проблемы, чем проблема механизма инициации молнии в грозовых облаках.

Известный исследователь молнии Мартин Юман, который последовательно в течение почти полувека публиковал (один и вместе с соавторами) наиболее цитируемые обзорные монографии по физике молнии [Uman, 1969, 1987, 2001], [Юман, 1972], [Rakov and Uman, 2003], [Dwyer & Uman, 2014], выделил «десять основных вопросов в исследовании молнии» [Dwyer & Uman, 2014, p.156]. Самым первым по важности пунктом были вопросы, касающиеся механизма инициирования молнии в грозовых облаках: «{1} Каким физическим механизмом или механизмами инициируется молния в грозовом облаке? Какова максимальная величина электрического поля внутри облака и в каком объеме облака? Какие процессы с высокой энергией (убегающие электроны, рентгеновские лучи, гамма-лучи) участвуют в возникновении молнии и как? Какова роль различных форм льда и воды в возникновении молнии?» Обращает на себя внимание, что [Dwyer & Uman, 2014, p.156] предположили, что механизм может состоять из нескольких физических явлений, в котором участвуют процессы усиления электрического поля, а также убегающие электроны, рентгеновские и гамма-фотоны. Отметим, что возможная ключевая роль широких атмосферных ливней космических лучей (ШАЛ) в инициации молнии, которая в эти годы активно обсуждается (например, [Gurevich et al., 1999], [Gurevich and Karashtin, 2013]), не включена в этот пункт из-за, по-видимому, отрицания Джозефом Двайером (Dwyer) этой роли. Главы диссертации 7 и 8 посвящены попытке ответить на эти вопросы и снова возвращают, благодаря предложенному новому механизму, ШАЛ ключевую роль в инициации молнии. Остальные главы диссертации служат необходимыми элементами (звеньями) общего механизма, описанного в главах 7 и 8.

Вторым по важности вопросом [Dwyer & Uman, 2014, p.156] считают вопросы физики распространения лидеров молнии: «{2} Какие физические механизмы управляют распространением различных типов лидеров молний (отрицательных ступенчатых, первых положительных, отрицательных стреловидных, отрицательных стреловидно-ступенчатых, отрицательных стреловидно-хаотических) распространяющихся между облаком и землей и

внутриоблачными лидерами»? Вопросам ступенчатого распространения положительного и отрицательного лидеров длинной искры, которые моделирует развитие лидеров молнии, посвящена глава 6.

Четвертым вопросом был отдельно выделена проблема физической природы компактных внутриоблачных разрядов — КВР (CID/NBE): «{4} Какова физика компактных внутриоблачных разрядов (CID) (которые производят узкий биполярный широкополосный импульс электрического поля, узкое биполярное событие (narrow bipolar event — NBE), сильно излучающий в HF и VHF-диапазоне? Как CID связаны с другими типами начальных импульсов пробоя (IBPs)? Связаны ли CID с земными гамма-вспышками (TGF), наблюдаемыми на спутниках, или с «переходными световыми явлениями» (TLE, то есть, разрядами в мезосфере — спрайтами, эльфами, джетами и гигантскими джетами – А.К.), зафиксированными над границами грозовых облаков, особенно с так называемыми «гигантскими джетами»?

[Rison et al., 2016] первыми предположили, что CID/NBE или их слабая по энергии модификация являются причиной инициации «всех или почти всех» молний. То есть, первый и четвертый пункт «программы исследований Юмана-Двайера» оказались тесно связанными. В качестве физического механизма CID/NBE они предположили механизм быстрого положительного пробоя – FPB, который, по их мнению, представляет собой гигантскую стримерную вспышку, которая движется со скоростью 10^7 - 10^8 м/с [Attanasio et al., 2019]. На наш взгляд, идея внутренней связанности CID/NBE (в большинстве случаев слабого аналогичного события) и момента инициации молнии справедлива, но газоразрядные стримеры при давлениях 0.1-1 атм не могут двигаться со скоростями 10^7 - 10^8 м/с в подпробойных электрических полях [Les Renardières Group, 1972, 1974, 1977, 1981]. Вопрос тесной связи инициации молнии и КВР (CID) является центральной частью предложенного нами механизма инициации молнии (главы диссертации 7 и 8).

Насколько актуальна и сложна проблема инициации молнии в облаках, можно видеть, рассмотрев также мнения ведущих российских исследователей. В книге «Физика молнии и молниезащиты» [Базелян и Райзер, 2001, стр.156] есть раздел, который так и называется — «Зарождение в облаках», где высказан следующий взгляд на состояние проблемы на тот момент: «Хотя процесс распространения нисходящего отрицательного ступенчатого лидера больше всего знаком наблюдателям молнии, обстоятельства и механизмы его зарождения в буквальном смысле слова покрыты туманом. Никто не наблюдал старта молнии и не следил за развитием процесса в облаках. Процесс зарождения не воспроизводится в полной мере в лаборатории, хотя в экспериментах получают отрицательный ступенчатый лидер. Но условия его зарождения от высоковольтного металлического электрода, присоединённого к

конденсаторной батарее импульсного генератора, имеют мало общего с тем, что происходит в облаках. Облако — не обкладка конденсатора и вообще не проводник. Отрицательный облачный заряд рассеян в диэлектрической воздушной среде на малых по размерам гидрометеорах. Трудно вообразить, как может этот рассеянный в громадном объеме заряд, сидящий на малоподвижных частицах, собраться и за миллисекунды направиться в плазменный канал». Фактически молнией по умолчанию считается мощный ступенчатый отрицательный лидер, выходящий из грозового облака, как изображено на ставшей классической схеме-развертке из книги Мартина Юмана [Юман, 1972, стр.17], Рисунок В.1

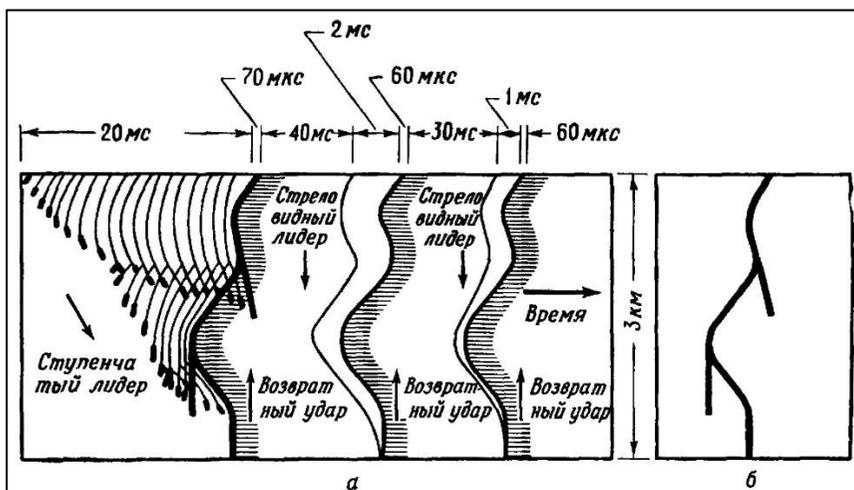


Рисунок В.1 (адаптировано из [Юман, 1972]). (а) Схема временной развертки трех ударов молнии, которые «записаны» камерой с неподвижным объективом и движущейся пленкой (подобно работе фотоэлектронных регистраторов или электронных стрик-камер). Время течет слева направо. Шкала времени для ясности изображения нелинейно. Ступени отрицательного лидера (слева) изображены жирными отрезками на кончиках тонких каналов лидера. Штриховка после обратных ударов подчеркивает, что ток через горячий плазменный канал течет и после прохождения обратного удара; (б) схема, подобная изображению обычным фотоаппаратом (с неподвижной пленкой или матрицей, без развертки изображения).

[Базелян и Райзер, 2001, стр.156] также обращают внимание на перспективы изучения искусственно заряженного аэрозольного облака, которое использовалось в исследованиях, получивших отражение в данной диссертации:

«Нельзя сказать, что в земной практике нет никаких намеков на что-либо сходное с зарождением искры в облаках. То, что в среде с дисперсно размещенным зарядом иногда возникают искровые разряды, известно благодаря расследованиям причин взрывов и пожаров в производственных помещениях с большими объемами электростатически заряженных пылевых частиц или капель. В последнее время появились отчеты об исследованиях при помощи пароструйных генераторов, выбрасывающих в атмосферу миниатюрные электрически заряженные облака [Antsupov et al., 1991], [Верещагин и др., 1989]. Иногда у границы заряженного аэрозоля возникали вытянутые светящиеся образования с размерами порядка 10 см; реже они превращались в искровые каналы (длиной до 1 м). К сожалению, в экспериментах не удавалось измерить поле в месте старта искрового разряда и дальше констатации факта возбуждения искр дело не дошло. Поэтому о механизмах возбуждения молнии в облаках и искр в лабораторных аэрозольных смесях пока приходится только гадать».

Таким образом процесс инициации молнии в грозовых облаках, как и процесс инициации компактных внутриоблачных разрядов являются одними из самых актуальных проблем физики молнии и грозы и приближение к пониманию этих процессов важно как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения не только в узком, но и широком смысле, учитывая, что молния и КВР (CID) являются разрядными событиями в аэрозольных (многофазных) средах, подобными, например, разрядам в облаках вулканического пепла [McNutt and Thomas, 2015] или в атмосферах других планет [Brown et al., 2018] и др.

Цели работы

1. Изучить возможные формы плазменных образований внутри искусственных, заряженных облаков водного аэрозоля, а также возможные механизмы их инициации.
2. Предложить качественный механизм инициации молнии в грозовых облаках от инициирующего молнию события (IE) через начальную стадию изменения электрического поля (IES), до первых начальных импульсов пробоя (IBPs), которые переходят в ступенчатый отрицательный лидер (в отсутствие в облаке или рядом с ним протяженных проводящих объектов).
3. Предложить механизм инициации компактных внутриоблачных разрядов (КВР/CID/NBE).
4. Предложить последовательную цепочку переходов плазмы из одного состояния в другое на протяжении всего процесса инициации молнии

(от первых газоразрядных лавин, до сквозной фазы взаимодействия плазменных двунаправленных лидеров и/или сетей во время протекания IBPs-стадии развития молнии).

Задачи работы

1. Обнаружить ключевые недостающие звенья в цепи преобразований (переходов) плазмы из одного состояния в другое на начальной стадии процесса инициации горячих проводящих плазменных каналов внутри искусственных положительно и отрицательно заряженных аэрозольных облаков.
2. Выяснить механизм инициации горячих высокопроводящих плазменных каналов внутри искусственных положительно и отрицательно заряженных аэрозольных облаков.
3. Исследовать механизм квази-сквозной фазы и фазы квазиобратного удара при взаимодействии (контакте) плазменных каналов внутри искусственных положительно и отрицательно заряженных водных аэрозольных облаков.
4. Исследовать структуру двунаправленных лидеров, инициированных внутри искусственных положительно и отрицательно заряженных водных аэрозольных облаков.
5. Исследовать инициацию плазменных образований при движении протяженного проводника около и внутри облака положительно и отрицательно заряженного водного аэрозоля.
6. Исследовать процесс образования ступеней положительного и отрицательного лидера длинной искры применительно к моделированию ступенчатого развития молнии.
7. Построить на основе результатов, полученных в пунктах 1-6, качественный механизм инициации молнии в грозовых облаках от инициирующего молнию события (IE) до первых начальных импульсов пробоя (IBPs), которые переходят в ступенчатый отрицательный лидер (в отсутствие в облаке или рядом с ним протяженных проводящих объектов).
8. Построить механизм инициации компактных внутриоблачных разрядов (KBP/CID/NBE).

Научная новизна работы

1. Внутри положительно и отрицательно заряженных искусственных водных аэрозольных облаков нами обнаружен новый класс электрических разрядов, которые мы с соавторами назвали «необычные плазменные образования» (unusual plasma formations — UPFs). UPFs представляют из себя сети плазменных каналов, размеров 10-30 см, некоторые из которых нагреты настолько, насколько нагрет восходящий положительный лидер.
2. Найден по крайней мере один механизм инициации UPFs на границе отрицательно заряженного аэрозольного облака. UPFs инициируется внутри восходящей положительной стримерной вспышки до появления других плазменных образований в электрическом поле аэрозольного облака.
3. Впервые представлены два кадра сквозной фазы контакта лидеров, показывающие значительное разветвление лидеров внутри общей стримерной зоны.
4. Впервые показано, 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.
5. Впервые, с помощью ИК-камеры исследована положительная часть (положительный лидер) двунаправленного лидера, находящийся внутри отрицательно заряженного облака водного аэрозоля.
6. Впервые исследован процесс инициации плазменных образований (стримерных вспышек и лидеров) при движении протяженного проводника около и внутри искусственного облака положительно и отрицательно заряженного водного аэрозоля.
7. Впервые во время образования ступеней положительного лидера длинной искры перед ним в зоне стримерной короны обнаружено плазменное образование, сходное со спейс-стемом или спейс-лидером, которые наблюдаются в стримерной зоне отрицательного лидера. Впервые показана морфологическое сходство ступеней положительного и отрицательного лидеров длинной искры.
8. Впервые предложен последовательный качественный механизм инициации молнии в грозовых облаках от инициирующего молнию события (IE) через начальную стадию увеличения электрического поля

- (IEC), до первых начальных импульсов пробоя (IBPs), которые переходят в ступенчатый отрицательный лидер.
9. Впервые предложен механизм инициации компактных внутриоблачных разрядов (КВР/CID/NBE), который дает непротиворечивое объяснение спектру излучения КВР, характерному для стримерных вспышек, и скорости распространения источников радиоизлучения внутри грозового облака близкой к скорости света. В предложенном механизме ключевую роль играют широкие атмосферные ливни космических лучей (ШАЛ), но механизм их воздействия на инициацию КВР принципиально отличается от предложенных ранее механизмов.
 10. Впервые предложена последовательная цепочка переходов плазмы из одного состояния в другое на протяжении всего процесса инициации молнии (от первых газоразрядных лавин, до сквозной фазы взаимодействия плазменных двунаправленных лидеров и/или сетей во время протекания IBPs-стадии развития молнии).

Теоретическая и практическая значимость работы

Был обнаружен и исследован внутри заряженных искусственных облаков водного аэрозоля новый класс горячих плазменных образований, которые представляют из себя сети взаимодействующих плазменных каналов и двунаправленных лидеров, часто пронизывающих значительную часть аэрозольного облака. Эти результаты открывают новую страницу не только в области физики грозных облаков, но и в области других заряженных аэрозольных и многофазных сред, таких как выбросы заряженной вулканической тефры, торнадо и пылевые бури, молнии на других планетах солнечной системы.

Проблема физического механизма инициации молнии в облаках не менее ста лет является вызовом физикам и геофизикам. Поэтому построение в данной работе даже качественной теории инициации молнии от первого инициирующего события (IE) через начальную стадию увеличения электрического поля (IEC) до стадии, включающей начальные импульсы пробоя (IBPs) является важным шагом к решению этой проблемы.

Другим важным результатом данной работы является то, что была построена полуколичественная модель компактных внутриоблачных разрядов (КВР/CID/NBE), дающая непротиворечивую интерпретацию их наблюдаемых физических свойств. Данная модель опирается на ключевую роль широких атмосферных ливней космических лучей в инициации молнии и КВР. Было показано, что только ШАЛ, благодаря инициации вторичными электронами и позитронами в небольших объемах грозового облака со сверхпробойными

полями множества «обычных» стримерных вспышек, могут обеспечить такие, казалось бы, взаимоисключающие свойства КВР, как излучение свойственное стримерным вспышкам и скорость распространения, свойственную волне потенциала, идущей со скоростью близкой к скорости света по высокопроводящему плазменному каналу, при обратных ударах и стреловидных лидерах.

Практическая значимость работы определяется тем, что продвижение в понимании механизмов инициации молнии и КВР, которые являются мощными электрическими явлениями и генераторами потоков релятивистских частиц, позволит лучше предсказывать опасные явления, вызывающие гибель людей и животных, нарушающие работу линий электропередачи и связи и несущие опасность летательным аппаратам.

Выявленная в работе связь между инициацией молний, КВР и IBPs, и наиболее турбулентными областями облака позволит предложить методики обнаружения наиболее сильных турбулентностей в грозовых облаках, с помощью детектирования электромагнитных сигналов, характерных для IBPs и КВР. Схема предполагаемого эксперимента по обнаружению областей грозового облака, где происходит инициация молний, КВР и происходят IBPs, предположительно наиболее сильно турбулентными областями со встречными многофазными заряженными потоками, изображена на Рисунке В.45. Система антенн (3), работающих по триангуляционному принципу определения абсолютных координат внутриоблачных разрядов с помощью измерения задержек радиосигналов от разных антенн (the time-of-arrival technique — TOA (LMA)), в режиме реального времени с задержкой не хуже 1-3 мс передает координаты управляющей системе активной многолучевой фазированной антенной решетке (АФАР) (4). Лучи АФАР зондируют область грозового облака с поперечником 1-5 км, где благодаря TOA-системе были обнаружены IBPs или КВР и, так как IBPs и, возможно КВР на поздней стадии развития, являются горячими плазменными каналами с концентрацией

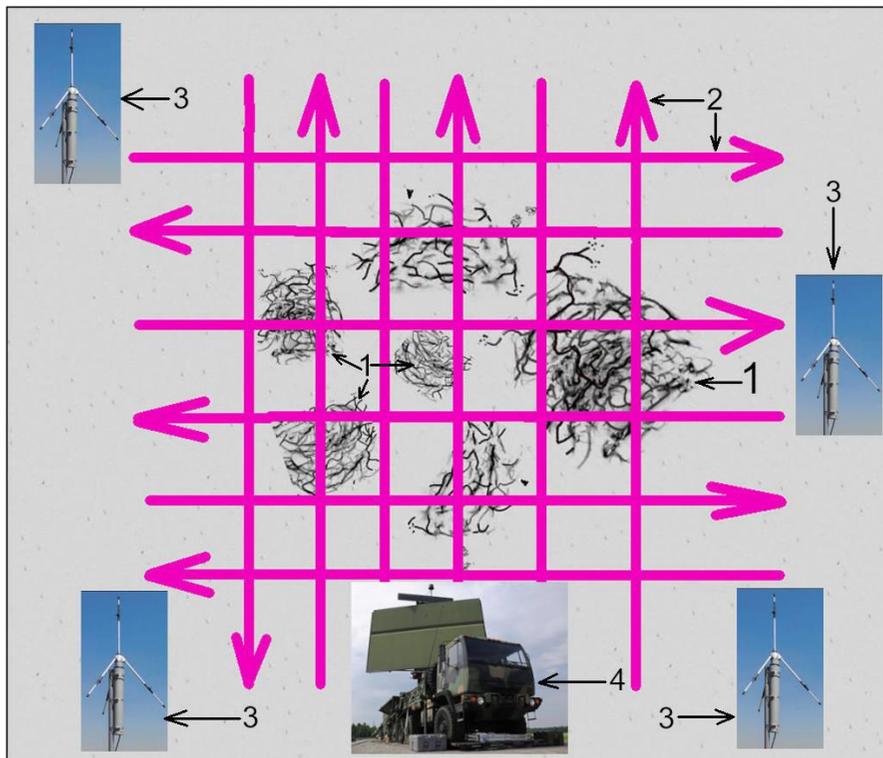


Рисунок В.2. Схема предполагаемого эксперимента по обнаружению областей грозового облака, где происходит инициация молний и КВР (предположительно наиболее сильно турбулентных областей со встречными многофазными заряженными потоками). 1 — области грозового облака, где возможно образуются сети плазменных каналов, которые приводят к IBPs или КВР; 2 — схема лучей активной фазированной антенной решетки (АФАР), которые зондируют область грозового облака, где благодаря TOA (LMA)-системе обнаружены IBPs или КВР; 3 — антенны TOA (LMA)-системы картирования молнии; 4 — АФАР (active electronically scanned array (AESA)), которая получает координаты разрядов от TOA (LMA)-системы и фиксирует отражение от сетей плазменных каналов в области грозового облака размером около 1-5 км, которые создают IBPs или КВР.

