

На правах рукописи



ЕВТУШЕНКО Андрей Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ
УСЛОВИЙ ИНИЦИАЦИИ, ОСОБЕННОСТЕЙ РАЗВИТИЯ
И ГЛОБАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ВЫСОТНЫХ РАЗРЯДОВ В АТМОСФЕРЕ**

1.6.18 – науки об атмосфере и климате

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Нижний Новгород – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород).

Официальные
оппоненты:

Криволицкий Алексей Александрович, доктор физико-математических наук (Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральная аэрологическая обсерватория», г. Долгопрудный);

Синькевич Андрей Александрович, доктор технических наук (Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова», г. Санкт-Петербург);

Пулинец Сергей Александрович, доктор физико-математических наук (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт космических исследований Российской академии наук», г. Москва).

Ведущая организация:

Рекомендуемая ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук», г. Москва.

Защита диссертации состоится «12» октября 2023 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета ДС 24.2.365.02 при Российском государственном гидрометеорологическом университете ФГБОУ ВПО «Российский государственный гидрометеорологический университет» (РГГМУ).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета по адресу: 195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский проспект, 98 и на официальном сайте ФГБОУ ВПО «Российский государственный гидрометеорологический университет» по адресу <https://www.rshu.ru/university/dissertations/files/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук



Т.С. Ермакова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

После открытия высотных разрядов (спрайтов, джетов, гало и эльфов) встал вопрос об их влиянии на химический состав, проводимость атмосферы и о глобальном распределении. Возмущение электрического поля во время высотного разряда инициирует плазмохимические реакции, приводящие к ионизации и возбуждению атомов и молекул. Наиболее интересны для исследования спрайты, так как они занимают объем в несколько тысяч кубических километров, характеризуются высокой частотой инициации, а над особо мощными мезомасштабными конвективными системами (ММКС) могут загораться целыми группами. Джеты интересны тем, что проходят через озоновый слой.

Постановка задачи численного моделирования о влиянии разрядов на химический баланс атмосферы всегда начинается с определения химических компонент, задания начальных условий для них во всем диапазоне исследуемых высот, выбора основных реакций, являющихся стоками и источниками. Модельные и экспериментальные данные о концентрации основных нейтральных компонент, электронов и некоторых ионов доступны только для определенного диапазона высот. Процессы, происходящие в азотно-кислородной смеси под воздействием импульсного электрического поля, хорошо описаны в [1]. Сложность нахождения данных о скоростях химических реакций и начальных концентраций является основным доводом к использованию ограниченного набора компонент, несмотря на наличие достаточных вычислительных мощностей.

Химические возмущения атмосферы во время джета были впервые исследованы в 1997 году [2]. Для азотно-кислородной смеси, содержащей 15 химических компонент, использовалось 40 реакций. Показано, что при развитии одиночного джета на высоте 30 км происходит локальное изменение концентрации NO на 10% и O₃ на 0,5%. Подчеркивается, что возмущение концентраций пропорционально квадрату давления и в нижней части озонового слоя может дополнительно возрастать из-за наличия голубых стартеров. Улучшенная модель для 33 химических компонент и более полным учетом влияния электронов на развитие голубого джета проведена в работе [3]. По сравнению с [2], относительное возмущение концентрации NO должно быть выше, а для O₃ – ниже. Обе работы основывались на достаточно старой физической модели джета [4], в которой электрические поля и соответствующие процессы в головке стримера были недооценены, по сравнению с улучшенной моделью [5]. Самое полное исследование с учетом последних данных о физических процессах, происходящих во время джета, проведено в работе [6]. Химический блок расширен до 1000 реакций и 88 химических компонент. Расчеты проведены для высот 18, 27 и 38 км для ночных и дневных условий. Концентрации O₃, NO, N₂O возрастают на порядки, при развитии голубого джета, и увеличиваются с уменьшением высоты исследования.

В 2004 году проведено моделирование диффузной области спрайта, с акцентом на исследование возмущения концентрации $O(^1D)$ и $O(^3P)$ в дневных и ночных условиях при импульсном дипольном моменте (ИДМ) 1000 Кл·км [7]. Детальная модель для стримеров спрайта (80 компонент и более 800 реакций) была предложена в 2008 г. [8]. Основное внимание обращено на накопление молекулярных и атомарных азота и кислорода в возбужденном состоянии, сделана оценка по накоплению NO для стримера спрайта $5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$. В [9] исследовано развитие стримеров спрайта на высотах 63, 68 и 78 км, изучена динамика химической системы из 75 компонент и более чем 500 реакций, проанализированы возмущения концентраций возбужденных состояний азота, кислорода и связанными с ними эмиссиями в оптическом, ультрафиолетовом, инфракрасном диапазонах. Развитие модели представлено в статье [10], где указано, что в нижней части стримеров спрайта инфракрасное излучение от CO_2 может достигать высокой интенсивности. В [11] рассчитано распределение электронов по энергии и уделено особое внимание динамике колебательно-возбужденных состояний азота. Глобальные и локальные оценки по наработке оксидов азота и озона во время развития спрайта сделаны на основе данных со спутника FORMOSAT-2. Локальное возмущение оксидов азота на высоте 70 км может достигать 5 раз, но в глобальном масштабе спрайты не являются значимым источником NO_x [12]. В работе [13] исследовано влияние гало на состав мезосферы и проанализированы излучения в оптическом диапазоне. Подробно исследована роль отлипания электронов от O^- при развитии разряда и релаксации возмущения ионов. В статье [14] исследуется чувствительность модели WACCM к возмущениям химического состава, а особенно оксидов азота, вызываемых спрайтами. Показано, что спрайты могут быть важным источником NO_x в тропиках на высоте 70 км и локально возмущать концентрацию оксидов азота до 20 % над областями высокой молниевой активности, но глобального эффекта на содержание NO_x не оказывают.

Надежной статистики и параметров глобального распределения спрайтов на основе данных непосредственных наблюдений не существует. Проводятся локальные наблюдательные кампании [15], дополняемые отдельными фактами регистрации высотных разрядов, и спутниковые наблюдения [16–18]. По данным, собранным за 4 года на спутнике FORMOSAT-2, было зарегистрировано 633 спрайта, 5 434 эльфов, 657 гало и 13 гигантских джетов [17], что составляет лишь малую часть от общего количества высотных разрядов. Полученные данные позволяют оценить относительную частоту появления высотных разрядов. Построение глобального распределения высотных разрядов требует существенных допущений и аппроксимации данных. Поверхность Земли была разбита на ячейки $2,5 \times 2,5^\circ$, при этом рассматривались только события, происходящие в ячейках, где спутник находился не менее 30,7 минут за 3 года. Некоторые зоны (Великие равнины в США, Восточно-Китайское море, часть Бразилии и Аргентины), известные своей высокой спрайтовой активностью, не были исследованы по техническим причинам. В результате получено, что глобальная частота

инициации спрайтов составляет 1 событие в минуту. В статье [19] сделано исследование интенсивности инициации спрайтов на основе исследования магнитного поля в низкочастотном диапазоне 1–100 Гц. Выделялись события, при которых на несколько среднеквадратичных отклонений превышались фоновые значения. Фактически, фиксировались экстремально мощные разряды облако-земля, и использовалось предположение об их тесной связи со спрайтами [20]. В результате, для спрайтов получена оценка 720 событий/день, с указанием, что этот результат следует рассматривать как нижнюю границу. Средние значения дипольного момента для зафиксированных всплесков более 600 Кл·км, что превышает общепринятые на сегодня значения и указывает на занижение полученной оценки [21].

В натуральных экспериментах нельзя организовать систематизированные измерения, позволяющие исследовать явление в аналогичных условиях. Заранее предсказать место появления высотного разряда и предположить его параметры на сегодняшний момент невозможно, поэтому значительный интерес представляет лабораторное моделирование, осуществляемое на относительно небольших по размерам установках. В силу сложной и принципиально нелинейной динамики высотных разрядов, критерии подобия при их масштабировании не определены, но в лабораторных условиях можно воспроизвести структурные особенности разрядов в атмосфере и общие закономерности в развитии разряда, с сохранением некоторых количественных параметров [22].

В 2001 году появилась первая работа по лабораторному моделированию спрайтов и эльфов [23]. В плексигласовой трубе (длина 1,8 м, диаметр 0,61 м) с пониженным давлением был инициирован разряд в постоянном поле. Рядом с положительным электродом основное излучение приходится на первую положительную систему молекулярного азота ($1PN_2$), а рядом с отрицательным электродом наблюдается синее свечение, возникающего из-за излучения в первой отрицательной полосе N_2^+ . Развитие работы в части увеличения мощности и токов разряда было сделано в [24], с последующим сравнением с данными наблюдений. Изучение условий инициации и распространения стримера в синтетическом газе (80:20 для $N_2:O_2$) при давлении 0,1–2000 Торр (размер вакуумной камеры 220 мм и межэлектродное расстояние 30 мм), с использованием камеры с наносекундным разрешением, а также численное моделирование проведено в [25]. Показано, что диаметр стримеров обратно пропорционален давлению, а ветвление наблюдается при давлениях выше 470 Торр. В статье [26] проведены оценки наработки оксидов азота в спрайтах и джетах. В прозрачной пластиковой камере с межэлектродным расстоянием 5 см создавалось давление, соответствующее тропосфере (100–500 Торр), стратосфере (1–100 Торр), мезосфере (1 Торр и менее), и исследовалась эффективность наработки оксидов азота на джоуль подведенной к разряду энергии. Рассчитано количество NO_x от единичного спрайта и джета, с учетом частоты инициации высотных разрядов, сделана оценка для высотных разрядов как источника оксидов азота в глобальном масштабе. Подходы и полученные результаты не были приняты в научном

сообществе, вызвали появление критических статей [27, 28] и последующих комментариев [29]. Исследование законов подобия и границ их применимости для азота и воздуха проведено в работе [30], где экспериментально показано сохранение приведенного диаметра стримеров (произведение диаметра стримера на давление, деленное на температуру газа) в диапазоне 10^{-5} –1 бар, хотя теоретические оценки предсказывают границу в 0,04 бар. На этой же установке были исследованы спектры и параметры спрайтов, которые возможно инициируются в атмосфере Венеры (смесь $\text{CO}_2\text{-N}_2$) и Юпитера (смесь $\text{H}_2\text{-He}$). Показано, что для воздуха, чистого азота и смеси $\text{CO}_2\text{-N}_2$ приведенный диаметр практически одинаковый, а для смеси $\text{H}_2\text{-He}$ в 2 раза больше [31]. Исследование плазмы в диапазоне давлений 0,1–2 мбар, с разрешением до 0,01 нм, с целью выяснения вращательной температуры газа в высотных разрядах, проведено в [32]. В работе [33] сделана попытка объяснить некоторые свойства джетов и спрайтов с помощью нового типа разряда, названного «апокампом» [34]. Исследование распространения стримеров в потоке газа проведено в [35], где изначально нагретая до 500 °С струя воздуха при распространении смешивалась с воздухом комнатной температуры, что приводит к изменению плотности потока, проходящего между электродами. Показано, что с повышением давления понижается диаметр стримеров, исследовано их ветвление. Моделирование отдельных свойств спрайтов проведено в [36]. Предварительно заряженная диэлектрическая пластина помещалась в вакуумную камеру объемом 2 м^3 , где производилась откачка. При давлении 10–100 Торр происходит инициация стримеров с заряженной пластины. В диапазоне 2–16 Торр инициируется сферический разряд, не соприкасающийся с диэлектрической пластиной, названный «реопу». Данный тип разряда имеет спектральный состав излучения, аналогичный верхней части спрайтов.

Данная диссертация посвящена комплексному изучению физико-химических процессов во время высотных разрядов. Предложена самосогласованная аксиально-симметричная плазмохимическая модель и применена для расчета возмущения химического баланса мезосферы во время спрайта и гало. Предложена новая параметризация для изучения глобального распределения спрайтов по данным сети грозопеленгации WWLLN. Впервые реализовано моделирование спрайтов на лабораторной установке в градиенте давления.

Цели и задачи работы

Цель работы: Исследование физико-химических процессов в атмосфере при инициации высотных разрядов и изучение глобального распределения спрайтов.

В работе решались следующие конкретные задачи:

1. Определение основных химических компонент и их начальных концентраций в интересующем диапазоне высот, необходимых для описания химического состава мезосферы в ночных и дневных условиях, определение списка

химических и фотохимических реакций для описания возмущения химического баланса мезосферы, вызываемого высотным разрядом.