электронов не менее, чем $10^{16}-10^{17} \text{ см}^{-3}$, то существует высокая вероятность, что АФАР обнаружит отражающие объекты, которые в поперечнике составляют десятки и сотни метров. Кроме того, можно будет определить каковы отражающие свойства тех областей грозового облака, где иницируются

молнии и КВР. Фиксирование IBPs на первом этапе представляется гораздо более перспективным, так как подавляющее большинство зафиксированных молний имеет IBPs-стадию (не менее 90% [Mäkelä et al., 2008], [Marshall et al., 2014b]), а «классические» КВР с сильными электромагнитными сигналами фиксируются всего в нескольких процентах случаев и то не на всех широтах. Стадия IBPs отличается настолько сильными изменениями электрического поля, что в средних широтах в 25% молний пиковые значения IBPs превосходили пиковые значения обратных ударов молнии [Mäkelä et al., 2008]. VHF-излучение IBPs также велико и может использоваться для определения их координат, но, конечно, VHF-излучение классических КВР гораздо сильнее.

Методология и методы исследования

Для достижения целей, определенных для данного исследования и решения задач, поставленных в рамках данной работы, используются как существующие уникальные экспериментальные стенды (ГИН-6 МВ, искусственное, заряженное облако водного аэрозоля¹) и разработанные методики (осциллографическое измерение токов, электрических полей, потоков оптического излучения), так и впервые применяемые методики для исследования неизвестных типов разрядов внутри аэрозольных облаков, а также длинной искры, создаваемой электрическими полями генераторов импульсных напряжений и заряженных искусственных аэрозольных облаков (ИК-камеры среднего ИК-диапазона, камеры с усилением изображения, скоростные камеры, микроволновая диагностика разрядов²). Наиболее важные результаты, такие, как обнаружение внутри аэрозольных облаков нового класса плазменных объектов — «необычных плазменных образований» (UPFs) или разрядов, инициированных протяженными проводящими объектами в электрическом поле аэрозольного облака, фиксировалось не менее двумя независимыми методиками измерений. Поэтому основные полученные экспериментальные результаты

¹ Работу уникальных установок в этих экспериментах, а также измерения токов, электрических полей обеспечивала группа ультравысоких напряжений Высоковольтного исследовательского центра РФЯЦ – ВНИИ Технической физики имени ак. Е.И. Забабахина под руководством В.С. Сысоева. В работе принимали активное участие М. Г. Андреев, М. У. Булатов, Д. И. Сухаревский, а также Л. М. Макальский.

² Микроволновая методика зондирования плазменных объектов разработана, имплементирована и реализована Н. А. Богатовым, который также внес большой вклад во все стадии исследований, написания статей и обсуждения ключевых физических проблем.

обладают высокой степенью достоверности и являются обоснованными, что подтверждено публикациями в ведущих мировых и российских научных журналах по данной тематике исследований (Geophysical Research Letters, Journal of Geophysical Research, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Radiophysics and Quantum Electronics (Известия вузов. Радиофизика)), а также докладами на ведущих мировых конференциях и выступлениями в ведущих научных учреждениях (см. раздел «Апробация результатов работы»).

Методология построения качественного механизма инициации молнии и КВР строилась, как на последовательном учете имеющихся современных экспериментальных данных по физике молнии, КВР и физике широких атмосферных ливней космических лучей, так и на аналитических и численных оценках, использующих результаты исследований по физике плазмы высокого давления и физике длинной искры.

Степень достоверности результатов работы

Научные положения и выводы диссертации А.Ю. Костинского аргументированы и обоснованы. Достоверность результатов по обнаружению и исследованию необычных плазменных образований (UPFs) и длинных искр подтверждена использованием корректных и апробированных независимых методик измерений, а также мнением рецензентов и коллег, верифицировавших результаты этих измерений. Экспериментально верифицирован предложенный в диссертации механизм, например, в следующих публикациях: достоверность предложенного качественного механизма инициации молнии и КВР соответствует работам [Rison et al., 2016], [Lyu, Cummer et al., 2019] и верифицирована в [Shao et al., 2020], [Liu et al., 2021]; стадия начального изменения электрического поля (IEC) верифицирована в [Rison et al., 2016], [Marshall et al., 2019], [Bandara et al., 2019], [Lyu, Cummer et al., 2019]; стадия начальных импульсов пробоя (IBPs) верифицирована в [Marshall et al., 2014a], [Rison et al., 2016], [Bandara et al., 2019].

Апробация результатов работы

1. *Kostinskiy, A., Marshall, T., and Stolzenburg, M.* (2020): The mechanism of the origin the NBE (CID) and the initiating event (IE) of lightning due to the volume phase wave of EAS-RREA synchronous ignition of streamer flashes // EGU General Assembly 2020, 4–8 May 2020, EGU2020-11487, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-11487>.

2. *Vlasov, A., Fridman, M., and Kostinskiy, A.* (2020): Method for the numerical calculation of the mechanism of the origin the NBE (CID) due to the volume phase wave of synchronous ignition of streamer flashes by EAS-RREA // EGU General Assembly 2020, 4–8 May 2020, EGU2020-22461, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-22461>, 2020.
3. *Kostinskiy, A. Y., Marshall, T.C., Stolzenburg, M.* (2019). The Mechanism of the Origin and Development of Lightning from Initiating Event to Initial Breakdown Pulses // AE13B-3209, AGU Fall Meeting, 9 December 2019. <https://agu.confex.com/agu/fm19/meetingapp.cgi/Paper/551802>
4. *Kostinskiy, A. Y., Marshall, T.C., Stolzenburg, M.* (2019). The Mechanism of the Origin and Development of Lightning from Initiating Event to Initial Breakdown Pulses // IUGG19-3423, 27th IUGG General Assembly, Montreal, Canada, https://www.czech-in.org/cmPortalV15/CM_W3_Searchable/iugg19/#!abstractdetails/0000757460
5. *Kostinskiy A. Yu., V. S. Syssoev, N. A. Bogatov, E. A. Mareev, M. G. Andreev, M. U. Bulatov, D. I. Sukharevsky, and V. A. Rakov.* (2019) Some Results of Spark Discharge Studies Conducted at the High-Voltage Research Center (Istra, Russia) in 2013-2018 // 12th International Conference on Plasma Science and Applications (ICPSA 2019), Lucknow, India, November 11-14, 2019.
6. *Rakov, V.A., E. A. Mareev, M. D. Tran, N.A. Bogatov, A.Yu. Kostinskiy, V. S. Syssoev* (2018). Recent progress in studying lightning initiation, propagation, and attachment // International Conference on Atmospheric Electricity (ICAE 2018), Nara, Japan. P-06-01.
7. *Bogatov N. A., A.Yu. Kostinskiy, V.S. Syssoev, M. G. Andreev, M.U. Bulatov, D. I. Sukharevsky, E.A. Mareev, V. A. Rakov* (2018). Experimental investigation of the streamer zone of positive leader // International Conference on Atmospheric Electricity (ICAE 2018), Nara, Japan. O-06-06.
8. *Kostinskiy A. Yu.* (2017). Generation of gamma radiation by a lightning discharge and a long spark. // TEPA2017, October 2-6, Byurakan, Armenia.
9. *Kostinskiy A. Yu., M. G. Andreev, N.A. Bogatov, E. A. Mareev, D.I. Sukharevsky, V. S. Syssoev, V.A. Rakov.* (2017) Detailed Observations of Discharges within the Artificial Charged Aerosol Cloud // Complex Systems of Charged Particles and their Interactions with Electromagnetic Radiation 2017, Москва, Россия, 5-7 апреля 2017
10. *Kostinskiy A., Mareev E., Bogatov N., Syssoev V., Andreev M., Sukharevsky D., Bulatov M., Rakov V.* (2016) A new class of electric discharges in clouds of negatively charged water droplets // 33rd International

- Conference on Lightning Protection (ICLP) - Estoril, Portugal, 25-30 September, 2016. IEEE.
11. *Kostinskiy A., Mareev E., Bogatov N., Syssoev V., Sukharevsky D., Bulatov M., Rakov V.* (2016) Electric discharges produced by artificially charged clouds: Influence of rapidly moving conductive object // 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP) - Estoril, Portugal, 25-30 September, 2016. IEEE.
 12. *Bogatov N., Kostinskiy A., Sukharevsky D., Andreev M., Bogatov N., Mareev E. A., Rakov V.* (2015). A study of spark discharge at the final jump stage by microwave diagnostics // Abstr. of Int. Conf. on Plasma Science and Application (ICPSA), Isfahan, Sept.8-10, 2015, p.109 (paper PL38).
 13. *Kostinskiy A., Aleshchenko A., Andreev M. G., Bogatov N., Kuznetsov V., Makal'sky L. M., Mareev E. A., Rakov V., Sukharevsky D., Syssoev V. S.* (2014) Discharges Produced by Negatively Charged Aerosol Clouds in the Presence of a Moving Conducting Object // XV International Conference on Atmospheric Electricity, 15-20 June 2014, Norman, Oklahoma, U.S.A. Norman: NWC.
 14. *Davydenko S., Iudin D., Klimashov V., Kostinskiy A., Syssoev V. S.* (2014). Electrical Structure Of The Unipolar Charged Aerosol Cloud // XV International Conference on Atmospheric Electricity, 15-20 June 2014, Norman, Oklahoma, U.S.A. Norman: NWC.
 15. *Andreev M. G., Makal'sky L. M., Kostinskiy A., Mareev E. A., Sukharevsky D., Syssoev V. S.* (2014). First Detailed Observations of Discharges within the Artificial Charged Aerosol Cloud // XV International Conference on Atmospheric Electricity, 15-20 June 2014, Norman, Oklahoma, U.S.A. Norman: NWC.
 16. *Kostinskiy A., Bogatov N., Syssoev V. S., Sukharevsky D., Bulatov M., Andreev M. G., Mareev E. A., Rakov V.* (2014) Microwave Diagnostics for Investigation of Long Spark and Artificial Charged Aerosol Cloud // XV International Conference on Atmospheric Electricity, 15-20 June 2014, Norman, Oklahoma, U.S.A. Norman: NWC.
 17. *Andreev M. G., Bulatov M., Kostinskiy A., Makal'sky L. M., Sukharevsky D., Syssoev V. S.* (2014). Return Stroke Initiated by the Contact between a Downward Negative Leader from the Aerosol Cloud and Upward Positive Leader from the Grounded Plane // XV International Conference on Atmospheric Electricity, 15-20 June 2014, Norman, Oklahoma, U.S.A. Norman: NWC.
 18. *Сысоев В., Костинский А. Ю., Макальский Л., Андреев М., Булатов М., Сухаревский Д., Наумова М.* (2012). Исследование параметров встречного лидера и его влияния на молниезащищенность объектов

на основе лабораторного физического крупномасштабного моделирования // Сборник трудов VII Всероссийской конференции по атмосферному электричеству, Санкт-Петербург, 24-28 сент. 2012 г. В 2-х т. Т. 1. СПб.: Издательство ГГО, 2012. С. 242-244.

19. *Богатов Н., Костинский А. Ю., Мареев Е., Сысоев В.* (2012). СВЧ-диагностика стримерной зоны и чехла длинного искрового разряда // Сборник трудов VII Всероссийской конференции по атмосферному электричеству, Санкт-Петербург, 24-28 сент. 2012 г. В 2-х т. Т. 1. СПб.: Издательство ГГО, 2012.
20. *Andreev M., Bulatov M., Kostinskiy A., Kuhno A., Makalsky L., Mareev E., Syssoev V.* (2011) An upward connecting leader at tests of large-scale lightning-rod models // 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning. Chengdu: Chengdu university, 2011.

Также результаты работы регулярно докладывались на семинарах в Институте прикладной физики РАН, Институте общей физики РАН, НИИ Ядерной физики МГУ, ГО «Борок» Института физики Земли РАН, Ереванском физическом институте, Московском институте электроники и математики и др.

Личный вклад автора

Всего по теме диссертации опубликовано 11 статей в ведущих рецензируемых российских и зарубежных научных журналах, из них в 7 автор диссертации является первым автором (в одной — единственным), что показывает его определяющий вклад в эти работы.

В исследованиях, которые представлены в главах 1-5, и 7, автор был основным постановщиком научных задач, отвечал за ключевые оптические измерения с помощью ИК-камер, камер с усилением изображения, скоростных камер, обрабатывал подавляющее большинство экспериментальных данных и обеспечивал их оформление, писал базовые варианты научных статей на основе этих данных, представлял на конференциях и семинарах полученные результаты (см. раздел Апробация результатов работы). Е.А. Мареев и В.А. Раков, Н.А. Богатов активно участвовали в постановке и планировании экспериментов, расширении тематики исследований, верификации полученных данных и написании окончательных английских вариантов статей. Н.А. Богатов планировал, готовил и проводил все эксперименты по микроволновым методикам измерений и многие эксперименты по фотометрированию разрядов с помощью фотоэлектронных умножителей. Работу экспериментальных установок в этих экспериментах, а также измерения токов, электрических полей обеспечивала группа ультравысоких напряжений ВНИЦ Всероссийского

энергетического института, г. Истра (ныне Высоковольтный исследовательский центр РФЯЦ – ВНИИ Технической физики имени академика Е.И. Забахина) под руководством В.С. Сысоева. В работе принимали активное участие М. Г. Андреев, М. У. Булатов, Д. И. Сухаревский, а также Л. М. Макальский. Все они активно участвовали в обсуждении экспериментов и высказали много полезных замечаний и предложений.

В исследованиях, которые представлены в главах 7-8, автор был инициатором построения единого механизма инициации молнии и компактных внутриоблачных разрядов. Автору принадлежит идея рассмотреть КВР, как фазовую волну инициации «обычных» газоразрядных стримерных вспышек, движущуюся со скоростью, близкой к скорости света (благодаря вторичным электронам ШАЛ, экспоненциально усиленным в электрическом поле грозового облака) и определить свойства КВР через свойства множества стримерных вспышек, распределенных по объему. Также автору принадлежит идея и реализация построения последовательной цепочки плазменных превращений с использованием плазменных образований, обнаруженных в экспериментах, описанных в главах 1-5, и 6. Данная цепочка плазменных превращений через короткое время фазы начальных изменений электрического поля (ИЕС) заканчивалась мощными начальными импульсами пробоя (IBPs), которые также удавалось объяснить трехмерным образованием сетей плазменных каналов, связанных с трехмерной фазой инициации молнии в процессе КВР или слабого КВР. Томасу Маршаллу (Thomas Marshall) и Марибет Стольценбург (Maribeth Stolzenburg) принадлежит четкая постановка задачи построения модели КВР (CID/NBE), которая требовала, чтобы новая модель NBE исключала начальное присутствие горячих высокопроводящих плазменных каналов до момента инициации NBE, то есть NBE не может быть результатом взаимодействия двунаправленных лидеров или плазменных сетей. Также Т. Маршалл и М. Стольценбург сформулировали все основные ограничения, которые существуют для построения модели NBE (слабое свечение в видимом диапазоне, скорость движения, близкая к скорости света и др.) и верифицировали и согласовали предложенный механизм со всем большим и противоречивым комплексом современных экспериментальных данных по внутриоблачным процессам от IE до IBPs. Они также писали и редактировали окончательный английский вариант статьи.