2. Создание программно-вычислительного комплекса для моделирования и анализа химико-физических процессов во время и после высотного разряда.

3. Исследование влияния спрайта и гало на химический состав мезосферы в самосогласованной радиально-симметричной плазмохимической модели с учетом изменения проводимости, обусловленного высотным разрядом, в дневных и ночных условиях.

4. Создание параметризации для распределения спрайтов по данным глобальной сети грозопеленгации WWLLN.

5. Изучение сезонного, зонального распределения положительных и отрицательных спрайтов, исследование чувствительности предложенной модели к начальным данным системы WWLLN и вариациям основных параметров.

6. Создание экспериментального стенда «Спрайт», предназначенного для моделирования протяженных разрядов в градиенте давления.

7. Исследование свойств и параметров разряда в перепаде давления, реализуемого в режиме импульсного напуска воздуха на стенде «Спрайт».

Научная новизна работы

В работе реализован комплексный подход к изучению одного из самых интересных для моделирования высотных разрядов – спрайтов в ночных и дневных условиях (в дневных условиях дополнительно изучены тесно связанные со спрайтами гало). Впервые предложена самосогласованная плазмохимическая модель спрайта, которая учитывает процессы протекания тока в тропосферном разряде и изменение в динамике электрического поля, в результате возмущения химического состава и проводимости мезосферы. Модель была применена для спрайтов в ночных условиях и для спрайтов/гало в дневных условиях. Предложенная модель для глобального распределения спрайтов по данным сети грозопеленгации WWLLN, кроме среднего значения количества спрайтов за минуту в глобальном масштабе, позволяет исследовать региональные и сезонные распределение разрядов с существенно более высоким разрешением, чем с использованием спутниковых и других видов наблюдений. Моделирование высотного разряда на экспериментальном стенде «Спрайт» принципиально отличается от проводимых ранее в мире экспериментов: высотный разряд моделируется в градиенте давления и одновременно существуют диффузная, переходная и стримерная области. Именно в такой постановке эксперимента можно говорить о моделировании «всего» высотного разряда с использованием коэффициентов подобия.

Теоретическая и практическая ценность работы

В работе представлены результаты по трем взаимодополняющим направлениям исследований высотных разрядов, которые при использовании вместе

могут дать существенно более полную информацию по разрядным процессам в атмосфере, нежели по отдельности. Впервые предложена радиально-симметричная самосогласованная плазмохимическая модель высотного разряда, которая позволяет проанализировать особенности развития высотного разряда с учетом особенностей протекания тока в «родительском» тропосферном молниевом разряде и изменения проводимости, химического состава мезосферы во время развития высотного разряда с соответствующим изменением в динамике электрического поля. Предложена модель для расчета глобального распределения спрайтов по данным сети грозопеленгации WWLLN, которая позволяет выделить региональные и сезонные особенности развития спрайтовой активности, что упростит планирование наблюдательных компаний за высотными разрядами. Моделирование на экспериментальном стенде «Спрайт» показало возможность инициации в лабораторных условиях разрядов в градиенте давления в импульсном режиме, которые по параметрам подобия в значительной мере повторяют высотные разряды, что в совокупности с разносторонней диагностикой позволит более глубоко разобраться в особенностях инициации и динамики развития спрайтов и других типов разрядов.

Методы исследования и степень достоверности результатов

Для решения задач, поставленных в рамках работы, применялось численное моделирование для проведения расчетов с использованием аксиально-симметричной самосогласованной плазмохимической модели, расчетов по глобальному распределению спрайтов и методы лабораторного исследования физических процессов, происходящих внутри вакуумной камеры при реализации разряда в градиенте давления. Все полученные результаты обладают высокой степенью достоверности и являются обоснованными. Достоверность получаемых результатов обеспечивается применением признанных методов и оригинальных подходов, взаимодополняющих друг друга. Результаты по теме диссертации опубликованы в рецензируемых российских и зарубежных научных журналах, докладывались на международных и всероссийских конференциях, обсуждались на семинарах ИПФ РАН, РГГМУ.

Апробация работы

Результаты выполненных исследований докладывались на семинарах в ИПФ РАН, РГГМУ на международной конференции “Topical problems of nonlinear wave physics” (Нижний Новгород, 2005, 2008, 2014, 2017, 2021), на ассамблее Международного союза геодезии и геофизики IUGG (Перуджа, 2007, Прага, 2015, Монреаль, 2019, Берлин, 2023), на всероссийской научной школе “Нелинейные волны” (Нижний Новгород, 2006, 2008, 2010, 2012, 2016, 2018, 2020, 2022), на всероссийской конференции молодых ученых “Состав атмосферы и электрические процессы” (Москва, 2004, Нижний Новгород, 2005, Нижний Новгород, 2007, Шепси, 2015, Борок 2017, Борок 2020), на всероссийской конфе-

рещии молодых ученых “Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы” (Звенигород, 2009, Борок, 2011), на всероссийской конференции “Глобальная электрическая цепь” (Борок, 2019, 2021), на международном симпозиуме “Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы” (Москва, 2023), на международной конференции по атмосферному электричеству ICAE (Пекин, 2007, Рио-де-Жанейро, 2011, Оклахома, 2014, Нара, 2018, Тель-Авив, 2022), на ассамблее союза геомагнетизма и аэронауки “IAGA – 2009” (Сопрон, 2009), на международной конференции динамические дни в Европе “Dynamics Days Europe – 2010” (Бристоль, 2010), на летней школе грозовые эффекты в атмосферно-ионосферной системе “TEA-IS” (Малага, 2012, Коллиур, 2014, Копенгаген, 2016), на международной конференции по математической геофизике международного союза по геодезии и геофизике (Нижний Новгород, 2019), на четырнадцатой международной конференции “Физика плазмы в солнечной системе” (Москва, 2019), на 7 международной конференции “Frontiers of Nonlinear Physics - 2019”, (Нижний Новгород, 2019), на всероссийской конференции по атмосферному электричеству (Санкт-Петербург, 2012), опубликованы в журналах «Известия РАН. Физика атмосферы и океана» (4 статьи), «Известия Вузов. Радиофизика» (2 статьи), Journal of Atmospheric research (2 статьи), Journal of Atmospheric and Terrestrial physics (2 статьи), «Геомагнетизм и аэронаука» (1 статья), «Физика плазмы» (2 статьи), «Журнал технической физики» (1 статья), в сборнике Sprites, Elves and Intensive Lightning Discharge (1 статья).

Личный вклад автора

По теме диссертации опубликовано 17 основных публикаций (15 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК, см. список работ автора в конце диссертации) из них в 11 автор диссертации является первым автором, что подчеркивает его определяющий вклад в эти работы.

Создание аксиально-симметричной самосогласованной плазмохимической модели для описания влияния высотных разрядов на химический баланс атмосферы проводилось совместно с Ф.А. Кутериным. Идея исследования предложена Е.А. Мареевым. Постановка задачи, выбор системы химических реакций и начальных условий, анализ результатов, сравнение с экспериментальными данными были проведены автором. Непосредственное написание программного кода проведено Ф.А. Кутериным. В анализ результатов и написание статей внес вклад Е.К. Свечникова.

Разработка модели для описания глобального распределения спрайтов по данным сети грозопеленгации WWLLN была проведена совместно с Н.В. Ильиным и Е.К. Свечниковой. Идея параметризации предложена автором. Расчеты проведены Н.В. Ильиным. Анализ результатов моделирования сделан автором. Написание статей проведено совместно с Е.К. Свечниковой.

Экспериментальное исследование высотных разрядов на стенде «Спрайт» было проведено совместно с М.Е. Гуциным, А.В. Стриковским, С.В. Коробковым, И.Ю. Зудиным, К.Н. Лоскутовым, В.И. Гундориным, А.В. Костровым.

Идея создания экспериментального стенда предложена Е.А. Мареевым и автором. Автор непосредственно принимал участие в исследовании на всех его стадиях: первоначальном монтаже установки, проведении экспериментов, анализе результатов и написании статей.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и двух приложений. Общий объем работы 219 страниц, включая 104 рисунка и список литературы из 156 наименований.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Развитая радиально-симметричная самосогласованная плазмохимическая модель спрайта позволяет связать процессы переноса заряда в молниевом разряде облако – земля в тропосфере с разрядными явлениями в мезосфере в дневных и ночных условиях, сопровождающимися возмущением химического баланса и проводимости. Уменьшение проводимости на начальной стадии разряда способствует инициации спрайта, а последующее увеличение приводит к вытеснению электрического поля и формированию тороидальной структуры разряда.

2. Развитие спрайта в ночных условиях при ИДМ = 720 Кл·км приводит к увеличению концентрации заряженных частиц до 2 порядков и интенсивному излучению в первой и второй положительных полосах молекулярного азота.

3. Время релаксации возмущения концентрации электронов после ночного спрайта изменяется с высотой от нескольких секунд на 75 км до 1000 с на 82 км, а радиус возмущения концентрации электронов растет с 10 км на высоте 75 км до 40 км на 79 км.

4. Инициация спрайта/гало в дневных условиях возможна при ИДМ 3750/2750 Кл·км. Характерная высота инициации разрядов определяется проводимостью атмосферы и смещена вниз на 20 км относительно ночных условий.

5. Развитая модель для расчета глобального распределения спрайтов по данным сети грозопеленгации WWLLN позволяет получить региональное и сезонное распределение разрядов с существенно более высоким разрешением, чем с использованием спутниковых и других видов наблюдений.

6. Среднее количество спрайтов, рассчитанных по данным WWLLN, составляет 870 разрядов в день, из них 0,93% отрицательных, при этом наблюдается значительная сезонная изменчивость от 625 в октябре до 1255 в мае.

7. Рассчитанное по предложенной модели количество спрайтов над сушей и океаном в 2016 году распределено неравномерно: с января по апрель примерно совпадает, а с мая по декабрь количество разрядов над океаном выше на 20% и более, что приводит к среднему за год распределению суша/океан 41,4/58,6%.

8. Экспериментальный стенд «Спрайт» в режиме импульсного напуска воздуха позволяет реализовать перепад давления до 100 раз на межэлектродном

промежутке 80 см при сохранении дозвукового режима распространения фронта давления.

9. Полученный в результате лабораторного моделирования разряд в градиенте давления по параметрам подобия для приведенного электрического поля, концентрации электронов, плотности тока, размера филамента соответствует спрайту.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении освещается современное состояние рассматриваемых в диссертации проблем, обосновывается актуальность темы работы и ее практическая значимость, кратко излагается ее содержание, формулируются положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлена самосогласованная радиально-симметричная плазмохимическая модель влияния спрайта на состав ночной мезосферы и спрайта/гало на состав дневной мезосферы.

В § 1.1 приведено описание созданного программно-вычислительного комплекса (ПВК), используемого при моделировании влияния высотных разрядов на состав атмосферы. ПВК состоит из препроцессора, вычислительного блока и разработанных средств анализа проведенных вычислений. Препроцессор предназначен для усвоения списка химических реакций, преобразования его в систему дифференциальных уравнений, генерации программной функции с одновременным контролем повторяемости реакций, законов сохранения массы и заряда. Вычислительный блок реализован на базе Matlab с использованием функции `ode15s`, предназначенной для интегрирования «жестких» систем обыкновенных дифференциальных уравнений методом обратного дифференцирования с использованием переменного шага по времени. Описаны применяемые параметризации для электрического поля, температуры электронов и проводимости во время высотного разряда.

В § 1.2 предложена система из 267 химических реакций для 61 химической компоненты, предназначенная для описания химических взаимодействий в ночной мезосфере. Учтены основные ионы, электроны, нейтральные компоненты, включая возбужденные состояния азота и кислорода. Выбраны временные и амплитудные характеристики тока в молниевом канале, приводящие к максимальному значению силы тока 121,7 кА и ИДМ 720 Кл·км. Расчеты проводятся в диапазоне 60–90 км по высоте с шагом 100 м, по радиусу до 60 км с шагом 1 км.

В § 1.3 проведен подробный анализ результатов моделирования для ИДМ = 720 Кл·км, приводящего к инициации спрайта в условиях ночной мезосферы. Пробойное поле 128 Тд достигается на высоте 81 км через 0,4 мс после начала разряда в тропосфере с максимумом 185 Тд на высоте 79 км через 0,3 мс после начала спрайта (рис. 1). На 80 км через 1 мс формируется лавина элек-

тронов, что приводит к росту проводимости и вытеснению поля. Эффект особенно заметен на 79–81 км, где быстрое вытеснение поля приводит к формированию тороидальной структуры разряда: через 1,2 мс на оси разряда электрическое поле полностью вытесняется, а на расстоянии 20 км по радиусу разряд продолжается. Значительное возмущение проводимости наблюдается на 75–90 км по высоте и до 35 км по радиусу. На высотах 75–82 км проводимость существенно снижается на начальной стадии разряда вследствие роста температуры электронов и частоты столкновений. Развитие лавинной ионизации приводит к резкому росту концентраций заряженных частиц и проводимости. На 75 км релаксация возмущения проводимости происходит за несколько секунд, на 80–83 км несколько сотен секунд. На 83–86 км во время разряда концентрация электронов и проводимости падает вследствие увеличения роли реакций прилипания, с последующим плавным восстановлением к начальному значению.

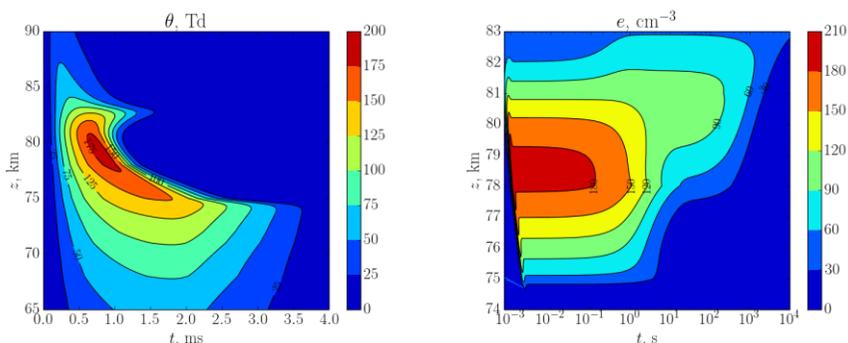


Рис. 1. Электрическое поле на оси (слева) и концентрации электронов (справа)

Значительное возмущение концентрации электронов происходит на 74,5–86,5 км в области с радиальным размером до 30 км (рис. 1). Концентрация электронов увеличивается в нижней части разряда на 74,5–82,5 км и уменьшается в верхней части на 82,5–86,5 км. Основной сток для электронов во время спрайта вызван прилипанием электронов к молекулярному кислороду в электрическом поле с образованием O^- . Максимальное возмущение концентрации электронов на 78 км составляет 198 cm^{-3} , что более чем на 2 порядка больше равновесной. Время релаксации электронов увеличивается с ростом высоты: от нескольких секунд на 75 км до 1000 с на высоте 82 км. Радиус возмущения концентрации электронов растет с 10 км на высоте 75 км, до 40 км на 79 км. Накопление O_2^- идет при развитии разряда и при дальнейшей конверсии других отрицательных ионов. Значительное возмущение концентрации O_2^- наблюдается на высотах от 74,5 до 84 км, с радиусом до 42 км (рис. 2). На высоте 74,5–76,5 км время релаксации – несколько десятков секунд, на 76,5–81,3 км – несколько сотен секунд, выше 81,5 км – не более секунды. Максимальное возмущение концентрации O_2^- смещено к низу на высоту 76–78 км и составляет 135 cm^{-3} . На 76–78 км наблюдается пик возмущения концентрации O_2^- после окончания разряда, вызванный

ионной конверсией. На 75 км радиус возмущения концентрации O_2^- не более 10 км, на 80 км более 40 км. Основной источник O^- – это диссоциативное прилипание электронов в электрическом поле к молекулярному кислороду, что является основным стоком для электронов. Время релаксации возмущения концентрации O^- мало, и он быстро исчезает после вытеснения поля. Максимальное возмущение концентрации на 78 км составляет 30 см^{-3} и достигает 30 км по радиусу через 1,5 мс после начала спрайта. Концентрация O_2^+ достигает 255 см^{-3} на 78 км. Нижняя граница возмущения на 75 км резкая, а верхняя размытая, и небольшие возмущения наблюдаются до 90 км (рис. 2). На 75 км радиус возмущения 10 км, а на 78 км уже более 30 км. Релаксация O_2^+ занимает 100 секунд на 82 км и несколько секунд на 75 км. Концентрация N_2^+ в невозмущенных условиях ночной мезосферы мала. Заметное возмущение концентрации N_2^+ наблюдается на 73–82 км с радиусом 40 км только во время разряда при ионизации молекулярного азота в электрическом поле и быстро релаксирует из-за ионной конверсии в O_2^+ . Максимальное значение 105 см^{-3} достигается на 78 км.

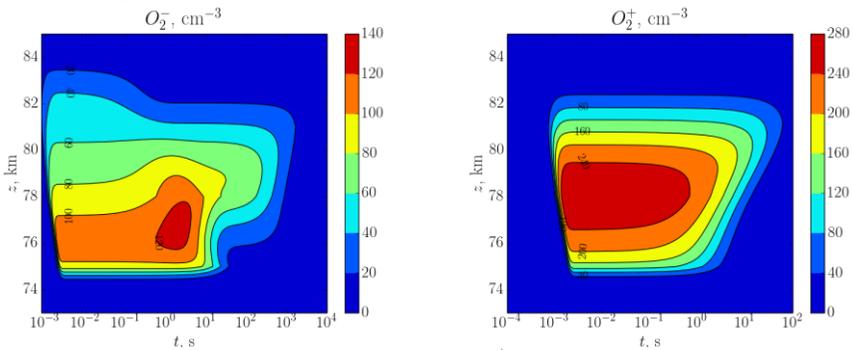


Рис. 2. Концентрации O_2^- (слева) и O_2^+ (справа) на оси разряда

Основное излучение спрайта на всех высотах приходится на первую (1PN_2) и вторую (2PN_2) положительные полосы азота (рис. 3). Излучение в 2PN_2 , связанное с быстрым переходом из $N_2(C)$ в $N_2(B)$, приходится на 75–81,5 км, радиальный размер излучения до 30 км, максимум $1,35 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ на оси разряда на высоте 78 км. Основные источники для $N_2(B)$ это переход из $N_2(C)$ и возбуждение азота при столкновении с электронами в электрическом поле, а основной сток – излучение в 1PN_2 . Высотный диапазон возмущения $N_2(B)$ от 75 до 81,5 км, а максимальное возмущение 405 см^{-3} на 78 км. $N_2(A)$ имеет самое большое время жизни из всех рассмотренных возбужденных состояний молекулярного азота. Максимальная скорость объемной эмиссии 1PN_2 $6,4 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ на оси спрайта на 78 км. Область возмущения концентрации $N_2(A)$ 74,5–82,5 км, максимальное возмущение достигает $1,73 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$. С увеличением высоты время релаксации возмущения увеличивается с 2 мс на 74,5 км до 5 мс на 82,5 км. Радиус возмущения для $N_2(B)$ и $N_2(A)$ достигает 35 км. Интенсивное излучение на оси спрайта на 78 км начинается через 0,9 мс после

начала разряда облако-земля. К 1,2 мс поле распространяется до 22 км по радиусу, а на оси вытесняется, и интенсивность излучения резко падает.

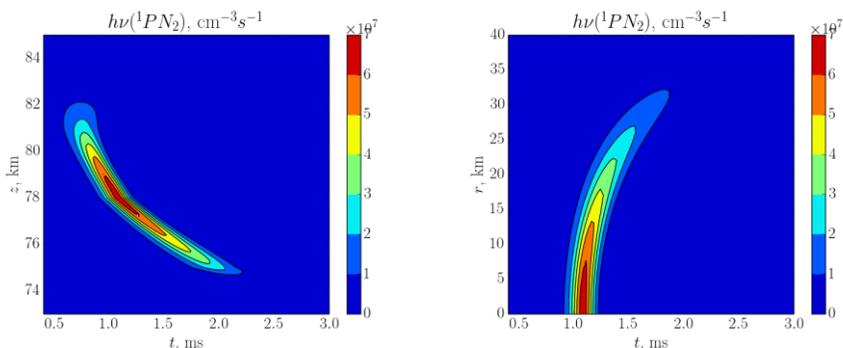


Рис. 3. Высотная (слева) и радиальная на 78 км (справа) зависимости объемной скорости эмиссии фотонов в первой положительной полосе молекулярного азота

В § 1.4 проведено сравнение полученных численных результатов с экспериментальными данными. Построена зависимость радиального размера области диффузного разряда от максимального тока в молниевом канале и ИДМ. Модель выдает удовлетворительное соответствие экспериментальным данным для средних значений ИДМ, наиболее характерных для спрайтов. Проанализировано отношение интенсивностей излучения в 2PN_2 и 1PN_2 на различных высотах и среднее для всего исследуемого разряда. Максимальное значение отношения интенсивностей 0,25, а для всего разряда 0,21, что немного превышает данные экспериментальных наблюдений [37].

В § 1.5 рассмотрена параметризация для моделирования спрайта/гало в дневных условиях. Вопрос о возможности инициации спрайтов/гало в дневных условиях остается открытым вследствие отсутствия оптической регистрации. На существование дневных спрайтов указывают электромагнитные измерения, дающие основания предполагать наличие спрайтов/гало при характерном значении ИДМ 2000–5000 Кл·км [38]. В химический блок были добавлены 28 фотохимических реакций. Моделирование показало, что для указанных ИДМ наблюдается 2 сценария. При малых ИДМ поле достигает 100–110 Тд, что ниже пробойного поля. Лавины электронов не формируется, но наблюдается свечение и незначительное возмущение химического баланса, что в целом соответствует гало. При высоком ИДМ поле превышает 128 Тд и формируются условия для развития спрайта, со значительным возмущением ионного состава и высокой светимостью.

В § 1.6 представлено моделирование гало в дневных условиях при ИДМ 2750 Кл·км. Электрическое поле ускоряет реакции диссоциативного отщипывания электронов от молекулярного азота и кислорода, с одновременным ускорением прилипания к кислороду с образованием O^- , что приводит к исчезновению сво-

бодных электронов (рис. 4). O^- быстро взаимодействует с молекулярным кислородом и к 10 мс после начала нарастания поля весь отрицательный заряд накапливается на O_2^- . В отсутствие поля происходит отлипание заряда с O_2^- , через реакции с O , $O_2(a)$ и при фотохимическом отлипании. Концентрации электронов и O_2^- возвращаются к невозмущенным значениям за 0,5 с, небольшое возмущение концентрации CO_3^- релаксирует за 200 с. Ионизации молекулярных азота и кислорода в электрическом поле приводит к формированию N_2^+ и O_2^+ , являющимися промежуточными в быстрой цепочке образования ионосвязок и возмущению $H_9O_4^+$ с 175 до 202 cm^{-3} к 35 секунде с последующей релаксацией к невозмущенному состоянию за 200 с.

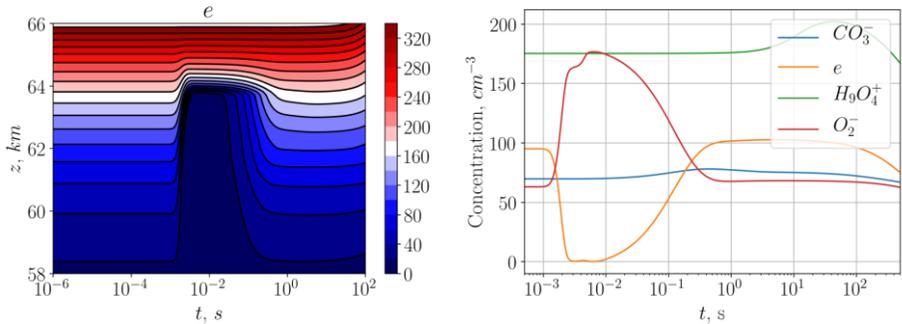


Рис. 4. Концентрации электронов на оси разряда (слева) и динамика основных ионов и электронов на высоте 62 км (справа)

Взаимодействие электронов с молекулярным азотом приводит к образованию возбужденных состояний азота с малым временем релаксации. Выделяется $N_2(A)$ и $N(^2D)$ с максимальными концентрациями 1400 cm^{-3} и 800 cm^{-3} . Отношение интенсивности эмиссий ${}^2PN_2/{}^1PN_2$ около 0,16, что ниже, чем для спрайта в ночных условиях. Концентрация N возмущается в 3 раза, а время релаксации составляет 300 с. Взаимодействие электронов с молекулярным кислородом в электрическом поле приводит к образованию существенного количества $O(^1S)$ и $O(^1D)$. Сток $O(^1S)$ приводит к образованию $O(^1D)$, что поддерживает его концентрацию, но после релаксации поля оба быстро релаксируют.