Автор также предложил математическую модель и методику численного расчета механизма инициации КВР с помощью ШАЛ, вторичные электроны которого экспоненциально усиливаются благодаря механизму убегающих электронов (глава 8). Численную вариант этой математической модели реализовали и оформили графики решений А. Власов и М. Фридман.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 8 глав, заключения, словаря терминов и списка цитированной литературы. Список цитируемой литературы содержит 296 наименований, список работ по теме диссертации включает 11 статей. Общий объем диссертации составляет 526 страниц и включает 207 рисунков.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Внутри положительно и отрицательно заряженных искусственных водных аэрозольных облаков существует новый класс электрических разрядов «необычные плазменные образования» (unusual plasma formations — UPFs), которые представляют из себя сети плазменных каналов, размеров 10-30 см, некоторые из которых нагреты настолько, насколько нагрет восходящий положительный лидер.
2. Установлен по крайней мере один механизм возникновения UPFs. UPFs инициируется внутри восходящей положительной стримерной вспышки до появления других плазменных образований в электрическом поле аэрозольного облака.
3. Во время сквозной фазы контакта восходящего и нисходящего лидеров длиной искры, возможно ветвление лидеров внутри общей стримерной зоны.
4. Яркость инфракрасного излучения в области контакта восходящего и нисходящих лидеров длиной искры примерно в 5 раз выше, чем для участков образовавшегося единого канала ниже или выше этой области.
5. При движении протяженного проводника (болта арбалета с проводом и без провода) в окрестностях и внутри искусственного облака положительно и отрицательно заряженного водного аэрозоля возникают стримерные вспышки, инициируются длинные искры (лидеры) и UPFs, и возникают квазиобратные удары в заземленные объекты.
6. Во время образования ступеней (длиной 30-120 см) положительного лидера длиной искры (в электрическом поле высоковольтного генератора импульсных напряжений) перед головкой лидера в зоне стримерной короны может существовать плазменное образование, сходное по морфологии со спейс-стемом или спейс-лидером, которые наблюдаются в стримерной зоне отрицательного лидера. Стримерные

- зоны, возникающие во время образования ступеней положительного и отрицательного лидеров длинной искры морфологическое сходны.
7. Инициацию молнии в грозовых облаках можно описать, как последовательный качественный механизм от инициирующего молнию события (IE) через начальную стадию увеличения электрического поля (IEC), до первых начальных импульсов пробоя (IBPs), которые переходят в ступенчатый отрицательный лидер.
 8. Иницирующим молнию событием (IE) могут быть «классические» компактные внутриоблачные разряды (КВР/CID/NBE) или, в гораздо большем числе случаев, — «слабые» КВР (weak NBE), аналогичные по физическому механизму классическим КВР, но меньшие по масштабу. Механизм инициации компактных внутриоблачных разрядов (КВР/CID/NBE), который дает непротиворечивое объяснение спектру оптического излучения КВР, характерному для стримерных вспышек, и скорости распространения источников радиоизлучения внутри грозового облака близкой к скорости света, можно представить, как инициацию вторичными электронами и позитронами ШАЛ в наиболее турбулентных областях грозового облака в небольших объемах со сверхпробойными полями множества стримерных вспышек, внутри которых возникнут цепочки UPFs, взаимодействующие друг с другом посредством вторичных стримерных корон.
 9. Инициацию молнии можно представить, как последовательную цепь переходов плазмы из одного состояния в другое (от первых газоразрядных лавин до стримеров, UPFs, положительных, отрицательных, двунаправленных лидеров, сетей плазменных каналов, которые ведут к сквозным фазам взаимодействия плазменных двунаправленных лидеров и/или сетей во время протекания IBPs-стадии развития молнии).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сделан подробный обзор проблемы инициации молнии и компактных внутриоблачных разрядов, а также инициирующего молнию события (IE), начального изменения электрического поля (IEC) и начальных импульсов пробоя (IBPs). Во введении сформулированы цели и решаемые задачи диссертации, изложены основные положения, выносимые на защиту, и пояснена их научная и практическая значимость, приведена структура диссертационной работы, методология и

методы исследований, степень достоверности и апробация результатов диссертации.

Первая глава посвящена открытию нового класса электрических разрядов в облаках искусственно заряженных капель водного аэрозоля и последствиям их открытия для инициирования молнии в грозовых облаках.

В этой главе приведены эксперименты, где впервые наблюдались «необычные плазменные образования» (UPFs) внутри облаков искусственно заряженного водного аэрозоля с помощью высокоскоростной инфракрасной камеры, работающей в сочетании с высокоскоростной камерой видимого диапазона и измерениями тока и свечения разрядов в оптическом диапазоне [Kostinskiy et al., 2015a]. Параметры инфракрасного излучения каналов плазмы UPFs были близки к параметрам положительных лидеров длинных искр, наблюдаемых в тех же экспериментах, в то время как морфология каналов UPFs отличалась от параметров любых до этого момента известных лидеров, поэтому UPFs можно рассматривать как новый, необычный тип внутриоблачного и облачного разряда. Эти образования, вероятно, оказываются проявлением коллективных процессов создания сложной иерархической сети взаимодействующих каналов на разных стадиях развития (некоторые из них горячие и обнаруживаются в течение миллисекунд). Мы полагаем, что это явление также может происходить в грозовых облаках и может являться одним из звеньев в процессе инициирования молнии внутри грозовых облаков. Удалось обнаружить UPFs в экспериментах, описанных в этом разделе, так как в экспериментах использовалось (а) отрицательное облако искусственно заряженных капель водного аэрозоля со средним радиусом 0,5 мкм и (б) инфракрасную (ИК) камеру, с матрицей, чувствительной в диапазоне длин волн 2,7–5,5 мкм (длины волн на порядок большие, чем размер капель), что позволило впервые «увидеть», что происходит внутри аэрозольного облака. Облако (размером несколько десятков кубических метров) при отрицательном заряде капель способно инициировать лидеры длинной искры, стартующие с близлежащих заземленной плоскости и металлических объектов на ней ([Верещагин и др., 1988]; [Анцулов и др., 1990]) и, следовательно, может рассматриваться как модель некоторых естественных заряженных аэрозольных систем. Уникальная комбинация параметров аэрозольного облака (относительно небольшой размер капель) и относительно больших длин волн, которые может фиксировать ИК-камера, позволило нам наблюдать новый класс плазменных образований в облаке как при наличии, так и в отсутствие лидерных каналов между облаком и заземленной сферой.

В разделе 1.1. описана экспериментальная установка. Эксперименты проводились на установках Высоковольтного исследовательского центра РФЯЦ

– ВНИИ Технической физики имени ак. Е.И. Забабахина (<http://www.ckrf.ru/usu/73578/>). Экспериментальная установка, применяемая в экспериментах данного раздела показана на Рисунке 1.1. Заряженное облако (1) создавалось парогенератором (2.1) и источником высокого напряжения (2.2), который подавал напряжение на острие иглы, создающее корону. Острые иглы располагались в сопле (2.3), через которое проходила паровоздушная струя. Струя имела температуру около 100–120°C и давление 0,2–0,6 МПа. Она двигалась со скоростью около 400–420 м/с углом расширения 28°, образуя благодаря турбулентной струе, заряженное облако, показанное на Рисунке 1.2. Сопло располагалось в центре плоского заземленного металлического экрана (3) диаметром 2 м. В результате быстрого охлаждения пар конденсировался в капли воды со средним радиусом около 0,5 мкм [Верещагин и др., 1989]. Ионы, заряжающие водный аэрозоль, образовывались в коронном разряде между острием и соплом (2.3). На острие подавалось постоянное напряжение 10–20 кВ. Ток, связанный с зарядом, переносимым струей, находился в диапазоне от 60 до 150 мкА. Когда общий заряд, накопленный в облаке, приблизился к 50–60 мкКл или около того, между облаком и находящимися поблизости заземленными объектами спонтанно возникли положительные восходящие лидеры, которые приводили в некоторых случаях к искровым разрядам (под которыми в данном случае мы понимаем взаимодействие восходящих положительных лидеров с нисходящими

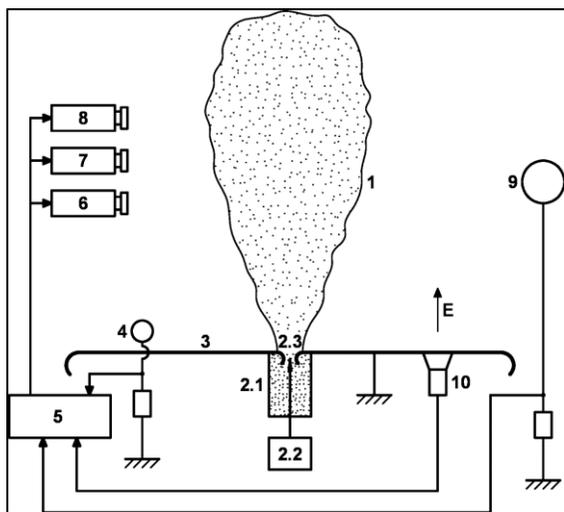


Рисунок 1.1 (адаптировано из [Kostinskiy et al., 2015a]). Экспериментальная установка: 1 — отрицательное искусственно заряженное облако аэрозоля; 2.1 — парогенератор; 2.2 — источник высокого напряжения с коронирующим острием; 2.3 — сопло; 3 — заземленная металлическая плоскость; 4 — 5-сантиметровый заземленный шар с токоизмерительным шунтом; 6 — скоростная 4Picos камера видимого диапазона с усилением изображения; 7 — высокоскоростная инфракрасная камера; 8 — фотоаппарат; 9 — сфера 50 см для отслеживания изменений заряда облака; 10 — измеритель электрического поля (флюксометр).



Рисунок 1.2 (адаптировано из [Kostinskiy et al., 2015a]). Снимок, сделанный фотоаппаратом Canon (видимый диапазон; экспозиция — 5 с), отрицательно заряженного облака (наклонная струя, темное образование) и четырех восходящих положительных лидеров длиной около 1,5 м, инициированных заземленной сферой. Внутри облака на фотографии не видны внутриоблачные светящихся образований.

отрицательными лидерами, которые были частью двунаправленного лидера, см. глава 3). В случае отрицательно заряженного облака большая часть положительных восходящих лидеров возникла на заземленной металлической сфере (4), как показано на Рисунке 1.2. Сфера имела диаметр 5 см и находилась на расстоянии 0,8 м от центра экрана. Самая верхняя точка сферы (4) находилась на 12 см выше экрана. Важно отметить, что описанное здесь искусственно заряженное облако лишь приблизительно имитирует реальное грозовое облако, которое имеет другие размеры, температуру, содержит кристаллы льда и другие гидрометеоры с широким диапазоном размеров, форм, фазовых состояний и т.д. Токи в лидерах и искрах, возникающих на сфере (4), измерялись омическим шунтом сопротивлением 1 Ом, сигнал с которого передавался на оцифровывающий осциллограф Tektronix (5) с полосой пропускания 1 ГГц. Когда ток превышал заданное значение, запускался осциллограф, который, в свою очередь, генерировал импульс, который использовался для запуска высокоскоростной камеры 4Picos с усилением изображения, работающей в видимом диапазоне (6) и высокоскоростной инфракрасная камера FLIR 7700M (7). ИК-камера FLIR 7700M работала со скоростью 115 кадров в секунду (длительность кадра 8,7 мс, время экспозиции 6,7 мс) с разрешением 640×512 пикселей. Скоростная камера, работающая в видимом диапазоне (4Picos), выдавала 2 кадра по 1360×1024 пикселей каждый. Общая картина разряда регистрировалась фотоаппаратом Canon (8). Все камеры были установлены на расстоянии около 3 м от оси струи, образующей облако. Изображение, представленное на Рисунке 1.2, было получено с помощью камеры Canon (выдержка 5 с). Для отслеживания динамики зарядки (и разрядки) облака использовалась медная сфера (9) диаметром 50 см, заземленная через сопротивление 100 МОм и расположенная в 6 м от облака. Сигналы с сопротивления 100 МОм, свидетельствующие об изменении электрического потенциала, наведенного на сфере диаметром 50 см облачным зарядом, регистрировались осциллографом (5). Электрическое поле на поверхности заземленной плоскости измерялось флюксометром (10).

В разделе 1.2. приведены результаты экспериментов.

В разделе 1.2.1. приведена двухкадровая запись камерой с усилением изображения и инфракрасная запись восходящих положительных лидеров и необычных плазменных образований (UPFs) внутри облака.

На Рисунках 1.3a и 1.3b показаны два последовательных кадра, снятых ИК-камерой в верхней части облака (нижняя граница кадра находилась примерно на 70 см выше заземленной плоскости). Все процессы разрядов, наблюдаемые на этих кадрах, происходили внутри облака и, следовательно, не отображались на камерах и фотоаппаратах в видимом диапазоне (наблюдались только вспышки рассеянного света). Каждый кадр имел экспозицию 6,7 мс и мертвое

время 2 мс, так что два изображения могли быть разделены во времени на 2–15,4 мс. Отсюда следует, что большинство разрядных процессов, зарегистрированных на двух кадрах, были видны в ИК-диапазоне не менее 2 мс. Процессы, наблюдаемые на ИК-изображениях, включают: (1) верхнюю часть в облаке восходящего положительного лидера от заземленной сферы, нижняя часть которой, развивающаяся в чистом воздухе, находилась вне поля зрения ИК-камеры, (2) большая стримерная зона, пересекающая каждый кадр от нижнего правого до верхнего левого угла (предположительно, положительная стримерная корона от первых стримерных вспышек и от восходящего положительного лидерного канала, включая его ветви, которые находятся вне поля зрения камеры), и (3) необычные плазменные образования (UPFs), которым посвящена данная глава. По результатам измерения тока, который шел через заряженную сферу и шунт, стримерная вспышка, в результате которой образовался лидер имела максимум тока около 10 А, восходящий положительный лидер имел пик тока около 5 А и во время распространения лидера ток лидера опускался до примерно 0.2 А. Все разрядные события длились около 35 мкс и с облаком провзаимодействовал общий положительный заряд первой стримерной вспышки и стримерной короны лидера размером около 15 мкКл заряда (Рисунок 1.4).

На Рисунке 1.3 хорошо видно, что структура и форма UPFs (3) принципиально отличаются от восходящего положительного лидера (1) и стримерных вспышек (2). Наиболее яркие части UPFs намного (на порядок) ярче стримеров. Кроме того, на Рисунке 1.3а хорошо видно, что интенсивность ИК-излучения от UPFs (3), близка по интенсивности от горячего

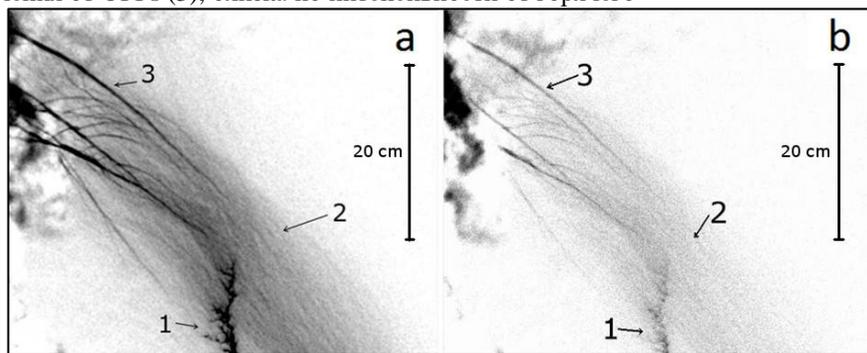


Рисунок 1.3 (адаптировано из [Kostinskiy et al., 2015a]). Два последовательных инфракрасных изображения (инвертированы), полученных с выдержкой 6,7 мс и разделенных интервалом 2 мс, которые показывают различные разрядные процессы внутри облака. Во время этого события в видимом диапазоне наблюдались только вспышки

рассеянного света, а не отдельные каналы. 1 — верхняя часть восходящего положительного лидера (его нижняя часть, фиксируемая в видимом диапазоне, находится вне поля зрения ИК-камеры), 2 — стримерная зона первых стримерных вспышек, 3 — необычные плазменные образования (UPFs).

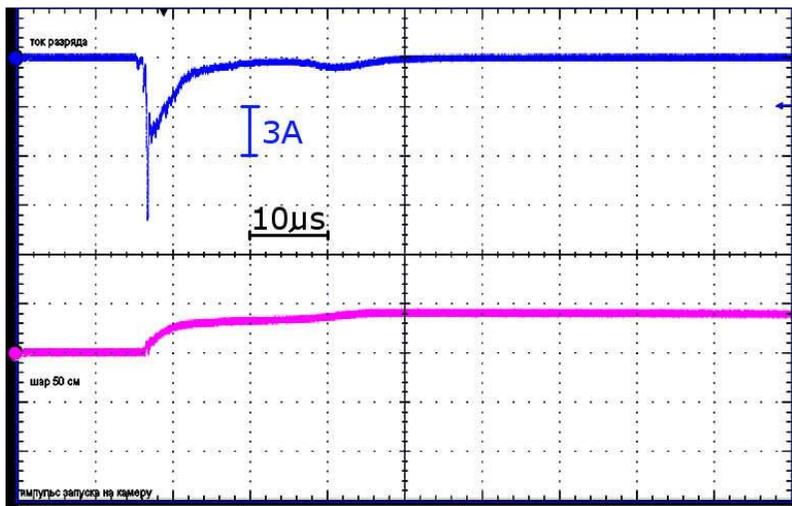


Рисунок. 1.4 (адаптировано из [Kostinskiy et al., 2015a]). Осциллограмма события, зафиксированного на Рисунке 1.3. Верхний луч – ток восходящего положительного лидера, идущий через шунт (одно вертикальное большое деление соответствует току — 3 А), горизонтальное большое деление соответствует интервалу времени — 10 мкс). Нижний луч показывает динамику заряда облака (прибор не калиброван и служит для качественного понимания процессов ухода заряда с облака).

восходящего положительного канала лидера (Рисунок 1.5a2), но его морфология (сложная сеть разных по интенсивности каналов, пронизывающих относительно большую область облаков) не похожа на морфологию положительного лидера (основной канал с боковыми ветвлениями, указывающими направление распространения лидера, со стримерными зонами, начинающимися на головках лидерных каналов). На Рисунке 1.5b2, который фиксирует интенсивность ИК-излучения каналов через несколько мс после разряда, видно, что UPFs излучают даже немного сильнее, чем распадающийся канал восходящего лидера.

ИК-изображения UPF, показанные на Рисунках 1.3a и 1.3b, типичны в присутствии восходящего положительного лидера от заземленной сферы, входящего в отрицательно заряженное облако. На сегодняшний день зарегистрировано более 100 таких событий.

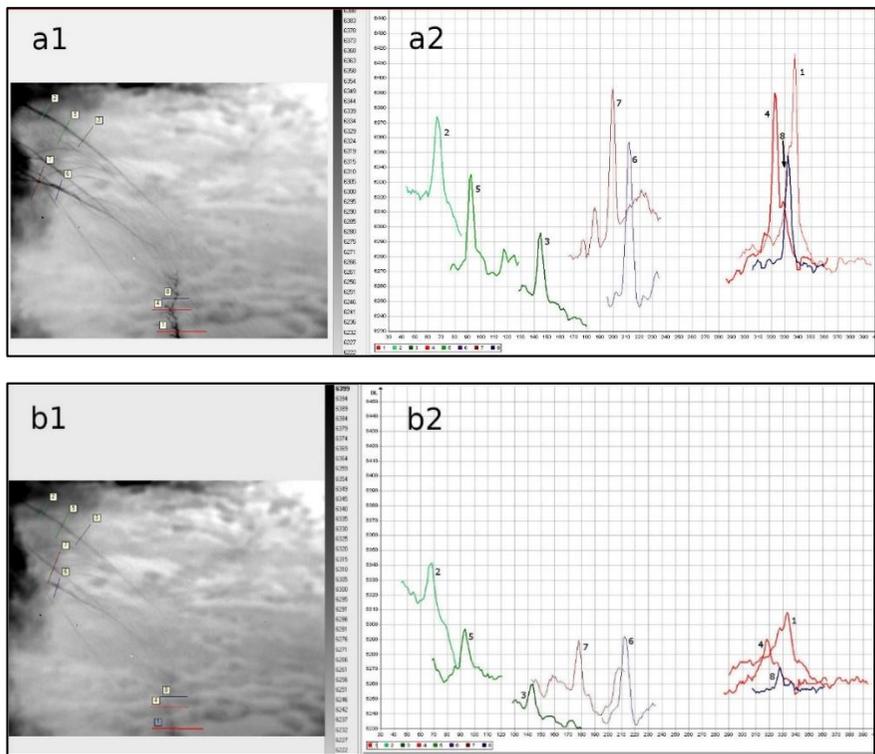


Рисунок 1.5 (адаптировано из [Kostinskiy et al., 2015a]). Два последовательных инфракрасных изображения (a1 — то же изображение, что и на Рисунке 1.3а, а b1 — то же изображение, что и на Рисунке 1.3б), полученных с выдержкой 6,7 мс и разделенных интервалом 2 мс, которые показывают различные разрядные процессы внутри облака. Анализ интенсивности ИК-излучения вдоль линий на изображениях b1 и b2 позволяет сравнить нагрев UPFs и восходящего положительного лидера. Вертикальная шкала на b2 является линейной и цифры приведены в относительных единицах, а горизонтальная шкала соответствует номеру пикселя.

В разделе 1.2.2 показаны изображения UPFs, расположенные внутри облака заряженного аэрозоля ниже верхней части канала восходящего положительного лидера.

В разделе 1.2.3 приводятся результаты ИК-зондирования облака и его окрестностей в поисках местоположения инициации UPFs. В разделе показано, что большинство UPFs возникают на видимой границе аэрозольного облака или недалеко от этой границы внутри аэрозольного облака, но также

были обнаружены UPFs, которые возникали недалеко от заземленной плоскости.

В разделе 1.2.4 приводятся результаты наблюдений UPFs одновременно, как в ИК, так и в видимом диапазонах. Эти эксперименты явились важным свидетельством того, что изображения в ИК-диапазоне соответствуют изображениям в видимом диапазоне эти впервые открытые изображения не являются артефактами измерительных приборов, а фиксируют реальные физические явления.

В разделе 1.2.5 показаны ИК-изображения событий, где несколько UPFs, взаимодействующих между собой и с положительными лидерами в рамках одного события. Хорошей иллюстрацией таких явлений является событие, зафиксированное на Рисунке 1.6. Мы видим события, где показаны два UPFs (указаны стрелками), которые взаимодействуют, благодаря положительным стримерам между собой и со стримерной короной восходящего положительного лидера. Они образуют цепочку взаимосвязанных плазменных образований. UPFs также находятся примерно на одной линии, идущей от заземленной плоскости. Расстояние между UPFs на Рисунке 1.17 около 33 см друг от друга, а расстояние от нижнего UPFs до заземленной плоскости около 50 см. Эти эксперименты важны для понимания того, как могут плазменные образования достаточно долго сохранять проводимость благодаря текущему между ними току.

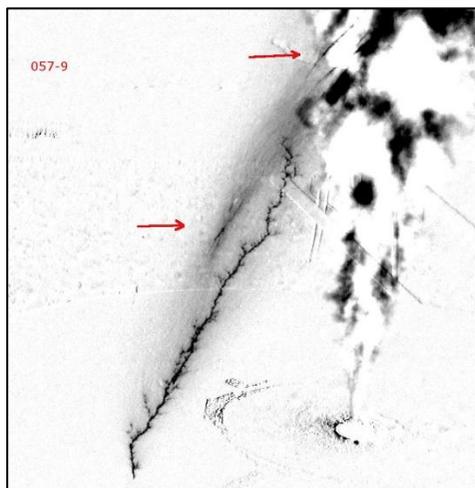


Рисунок 1.6 (адаптировано из [Andreev et al., 2014]). Два UPFs (указаны стрелками), которые взаимодействуют, благодаря положительным стримерам со стримерной короной восходящего положительного лидера и друг с другом, образуя цепочку

взаимосвязанных плазменных образований различной природы. При этом общая стримерная корона между UPFs является более яркой, чем между нижним UPFs и нижней частью положительного лидера. Расстояние между UPFs около 33 см друг от друга, а расстояние от нижнего UPFs до заземленной плоскости около 50 см. Изображение инвертировано.

В разделе 1.3 обсуждаются результаты, полученные в главе 1.

В разделе 1.4 обсуждаются результаты, полученные в более ранних работах, в которых, возможно, также фиксировались UPFs.

В разделе 1.5 представлены выводы главы. Материалы главы опубликованы в работах [Andreev et al., 2014], [Kostinskiy et al., 2015a].

Вторая глава посвящена инициации необычных плазменных образований (UPFs) внутри положительной стримерной вспышки, поддерживаемой электрическим полем отрицательно заряженного облака водного аэрозоля. Задачей данной главы было установление процессов, которые приводят к возникновению UPFs. Для исследования причин возникновения UPFs экспериментальная установка, аналогичная описанной в [Kostinskiy et al., 2015a], была дополнена микроволновой диагностикой, что, вместе с другими приборами, позволило получить экспериментальные данные, которые указывают на возможный механизм возникновения UPFs, как горячих плазменных каналов, образованных внутри длинной положительной стримерной вспышки.

В разделе 2.1 описана экспериментальная установка аналогичная описанной в главе 1, дополненная микроволновой диагностикой и модифицированной схемой измерений.

В разделе 2.2 описаны полученные экспериментальные результаты. Было зафиксировано, что UPFs возникают внутри объема первой положительной стримерной вспышки, стартующей с заземленного электрода, с начальным током в диапазоне 1-1.5 А. UPFs появляются заведомо до того, как стримерная корона или канал восходящего с заземленного электрода положительного лидера смогут повлиять на эти процессы, происходящие в непосредственной близости от края или внутри аэрозольного облака. Сравнение интенсивностей ИК-излучения канала «обычного» положительного восходящего лидера, восходящего с заземленного электрода, и ИК-излучения UPFs позволяет предположить, что, по крайней мере, некоторые UPFs являются такими же горячими плазменными каналами, как и восходящий положительный лидер. Время возникновения UPFs оказалось не более, чем 1-1.5 мкс. В данных экспериментах расстояние, которая проходила стримерная вспышка от электрода до оси облака, составляло 1-1.5 м. Первые 30-40 см стримерная вспышка была расходящейся под углом 5-7°, а затем ее диаметр оставался приблизительно

постоянным в диапазоне 5-10 см. Средняя скорость движения фронта стримерной вспышки была в диапазоне $5\text{-}7\cdot 10^5$ м/с. К моменту вхождения стримерной вспышки в облако, при длине вспышки 1-1.5 м, ее заряд был в диапазоне 0.2-0.3 мкКл. На большей части своей длины, начиная от заземленного электрода, стримерная вспышка была квази-однородна, то есть не имела внутри видимых неоднородностей с масштабом, меньшим поперечного размера вспышки. Вблизи границы облака внутри стримерной вспышки могли появляться нагретые плазменные каналы (UPFs), которые размещались и внутри облака.

В разделе 2.3 полученные экспериментальные результаты сравниваются с результатами, полученные в более ранних работах, в которых, возможно, также фиксировались физические проявления UPFs [Анцупов и др., 1990]. В разделе показано, что новые результаты хорошо согласуются с полученными ранее и позволяют непротиворечиво объяснить результаты ранних экспериментов, которые не имели однозначных интерпретаций.

В разделе 2.4 обсуждаются полученные в главе 2 результаты.

В разделе 2.5 приведены выводы главы 2. Материалы главы опубликованы в [Kostinskiy et al., 2021].

Третья глава посвящена подробным исследованиям взаимодействия между положительными и отрицательными лидерами в электрических разрядах метрового масштаба, генерируемых электрическими полями облака отрицательно заряженного водного аэрозоля, и обсуждаются их возможные последствия для процесса контакта молнии с наземными объектами [Kostinskiy et al., 2016]. В экспериментах использовались оптические изображения, полученные с помощью трех различных высокоскоростных камер (видимого диапазона, сдвинутого в УФ, с усилением изображения; скоростная камера видимого диапазона с CMOS-матрицей; и камера среднего инфракрасного диапазона), и соответствующие этим взаимодействиям записям тока. Впервые представлены два снимка сквозной фазы лидеров, показывающие значительное разветвление лидера внутри общей стримерной зоны. Параметры фронта и длительности тока подобны параметрам тока главной стадии длинной искры. Скорости положительных и отрицательных лидеров внутри общей стримерной зоны для двух событий оказались схожими. Более высокие скорости лидера обычно связаны с более высокими токами лидера. Контакт происходил между отрицательным лидером (двунаправленного лидера), нисходящим из отрицательно заряженного облака водного аэрозоля и положительным лидером, который поднимается с заземлённой плоскости (заземленной сферы). Противоположная положительная сторона двунаправленного лидера (по отношению к каналу нисходящего отрицательного лидера) представляет собой

восходящий ветвящийся положительный лидер, развивающийся внутри отрицательного облака. Внутри отрицательного облака обнаружено множество плазменных каналов. Получены дополнительные данные о характеристиках контакта лидеров (сквозной и главной фазы), благодаря использованию скоростных видео и инфракрасных камер. В случае соединения лидеров «головка к головке» яркость инфракрасного излучения в области сквозной фазы (вероятно, пропорциональная температуре газа и, следовательно, подводу энергии) обычно была примерно в 5 раз выше, чем для участков канала ниже или выше этой области. В 16% случаев нисходящий отрицательный лидер (двунаправленного лидера) соединялся с восходящим положительным лидером ниже его головки (контактировал с боковой поверхностью положительного лидера), при этом контакт осуществлялся через сегмент канала, который казался перпендикулярным одному или обоим каналам лидеров.

В разделе 3.1 представлено подробное введение в проблему взаимодействия (сквозной фазы) плазменных каналов.

В разделе 3.2 описана экспериментальная установка аналогичная описанной в главах 1,2, дополненная оптической скоростной камерой видимого диапазона с CMOS матрицей и модифицированной для данной научной задачи схемой измерений.

В разделе 3.3. представлены экспериментальные результаты.

В разделе 3.3.1 представлена сквозная фаза взаимодействия лидеров, зафиксированная камерой с усилением изображения. На Рисунке 3.1 показаны два кадра камеры 4Picos, на которых показаны два снимка сквозной фазы отрицательного разряда на землю, создаваемого облаком искусственно заряженного водного аэрозоля. На сегодняшний день это единственный двухкадровый снимок сквозной фазы соединения противоположно заряженных лидеров длиной искры или молнии. Время экспозиции для кадра (I) составляло 100 нс, для кадра (II) — 50 нс. Временной интервал между кадрами составлял 2 мкс. Обозначены нисходящий отрицательный лидер (1), восходящий положительный лидер (2) и общая стримерная зона (3). Длина общей стримерной зоны (расстояние между концами лидеров) составляет около 20 см в кадре (I) и около 4,5 см в кадре (II). Обращает на себя внимание, что только восходящий положительный лидер на Рисунке 3.1(I) является разветвленным, в то время как на Рисунке 3.1 (II) как восходящие положительные, так и нисходящие отрицательные лидеры демонстрируют явное ветвление. Удивительно, но фактически, внутри общей стримерной зоны можно выделить две стримерные зоны сквозной фазы на кадре (II) (одна общая стримерная зона, видимая на кадре (I), преобразовалась в две стримерные зоны на кадре (II)) и вполне вероятно, что могут образоваться две точки соединения каналов, ведущие к петле или разделению канала на два в процессе обратного удара (хотя для

данного события нет изображения единого канала после обратного удара), особенность, которая иногда наблюдается как в лабораторных искрах, так и в молнии.

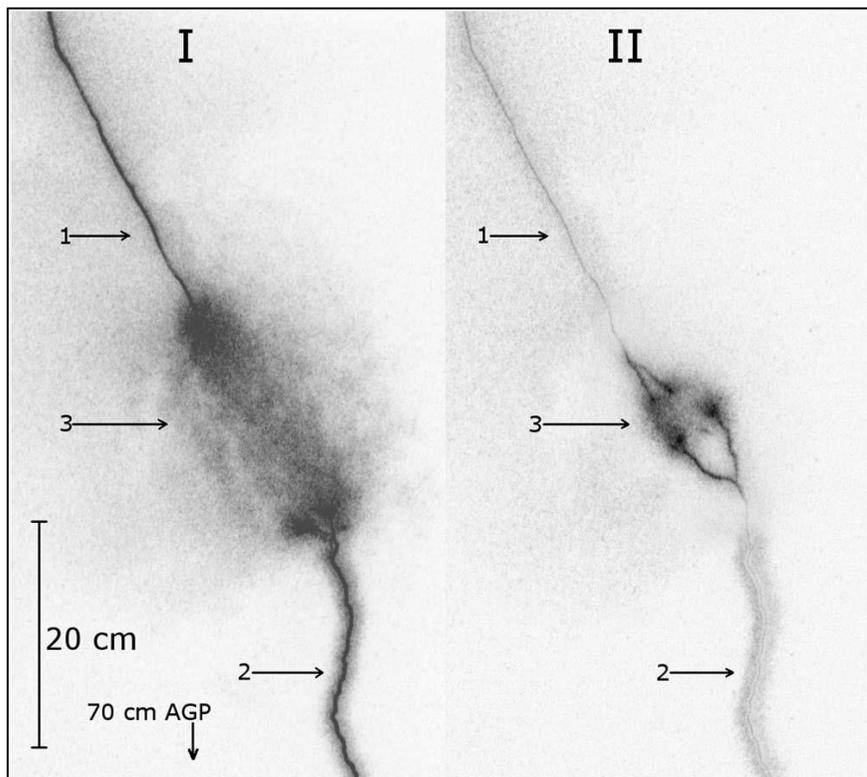


Рисунок 3.1 (адаптировано из [Kostinskiy et al., 2016]). На двух кадрах камеры 4Picos показана сквозная фаза отрицательного разряда на землю, создаваемого облаком искусственно заряженных капель воды. Время экспозиции для кадра (I) составляет 100 нс, для кадра (II) — 50 нс. Временной интервал между кадрами составляет 2 мкс. Обозначены нисходящий отрицательный лидер — 1, восходящий положительный лидер — 2 и общая стримерная зона — 3. AGP (“above the grounded plane”) означает «над заземленной плоскостью».

В разделе 3.3.2 исследуется яркость области контакта каналов относительно верхней и нижней частей объединенного канала (соединение головка-головка). Было экспериментально показано, что ИК-яркость области контакта (вероятно, пропорциональная энерговкладу в газ; см. [Kostinskiy et. al., 2015a])

в 4-5 раз выше, чем яркость, соответствующая положительному или отрицательному лидеру выше и ниже области контакта.

В разделе 3.3.3 изучается возможное место контакта нисходящего отрицательного лидера с боковой поверхностью восходящего положительного лидера. В разделе было показано, что имеют место не только взаимодействия кончик-кончик (головка-головка) лидеров, но и взаимодействие, когда лидеры образуют контакт с углами близкими к 90 градусов к направлению движения одного из лидеров. Этот феномен происходит, когда лидеры движутся в разных плоскостях в трехмерном пространстве и перпендикуляр к одному из каналов является наиболее коротким расстоянием между лидерами.

В разделе 3.3.4 анализируется возможная причина возникновения внутриоблачного двунаправленного лидера и в ранних результатах измерений [Анцупов и др., 1990] находятся подтверждения результатам главы 2, где причиной появления горячих плазменных образований, которые вероятно развиваются в двунаправленные лидеры, является первичная стримерная вспышка, поднимающаяся с заземленной плоскости.

В разделе 3.3.5 с помощью ИК-измерений впервые исследуется и анализируется верхняя, положительная, часть двунаправленного внутриоблачного лидера. Например, на Рисунке 3.2.1 и 3.2.2 (увеличенный фрагмент) мы видим центральную (1) и верхнюю (2) часть внутриоблачного канала во время разряда, который закончился квазиобратным ударом (нижняя часть этого канала — нисходящий отрицательный лидер). Верхняя часть данного канала очень похожа на сильно ветвящийся положительный лидер, стартующий с заземленной плоскости, и резко отличается от центральной части (1), на которой при данной контрастности изображения не фиксируются ветвления.

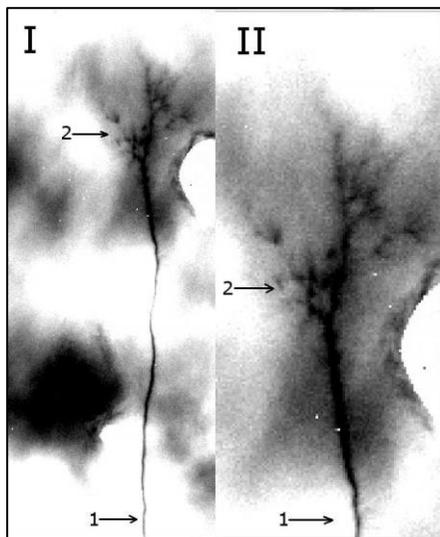


Рисунок 3.2 (событие 266-2014-09-01). Верхняя, положительная часть (положительный лидер) двунаправленного внутриоблачного разряда (лидера). Центральная – (1) и верхняя (положительная) – (2) части внутриоблачного канала, который закончился обратным ударом (нижняя, не видная на изображении часть этого канала — нисходящий отрицательный лидер). Верхняя часть (2) данного канала очень похожа на сильно ветвящийся положительный лидер и резко отличается от центральной части (1), на которой при данной контрастности изображения не фиксируются ветвления. II – увеличенный фрагмент изображения – I.

В разделе 3.4 полученные результаты сравниваются с результатами, полученными в более ранних работах ([Верещагин и др., 2003] [Temnikov et al. 2007], [Temnikov 2012a], [Temnikov et al. 2012b]), где другими методиками также исследовался контакт двух лидеров, инициированных в электрическом поле облака искусственно заряженного аэрозоля.

В разделе 3.5 обсуждаются результаты экспериментов главы 3 и они сравниваются с имеющимися экспериментальными результатами по длинной искре и молнии.

В разделе 3.6 приводятся выводы главы 3. Материалы главы опубликованы в [Kostinskiy et al., 2016].