В § 1.7 представлено моделирование дневного спрайта при ИДМ 3750 Кл·км. Начальная стадия разряда в подкритических полях происходит аналогично га-ло: электроны эффективно прилипают к кислороду. Далее электрическое поле на высоте 56–64 км превышает 128 Тд, что формирует условия для образования лавины электронов, с ростом концентрации электронов до 1400 cm^{-3} , концентрации O_2^- до 1500 cm^{-3} . Вытеснение поля приводит к прилипанию электронов: концентрация электронов второй раз резко падает и почти весь отрицательный заряд скапливается на O_2^- с максимальной концентрацией 2800 cm^{-3} на 62 км (рис. 5). Концентрация O^- резко возрастает при достижении электрическим полем критического значения и на 0,5 мс достигает 100 cm^{-3} . Релаксация O_2^- про-

исходит через отлипание электронов и образование CO_3^- . Максимальная концентрация электронов 1250 см^{-3} достигается к 0,5 с, CO_3^- возмущается до 900 см^{-3} к 8 с. O_2^+ появляется во время спрайта и к 2 мс достигает концентрации 2800 см^{-3} на 62 км, накапливая почти весь положительный заряд, при ионизации O_2 и N_2 . С O_2^+ начинается цепочка реакций, приводящая к формированию ионов-связок (рис. 6). Длительность процесса возмущения возрастает с ростом молярной массы: H_9O_4^+ достигает 2300 см^{-3} к 30 с.

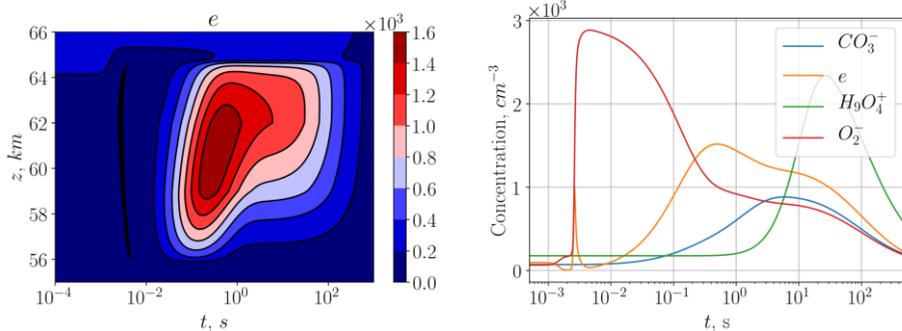


Рис. 5. Концентрация электронов (слева) и основные ионы на 62 км (справа)

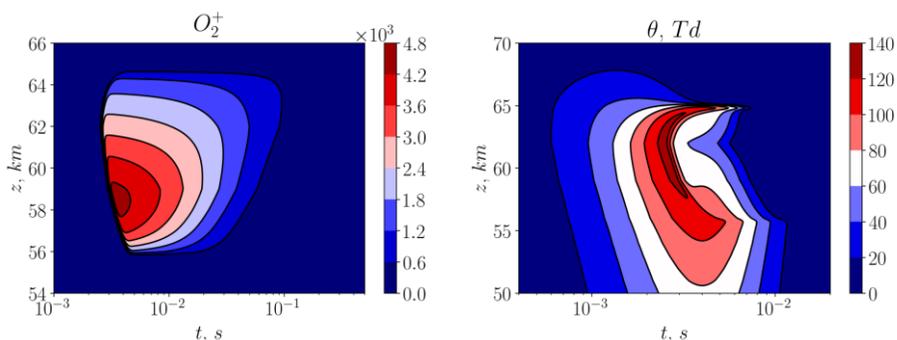


Рис. 6. Концентрации O_2^+ (слева) и нормированное электрическое поле (справа)

В области 56–64 км проводимость сначала падает из-за прилипания электронов, потом происходит резкий скачок на 2–3 порядка во время образования лавины электронов, что приводит к быстрому вытеснению поля. На стадии релаксации вместе с ростом концентрации электронов синхронно растет проводимость, достигая максимума к 0,5 с. Условия для образования лавины электронов создаются на расстоянии до 20 км от оси разряда, а на расстоянии еще 10 км электрические поля достигают 100–110 Тд, то есть реализуются условия, описанные для гало. Возмущение концентрации $\text{N}_2(\text{A})$ и $\text{N}(\text{D})$ достигает $2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ и 10^5 см^{-3} , но быстро релаксирует. Возмущение $\text{O}(\text{S})$ длится до 30 мс,

достигает $2,5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ на 62 км, а максимальное значение $4,6 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ наблюдается на 58 км. Радиальный размер возмущения $N_2(A)$ и $O(^1S)$ определяется полем и составляет 20 км. $N_2(A)$ остается основным источником для $N(^2D)$ и молекулярного азота. Характерное время жизни для $N(^2D)$ около 1 мс с максимальным возмущением $1,5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ на высоте 59 км. Возмущение N на высоте 58 км достигает $2,6 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ и релаксирует более 300 с. Основное свечение происходит в 1PN_2 и 2PN_2 . Интенсивное излучение наблюдается в центральной части спрайта с радиусом до 20 км на 56–64 км.

В § 1.8 представлены выводы к Главе 1. Материалы Главы 1 опубликованы в работах 1*–9*, 15*.

Во второй главе развит подход для параметризации спрайтов на основе данных глобальной гронопеленгационной сети WWLLN (World Wide Lightning Location Network).

В § 2.1 рассмотрены параметризации процессов, приводящих к инициации спрайтов. WWLLN предоставляет данные о месте, времени и энергии молниевых разрядов. Ночные условия соответствуют заходу солнца на высоте 90 км. WWLLN не содержит информации о полярности молниевых разрядов, поэтому определим $R = 10\%$ как долю положительных разрядов относительно всех разрядов облако – земля [39–41]. Основываясь на данных системы гронопеленгации NLDN для 13,1 миллиона молний за 3 года работы [42] определим для отрицательных разрядов средний ИДМ как $\langle \text{ИДМ} \rangle = 5\sqrt{I}$, для положительных $\langle \text{ИДМ} \rangle = 15\sqrt{I}$. Введем функцию $f(x) = 4x \cdot \exp(-2x)$ – плотность вероятности для распределения ИДМ, где переменная x – это модуль ИДМ молниевых разрядов, нормированный на среднее значение. Предложенная $f(x)$ удовлетворительно описывает приведенные в [42] данные (рис. 7).

Инициация спрайтов носит вероятностный характер и высокий ИДМ только необходимое условие. Полярность разряда крайне важна: для положительных разрядов пороговое значение ИДМ оказывается значительно меньше, чем для отрицательных [43]. В работе [44] показано, что минимальное значение для инициации положительного спрайта 200 Кл·км, для отрицательного 320 Кл·км, а наличие неоднородностей в мезосфере может привести к инициации спрайтов при меньших значениях ИДМ. Вероятность инициации спрайта от разрядов с разной полярностью определена как $p = (1 + \exp(-(ИДМ - a)/b))^{-1}$. Кривая для положительных разрядов является основной, а для отрицательных получена сдвигом на 200 Кл·км в сторону увеличения ИДМ (рис. 8). Базовые параметризации соответствуют параметрам $a = 400$ Кл·км для положительных разрядов, $a = 600$ Кл·км для отрицательных разрядов, $b = 400$ Кл·км для обеих полярностей.

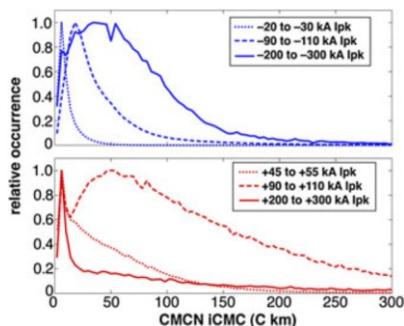


Рис. 7. Нормированное распределение ИДМ для трех диапазонов пиковых токов для отрицательных (сверху) и положительных (снизу) молниевых разрядов [42]

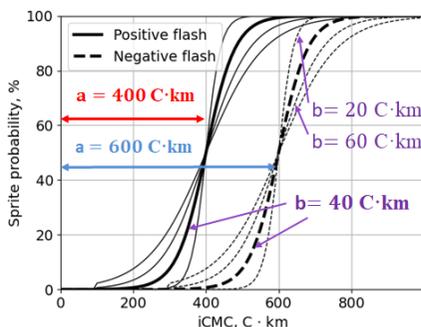


Рис. 8. Параметризация вероятности инициации спрайта для положительных (сплошная) и отрицательных (пунктир) разрядов

В § 2.2 представлены результаты моделирования глобального распределения спрайтов по данным за 2016 год. Система WWLLN регистрирует около 300 вспышек разной мощности в минуту, но ограничимся только мощными с током более 15 кА, общее количество которых $9,6 \cdot 10^7$ разрядов (суша $4,75 \cdot 10^7$, океан $4,84 \cdot 10^7$) (рис. 9). Среднемесячное количество разрядов $8 \cdot 10^6$ событий, минимум в феврале $5,8 \cdot 10^6$, максимум в мае $9,16 \cdot 10^6$. С января по апрель количество разрядов над океаном малое, и преобладают разряды над сушей, с мая по декабрь – наоборот. Распределение токов над сушей имеет пик на 26 кА, над океаном – на 28 кА, и в среднем разряды над океаном более мощные. Применение параметризации для ИДМ показывает, что для положительных разрядов максимум приходится на 50 Кл·км, для отрицательных менее 20 Кл·км. С 180 Кл·км положительных разрядов больше, чем отрицательных. Полученное распределение соответствует натурным данным для высоких ИДМ [42, 45], что косвенно подтверждает правильность выбора параметра $R = 10\%$.

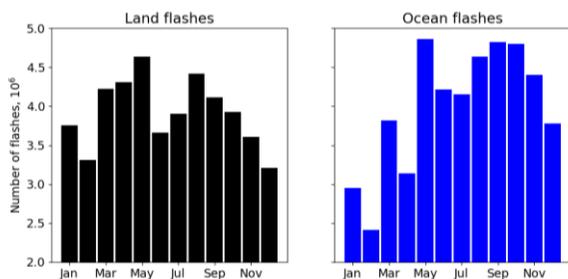


Рис. 9. Распределение молниевых разрядов над сушей (слева) и океаном (справа)

Минимальное количество отрицательных спрайтов наблюдается в августе-октябре (63,55,66), максимальное в январе – марте (509, 383, 408), а в среднем по году 242 события. Среднее значение ИДМ за год для отрицательных спрайтов – 669 Кл·км, минимальное в начале осени – 630 Кл·км, максимальное – 698 Кл·км в январе, что хорошо согласуется с [46], где для 69 зафиксированных отрицательных спрайтов средний ИДМ составляет 709 Кл·км. Максимальное количество положительных спрайтов в мае – $38,9 \cdot 10^3$, минимальное количество в октябре – $19,3 \cdot 10^3$. Высокое количество спрайтов в мае коррелирует с максимальным по году количеством молниевых разрядов в мае. В октябре $8,9 \cdot 10^6$ молниевых разрядов, что лишь на 5% меньше среднего значения по году, но существенно снижен средний ток и средний ИДМ. Средний ИДМ за год для положительных спрайтов 489 Кл·км, что выше данных натурных наблюдений [46], рассчитанных для суши.

Спрайтовая активность над океаном выше в течение всего года для отрицательных разрядов (рис. 10). Максимальная разница, 189 отрицательных спрайтов, наблюдается в июне в абсолютном и в относительном выражении. В феврале наблюдается минимум относительного преобладания спрайтов над океаном, что совпадает со статистикой для положительных спрайтов. В сезонном распределении суша/океан для положительных спрайтов выделяются 2 периода: январь – апрель с примерно равным распределением и май – декабрь с преобладанием над океаном 20% и более.

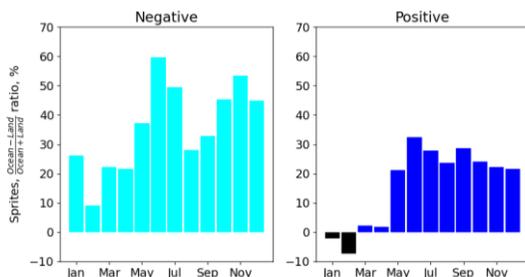


Рис. 10. Относительное распределение отрицательных (слева) и положительных (справа) спрайтов

Общее количество отрицательных спрайтов за год составляет 2906, положительных 311007 событий. Доля отрицательных спрайтов 0,93%, что хорошо соотносится с известным фактом об их редкости [47]. В статье [21] обсуждается вопрос о возможности развитии стримеров в области спрайта в зависимости от параметров родительской молниевой вспышки и делается вывод о 5% теоретическом пределе для отрицательных спрайтов. В статье [44] утверждается, что развитие стримеров при отрицательном спрайте сложно детектировать из-за низкой светимости и количество отрицательных спрайтов должно быть существенно ниже теоретического предела в 5%. В статье [48] показано, что нижняя теоретическая граница для отрицательных спрайтов – 450 Кл·км, и их доля не должна превышать 0,5% от общего количества.

Среднее значение количества спрайтов в день около 870 или 0,6 спрайта в минуту, из них 58,6% над океаном и 41,4% над сушей. Главные зоны с высокой спрайтовой активностью наблюдаются в Карибском бассейне, Юго-Восточной Азии и над Африкой. Спрайты очень редко встречаются в Северной Африке, Южной Атлантике и южной части Тихого океана. Самый высокий показатель спрайтовой активности наблюдается в Южноамериканском регионе с мая по июль.

Полученное глобальное распределение в целом качественно соответствует результатам трехлетних спутниковых наблюдений [17] и находится в количественном согласии в некоторых областях. Для Центральной Африки моделирование дает плотность на порядок меньше, чем спутниковые наблюдения, что может быть связано с особенностями размещения приемных пунктов системы WWLLN (рис. 11).

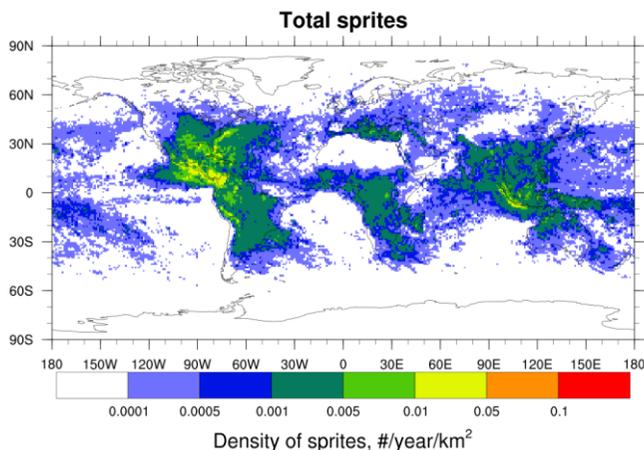


Рис. 11. Глобальное распределение спрайтов за 2016 год

В § 2.3 проведено исследование чувствительности предложенной параметризации спрайтов от качества начальных данных WWLLN и вариации парамет-

ров модели. Система WWLLN выдает информацию об энергии разряда через RMS_Energy, которая имеет погрешность определения в 25% [49]. Расчеты, проведенные с добавлением/вычитанием погрешности, приводят к увеличению количества спрайтов на 31% и уменьшению на 37%. WWLLN не может зафиксировать все молнии. По данным [49], WWLLN фиксирует лишь 11% от всех разрядов облако – земля, а для разрядов с пиковым током 30 кА и более детектируется 30%. Скорее всего, влияние спрайтов на статистику не должно быть выше 20–30% в сторону увеличения, так как важны разряды с высокими токами. Учет относительной эффективности детектирования дает увеличение количества спрайтов на 1,3%.

Для базовых расчетов доля положительных разрядов выбрана $R = 10\%$. Локальным летом количество положительных разрядов находится в диапазоне 5–10%, зимой увеличивается до 20+%, а с увеличением широты сезонная вариабельность параметра R проявляется сильнее [40, 50]. Учет этой особенности для R увеличивает количество спрайтов на 4,7%. В базовом сценарии $\langle \text{ИДМ} \rangle = 15\sqrt{I}$ для положительных разрядов. При сохранении формы зависимости проведено изменение коэффициента 15 на 13, 14, 16, 17. В результате количество спрайтов изменится на –37%, –20%, +21%, +44%.

Форма зависимости вероятности инициации спрайта в зависимости от ИДМ не может быть установлена точно, поэтому важно проанализировать влияние изменения формы и положения кривой. Наклон кривых зависит от параметра b и в базовом сценарии равен 40 (см. рис. 8). Увеличение параметра b приводит к более пологому росту вероятности инициации спрайта: с одной стороны, увеличивает вероятность для малых ИДМ, с другой стороны, уменьшает вероятность для больших ИДМ. Уменьшение параметра b с 40 Кл·км до 20 Кл·км приводит к уменьшению количества спрайтов на 16%, а увеличение до 80 Кл·км увеличивает количество спрайтов на 71,5% для положительных спрайтов. Для отрицательных спрайтов эти изменения параметра b приводят к уменьшению на 21% и увеличению на 129% относительно базового сценария. Параметр a определяет положение точки с вероятностью инициации спрайта в 50%. Уменьшение параметра a на 100 Кл·км приводит к увеличению количества положительных спрайтов на 145%, отрицательных спрайтов на 190%. Увеличение параметра a на 100 Кл·км приводит к уменьшению количества положительных спрайтов на 56%, и отрицательных на 60%.

В § 2.4 представлены выводы к Главе 2. Материалы Главы 2 опубликованы в работах 16*–17*.

В третьей главе приведены результаты моделирования спрайта на экспериментальном стенде «Спрайт». Показана возможность лабораторной реализации разряда в градиенте давления, повторяющего структурные особенности и общие закономерности в развитии спрайта с сохранением безразмерных параметров.

В § 3.1 приведено описание экспериментального стенда «Спрайт», представляющего собой металлическую цилиндрическую вакуумную камеру длиной

2 м, диаметром 1,6 м, объемом около 4 м^3 (рис. 12). Камера позволяет работать при давлениях от 10^{-5} Торр до атмосферного. На стенде смонтирован откачный пост Pfeiffer WD400, состоящий из насоса Рутса ОКТА 500 и двухступенчатого пластинчато-роторного форвакуумного насоса Duo 65. Опытным путем было установлено, что в диапазоне 0,1–10 Торр становится возможным реализовать высокий перепад давления в межэлектродной промежутке, сохранить дозвуковую скорость движения напускаемого газа и реализовать структуру разряда, характерную для спрайтов.

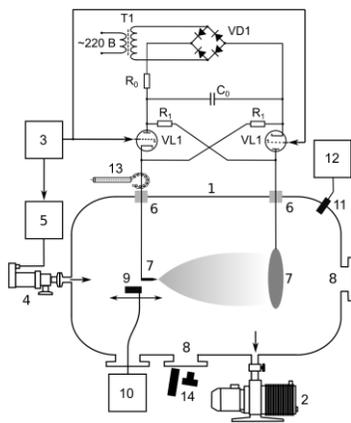


Рис. 12. Экспериментальный стенд «Спрайт». Общий вид (слева), принципиальная схема (справа). 1 – вакуумная камера, 2 – система откачки, 3 – генератор задержанных импульсов, 4 – импульсный газовый клапан, 5 – блок управления клапана, 6 – высоковольтные вакуумно-плотные вводы, 7 – электроды разряда, 8 – кварцевые окна, 9 – подвижный датчик давления, 10 – блок измерения нестационарных вариаций давления, 11 – стационарный датчик давления, 12 – вакуумметр, 13 – пояс Роговского, 14 – средства оптической диагностики

На стенде «Спрайт» имеется 3 основных окна, для организации оптических наблюдений. На расстоянии 1,8 метра на боковой стенке сделаны высоковольтные вводы, через которые потенциал подводится непосредственно к электродам. Для контролируемого напуска рабочего газа используется патрубок в середине торцевой стенки, оснащенный электромагнитным клапаном КВУМ-16. Контроль давления в камере осуществляется стационарным широкодиапазонным датчиком вакуума Pfeiffer PKR251 с активным блоком управления RVC300. Для измерения нестационарного профиля давления используется манометрическая лампа ПМИ-10-2, корпус которой был укорочен согласно методике, изложенной в [51].

Система синхронизации состоит из шестиканального импульсного генератора, способного задавать задержку между импульсами от 0,1 мкс до 32 мс.

Высоковольтная система состоит из блока питания с плавной регулировкой выходного напряжения от 0 до 10 кВ, накопителя емкостью $C_0 = 1,2$ мкФ с максимальной запасенной энергией 60 Дж, системы тиратронных ключей на базе тиратронов ТГИ1-1000/25. Потенциал подается на промежуток между электродами. Один из электродов представляет собой стержень из нержавеющей стали диаметром 1,2 см с острием, ориентированным вдоль оси камеры, второй электрод – плоский диск диаметром 40 см, установленный перпендикулярно оси камеры напротив острия стержневого электрода. Оба электрода закреплены на трубчатых изоляторах длиной 80 см и находятся на максимально возможном удалении от стенок камеры. Подключение высоковольтной системы к сети переменного напряжения производится через разделительный трансформатор: конденсаторная батарея, тиратронные ключи и электроды гальванически развязаны с корпусом установки, что позволяет локализовать разряд между электродами и минимизировать утечку разрядного тока по металлической камере на землю.

Система регистрации состоит из фотоэлектронного умножителя ФЭУ-84-3, калиброванных поясов Роговского, высокоскоростной фотокамеры Photron UX100 с максимальной скоростью записи 800 000 кадров/с, фотокамер Pentax K-5 и Sony-NEX F3, одноканального интерферометра с рабочей частотой 27 ГГц, спектрометра МДР-204, камеры с быстрым затвором для получения изображений разряда на выдержках до 1 нс, в том числе, в режиме двухкадровой съемки.

В § 3.2 приведены результаты экспериментов в воздухе с малым перепадом давления. Для создания градиента давления на разрядном промежутке выбран способ импульсного напуска. Осциллограммы, полученные на выходе манометрического преобразователя, показывают движение фронта давления со скоростью около 230 м/с. Наиболее сильный градиент давления на межэлектродном промежутке, создающий перепад давления в 5 раз, регистрируется в момент времени $\sim 12,5$ мс после открывания клапана импульсного напуска (рис. 13). Именно этот момент времени использовался в экспериментах по высоковольтному пробою неоднородного воздуха в камере. Выбор фонового давления позволяет определить получаемый перепад давления и его градиент, так как напускаемый объем газа не изменяется.

Режим положительного разряда реализуется при подключении положительного вывода батареи к стержневому электроду. Во всех экспериментах подаваемое на разрядный промежуток напряжение составляет 6 кВ при обеих полярностях, что обеспечивает пробой воздуха во всем рабочем диапазоне давлений [52]. В отсутствие импульсного напуска воздуха, в однородном фоновом газе при давлении вплоть до $p_0 \sim 1$ Торр разряд носит диффузный характер, занимая весь объем конуса, образованного острием стержневого электрода и дисковым электродом, при обеих полярностях (рис. 14).