В главе 4 исследуются плазменные образования, включая двунаправленные лидеры, инициированные в электрическом поле положительно заряженного водного аэрозоля, обнаруженные внутри облака, благодаря ИК-камерам, фиксирующим в диапазоне 3-6 мкм. Данная глава посвящена плазменным

явлениям внутри аэрозольного облака *положительно* заряженных водяных капель. Предыдущие три главы касались отрицательно заряженного облака. Далее будут представлены, полученные в рамках исследований [Kostinskiy et al., 2015b], подробные инфракрасные (3-6 мкм) изображения плазменных образований (включая двунаправленные (bidirectional) лидеры, предсказанные для молнии Каземиром [Kasemir, 1960]), инициированных облаком положительно заряженного водного аэрозоля (средний радиус капель около 0,5 мкм). Во многих случаях зафиксированный результирующий двунаправленный лидер состоял из идущей вниз положительной части и восходящей отрицательной части, причем эти две части (обе разветвленные, хотя и по-разному) были соединены одноканальной средней частью. Нисходящая часть включала извилистый положительный лидерный канал (аналогичный его восходящему извилистому аналогу, наблюдаемому при отрицательной полярности облака), который часто сопровождался гораздо менее извилистыми, но часто столь же яркими, идущими вниз плазменными образованиями неизвестной природы. Также наблюдалась положительная стримерная зона, идущая от облака к заземленной плоскости. В этих экспериментах, как и в экспериментах с отрицательным облаком (глава 1) были впервые обнаружены в положительном облаке сильно излучающие в ИК-диапазоне плазменные образования различной морфологии, которые ранее были названы необычными плазменными образованиями (unusual plasma formations — UPFs) [Kostinskiy et al., 2015a]. Некоторые UPFs, обнаруженные в электрическом поле положительно заряженного облака не наблюдались внутри отрицательно заряженного облака. Либо положительный лидерный канал, либо UPFs могут контактировать с заземленной плоскостью. Восходящая часть связана с большой разветвленной сетью каналов, часто выходящих веером из верхней части обычно более яркого основного канала и, по-видимому, пронизывающих всю верхнюю часть облака. Некоторые из этих слабых каналов могут быть длинными и яркими отрицательными стримерами, в то время как другие могут быть похожи на UPFs. ИК-светимость вдоль самой яркой части двунаправленного лидерного канала часто неоднородна. Некоторые изменения яркости канала локализованы и предполагают участие процессов взаимодействия нескольких каналов (типа, известного взаимодействия спейс-лидеров) в нескольких местах вдоль канала.

Раздел 4.1 является введением в главу 4, где сделан подробный обзор предыдущих экспериментов с положительно заряженным аэрозольным облаком и плазменных образований, которые ранее удалось обнаружить [Верещагин и др. 1988], [Анцупов и др., 1990].

В разделе 4.2 рассматриваются инфракрасные изображения плазменных образований, включая двунаправленные лидеры, инициированных электрическим полем облака заряженного водяного аэрозоля.

В разделе 4.2.1 описана экспериментальная установка и особенности положительно заряженного аэрозольного облака.

В разделе 4.2.2 описаны полученные экспериментальные результаты.

В разделе 4.2.2.1 рассматриваются части двунаправленного лидера и плазменных образований, движущиеся вниз. На Рисунке 4.1 показана нижняя часть двунаправленного лидера, инициированного в положительно заряженном облаке (его центральная, более плотная часть видна в виде вертикально-струйной структуры на панели I). На Рисунке 4.1 (одинаковая нумерация на всех трех панелях) обозначены средняя часть двунаправленного лидера (1), восходящий отрицательный лидер (2), необычное плазменное образование, UPF, (3), нисходящий положительный лидер (4) и положительная стримерная корона (5). Все элементы двунаправленного лидера расположены внутри облака, за исключением нижней части положительной стримерной короны, которая контактирует с заземленной плоскостью. Панели II - III представляют собой увеличенные версии панели I, а панель III была получена путем вычитания из кадра I предыдущего кадра, который не содержал изображений разряда (для повышения контраста). Нисходящий положительный лидер (4) на панели III очень похож (за исключением направления движения) на его восходящий аналог на Рисунке 4.4. UPF (3) не сильно отличается от положительной стримерной короны (5), но отличие его каналов в сравнении с более однородной светимостью, создаваемой большим количеством положительных стримеров отчетливо видна.

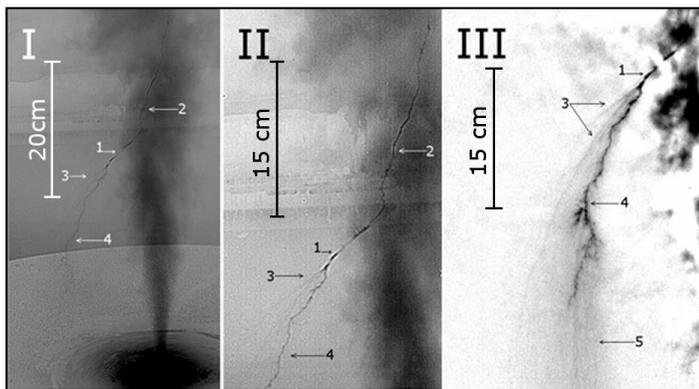


Рисунок 4.1 (адаптировано из [Kostinskiy et al., 2015b]), (событие 125-1276-1). Инфракрасные изображения (инвертированные), полученные при экспозиции 6,7 мс, показывают нижнюю часть двунаправленного лидера, инициированного в положительно заряженном облаке. Обозначены средняя часть двунаправленного лидера (1), восходящий отрицательный лидер (2), необычное плазменное образование, UPF, (3),

нисходящий положительный лидер (4) и положительная стримерная корона (5). Панели II и III представляют собой увеличенные версии панели I, а панель III была получена путем вычитания предыдущего кадра, который не содержал изображений разряда.

Отметим, что средняя часть, где, по-видимому, был инициирован двунаправленный лидер, трудно отличима от участков верхней части двунаправленного лидера. Поэтому определение средней части является довольно субъективным. Мы обозначили его приблизительное (ожидаемое) положение на ИК-изображениях, предполагая, что оно должно быть менее извилистым, чем нижняя (положительная) или верхняя (отрицательная) части. Граница между средней и нижней частями в целом была более заметной, чем между средней и верхней частями.

Изучая все приведённые в главе 4 рисунки, снятые с расстояния 6 м, можно в первом приближении реконструировать структуру двунаправленного лидера и других внутриоблачных разрядов в положительном аэрозольном облаке. Она отличается от простой структуры двунаправленного лидера [Kasemir, 1969], [Edens et al., 2012], хотя в ней и можно выделить нисходящий положительный лидер и восходящий отрицательный. Кроме них, обычно в центре, находится гораздо более нагретое, скорее всего поляризованное плазменное образование, из которого, возможно, и возникают оба лидера (мы называли его выше «центральный UPF»). Кроме того, из центрального UPF вместе с положительным лидером возникают нисходящие положительные каналы, искривлённые, возможно, по силовым линиям электрического поля, подобно положительной стримерной короне, но данные каналы на порядок более яркие в ИК-диапазоне, чем стримеры (их мы называем положительными нисходящими UPFs), причём их яркость часто не уступает или даже превышает яркость горячих положительных лидеров, что не позволяет отнести их к положительной стримерной короне.

В разделе 4.2.2.2 рассматриваются части двунаправленного лидера, и других плазменных образований, движущиеся вверх. Например, на Рисунке 4.2 показана верхняя часть двунаправленного лидера, включая нижнюю часть плазменного канала с относительно высокой (1) а другую часть с относительно низкой (2) интенсивностью ИК-излучения, соединенной с сетью плазменных каналов (3) в верхнем левом углу кадра. Все каналы расположены глубоко внутри аэрозольного облака. Похоже, что разветвленная сеть плазменных каналов пронизывает значительный объем облака и не является только продолжением начальных каналов или стримерной короны лидеров. ИК-яркость некоторых частей сети сравнима с

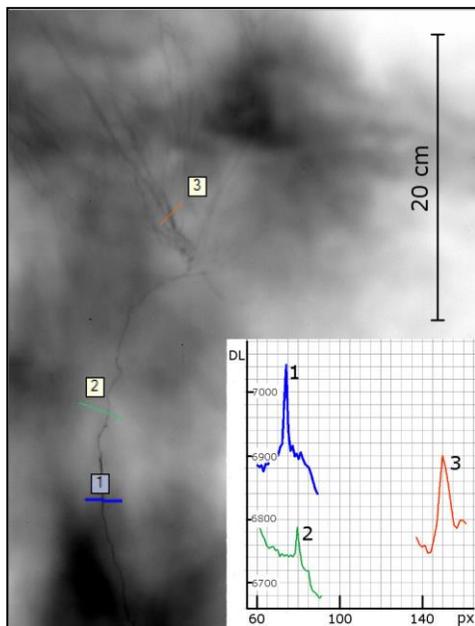


Рисунок 4.2 (адаптировано из [Kostinskiy et al., 2015b]), (событие 051-3013). Инфракрасное изображение (инвертированное), полученное с выдержкой 6,7 мс, которое показывает верхнюю часть двунаправленного лидера, инициированного полем положительно заряженного облака (событие 051-3013). В левом верхнем углу кадра можно увидеть плазменный канал (2 – восходящий отрицательный лидер) с относительно высокой (внизу) и относительно низкой (вверху) интенсивностью ИК-излучения, соединенный с сетью плазменных каналов. На вставке в правом нижнем углу показаны приблизительные профили ИК-яркости для участков канала, обозначенных 1, 2 и 3 (горизонтальная ось - номер столбца пикселей в матрице камеры, а вертикальная ось - яркость в относительных единицах).

яркостью канала восходящего отрицательного лидера, что не позволяет интерпретировать разветвленную сеть, как стримерную зону отрицательного лидера. Яркость некоторых ветвей сети (3) превышает яркость канала восходящего отрицательного лидера (2). Морфология сети (3) резко отличается от морфологии отрицательной стримерной вспышки длинной искры. Возможно, поэтому некоторые каналы в верхней части кадра не относятся к стримерной короне восходящего отрицательного лидера. Это обстоятельство и сложная морфология всей сети (включая значительные вариации яркости, свидетельствующие о неравномерном нагреве) позволяют предположить, что

наблюдаемые плазменные структуры могут иметь ту же природу, что и UPFs, описанные в главах 1-2. Последнее утверждение в первую очередь основано на том факте, что то, что мы называем UPFs, значительно отличается по морфологии от лидеров или стримеров. Действительно, в сравнении с нижней положительной частью двунаправленного лидера, UPFs гораздо менее извилисты и разветвляются по-другому в сравнении с положительными лидерами, но при этом UPFs значительно ярче, чем стримерная зона положительного лидера. В верхней части UPFs образуют сложную сеть каналов, которая скорее всего не является лидером, хотя каналы сети выглядят гораздо ярче, чем отрицательные стримеры. Мы не можем исключить возможность того, что нижние и верхние UPFs имеют разную природу, хотя их отличия друг от друга могут быть связаны с разной полярностью и разным положением относительно более плотной части облака и заземленной плоскости. Интересно, что положительный лидер имеет одинаковый внешний вид независимо от того, распространяется ли он вниз или вверх, и инициируется ли он от заземленного объекта или составляет нижнюю часть двунаправленного лидера.

В разделе 4.2.2.3 исследуется структура внутриоблачных разрядов у основания облака, вблизи заземлённой плоскости и квазиобратные удары в электрическом поле положительно заряженного облака. По-видимому, удалось установить, что результирующий плазменный канал образовался из двух или трех плазменных каналов. Например, на Рисунке 4.3 хорошо видны два структурных элемента (7) и (8) разрядного канала, у которых центральные части гораздо ярче в ИК-диапазоне, чем области выше и ниже этих сегментов. Максимум структурного элемента II(7) находится в точке I(2), а максимум структурного элемента II(8) находится в районе точек I(4, 5). Характерно, что даже при такой малой общей длине канала (около 25 см) и близости его к заземлённой плоскости, основание канала I(1) светится почти в три раза слабее, чем область выше него I(2). Над разрядом видна широкая разветвлённая сеть каналов (9), которые заметно длиннее, чем сам основной разряд. Весьма вероятно, что в данном случае на Рисунке 4.23 мы фиксируем взаимодействие двух плазменных структур, образовавшихся в объёме недалеко от заземлённой плоскости.

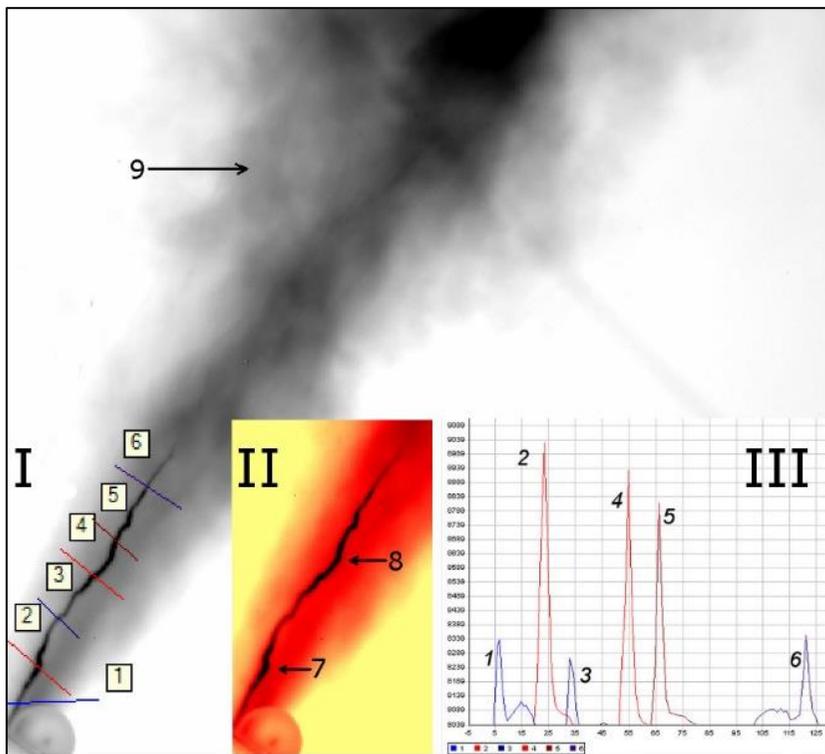


Рисунок 4.3 (событие 027-3165). Разряд вблизи заземлённой плоскости. 1÷6 – линии, вдоль которых измеряется яркость излучения в ИК-области (в относительных единицах). 7,8 – области канала с максимальной яркостью, 9 – веер каналов, идущих с верхней части основного канала. Диаметр сферы в левом нижнем углу — 5 см. Режим записи: частота кадров — 111 Гц, выдержка — 8.7 мс, число пикселей в исходном кадре — 640x512 (на данном рисунке изображена только часть кадра с разрядом).

В разделе 4.2.2.4 описано наблюдения разрядов, инициированных положительно заряженным облаком в видимом диапазоне. Эти исследования хорошо согласуются с ИК-измерениями и предыдущими экспериментами.

В разделе 4.3 обсуждаются результаты, полученные в главе 4.

В разделе 4.4 приведены выводы главы 4. Материалы главы опубликованы в [Kostinskiy et al., 2015b].

В главе 5 приводятся экспериментальные данные по моделированию в лабораторных экспериментах аналогов высотно-инициированных триггерных

молний (altitude-triggered lightning) и «классических» триггерных молний в электрическом поле отрицательно и положительно заряженного облака заряженного водного аэрозоля. В данном разделе представлены результаты [Kostinskiy et al., 2015c], где впервые продемонстрирована возможность моделирования в лабораторных условиях высотно-инициированных триггерных молний (altitude-triggered lightning) и триггерных молний с помощью инициации болтом арбалета (моделирующего летательный аппарат) разрядов, в электрическом поле облака отрицательно заряженного водного аэрозоля. Зафиксировано более сотни подобных событий. В рамках каждого события одновременно измерены: ток, текущий из облака заряженного аэрозоля через болт по плазменному каналу; динамика восходящих положительных лидеров со стримерной короной с последующим квазиобратным ударом и распадом плазмы, а также получены интегральные фотографии событий. Обнаружена высокая степень подобия разряда, инициированного болтом в электрическом поле искусственного облака заряженного аэрозоля и высотно-инициированной молнии в природных условиях. Также исследованы некоторые особенности инициирования положительных лидеров триггерных молний. В частности, получены параметры токов прекурсоров (стримерных вспышек) восходящих положительных лидеров.

Раздел 5.1 является введением в главу 5, где сделан краткий обзор экспериментальных данных, касающихся триггерных молний.

В разделе 5.2 описана экспериментальная установка, аналогичная описанной в главах 1-4 и схема экспериментов, где в направлении заряженного облака выпускается арбалетный болт с заземленным проводом и без него.

В разделе 5.3 описаны результаты экспериментов

В разделе 5.3.1 рассматриваются эксперименты с незаземленным арбалетным болтом, которые впервые реализуют разряд, который может являться аналогом высотно-инициированной триггерной молнии (ATL). На интегральных фотографиях разряда (Рисунки 5.1a и 5.1b) видны все характерные элементы высотно-инициированной триггерной молнии (altitude-triggered lightning), зафиксированной в природных условиях [Lalande et al., 1998], [Laroche et al., 1991]. Плазменный канал, между измерительной сферой (или заземленной плоскостью) перекрывает промежуток от сферы до конца болта, (или до провода, если он прикреплен к болту). Далее ток замыкается по проводящему болту. Ближе к облаку на фотографии виден плазменный канал (положительный лидер), который движется с наконечника болта в аэрозольное облако по восходящей траектории под возрастающим углом к болту $20 \div 600$. Болт в данных экспериментах (Рисунок 5.1) пролетал над сферой на расстоянии $0,5 \div 0,6$ м.

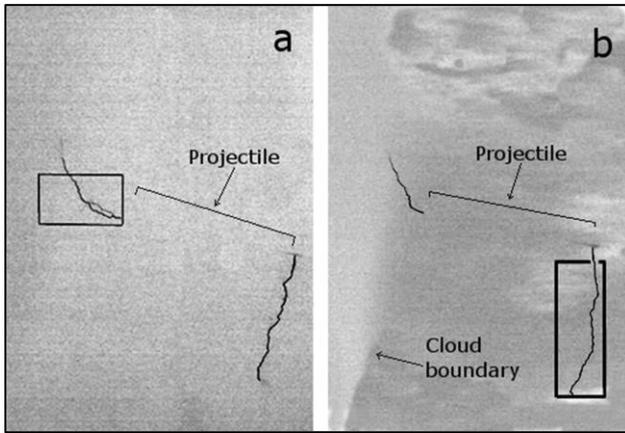


Рисунок 5.1 (адаптировано из [Kostinskiy et al., 2015c]). Примеры интегрированных фото (инвертированы) инициированных болтом разрядов. Два отдельных разряда показаны на панелях (a) и (b) в прямоугольных областях, показывающих поле зрения высокоскоростной видеокамеры FASTCAM SA4, отображающей лидеры, стартующие от наконечника болта и от заземленной сферы, соответственно. Проводящий болт (projectile) на фотографиях не виден, но его положение обозначено квадратной скобкой. Длина болта равна 0,58 м. Граница облака заряженного аэрозоля видна и отмечена на (b) стрелкой. (Данной фотографии соответствует скоростная съемка и осциллограмма на Рисунке 5.11).

Приведём наиболее вероятную последовательность событий, исходя из данных, полученных в эксперименте. Вероятно, первоначальным событием в разряде облако-болт-земля является стримерная вспышка и старт положительного лидера с наконечника болта в сторону аэрозольного облака. В пользу этого предположения говорит то, что в тех случаях, когда не удавалось инициировать длинный искровой разряд облако-болт-земля, в большинстве событий наблюдалась вспышка с наконечника болта, направленная к облаку. После первоначальной вспышки, с наконечника болта формируется положительный лидер. Движение лидера, восходящего к облаку, фиксируется скоростной видеокамерой, кадры которой синхронизованы с осциллограммой тока, который течёт в это время со сферы через шунт на осциллограф. Практически одновременно (в интервале не более 1,5 мкс после старта лидера с наконечника болта) со сферы в сторону хвоста болта стартует другой восходящий положительный лидер. Распространение это лидера фиксируется в другом эксперименте последовательностью кадров видеокамеры, синхронизованной с осциллограммой тока со сферы. При имеющемся временном разрешении скоростной

видеокамеры можно сделать заключение, что лидер с наконечника стрелы и лидер со сферы движутся большую часть времени одновременно с близкими скоростями до момента квазиобратного удара (контакта восходящего со сферы лидера с болтом). После замыкания плазменным каналом промежутка сфера-хвост болта следует квазиобратный удар, которому соответствует резкое увеличение тока за время примерно 150 нс при полуширине времени квазиобратного удара по полувысоте тока около 400-500 нс. Квазиобратному удару соответствует и резкое увеличение свечения разряда. В случае инициированного пролетающим болтом разряда облако-болт-земля во всех экспериментах наблюдался квазиобратный удар. Этим инициированный разряд отличается от самопроизвольно возникающего на плоскости положительного лидера, который приводит к обратному удару не более, чем в 5-15% разрядов (в зависимости от относительной влажности воздуха).

Раздел 5.3.2 посвящен разряду, который может являться аналогом классической («обычной») триггерной молнии. Типичная интегральная фотография триггерного разряда при отрицательной полярности облака представлена на Рисунке 5.2. На фотографии видна белая точка инициации положительного восходящего лидера на кончике болта (стрелы). Так как эксперименты проводились ночью, то болт и прикрепленный к нему провод не видны на фотографии. Восходящий, извилистый положительный лидер имеет длину около 1.5 метра, поднимаясь вверх к аэрозольному облаку.



Рисунок 5.2. На интегральной цветной фотографии видна белая точка инициации положительного восходящего лидера с кончика болта (стрелы), летящего слева-направо. Так как эксперименты проводились ночью, то болт и прикрепленный к нему провод не видны. Восходящий положительный лидер имеет длину около 1.5 метра, поднимаясь вверх к отрицательному аэрозольному облаку.

В разделе 5.3.2.1 рассматриваются прекурсоры (precursor pulses) положительного восходящего лидера, инициированного заземленным болтом в электрическом поле отрицательно заряженного аэрозольного облака. В триггерной молнии, инициированной электрическим полем грозового облака, по мере движения ракеты с заземленным проводом и увеличения разности потенциалов между ее кончиком и воздухом, начинают фиксироваться осцилляции тока величиной 20-60 А и продолжительностью 10-25 мкс. Их назвали «прекурсорами» (precursor pulses) положительных лидеров [Rakov and Uman, 2003, стр. 275]. В данных экспериментах впервые были зафиксированы подобные явления в электрических полях аэрозольного облака, причем характеристики токов, текущих через болт, оказались очень близки к параметрам прекурсоров грозовых триггерных молний.

В разделе 5.3.2.2 представлены впервые обнаруженные с помощью ИК-камеры плазменные образования (UPFs), инициированные болтом арбалета внутри отрицательно заряженного аэрозольного облака. Большой интерес представляет собой впервые зафиксированное событие (Рисунок 5.3), где можно видеть сложную и яркую иерархическую сеть плазменных каналов, весьма вероятно представляющую из себя сеть UPFs, изображение (1), инициированных заземленным болтом внутри аэрозольного облака, который пролетел по самому нижнему краю кадра (или, что более вероятно, положительным лидером, который инициирован с поверхности этого болта). Максимальный ток, который зафиксировал осциллограф, достигает большой величины, около 40 А. По форме тока осциллограмма похожа на типичную осциллограмму квазиобратного удара при контакте двух каналов. Но мы также не можем исключить, что на Рисунке 5.3 удалось зафиксировать взаимодействие заземленного болта арбалета с плотной сетью плазменных каналов (UPFs), которые за примерно 1 мкс снабжают болт арбалета большим током.

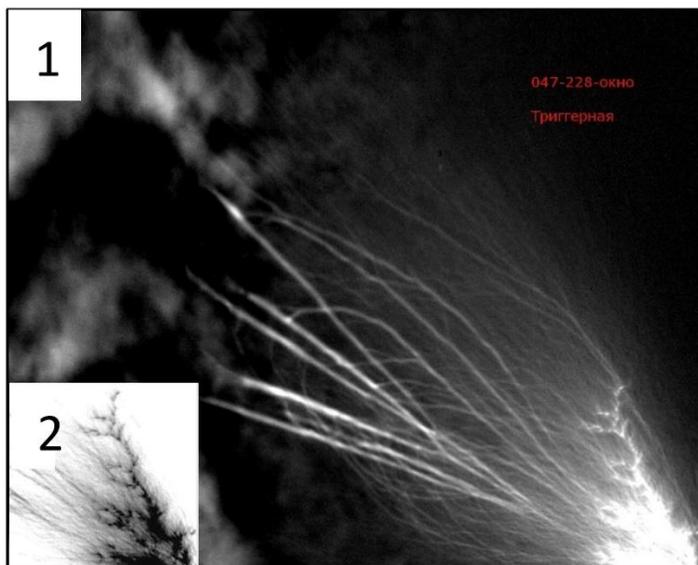


Рисунок 5.3 (событие 047-228_2013-01-18, заряд облака – минус). (1) – ИК-изображение, фиксирует большую иерархическую сеть плазменных каналов, инициированных заземленным болтом, летящим справа-налево, внутри аэрозольного облака, который пролетел по нижнему краю кадра (или, скорее всего, положительным лидером, поднимающимся с болта). Выдержка 3,4 мс, частота кадров 115 Гц, 640x512 пикселей. (2) – увеличенный, осветленный и инвертированный фрагмент правого нижнего угла изображения (1). Интересно, что некоторые яркие UPFs — почти прямые линии.

В разделе 5.3.2.3 описаны восходящие положительные лидеры, инициированные с заземленного болта, до входа болта в отрицательно заряженное аэрозольное облако.

В разделе 5.3.2.4 показаны впервые обнаруженные плазменные образования (UPFs), инициированные болтом арбалета внутри положительно заряженного аэрозольного облака. Характерным является изображение сложной плазменной сети внутри положительно заряженного облака на Рисунке 5.4. ИК-изображение фиксирует сложную и мощную иерархическую сеть плазменных образований (скорее всего UPFs), расположенных сверху и снизу от движущегося заземленного болта и инициированного болтом. Около поверхности болта все каналы имеют яркие отрезки. Болт движется справа-налево. На кончике болта также видны плазменные каналы. Хорошо видно насколько иерархична и сложна плазменная структура, которая совершенно непохожа на известные плазменные объекты, такие как стримеры, лидеры, спейс-лидеры,

спейс-стемы. Причем многие из этих каналов, как и описанные в предыдущих главах 1-4, имеют яркое свечение в ИК-диапазоне, которое позволяет предположить, что это горячие, высокопроводящие каналы, которые были ранее названы необычными плазменными образованиями (UPFs).

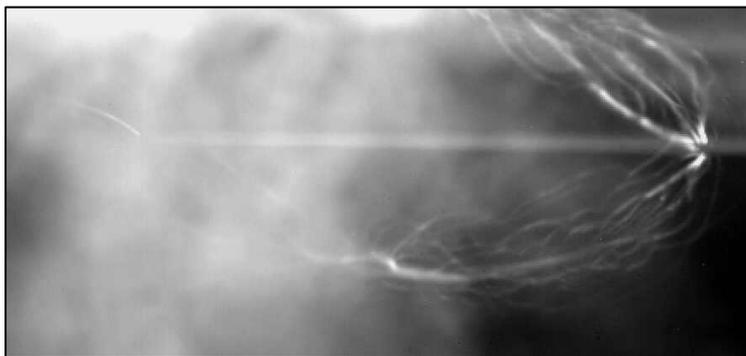


Рисунок 5.4 (событие 120-84+_2013-01-30, заряд облака – Плюс). ИК-изображение, которое фиксирует сложную и мощную иерархическую сеть плазменных образований, расположенных сверху и снизу от движущегося заземленного болта. Болт движется справа-налево. На кончике болта также видны плазменные каналы. Выдержка кадров 7 мс, частота кадров 115 Гц, 640x512 пикселей.

В разделе 5.4 приведены выводы главы 5. Материалы главы опубликованы в [Kostinskiy et al., 2015c].

В главе 6 рассматриваются эксперименты, описывающие ступенчатое развитие отрицательного и положительного лидера, приводящие к мощной вспышке стримерной короны: исследования длинных искр, инициированных генераторами импульсных напряжений (ГИН), в целях моделирования развития отрицательных и положительных каналов молний.

В разделе 6.1 дано подробное введение в проблему ступенчатого развития отрицательного лидера молнии и длинной искры.

В разделе 6.2 дано подробное введение в проблему ступенчатого развития положительного лидера длинной искры.

В разделе 6.3 дано подробное введение в проблему ступенчатого положительного лидера молнии.

В разделе 6.4 описана экспериментальная установка. экспериментальные исследования были проведены в Центре высоковольтных исследований Всероссийского научно-исследовательского института технической физики им.

Забабихина (г. Истра, Московская область). Длинные искры образовывались в электрическом поле генератора импульсных напряжений (ГИН-6МВ, собранный по схеме Маркса) 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.

Использовались коммутационные импульсы напряжения (100/7500 мкс). Ток измерялся с помощью малоиндуктивного шунта, установленного либо на высоковольтном электроде, либо на коротком (около 0,5 м) стержне, установленном на заземленной плоскости. Все изображения, представленные в этом разделе, были получены с помощью высокоскоростной камеры видимого диапазона с функцией усиления изображения (4Picos). Камера выдавала по два кадра с разрешением 1360×1024 пикселей каждый. Межкадровый интервал может быть 500 нс или более, а время экспозиции каждого кадра может быть установлено индивидуально в диапазоне от 0,2 нс до 80 с. Диапазон длин волн, которые фиксировал 4Picos в этих экспериментах составлял (315–850 нм), Камера устанавливалась на расстоянии 25, 30 или 90 м от искрового канала. Все представленные изображения являются двухмерными в плоскости кадра.

В разделе 6.5 показаны зафиксированные стримерные вспышки при образовании ступеней отрицательных лидеров и тонкая структура стримерной короны отрицательного лидера, включающая спейс-стем и спейс-лидер.

В разделе 6.6 исследуются вспышки стримеров при образовании ступеней положительных лидеров. Важным являются сравнения морфологий каналов положительных и отрицательных ступеней и их стримерных корон. Стримерные короны во время ступеней практически не отличаются друг от друга, при этом каналы отрицательных лидеров имеют большую извилистость, а каналы положительных лидеров почти всегда близки к прямым линиям. Из полученных результатов можно выделить событие, изображенное на Рисунке 6.1, где впервые удалось зафиксировать плазменное образование, похожее на спейс-лидер в короне отрицательного лидера. на Рисунке 6.1 показан момент высвечивания положительной ступени лидера с наиболее сильно структурированной вспышкой положительной стримерной короны в данном наборе данных. Обращает на себя внимание, что помимо направленных вниз стримеров, несколько разветвленных стримеров, по-видимому, возникают выше конца лидерного канала и движутся в обратном направлении по отношению к направлению движения канала, что делает общую геометрию вспышки почти сферической. Это похоже на геометрию стримерной вспышки отрицательного лидера. Длина ступени составляла около 123 см (самая длинная в этом наборе данных). На втором кадре показано «плавающее» (находящееся на заметном удалении от конца основного канала) разветвленное плазменное образование стримерного или лидерного типа. Больше всего это плазменное образование

похоже на спейс-лидер (существующий в стримерной зоне отрицательного лидера) внутри стримерной вспышки положительного лидера. Отличие этого плазменного образования от спейс-лидера, распространяющегося в стримерной зоне отрицательного лидера в том, что отрицательный (верхний) конец не имеет головки, в то время как положительные концы плазменного образования имеют 5 хорошо различимых головок. Это событие может являться первым свидетельством существования спейс-лидера (или спейс-стема, что нам кажется менее вероятным) внутри стримерной зоны положительного лидера.

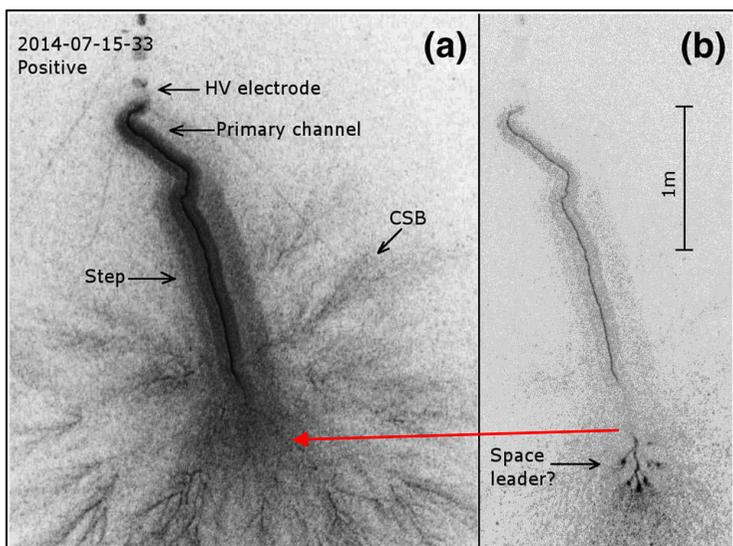


Рисунок 6.1 (адаптировано из [Kostinskiy et al., 2018]), (событие 2014-07-15_29). Ступень положительного лидера с наиболее сильно структурированной вспышкой стримерной короны в нашем наборе данных видна на первом кадре камеры 4Picos, показанном на панели (а). Изображения инвертированы. Длина ступени в плоскости кадра около 123 см. CSB означает вспышку коронного стримера. Второй кадр, показан на панели (b), более контрастной, и он показывает то, что выглядит как «спейс-лидер» с шестью или семью нисходящими ветвями на заметном расстоянии от конца канала положительного лидера. Время экспозиции первого кадра составляло 1 мкс, второго — 0,5 мкс. Межкадровый интервал составлял 5 мкс.

В разделе 6.7 подробно обсуждаются результаты экспериментов, представленных в главе 6 и их возможная роль в понимании процессов распространения молнии и внутриоблачных разрядов.

В разделе 6.8 приведены выводы главы 6. Материалы главы опубликованы в [Kostinskiy et al., 2018].

В главе 7 изложены результаты исследований [Kostinskiy et al., 2020a], где, основываясь на экспериментальных результатах последних лет, дано качественное описание возможного механизма (называемого далее для краткости Механизмом, чтобы отделить от других физических механизмов, обсуждаемых в данной главе) инициации молнии. Механизм является комплексным (составным) процессом и охватывает основные этапы инициации и развития молнии, начиная с иницирующего молнию самого первого события (IE — the initiating event), за которым следует изменение начального электрического поля (IEC — the initial electric field change), с последующими несколькими начальными импульсами пробоя (IBPs — the initial breakdown pulses) вплоть до старта большого отрицательного лидера, надежно регистрируемого радиофизическими системами и общепризнано считающегося «молнией». Механизм предполагает, что иницирование происходит в области ~ 0.1 - 1 км^3 со средним электрическим полем $E > 0,3 \text{ МВ}/(\text{м}\cdot\text{атм})$, которая содержит из-за статистического движения сильно заряженных гидрометеоров и турбулентности многофазной среды многочисленные небольшие « E_{th} -объемы», под которыми мы будем понимать объемы размером $\sim 10^{-4}$ - 10^{-3} м^3 , где электрическое поле $E \geq 3 \text{ МВ}/(\text{м}\cdot\text{атм})$ обеспечивает размножение «классических» разрядных лавин, то есть, в этих областях частота ионизации молекул воздуха выше частоты прилипания к электроотрицательным молекулам воздуха $\nu_i > \nu_a$. Механизм описывает инициацию и развитие молнии в результате любого из двух наблюдаемых типов иницирующих событий (IE): сильного УКВ (VHF)-события, такого как компактный внутриоблачный разряд (compact intracloud discharge — CID, который также называют NBE — narrow bipolar event), или слабого УКВ (VHF)-события. Согласно Механизму, оба типа иницирующих событий вызваны большой группой, широко распределенных в объеме с сильным электрическим полем грозового облака, лавин релятивистских убегающих электронов и позитронов, где начальные электроны и позитроны являются вторичными частицами широкого атмосферного ливня космических лучей (ШАЛ, extensive air shower — EAS). Электроны и позитроны проходят через множество E_{th} -объемов (которые мы также будем называть «воздушными электродами»), тем самым вызывая почти одновременную (синхронизованную) инициацию множества положительных стримерных вспышек. В рамках Механизма, из-за ионизационно-перегревной неустойчивости вдоль траекторий стримерных вспышек появляются высокопроводящие необычные плазменные образования (unusual plasma formations — UPFs). Эти UPFs во время протекания IEC-стадии, благодаря небольшим сквозным фазам между ними и

образовавшимися в результате их взаимодействия двунаправленным лидерам, объединяются в трехмерные (3D) сети горячих высокопроводящих плазменных каналов, что приводит к наблюдаемому слабому току и изменению электрического тока с небольшими импульсами. Последующее развитие этих 3D плазменных сетей приводит к контакту двух (или более) сетей, благодаря взаимодействию (сквозным фазам) их плазменных каналов, что вызывает первый ИВР. Каждый последующий ИВР возникает, когда еще одна трехмерная сеть каналов горячей плазмы объединяется с цепочкой сетей, созданной более ранними ИВРs. Цепочка ИВРs приводит к появлению «большого» ступенчатого отрицательного лидера, надежно фиксируемого наземными радиосистемами, который общепризнано считается молнией [Rakov and Uman, 2003]. Таким образом, мы делаем попытку создать качественный Механизм инициации молнии, как целостного процесса (цепочки превращений плазмы из одной формы в другую), в отличие от прежних критериев инициации молнии, за который принимался, например, инициация первого стримера (например, [Dawson & Duff, 1970], [Gurevich et al., 1999], [Babich et al., 2016]), инициация лавины убегающих электронов [Gurevich et al., 1992] или первой стримерной вспышки [Rison et al., 2016].