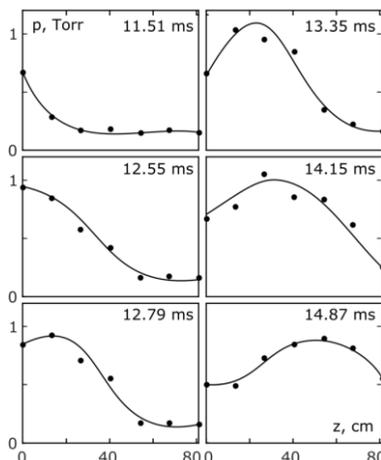
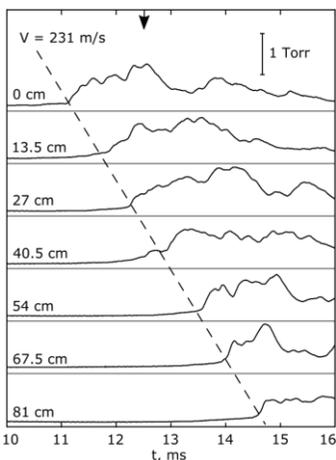


Рис. 13. Сигналы с датчика давления при импульсном напуске воздуха на оси камеры (слева) и восстановленный профиль давления (справа)

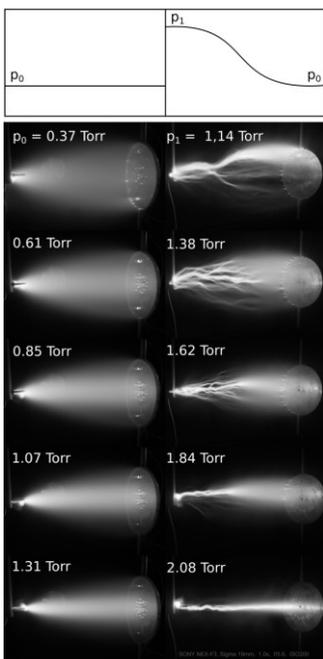


Рис. 14. Фотографии отрицательного разряда для различных значений фонового давления p_0 . Слева – разряд в однородном газе, справа – разряд в градиенте давления

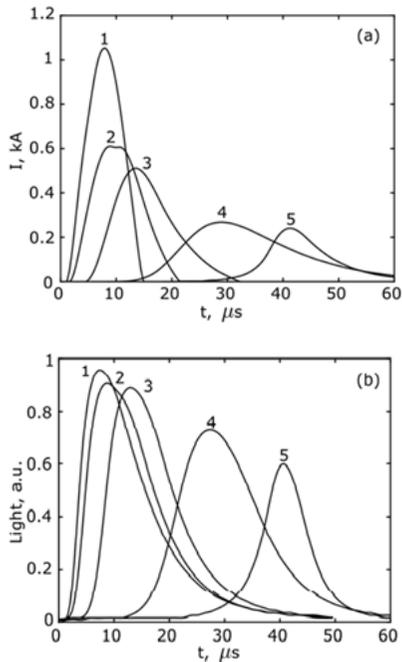


Рис. 15. Ток отрицательного разряда (сверху) и его интегральная светимость (справа) при различных фоновых давлениях p_0 : 1 – 0,37 Торр, 2 – 0,61, 3 – 0,85, 4 – 1,07, 5 – 1,31 Торр

В переходной области, при $1 \text{ Торр} < p_0 < 3 \text{ Торр}$, по мере увеличения давления поперечные размеры конуса уменьшались с переходом в тонкий разряд типа искрового при давлениях $p_0 > 3 \text{ Торр}$. Независимо от полярности, важной особенностью разряда в газе с градиентом давления являлась его структура: пучок отдельных ярких нитей (стримеров) в области стержневого электрода, в которой давление повышено, плавно переходящий в диффузное свечение в направлении дискового электрода, у которого давление оставалось фоновым. В диапазоне $p_0 = 0,3 - 1,3 \text{ Торр}$ структура разряда качественно сохранялась, уменьшался лишь объем области и интенсивность диффузного свечения. Для тех же значений напряжения и фонового давления отрицательный разряд у стержневого электрода характеризовался более разветвленной структурой. У положительного разряда наблюдалась контракция в области дискового электрода с выделением одиночного яркого разрядного канала, а у отрицательного разряда в области дискового электрода форма всегда оставалась диффузной.

В целом, длительность основной стадии пробоя составляла не более 30–40 мкс, максимумы тока и уровня светимости разряда достигаются в близкие моменты времени (рис. 15). За время протекания тока смещение газа не превышает 1 см, то есть разряд происходит при почти неизменных условиях по градиенту давления. Величина разрядного тока в максимуме $I_0 > 1000 \text{ А}$ при давлении $p_0 \sim 0,3 \text{ Торр}$. С повышением давления пиковый ток уменьшается, и пробой развивается позднее. При низких давлениях ($p_0 < 1 \text{ Торр}$) динамика разряда сходна для обеих полярностей. Для давления $p_0 = 1,31 \text{ Торр}$ максимум тока и светимости в положительном разряде достигается спустя почти 100 мкс, что на 60 мкс позже, чем для отрицательного разряда. Этот эффект связан с переходом к критическим электрическим полям согласно кривой Пашена. При отрицательном потенциале на острие, где напряженность поля выше, пробой происходит легче, чем при положительном разряде [53], что объясняет меньшую задержку.

В § 3.3 приводится обсуждение результатов, полученных при малом перепаде давления. Электрический разряд имеет сложную структуру, отличающуюся в деталях для положительного и отрицательного разряда. Величина и форма разрядного тока в рабочем диапазоне давлений приблизительно одинакова для обеих полярностей, сопротивление разрядного промежутка, которое можно оценить как $R \sim U/I_0$, где I_0 – величина разрядного тока в максимуме, а $U \sim U_0/2 \sim 3 \text{ кВ}$ – величина напряжения на конденсаторной батарее к моменту нарастания тока до максимального значения, изменяется от 2 Ом до 10 – 15 Ом в исследуемом диапазоне давлений. Характерные времена нарастания и релаксации разрядного тока близки к $\tau = RC_0$, где $C_0 = 1,2 \text{ мкФ}$ – емкость конденсаторной батареи: для минимального давления $\tau \sim 3 \text{ мкс}$, для максимального давления $\tau \sim 20 \text{ мкс}$.

У острия стержневого электрода радиус разрядного канала составляет $r \sim 1 - 2 \text{ см}$, плотность тока достигает значений $j \sim 100 \text{ А/см}^2$. В центральной области и вблизи плоского электрода при давлении фонового воздуха $p_0 < 1 \text{ Торр}$

плотность тока составляет не более $j \sim 10 \text{ А/см}^2$, а форма разряда близка к диффузной. Характерные значения частот физических процессов в разряде, оцененные для $E \sim 70 \text{ В/см}$ и рабочих давлений [53, 54], включая эффективную частоту ионизации ($\nu_i > 3 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$) и частоту упругих столкновений электронов с молекулами воздуха ($\nu_{em} > 1 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$), превышают обратную длительность разрядного процесса, $1/RC_0 < 2 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$, что позволяет применить дрейфовое приближение для скорости направленного движения электронов в разряде $v_e \sim (2-7) \cdot 10^7 \text{ см/с}$. В указанном диапазоне давлений параметр $E/p_0 \sim 50-200 \text{ В/(см·Торр)}$ или $150 - 600 \text{ Тд}$, что характерно для спрайтов.

В § 3.4 приводятся результаты моделирования в высоком градиенте давления. В конструкцию стенда было внесено изменение: внутри установки добавлен патрубок диаметром 11 см и длиной 80 см, позволяющий подводить напускаемый объем воздуха непосредственно к штыревому электроду. В такой конфигурации получается более высокая плотность газа около оси разряда. Формируется протяженный фронт давления с перепадом порядка 100 раз, при этом режим истечения газа приближается к сверхзвуковому, что нежелательно для моделирования эффектов в квазистационарной атмосфере. При давлении $p_0 \sim 0,1 - 0,5 \text{ Торр}$ удается сохранить дозвуковое течение напускаемого воздуха и получить высокий градиент.

Значения концентрации электронов, достигаемые в разряде при постоянном давлении $N_e \sim 10^{11}-10^{12} \text{ см}^{-3}$ (рис. 16). Максимум светимости и концентрации плазмы смещены относительно максимума тока на 2–3 мкс. При создании градиента давления, со стороны дискового электрода разряд остается диффузным, а у стержневого трансформируется в набор ярких филамент, разделенных темными областями. Средний диаметр филамент около 2 см, структура филаментированной области не повторяется. Филаменты плавно переходят в диффузное свечение, место переходной области соответствует фронту давления воздуха, то есть время задержки изменяет положение области перехода от стримерного к диффузному разряду (см. рис. 16). Форма получаемого в неоднородном воздухе разряда напоминает структуру свечения спрайта: одновременно возникает стримерная, диффузная и переходная области, что принципиально отличает данную постановку эксперимента от других.

Съемка, производимая на выдержках 1–10 нс, подтверждает диффузный характер разряда в области пониженного давления, и то, что все филаменты возникают и существуют одновременно. Изображение филамент не является результатом многократного экспонирования одиночных разрядных каналов в их динамике, и интегральные фотографии, производимые на длинной выдержке, адекватно отражают структуру разряда. Структура филамент складывается на стадии нарастания тока ($I/I_{\max} \sim 0,35$), и сохраняется в течение всего разрядного импульса, вплоть до стадии спада тока ($I/I_{\max} \sim 0,7$). Переходная область между диффузной и стримерной частью существует в течение всего этого интервала.

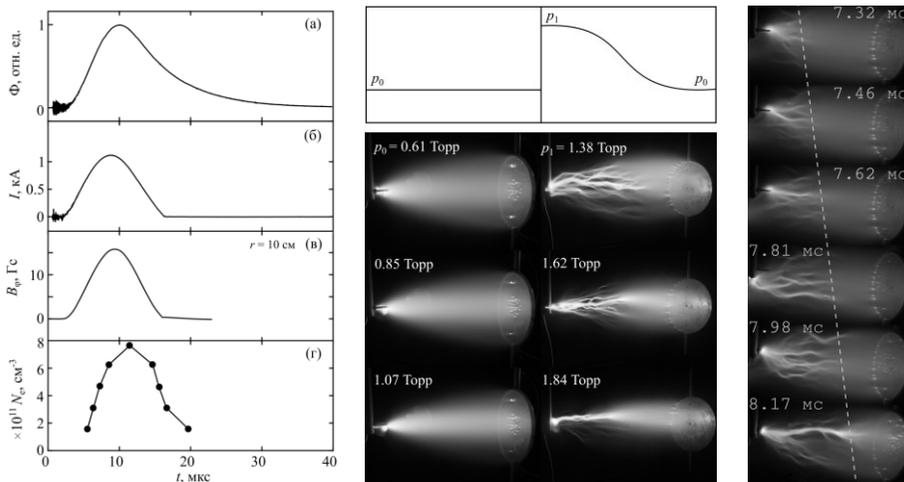


Рис. 16. Временные зависимости параметров импульсного разряда в однородном воздухе при давлении $p_0 = 0,6$ Топр: *a* – интегральная светимость разряда; *б* – ток с пояса Роговского; *в* – азимутальное магнитное поле в центральном сечении камеры в радиальной позиции $r = 10$ см; *г* – максимальная концентрация плазмы в центральном сечении камеры (слева). Фотографии разряда при различных давлениях в камере: в центре – разряд в однородном газе и в газе с градиентом давления; справа – разряд, зажигаемый с различными задержками относительно момента импульсного напуска газа в камеру

Получаемая при наличии градиента плотности развитая многоканальная структура разряда в области повышенного давления, по-видимому, обусловлена поперечной неустойчивостью пробоя и тока, протекающего по достаточно большому поперечному сечению. В однородном газе такую поперечно развитую филаментированную структуру получить не удастся: при низких давлениях разряд имеет диффузный характер, а при повышении давления сразу переходит в одиночный дуговой канал, соединяющий острие стержневого электрода с центром дискового электрода. Принципиальную роль в формировании структуры разряда играет большая апертура протекания тока, замыкаемого в области пониженного давления на дисковый электрод через широкую диффузную область.

В § 3.5 приводится обсуждение результатов, полученных при высоком перепаде давления. Полный перепад давления на масштабах спрайта достигает несколько сотен раз, но на переходной области от 70 до 80 км перепад всего около 5 раз. Если ограничиться только верхней частью разряда, то перепад не превышает 20–50 раз, то есть убираем из рассмотрения большую часть стримерной области и часть диффузной, и именно при таких значениях проводилось лабораторное моделирование.

Температура электронов плазмы спрайта составляет не более $T_e \sim 3\text{--}5$ эВ, что приблизительно соответствует температуре электронов в лабораторном разряде, и дает основание применить систему преобразований подобия, осно-

ванную на инвариантности скорости света [22] и введении пространственного множителя γ , равного отношению пространственного масштаба природного плазменного явления к размерам лабораторной плазмы. Если рассматривать переходную область спрайта с захватом диффузной и стримерной части, то $L_{\text{nat}} \sim 10\text{--}20$ км, а продольный размер лабораторного разряда, зажигаемого в перепаде давления, $L_{\text{lab}} \sim 50$ см, то масштабный коэффициент $\gamma = L_{\text{nat}}/L_{\text{lab}} = (2\text{--}4) \cdot 10^4$.

Концентрация заряженных частиц и плотность тока масштабируется пропорционально γ^{-2} . Концентрация электронов в спрайте достигает максимальных значений $N_e \sim 300\text{--}400$ см⁻³ в интервале высот от 70 до 80 км [55], что дает концентрации электронов в лабораторном разряде $N_e \sim (1,2\text{--}6,5) \cdot 10^{11}$ см⁻³ и соответствует фактическим концентрациям. Из электромагнитных измерений для спрайтов с характерным значениям момента тока 200–300 А · км и диаметром около 35 км можно оценить плотность тока $j \sim 3$ мкА/м² [56]. У более мощных событий с моментом тока до 1000 А · км [57] следует ожидать увеличения плотности тока до 5 раз, т. е. $j \sim 15$ мкА/м². Тогда, в соответствии с правилами подобия, плотность тока в лабораторной модели должна составлять $j \sim 0,1\text{--}2,5$ А/см², что и было измерено в эксперименте.

Величина полного тока при моделировании должна сохраняться. Полный ток спрайта составляет 1,5–3 кА [56], а у некоторых мощных событий достигает 25 кА [57]. В лабораторном эксперименте величина полного тока не более 1 кА. Такое отличие объясняется малым фактическим диаметром разряда в центральной области 30–40 см, в то время как при применении масштабного множителя γ поперечный размер лабораторного разряда, моделирующего спрайт диаметром 35 км, должен составлять не менее 100 см.

Диаметр филамент и время развития разряда масштабируется пропорционально γ . В переходной области спрайтов диаметр филамент $D \sim 1$ км [58], соответственно для филамент в лаборатории $D \sim 2,5\text{--}5$ см, что совпадает с параметрами лабораторных плазменных структур, имеющих поперечные размеры от 1 до 3 см. Такое подобие позволяет предполагать близость механизмов филаментации разряда в лаборатории и мезосфере. Длительность спрайта составляет 5 – 10 мс, что для лабораторного аналога дает длительность 0,1–0,5 мкс. В лабораторном эксперименте длительность разрядного импульса оказывается, как минимум, на порядок больше, поскольку определяется временем разряда конденсаторной батареи. Филаментированная структура свечения формируется в самом начале нарастания тока: филаменты отчетливо видны через 2 мкс после начала разряда, а их структура закладывается уже к окончанию первой микро-секунды разряда, то есть филаментация разряда происходит на временах, близких к режиму лабораторного моделирования спрайта по параметрам подобия.

Характерная величина напряженности электрического поля на высотах инициации спрайта $E \sim 1$ В/см, что соответствует приведенному электрическому полю 150–200 Тд. В лабораторном разряде максимум тока и интенсивности оптического излучения приходится на момент времени, когда напряжение на

разрядном промежутке составляет приблизительно половину от начального значения $E \sim 45$ В/см. Характерное приведенное поле должно достигаться в лаборатории при концентрации нейтрального газа $N = (2-3) \cdot 10^{16}$ см⁻³ или давлении $p = 0,6-0,8$ Торр. Именно при таких давлениях на газовом фронте в лабораторных экспериментах регистрируется переходная область между диффузной и filamentаризированной областями разряда, характерная для спрайтов.

В § 3.5 представлены выводы к Главе 3. Материалы Главы 3 опубликованы в работах 10*-14*.

В **Заключениях** сформулированы основные результаты.

Основные результаты

1. Разработана аксиально-симметричная самосогласованная плазмохимическая модель для спрайта на высотах 60-90 км в ночных условиях. Модельные расчеты показали, что при максимальном токе в молниевом канале 121,7 кА и максимальном ИДМ 720 Кл·км реализуются условия для инициации спрайта, приводящего к возмущению химического состава мезосферы (концентрация электронов возмущается до 198 см⁻³, O₂⁻ до 135 см⁻³, N₂⁺ до 105 см⁻³, O₂⁺ до 255 см⁻³) с радиальным размером до 40 км. Интенсивность излучения в ¹PN₂ достигает $6,4 \cdot 10^7$ см⁻³·с⁻¹ и в ²PN₂ $1,35 \cdot 10^7$ см⁻³·с⁻¹. Время релаксации химического состава мезосферы от 10 с на 75 км до 10³ с на 80–82 км.

2. Показана возможность инициации гало в дневных условиях на основе проведенного моделирования при ИДМ, равном 2750 Кл·км. Установлено, что характерная высота инициации разрядов определяется проводимостью атмосферы и смещена вниз на 20 км относительно ночных условий. Во время гало характерные поля 80–100 Тд формируются на высоте 56–64 км и радиусом 30 км, что приводит к быстрому прилипанию электронов к кислороду, падению проводимости на 2–4 порядка и излучению в ¹PN₂ с интенсивностью до $3 \cdot 10^6$ см⁻³·с⁻¹, в ²PN₂ с интенсивностью до $0,5 \cdot 10^6$ см⁻³·с⁻¹.

3. Проведено моделирование спрайта в дневных условиях при ИДМ 3750 Кл·км. Показано, что нормированное поле выше 128 Тд достигается на высотах 56–64 км и радиусом 20 км. Установлено, что развитие спрайта до формирования условий для лавинной ионизации в центральной части совпадает с развитием гало. Выяснено, что в пробойных полях концентрация электронов и O₂⁻ растет синхронно до 1400 см⁻³ и 1500 см⁻³, что после вытеснения поля приводит к прилипанию электронов и росту концентрации O₂⁻ до 2800 см⁻³ к 4 мс на 62 км. Показано, что соотношение максимальных интенсивностей излучения в ¹PN₂/²PN₂ порядка 1,6 раза, при этом интенсивность в ¹PN₂ достигает $8 \cdot 10^8$ см⁻³·с⁻¹.

4. Установлено, что самосогласованный учет электрического поля во время развития спрайта, как в ночных, так и в дневных условиях, приводит к лавинообразному росту концентрации электронов, сопровождающимся возмущением проводимости и формированием тороидальной структуры разряда, когда электрическое поле вытесняется из центральной части спрайта, а на удалении от оси

разряда свечение продолжается. При этом в отсутствии пробойных полей в периферийных частях спрайта разряд развивается как при гало.

5. Предложена параметризация для глобального распределения спрайтов по данным сети грозопеленгации WWLLN за 2016 год. Установлено, что в среднем создаются условия для инициации 870 спрайтов в день (8 из них отрицательные), при этом наблюдается значительная сезонная изменчивость: от 625 в октябре до 1255 в мае.

6. Обнаружено, что количество спрайтов над сушей и океаном за год распределено неравномерно: с января по апрель количество разрядов примерно совпадает, а с мая по декабрь количество разрядов над океаном выше на 20% и более, что приводит к среднему распределению суша/океан 41,4/58,6% за 2016 год.

7. Создан экспериментальный стенд «Спрайт», предназначенный для лабораторного моделирования разряда в протяженном градиенте давления в режиме импульсного напуска рабочего газа. На стенде реализован перепад давления до 100 раз на межэлектродном промежутке около 80 см, при сохранении дозвукового режима распространения фронта давления воздуха.

8. На лабораторной установке получен разряд, который по параметрам подобия для приведенного электрического поля, концентрации электронов, плотности тока, размера филамента соответствует спрайту на высотах от 70 до 90 км. Таким образом, в эксперименте были воспроизведены одновременно переходная, стримерная и диффузная области высотного разряда.

Список цитированной литературы

1. Косый И.А., Костинский А.Ю., Матвеев А.А. Плазмохимические процессы в неравновесной азотно-кислородной смеси // Труды ИОФАН. – 1994. – Т. 47. – Р. 37–57.
2. Mishin E. Ozone layer perturbation by a single blue jet // Geophys. Res. Lett. – 1997. – V. 24, № 15. – P. 1919–1922.
3. Smirnova N.V., Lyakhov A.N., Kozlov S.I. Lower stratosphere response to electric field pulse // Int. Journ. Geomagn. Aeron. – 2003. – V. 3, № 3. – P. 281–287.
4. On blue jet dynamics / Sukhorukov A.I., Mishin E.V., Stubbe P., Rycroft M. J. // Geophys. Res. Lett. – 1996. – V. 23, № 13. – P. 1625–1628.
5. Mishin E.V, Milikh G.M. Blue Jets: Upward Lightning // Sp. Sci. Rev. – 2008. – V. 137, № 1–4. – P. 473–488.
6. Winkler H., Notholt J. A model study of the plasma chemistry of stratospheric Blue Jets // Atmos. Sol.-Ter. Phys. – 2015. – V. 122. – P. 75–85.
7. Generation of metastable oxygen atom O(1D) in sprite halos / Hiraki Y., Tong L., Fukunishi H., Nanbu K., Kasai Y., Ichimura A. // Geophys. Res. Lett. – 2004. – V. 31, № 14. – P. L14105.
8. Sentman D.D., Stenbaek-Nielsen H.C., McHarg M.G. Plasma chemistry of sprite streamers // Geophys. Res. – 2008. – V. 113, D11. – P. D11112.

9. Gordillo-Vázquez F.J. Air plasma kinetics under the influence of sprites // *Phys. D. Appl. Phys.* – 2008. – V. 41, № 23. – P. 234016.
10. Parra-Rojas F.C., Luque A., Gordillo-Vázquez F.J. Chemical and thermal impacts of sprite streamers in the Earth's mesosphere // *Geophys. Res. Sp. Phys.* – 2015. – V. 120, № 10. – P. 8899–8933.
11. Gordillo-Vázquez F.J. Vibrational kinetics of air plasmas induced by sprites // *Geophys. Res. Sp. Phys.* – 2010. – Vol. 115, № A5. – P. A00E25.
12. Parameterisation of the chemical effect of sprites in the middle atmosphere / Enell C.-F., Arnone E., Adachi T., Chanrion O., Verronen P.T., Seppälä A., Neubert T., Ulich T., Turunen E., Takahashi Y., Hsu R.-R. // *Ann. Geophys.* – 2008. – V. 26, № 1. – P. 13–27.
13. Liu N. Multiple ion species fluid modeling of sprite halos and the role of electron detachment of O⁻ in their dynamics // *Geophys. Res.* – 2012. – V. 117, № A3. – P. A03308.
14. WACCM climate chemistry sensitivity to sprite perturbations / Arnone E., Smith A.K., Enell C.-F., Kero A., Dinelli B.M. // *Geophys. Res. Atmos.* – 2014. – V. 119, № 11. – P. 6958–6970.
15. Sprite climatology in the Eastern Mediterranean Region / Yair Y., Price C., Katzenelson D., Rosenthal N., Rubanenko L., Ben-Ami Y., Arnone E. // *Atmos. Res.* – 2015. – V. 157. – P. 108–118.
16. The ASIM Mission on the International Space Station / Neubert T., Østgaard N., Reglero V., Blanc E., Chanrion O., Oxborrow C.A., Orr A., Tacconi M., Hartnack O., Bhandari D.V. // *Space Sci. Rev.* – 2019. – V. 215, № 2. – P. 1–17.
17. Global distributions and occurrence rates of transient luminous events / Chen A.B., Kuo C.-L., Lee Y.-J., Su H.-T., Hsu R.-R., Chern J.-L., Frey H.U., Mende S.B., Takahashi Y., Fukunishi H., Chang Y.-S., Liu T.-Y., Lee L.-C. // *Geophys. Res.* – 2008. – V. 113. – P. A08306.
18. New observations of sprites from the space shuttle / Yair Y., Israelevich P., Devir A.D., Moalem M., Price C., Joseph J.H., Levin Z., Ziv B., Sternlieb A., Teller A. // *Geophys. Res.* – 2004. – V. 109, № D15. – P. D15201.
19. Sato M., Fukunishi H. Global sprite occurrence locations and rates derived from triangulation of transient Schumann resonance events // *Geophys. Res. Lett.* – 2003. – Vol. 30, № 16. – P. 1859–1863.
20. Sprites, ELF Transients, and Positive Ground Strokes / Boccippio D.J., Williams E.R., Heckman S.J., Lyons W.A., Baker I.T., Boldi R. // *Science.* – 1995. – V. 269, № 5227. – P. 1088–1091.
21. Qin J., Celestin S., Pasko V.P. Minimum charge moment change in positive and negative cloud to ground lightning discharges producing sprites // *Geophys. Res. Lett.* – 2012. – V. 39, № 22. – P. L22801.
22. Альвен Г., Фельтхаммар К.-Г. Космическая электродинамика. Основные принципы. Москва: Мир, 1967. 260 с.
23. Williams E.R. Sprites, elves, and flow discharge tubes // *Phys. Today.* – 2001. – V. 54, № 11. – P. 41–47.