Раздел 7.1 является введением в главу 7 и в нем рассматривается проблема инициации молнии в грозовых облаках, а также даются краткие определения основным физическим явлениям, которые учитываются при построении Механизма инициации молнии.

В разделе 7.2 приводятся экспериментальные и теоретические основания Механизма, в частности, опирающиеся на экспериментальные результаты, изложенные в главах 1-6.

В разделе 7.3 изложены основные условия и явления, которым должен удовлетворять и которые должен объяснять Механизм, чтобы соответствовать известным в настоящее время экспериментальным и теоретическим данным.

В разделе 7.4 обсуждаются некоторые основные компоненты Механизма.

В разделе 7.4.1 подробно рассматриваются имеющиеся экспериментальные данные, касающиеся начального иницирующего события молнии (IE). Далее обсуждается механизм, создающий убегающие электроны в грозовом облаке, благодаря широкому атмосферному ливню космических лучей (ШАЛ/ЕAS), который попадает в область сильного грозового электрического поля (ЕAS -RREA-механизм. И в конце раздела подробно рассматриваются экспериментальные и теоретические представления о лавинно-стримерном переходе и необходимых и достаточных условиях инициации стримеров.

В разделе 7.4.2 обсуждаются свойства положительных стримерных вспышек в воздухе, так как по современным представлениям именно с положительных стримерных вспышек начинается процесс образования молнии, и они

являются необходимым элементом инициации молнии, без которого не строится ни один механизм инициации молнии.

В разделе 7.4.2.1 приводятся подробные данные о параметрах фронта тока и продолжительности типичной индивидуальной положительной стримерной вспышки, стартовой с металлических электродов в различных электрических полях.

В разделе 7.4.2.2 оценивается длина проводящих каналов длинных стримеров и их проводимость.

В разделе 7.4.3 строится гипотеза об иницирующем событии (IE), как о почти одновременном (синхронизованном) иницировании большого числа положительных стримерных вспышек в грозовом облаке.

В разделе 7.4.3.1 рассматриваются модели, где стримерная корона, стартовой с гидрометеоров и создает множество положительных стримерных вспышек (гидрометеорный механизм инициации стримеров).

В разделе 7.4.3.2 на основе имеющихся теоретических представлений, обсуждаются гидродинамические и статистические процессы, которые могут играть роль в локальном усилении электрических полей грозового облака и создании группы положительных стримерных вспышек (гидродинамический и статистический механизм инициации стримеров).

В разделе 7.4.3.3 рассматриваются преимущества процесса гидродинамического и статистического усиления электрического поля по сравнению с чистым гидрометеорным механизмом и выдвигается предположение, что настолько сильное электрическое поле, которое может иницировать стримерные вспышки, смогут иницировать гидрометеорный, гидродинамический и статистический механизмы векторно суммируя их вклады.

В разделе 7.5 рассматривается предложенный новый Механизм инициации молнии от иницирующего события через стадию изменения электрического поля до стадии первых импульсов начального пробоя.

В разделе 7.5.1 рассматривается Механизм иницирования молнии благодаря классическому NBE(KBP), который можно назвать NBE-IE-Механизм.

В разделе 7.5.1.1 обсуждаются необходимые условия для возникновения NBE-IE-Механизма.

В разделе 7.5.1.2 Большие электрические поля, возникающие из-за турбулентных и статистических движений гидрометеоров, как начальное необходимое условие для первого иницирующего события (IE). Последовательную схему начальных стадий инициации молнии можно видеть на Рисунке 7.1. Стадия накопления в грозовом облаке областей с локальными сильными электрическими полями изображена на Рисунке 7.1.1.

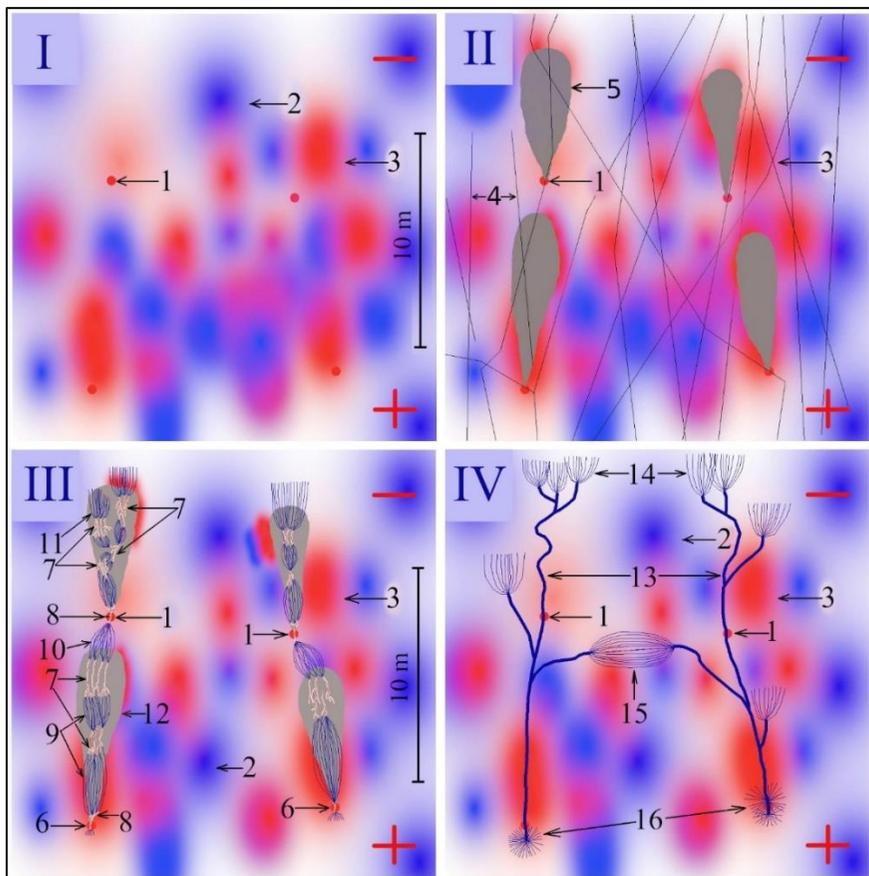


Рисунок 7.1 (адаптировано из [Kostinskiy et al., 2020a]). Схема механизма возникновения NBE, приводящего к инициации молнии. 1,6 — область с электрическим полем $E \geq 3$ МВ/(м·атм); 2 — область с электрическим полем $E < 0,28-0,35$ МВ/(м·атм); 3 — $E_{\text{Str}+}$ -объем, область с электрическим полем $E \geq 0,45-0,5$ МВ/(м·атм); 4 — траектории убегающих электронов; 5 — положительные стримерные вспышки; 7,8 — UPFs; 9 — вторичные положительные стримерные короны, соединяющие UPFs; 10 — вторичные положительные стримерные короны, соединяющие UPFs двух разных стримерных вспышек; 11 — положительная стримерная корона перед UPFs; 12 — траектории (области) первых стримерных вспышек; 13 — горячие высокопроводящие плазменные каналы (двунаправленные лидеры); 14 — стримерные короны положительных лидеров; 15 — стримерная корона двух взаимодействующих больших плазменных каналов (двунаправленных лидеров); 16 — стримерная вспышка отрицательного лидера

В разделе 7.5.1.3 предложен механизм EAS-RREA-синхронизации (почти одновременный в рамках 1-3 мкс) запуска большого количества электронных лавин и стримерных вспышек, который может объяснить близкую к скорости света скорость движения фронта радиоисточников в грозовом облаке и очень короткое время стадии начального изменения электрического поля (IEC), после которой появляются IBPs.

В разделе 7.5.1.4 излагаются условия возникновения и развития необычных плазменных образований (UPFs) и их цепочек после прохождения первых стримерных вспышек. Этот раздел опирается на данные, изложенные в главах 1 и 2 диссертации.

В разделе 7.5.1.5 предложены условия возникновения положительных и отрицательных лидеров, которые развиваются благодаря ранее возникшим цепочкам необычных плазменных образований (UPFs).

В разделе 7.5.1.6 рассматриваются, вытекающие из экспериментальных результатов, требования к событиям, которые подготавливают начальные импульсы пробоя (IBPs).

В разделе 7.5.1.7 первый классический IB-импульс рассматривается с точки зрения предложенного Механизма инициации КВР и молнии, Рисунок 7.10А.

В разделе 7.5.1.8 рассматривается возможный механизм инициации последующих классических IB-импульсов (IBPs), Рисунок 7.2В-D.

В разделе 7.5.1.9 излагается механизм переходя от стадии начальных импульсов пробоя (IBPs) к стадии «классического», «большого» отрицательного ступенчатого лидера, который считается полностью сформированной молнией.

В разделе 7.5.1.10. сравнивается предложенный Механизм NBE-IE инициации молнии с имеющимся корпусом экспериментальных данных.

В разделе 7.5.1.11. NBE-IE Механизм рассматривается для объяснения событий-прекурсоров и изолированных NBEs (КВР). [Rison et al., 2016] предложили этот термин для «разрядов короткой продолжительности» (“short duration discharge”), который они назвали «прекурсорами», поскольку они «иногда происходят до того, как IC-молния начнется в том же месте» («sometimes occur seconds before an IC discharge initiates at the same location»).

В разделе 7.5.2. изложен Механизм слабого IE, который инициирует молнию в грозовых облаках. В этом разделе мы описываются инициирующие молнию события (IE),

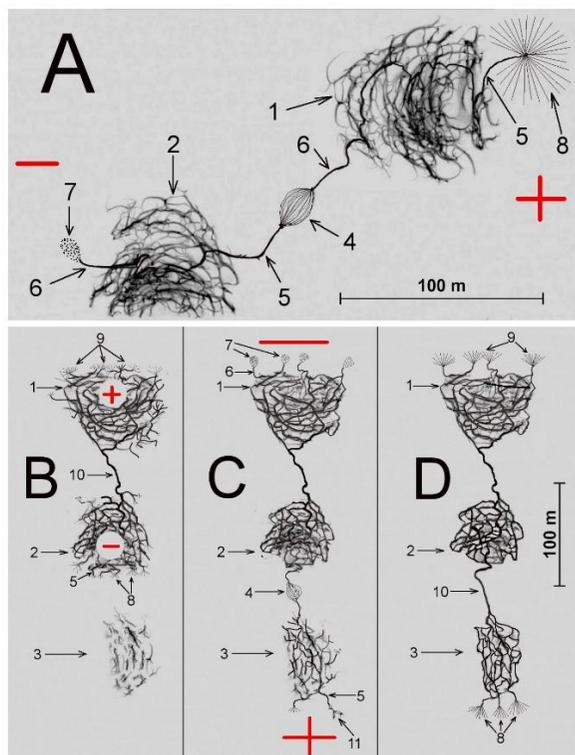


Рисунок 7.2 (схема), (адаптировано из [Kostinskiy et al., 2020a]). (A). Две плазменные сети, образованные после слияния UPFs, взаимодействуют друг с другом (сквозная фаза в IBP №1). (B). Фаза «обратного удара» IBP №1, на которой две плазменные сети объединяются. (C). Сквозная фаза в IBP №2. (D). Фаза «обратного удара» IBP №2. 1 — первая плазменная сеть, образованная слиянием множества UPFs; 2 — вторая плазменная сеть; 3 — третья плазменная сеть; 4 — сквозная фаза взаимодействия плазменных сетей; 5 — отрицательный лидер; 6 — положительный лидер; 7 — стримерная корона положительного лидера; 8 — вспышка стримерной короны отрицательного лидера; 9 — вспышка стримерной короны положительного лидера; 10 — плазменный канал фазы «обратного удара»; 11 — стримерная корона отрицательного лидера.

короткой продолжительности (≤ 1 мкс) и низкой мощности VHF (<1 Вт), как описано [Marshall et al., 2019] и [Lyu et al., 2019]. Мы называем эту часть Механизма механизмом слабого ИЕ. Эти ИЕ более слабые, чем все инициирующие события NBE, описанные выше, и явно не являются «классическими» NBE

(КВР). Как упоминалось во введении, недавние измерения показывают, что 88% из 26 ближайших IC-молний были инициированы слабыми IE [Lyu et al., 2019], в то время как 96% из 868 CG-молний были инициированы слабыми IE [Bandara et al., 2019]. Поэтому вероятность возникновения молний в 10-25 раз выше в случае слабых IE, чем в случае NBE-IE Механизма. Таким образом, мы можем ожидать, что условия, необходимые для Механизма слабого IE, с большей вероятностью возникнут в грозном облаке, чем условия для NBE-IE Механизма.

В разделе 7.5.2.1 рассматривается первое условие инициирования слабого IE.

В разделе 7.5.2.2 рассматривается второе условие инициирования «слабого» инициирующего события (Weak IE).

В разделе 7.5.2.3 предложен Механизм инициации «слабого» инициирующего события IE (Механизм слабого IE — Weak-IE Mechanism), с которого начинается инициация молнии. Этот механизм сходен с предложенным выше механизмом, но для его реализации необходимо, чтобы объемов с пробойными электрическими полями было меньше, а электрические поля, поддерживающие движение стримерных вспышек, распространялись бы на сотни метров (Рисунок 7.3). Дальнейшая подготовка плазменных образований для начальных импульсов пробоя проходит аналогично Механизму предложенному в разделах 7.5.1.6-7.5.1.8.

В разделе 7.5.2.4 приводится сравнение механизма возникновения слабого IE с корпусом имеющихся экспериментальных данных.

В разделе 7.6. Механизм инициации молнии впервые рассматривается с точки зрения последовательного перехода и усложнения структуры плазменных образований от электронных лавин (раздел 7.6.0), лавинно-стримерного перехода (7.6.1), стримерного-UPFs перехода (7.6.2), перехода UPFs-положительный лидер (7.6.3), перехода положительный лидер — двунаправленный лидер (7.6.4) до IBP-стадии, как переходу от цепочек UPFs и небольших двунаправленных лидеров к большим объемным взаимодействующим плазменным сетям (7.6.5).

В разделе 7.7 излагаются выводы главы 7. Материалы главы опубликованы в [Kostinskiy et al., 2020a]

В главе 8 производится оценка динамики инициирования стримерных вспышек, обеспечивающих пространственно-временной профиль и скорость распространения фазовой волны максимальных VHF-сигналов при развитии КВР (CID/NBE) [Kostinskiy et al., 2020b].

В разделе 8.1 сделана оценка динамики возникновения и гибели «воздушных электродов» в зависимости от высоты над уровнем моря.

В разделе 8.1.1 производится оценка зарядов и электрических полей модельных заряженных гидрометеоров, которые могут инициировать стримеры и коронный разряд.

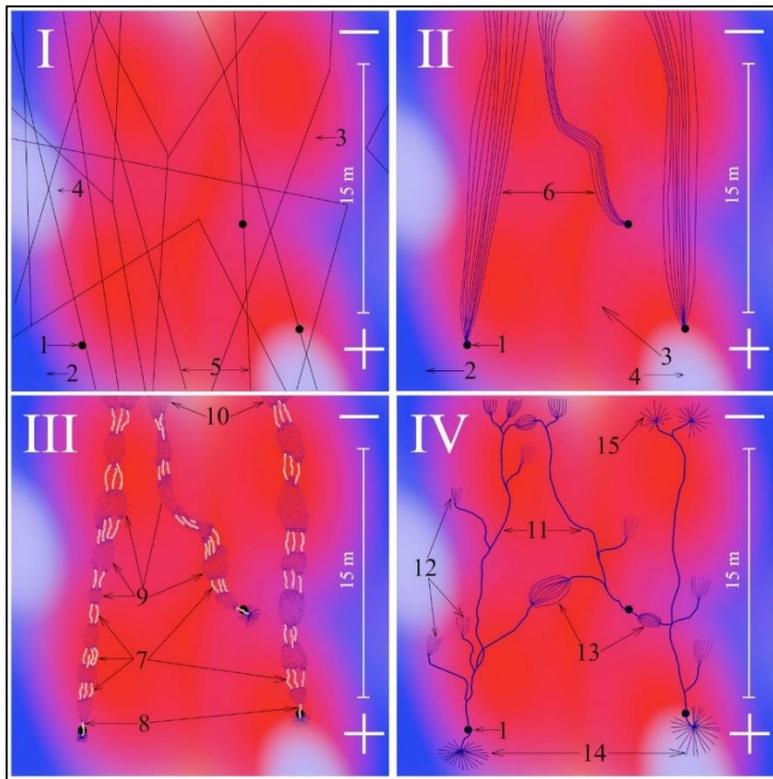


Рисунок 7.3 (адаптировано из [Kostinskiy et al., 2020a]). Возможное инициирование молнии с точки зрения Механизма «слабого» NBE и/или «слабого» инициирующего события (IE). 1 — область с электрическим полем $E \geq 3 \text{ МВ}/(\text{м} \cdot \text{атм})$; 2 — область с электрическим полем $E < 0,28-0,35 \text{ МВ}/(\text{м} \cdot \text{атм})$; 3 — область с электрическим полем $E \geq 0,45-0,5 \text{ МВ}/(\text{м} \cdot \text{атм})$; 4 — область с электрическим полем $E \approx 0,45-0,5 \text{ МВ}/(\text{м} \cdot \text{атм})$; 5 — траектории убегających релятивистских электронов (позитронов); 6 — длинные положительные стримерные вспышки; 7,8 - UPFs; 9 — вторичные стримерные короны, соединяющие UPFs; 10 — положительная корона впереди UPFs; 11 — горячие высокопроводящие плазменные каналы; 12 — положительные стримерные короны положительных лидеров; 13 — вторичная положительная стримерная корона двух взаимодействующих в сквозной фазе больших плазменных каналов; 14 — вспышка стримерной

короны отрицательного лидера; 15 — вспышка положительной короны положительного лидера.

В разделе 8.1.2 сделана оценка возможности инициации коронного и стримерного разряда с поверхности заряженных гидрометеоров малых размеров.

В разделе 8.1.3 оценено время жизни воздушных электродов с точки зрения инициации электронных лавин фоновыми космическими лучами до прохождения через этот объем грозового облака ШАЛ.

В разделе 8.1.4 приводятся выводы раздела 8.1.

В разделе 8.2 показано, что благодаря EAS-RREA – механизму возможна синхронная инициация стримерных вспышек в сильном электрическом поле грозового облака.

В разделе 8.2.1 рассматривается радиальное пространственное распределение вторичных электронов, усиленных электрическим полем при реализации EAS-RREA-механизма.

В разделе 8.2.2 описан алгоритм расчета EAS-RREA инициации стримерных вспышек.

В разделе 8.2.2.1 приведены результаты оценок с учетом: влияния напряженности среднего электрического поля на процесс инициации стримерных вспышек, благодаря вторичным электронам ШАЛ (раздел 8.2.2.1.1); влияния величины объема ЕЕ-области, занятого воздушными электродами, на процесс инициации стримерных вспышек, благодаря вторичным электронам ШАЛ (раздел 8.2.2.1.2); влияния числа посевных электронов ШАЛ на процесс инициации стримерных вспышек (8.2.2.1.3); влияния давления на процесс инициации стримерных вспышек (8.2.2.1.4).

В разделе 8.3 изложены предварительные выводы главы 8. Материалы главы опубликованы в [Kostinskiy et al., 2020b].

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Основные результаты диссертации

1. Внутри положительно и отрицательно заряженных искусственных водных аэрозольных облаков существует новый класс электрических разрядов «необычные плазменные образования» (unusual plasma formations — UPFs), которые представляют из себя сети плазменных каналов, размеров 10-30 см, некоторые из которых нагреты настолько, насколько нагрет восходящий положительный лидер.
2. Установлен по крайней мере один механизм возникновения UPFs. UPFs инициируется внутри восходящей положительной стримерной

- вспышки до появления других плазменных образований в электрическом поле аэрозольного облака.
3. Во время сквозной фазы контакта восходящего и нисходящего лидеров длинной искры, возможно ветвление лидеров внутри общей стримерной зоны.
 4. Яркость инфракрасного излучения в области контакта восходящего и нисходящих лидеров длинной искры примерно в 5 раз выше, чем для участков образовавшегося единого канала ниже или выше этой области.
 5. При движении протяженного проводника (болта арбалета с проводом и без провода) в окрестностях и внутри искусственного облака положительно и отрицательно заряженного водного аэрозоля возникают стримерные вспышки, инициируются длинные искры (лидеры) и UPFs, и возникают квазиобратные удары в заземленные объекты.
 6. Во время образования ступеней (длиной 30-120 см) положительного лидера длинной искры (в электрическом поле высоковольтного генератора импульсных напряжений) перед головкой лидера в зоне стримерной короны может существовать плазменное образование, сходное по морфологии со спейс-стемом или спейс-лидером, которые наблюдаются в стримерной зоне отрицательного лидера. Стримерные зоны, возникающие во время образования ступеней положительного и отрицательного лидеров длинной искры морфологически сходны.
 7. Инициацию молнии в грозовых облаках можно описать, как последовательный качественный механизм от инициирующего молнию события (IE) через начальную стадию увеличения электрического поля (IEC), до первых начальных импульсов пробоя (IBPs), которые переходят в ступенчатый отрицательный лидер.
 8. Иницирующим молнию событием (IE) могут быть «классические» компактные внутриоблачные разряды (КВР/CID/NBE) или, в гораздо большем числе случаев, — «слабые» КВР (weak NBE), аналогичные по физическому механизму классическим КВР, но меньшие по масштабу. Механизм инициации компактных внутриоблачных разрядов (КВР/CID/NBE), который дает непротиворечивое объяснение спектру оптического излучения КВР, характерному для стримерных вспышек, и скорости распространения источников радиоизлучения внутри грозового облака близкой к скорости света, можно представить, как инициацию вторичными электронами и позитронами ШАЛ в наиболее турбулентных областях грозового облака в небольших объемах со сверхпробойными полями множества стримерных вспышек, внутри

которых возникнут цепочки UPFs, взаимодействующие друг с другом посредством вторичных стримерных корон.

9. Инициацию молнии можно представить, как последовательную цепь переходов плазмы из одного состояния в другое (от первых газоразрядных лавин до стримеров, UPFs, положительных, отрицательных, двунаправленных лидеров, сетей плазменных каналов, которые ведут к сквозным фазам взаимодействия длинных плазменных двунаправленных лидеров и/или сетей во время протекания IBPs-стадии развития молнии).

Список цитированной литературы

Анцупов К.В., Верещагин И.П., Кошелев М.А., Лупейко А.В., Макальский Л.М., Сысоев В.С., Чернов Е.Н. (1990), Исследование искровых разрядов из облака заряженных аэрозольных частиц // Известия АН СССР, Энергетика и транспорт, 1990, №4, с.158-162.

Базелян Э.М., Райзер Ю.П. (1997) Искровой разряд, М.: И-во МФТИ, 1997.

Базелян Э.М., Райзер Ю.П. (2001) Физика молнии и молниезащиты, М.: Физматлит, 2001.

Базелян, Э. М., Горин, Б. Н., Левитов, В. И. (1978). Физические и инженерные основы молниезащиты (223 с). Ленинград: Гидрометеиздат, 1978.

Верещагин И.П., Кошелев М.А., Макальский Л.М., Сысоев В.С. (1989), Электрический разряд в заряженном аэрозоле // Известия АН СССР, Энергетика и транспорт, 1989, №4. С.100.

Горин Б.Н., Шкилев А.В. (1974). Развитие электрического разряда в длинных промежутках при импульсном напряжении положительной полярности // Электричество, №2, стр.29-38.

Горин Б.Н., Шкилев А.В. (1976). Развитие электрического разряда в длинных промежутках стержень-плоскость при отрицательном импульсе напряжения // Электричество, №6, стр.31-39.

Райзер Ю.П. (1992), Физика газового разряда, М.: Наука, 536 с.

Юман, М. (1972), Молния. М.: И-во Мир, 328 с.

Antsupov, K. V., I. P. Vereshchagin, M. A. Koshelev, L. M. Makalsky, V. S. Syssoev (1991), Discharges from cloud of charged aerosol // Proc. 7th Int. Symp. on High Voltage Engineering, Dresden, Germany, pp. 15–17.

Andreev, M. G., Bogatov, N. A., Kostinskiy, A. Yu., Makal'sky, L. M., Mareev, E. A., Sukharevsky, D. I., & Syssoev, V. S. (2014). First Detailed Observations of Discharges within the Artificial Charged Aerosol Cloud // XV International Conf.

on Atmospheric Electricity, June 2014, Norman, OK, USA
https://www.nssl.noaa.gov/users/mansell/icae2014/preprints/Andreev_11.pdf.

Attanasio, A., Krehbiel, P. R., & da Silva, C. L. (2019). *Griffiths and Phelps lightning initiation model, revisited* // Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 124, 8076-8094. <https://doi.org/10.1029/2019JD030399>.

Babich, L. P., Bochkov, E. I., Kutsyk, I. M., Neubert, T., & Chanrion, O. (2016). Positive streamer initiation from raindrops in thundercloud fields // J. Geophys. Res. Atmos., 121, 6393 -6403, <https://doi.org/10.1002/2016JD024901>.

Bandara, S., Marshall, T. S., Karunarathne, N., Siedlecki, R., & Stolzenburg, M. (2019). Characterizing three types of negative narrow bipolar events in thunderstorms // Atmospheric Research, 227, 263-279, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.05.013>.

Brown S., M., Janssen, V., Adumitroaie, S., Atreya et al. (2018). Prevalent lightning sferics at 600 megahertz near Jupiter's poles. // Nature, v.558, p.87, doi:10.1038/s41586-018-0156-5.

Gurevich, A. V., Zybin, K. P., & Roussel-Dupre, R. A. (1999). Lightning initiating by simultaneous effect of runaway breakdown and cosmic ray showers // Physics Letters A, 254, 79-87, [https://doi.org/10.1016/S0375-9601\(99\)00091-2](https://doi.org/10.1016/S0375-9601(99)00091-2).

Dawson, G.A., & D.G. Duff (1970). Initiation of cloud-to-ground lightning strokes // J. Geophys. Res., 75, 5858, <https://doi.org/10.1029/JC075i030p05858>.

Dwyer, J.R., & Uman, M.A. (2014). The physics of lightning // Physics Reports, 534, 147-241, <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2013.09.004>.

Gurevich, A. V., Milikh, G. M., & Roussel-Dupre, R. A. (1992). Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm // Physics Letters A, 165, 463-467, [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(92\)90348-P](https://doi.org/10.1016/0375-9601(92)90348-P).

Gurevich, A. V., Zybin, K. P., & Roussel-Dupre, R. A. (1999). Lightning initiating by simultaneous effect of runaway breakdown and cosmic ray showers // Physics Letters A, 254, 79-87, [https://doi.org/10.1016/S0375-9601\(99\)00091-2](https://doi.org/10.1016/S0375-9601(99)00091-2).

Gurevich, A. V., and A. N. Karashtin. (2013), Runaway breakdown and hydrometeors in lightning initiation // Phys. Rev. Lett., 110(18), 185005, doi:10.1103/PhysRevLett.110.185005.

Kasemir, H. W. (1960) A contribution to the electrostatic theory of a lightning discharge // J. Geophys. Res. 65, 1873-1878,

Kostinskiy, A. Y., Syssoev, V. S., Bogatov, N. A., Mareev, E. A., Andreev, M. G., Makalsky, et al. (2015a). Observation of a new class of electric discharges within artificial clouds of charged water droplets and its implication for lightning initiation within thunderclouds // Geophys. Res. Lett., 42, 8165-8171, <https://doi.org/10.1002/2015GL065620>.

Kostinskiy, A. Y., Syssoev, V. S., Bogatov, N. A., Mareev, E. A., Andreev, M. G., Makalsky, et al. (2015b), Infrared images of bidirectional leaders produced by the

cloud of charged water droplets // Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 120, 10,728–10,735.

Kostinskiy, A. Y., Syssoev, V. S., Bogatov, N. A., Mareev, E. A., Andreev, M. G., Bulatov, M. U., et al. (2018). Abrupt elongation (stepping) of negative and positive leaders culminating in an intense corona streamer burst: Observations in long sparks and implications for lightning // Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 123.

Kostinskiy, A. Y., Marshall, T. C., & Stolzenburg, M. (2020a). The mechanism of the origin and development of lightning from initiating event to initial breakdown pulses (v.2) // Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 125, e2020JD033191, <https://doi.org/10.1029/2020JD033191>.

Kostinskiy, A. Yu., Vlasov, A., & Fridman, M. (2020b). Calculation of the dynamics of the initiation of streamer flashes that provide the NBE VHF signal profile and the VHF phase wave propagation velocity // arXiv: 2005.12417 v1 [physics.aoph].

Kostinskiy A. Yu., N. A. Bogatov, V. S. Syssoev, E. A. Mareev, M. G. Andreev, M. U. Bulatov, D. I. Sukharevsky and V. A. Rakov (2021). Unusual plasma formations produced by positive streamers entering the cloud of negatively charged water droplets // J. Geophys. Res. (на рассмотрении в редакции).

Lalande, P., A. Bondiou-Clergerie, P. Laroche, A. Eybert-Berard, J.-P. Berlandis, B. Bador, A. Bonamy, M. A. Uman, and V. A. Rakov (1998), Leader properties determined with triggered lightning techniques // J. Geophys. Res., 103(D12), 14109–14115, doi:10.1029/97JD02492.

Laroche, P., Idone, V, Eybert-Berard, A., and Barret, L. (1991), Observations of bi-directional leader development in a triggered lightning flash // In Proc. Int. Conf. on Lightning and Static Electricity, Cocoa Beach, Florida, 1991., pp. 57/1 -10.

Les Renardières Group (1972). Research on long air gap discharges at Les Renardières // Electra, 23, 53–157.

Les Renardières Group (1974). Research on long air gap discharges at Les Renardières, 1973 results // Electra, 35, 107–214.

Les Renardières Group (1977). Positive discharges in long air gaps at Les Renardières // Electra, 53, 31–153.

Les Renardières Group (1981). Negative discharges in long air gaps at Les Renardières // Electra, 74, 67–216.

Liu, F., Lu, G., Neubert, T., Lei, J., et al. (2021). Optical emissions associated with narrow bipolar events in radio signals from thunderstorm clouds penetrating into the stratosphere // Preprint is under consideration at a Nature Portfolio Journal, <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-311122/v1>.

Lyu, F., Cummer, S. A., Qin, Z., & Chen, M. (2019). Lightning initiation processes imaged with very high frequency broadband interferometry // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, <https://doi.org/10.1029/2018JD029817>.

Marshall, T., Schulz, W., Karunarathna, N., Karunarathne, S., Stolzenburg, M., Vergeiner, C. & Warner, T. (2014b). On the percentage of lightning flashes that begin with initial breakdown pulses // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119, 445–460, <https://doi.org/10.1002/2013JD020854>.

Mäkelä, J. S., Porjo, N., Mäkelä, A., Tuomi T., Cooray, V. (2008). Properties of preliminary breakdown processes in Scandinavian lightning // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v.70(16), pp.2041-2052, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.08.013>.

Marshall T., Bandara, S., Karunarathne, N., Karunarathne, S., Kolmasova, I., Siedlecki, R., & Stolzenburg, M. (2019). A study of lightning flash initiation prior to the first initial breakdown pulse // *Atmospheric Research*, 217, 10-23.

McNutt, S.R., Thomas, R.J. (2015). Volcanic Lightning, Ch. 62, *The Encyclopedia of Volcanoes*, Ed. H. Sigurdsson, Academic Press.

Proctor, D.E., Uytenbogaardt, R., and Meredith, B.M. (1988). VHF radio pictures of lightning flashes to ground // *J. Geophys. Res.* 93: 12 683–727.

Rakov, V. A., & Uman, M. A. (2003). *Lightning: Physics and effects* (p. 687). New York: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107340886>.

Rison, W., Krehbiel, P. R., Stock, M. G., Edens, H. E., Shao, X.-M., Thomas, R. J., et al. (2016). Observations of narrow bipolar events reveal how lightning is initiated in thunderstorms // *Nature Communications*, 7:10721.

Shao, X.M., and Krehbiel, P.R. (1996). The spatial and temporal development of intracloud lightning // *J. Geophys. Res.* 101: 26 641–68.

Shao, X.-M., Ho, C., Bowers, G., Blaine, W., & Dingus, B. (2020). Lightning interferometry uncertainty, beam steering interferometry, and evidence of lightning being ignited by a cosmic ray shower // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125, e2019JD032273.

Uman, M. (1969). *Lightning*. McGraw-Hill, 264 pp.

Uman, M.A. (1987). *The Lightning Discharge*, San Diego: Academic Press, 377 pp.

Uman, M.A. (2001). *The Lightning Discharge*, Mineola, New York: Dover, 377 pp.

Список публикаций по теме диссертации

1. *Костинский А.Ю.* (2013). Вспышки в средней и верхней атмосфере, инициированные молниевыми разрядами: последние результаты и будущее оптических и спектральных методов наблюдения // Известия ВУЗ. Радиофизика Т. 56, № 11–12, ноябрь-декабрь, 2013. С.939-946.
2. *Сысоев В. С., А. Ю. Костинский, Л. М. Макальский, В. А. Раков, М. Г. Андреев, М. У. Булатов, Д. И. Сухаревский, М. Ю. Наумова* (2013). Исследование параметров встречного лидера и его влияния на молниезащищённость объектов на основе лабораторного крупномасштабного моделирования // Известия ВУЗ. Радиофизика Т. 56, № 11–12, ноябрь-декабрь, 2013. С.931-938.
3. *Kostinskiy, A. Y., Syssoev, V. S., Bogatov, N. A., Mareev, E. A., Andreev, M. G., Makalsky, et al.* (2015a). Observation of a new class of electric discharges within artificial clouds of charged water droplets and its implication for lightning initiation within thunderclouds // *Geophys. Res. Lett.*, 42, 8165–8171, <https://doi.org/10.1002/2015GL065620>
4. *Kostinskiy, A. Y., Syssoev, V. S., Bogatov, N. A., Mareev, E. A., Andreev, M. G., Makalsky, et al.* (2015b), Infrared images of bidirectional leaders produced by the cloud of charged water droplets // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120, 10,728–10,735, <https://doi.org/10.1002/2015JD023827>.
5. *Kostinskiy, A. Y., et al.* (2015c), Electric discharges produced by clouds of charged water droplets in the presence of moving conducting object // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 135, 36–41, doi:10.1016/j.jastp.2015.10.006.
6. *Kostinskiy, A. Yu., V. S. Syssoev, N. A. Bogatov, E. A. Mareev, M. G. Andreev, M. U. Bulatov, L. M. Makal'sky, D. I. Sukharevsky, and V. A. Rakov* (2016), Observations of the connection of positive and negative leaders in meter-scale electric discharges generated by clouds of negatively charged water droplets // *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, doi:10.1002/2016JD025079.
7. *Rakov, V., E. A. Mareev, M. D. Tran, Y. Zhu, N.A. Bogatov, A., Y, Kostinskiy, V.S. Syssoev, W. Lyu* (2018). High-Speed Optical Imaging of Lightning and Sparks: Some Recent Results // *IEEJ Transactions on Power and Energy*. Vol. 138. No. 5. P. 321-326.
8. *Kostinskiy, A. Y., Syssoev, V. S., Bogatov, N. A., Mareev, E. A., Andreev, M. G., Bulatov, M. U., et al.* (2018). Abrupt elongation (stepping) of negative and positive leaders culminating in an intense corona streamer burst: Observations in long sparks and implications for lightning // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123, <https://doi.org/10.1029/2017JD027997>

9. *Kostinskiy, A. Y., Marshall, T. C., & Stolzenburg, M. (2020). The mechanism of the origin and development of lightning from initiating event to initial breakdown pulses (v.2) // Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 125, e2020JD033191, <https://doi.org/10.1029/2020JD033191>.*
10. *Bogatov, N. A., Kostinskiy, A. Y., Syssoev, V. S., Andreev, M. G., Bulatov, M. U., Sukharevsky, D. I., Mareev, E. A., & Rakov, V. A. (2020). Experimental investigation of the streamer zone of long - spark positive leader using high - speed photography and microwave probing // Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 123, e2019JD031826. <https://doi.org/10.1029/2019JD031826>.*
11. *Ding, Z., V. A. Rakov, Y. Zhu, M. D. Tran, A. Y. Kostinskiy, I. Kereszy (2021). Evidence and inferred mechanism of collisions of downward stepped-leader branches in negative lightning // Geophysical Research Letters, v.48 (11), e2021GL093295, <https://doi.org/10.1029/2021GL093295>.*

КОСТИНСКИЙ Александр Юльевич

**ПЛАЗМЕННЫЕ СТРУКТУРЫ И ОБЪЕМНЫЕ СЕТИ КАНАЛОВ,
КАК СОСТАВЛЯЮЩИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО-МЕХАНИЗМА
ИНИЦИАЦИИ МОЛНИИ В ГРОЗОВЫХ ОБЛАКАХ**

Автореферат

Подписано к печати 18.11. 2021 г.

Формат 60 × 90 1/16. Усл. печ. л. 3,3. Тираж 150 экз. Заказ № 4783/15

Отпечатано в типографии «Постер-М»
192296, г. Москва, ул. Молодежная, 3