24. Williams E.R. Calibrated radiance measurements with an air-filled glow discharge tube: Application to sprites in the mesosphere // *Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges*, Nato Sci. Ser. II, vol. 225 / ed. Füllekrug M., Marev E.A., Rycroft M.J. Dordrecht, Netherlands.: Springer – 2006. – P. 237–251.
25. Pancheshnyi S., Nudnova M., Starikovskii A. Development of a cathode-directed streamer discharge in air at different pressures: Experiment and comparison with direct numerical simulation // *Phys. Rev. E.* – 2005. – V. 71, № 1. – P. 016407.
26. NO_x production in laboratory discharges simulating blue jets and red sprites / Peterson H., Bailey M., Hallett J., Beasley W. // *Geophys. Res. Sp. Phys.* – 2009. – Vol. 114, № A12. – P. A00E07.
27. Nijdam S., van Veldhuizen E.M., Ebert U. Comment on “NO_x production in laboratory discharges simulating blue jets and red sprites” by H. Peterson et al. // *Geophys. Res. Sp. Phys.* – 2010. – V. 115, № A12. – P. A12305.
28. de Urquijo J., Gordillo-Vázquez F.J. Comment on “NO_x production in laboratory discharges simulating blue jets and red sprites” by Harold Peterson et al. // *Geophys. Res. Sp. Phys.* – 2010. – V. 115, № A12. – P. A12319.
29. Reply to comment by J. de Urquijo and F. J. Gordillo-Vázquez on “NO_x production in laboratory discharges simulating blue jets and red sprites” / Peterson H., Bailey M., Hallett J., Beasley W. // *Geophys. Res. Sp. Phys.* – 2010. – Vol. 115, № A12. – P. A12319.
30. Briels T.M.P., Van Veldhuizen E.M., Ebert U. Positive streamers in air and nitrogen of varying density: Experiments on similarity laws // *Phys. D. Appl. Phys.* – 2008. – V. 41, № 23. – P. A234008.
31. Sprite discharges on Venus and Jupiter-like planets: A laboratory investigation / Dubrovin D., Nijdam S., van Veldhuizen E.M., Ebert U., Yair Y., Price C. // *Geophys. Res. Sp. Phys.* – 2010. – V. 115, № A6. – P. A00E34.
32. Spectroscopic diagnostics of laboratory air plasmas as a benchmark for spectral rotational (gas) temperature determination in TLEs / Parra-Rojas F.C., Passas M., Carrasco E., Luque A., Tanarro I., Simek M., Gordillo-Vázquez F.J. // *Geophys. Res. Sp. Phys.* – 2013. – V. 118, № 7. – P. 4649–4661.
33. Tarasenko V.F., Beloplotov D.V., Lomaev M.I. Colored Diffuse Mini Jets in Runaway Electrons Preionized Diffuse Discharges // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 2016. – V. 44, № 4. – P. 386–392.
34. Phenomenon of apokamp discharge / Sosnin E.A., Skakun V.S., Panarin V.A., Pechenitsin D.S., Tarasenko V.F., Baksht E.Kh. // *JETP Lett.* – 2016. – V. 103, № 12. – P. 761–764.
35. Study of streamers in gradient density air: Table top modeling of red sprites / Opaitis D.F., Shneider M.N., Howard P.J., Miles R.B., Milikh G.M. // *Geophys. Res. Lett.* – 2010. – V. 37, № 14. – P. L14801.
36. Robledo-Martinez A., Garcia-Villarreal A., Sobral H. Comparison between low-pressure laboratory discharges and atmospheric sprites // *Geophys. Res. Sp. Phys.* – 2017. – V. 122, № 1. – P. 948–962.

37. Observation of blue sprite spectra at 10,000 fps / Kanmae T., Stenbaek-Nielsen H.C., McHarg M.G., Haaland R.K. // *Geophys. Res. Lett.* – 2010. – V. 37, № 13. – P. L13808.
38. Detection of daytime sprites via a unique sprite ELF signature / Stanley M., Brook M., Krehbiel P., Cummer S.A. // *Geophys. Res. Lett.* – 2000. – V. 27, № 6. – P. 871–874.
39. Lightning locating systems: Insights on characteristics and validation techniques / Nag A., Murphy M.J., Schulz W., Cummins K.L. // *Earth Sp. Sci.* – 2015. – V. 2, № 4. – P.65–93.
40. Poelman D.R., Schulz W., Diendorfer G., Bernardi M. The European lightning location system EUCLID – Part 2: Observations // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* – 2016. – V. 16, № 2. – P. 607–616.
41. Marcos–Menéndez J.L., Castedo–Dorado F., Rodríguez–Pérez J.R. Statistical characterization of cloud-to-ground lightning data and meteorological modelling of cloud-to-ground lightning days for the warm season in the province of León (north-west Spain) // *Meteorol. Appl.* – 2016. – V. 23, № 4. – P. 671–682.
42. Cummer S.A., Lyons W.A., Stanley M.A. Three years of lightning impulse charge moment change measurements in the United States // *Geophys. Res. Atmos.* – 2013. – V. 118, № 11. – P. 5176–5189.
43. An analysis of five negative sprite-parent discharges and their associated thunderstorm charge structures / Boggs L.D., Liu N., Splitt M., Lazarus S., Glenn C., Rassoul H., Cummer S.A. // *Geophys. Res. Atmos.* – 2016. – V. 121, № 2. – P. 759–784.
44. Qin J., Celestin S., Pasko V.P. Dependence of positive and negative sprite morphology on lightning characteristics and upper atmospheric ambient conditions // *Geophys. Res. Sp. Phys.* – 2013. – V. 118, № 5. – P. 2623–2638.
45. Cummer S.A., Lyons W.A. Implications of lightning charge moment changes for sprite initiation // *Geophys. Res. Sp. Phys.* – 2005. – V. 110, № A4. – P. A04304.
46. Analysis of lightning strokes associated with sprites observed by ISUAL in the vicinity of North America / Lu G., Cummer S.A., Chen A.B., Lyu F., Li D., Liu F., Hsu R.-R., Su H.-T. // *Terr. Atmos. Ocean. Sci.* – 2017. – V. 28, № 4. – P. 583–595.
47. Polarity asymmetry of sprite-producing lightning: A paradox? / Williams E.R., Downes E., Boldi R., Lyons W., Heckman S. // *Radio Sci.* – 2007. – V. 42, № 2. – P. RS2S17.
48. Charge moment change and lightning-driven electric fields associated with negative sprites and halos / Li J., Cummer S.A., Lu G., Zigoneanu L. // *Geophys. Res. Sp. Phys.* – 2012. – V. 117, № 9. – P. 1–9.
49. Far-Field Power of Lightning Strokes as Measured by the World Wide Lightning Location Network/ Hutchins M.L., Holzworth R.H., Rodger C.J., Brundell J.B. // *Atmos. Ocean. Technol.* – 2012. – V. 29, № 8. – P. 1102–1110.
50. Zajac B.A., Rutledge S.A. Cloud-to-Ground Lightning Activity in the Contiguous United States from 1995 to 1999 // *Mon. Weather Rev.* – 2001. – V. 129, № 5. – P. 999–1019.

51. Батурин В.А., Карпенко А.Ю., Колинько С.В. Простая методика измерения коротких газовых импульсов // Вісник Сумського державного університету. Серія Фізика, математика, механіка. – 2004. – Т. 67, № 8. – С. 138–143.

52. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Москва: Наука, 1987. – 592 с.

53. Ховатсон А.М. Введение в теорию газового разряда. Москва: Атомиздат, 1980. – 182 с.

54. Шкаровский И.П., Джонстон Т., Бачинский М. Кинетика частиц плазмы. Москва: Атомиздат, 1969. – 396 с.

55. Евтушенко А.А., Кутерин Ф.А. Самосогласованная модель ночного спрайта // Изв. ВУЗов – Радиофизика. – 2016. – Т. 59, № 12. – С. 1092–1102.

56. Cummer S.A. ELF radiation produced by electrical currents in sprites // Geophys. Res. Lett. – 1998. – V. 25, № 8. – P. 1281–1284.

57. Cummer S.A. Current moment in sprite-producing lightning // Atmos. Solar-Terrestrial Phys. – 2003. – V. 65, № 5. – P. 499–508.

58. McHarg M.G., Stenbaek-Nielsen H.C., Kammer T. Observations of streamer formation in sprites // Geophys. Res. Lett. – 2007. – V. 34, № 6. – P. 1–5.

Список работ по теме диссертации

1*. Mareev E.A., Evtushenko A.A., Yashunin S.A. On the modeling of sprites and sprite producing clouds in the global electric circuit // Sprites, Elves and Intensive Lightning Discharges, NATO Science Series / Editors M. Fullekrug, E. Mareev, M. Rycroft. Cluwer: Springer. – 2005. – P. 313–340.

2*. Evtushenko A.A., Mareev E.A. On the generation of charge layers in MCS stratiform regions // Journal of Atmospheric research. – 2008. – V. 91, № 2-4. – P. 272–280.

3*. Евтушенко А.А., Мареев Е.А. О генерации слоев электрического заряда в мезомасштабных конвективных системах // Физика атмосферы и океана. – 2009. – Т. 45, № 2. – С. 242–252.

4*. Евтушенко А.А., Мареев Е.А. Моделирование возмущений состава мезосферы под действием высотных разрядов – спрайтов // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 2011. – Т. 54, № 2. – С. 123–140.

5*. Евтушенко А.А., Кутерин Ф.А., Мареев Е.А. Об особенностях возмущения ионного состава, нейтральных компонент и оптических эмиссий в мезосфере под действием грозových разрядов // Физика атмосферы и океана. – 2013. – Т. 49, № 5. – С. 1–11.

6*. Evtushenko A.A., Kuterin F.A., Mareev E.A. A model of sprite influence on the chemical balance of mesosphere // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2013. – V. 102 – P. 298–310.

7*. Евтушенко А.А., Кутерин Ф.А. Одномерная самосогласованная модель влияния спрайта/гало на химию мезосферы // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 2013. – Т. 56, № 11-12. – С. 947–967.

8*. Евтушенко А.А., Кутерин Ф.А. Самосогласованная модель ночного спрайта // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 2016. – Т. 59, № 12. – С. 1092–1102.

9*. Российские исследования в области атмосферного электричества в 2011-2014 годах / Мареев Е.А., Стасенко В.Н., Булатов А.А., Дементьева С.О., Евтушенко А.А., Ильин Н.В., Кутерин Ф.А., Слюняев Н.Н., Шаталина М.В. // Физика атмосферы и океана. – 2016. – Т. 52, № 2. – С. 175–186.

10*. Импульсный высоковольтный разряд в воздухе с градиентом давления / Стриковский А.В., Евтушенко А.А., Гуцин М.Е., Коробков С.В., Костров А.В. // Физика плазмы. – 2017. – Т. 43, № 10. – С. 1–8.

11*. Исследование нестационарного воздушного потока в большой вакуумной камере с помощью стандартного ионизационного манометра / Коробков С.В., Гуцин М.Е., Стриковский А.В., Лоскутов К.Н., Евтушенко А.А. // Журнал технической физики. – 2019. – Т. 89, № 1. – С. 35–41.

12*. Параметры плазмы крупномасштабного высоковольтного разряда в воздухе при пониженном давлении / Стриковский А.В., Коробков С.В., Гуцин М.Е., Евтушенко А.А., Зудин И.Ю. // Физика плазмы. – 2019. – Т.45, №6. – С. 487–497.

13*. Российские исследования в области атмосферного электричества в 2015–2018 гг / Мареев Е.А., Стасенко В.Н., Шаталина М.В., Дементьева С.О., Евтушенко А.А., Свечникова Е.К., Слюняев Н.Н. // Физика атмосферы и океана. – 2019. – Т. 55, № 6. – С. 79–93.

14*. Моделирование высотных разрядов на большой плазменной установке / Евтушенко А.А., Гуцин М.Е., Коробков С.В., Стриковский А.В., Мареев Е.А. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2020. – Т. 60, № 3. – С. 365–374.

15*. Evtushenko A.A., Kuterin F.A., Svechnikova E.K. Study of daytime high-altitude discharges using plasma-chemistry model // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. –2021. – V. 221. – P. 105670.

16*. Evtushenko A.A., Ilin N.V., Svechnikova E.K. Parameterization and global distribution of sprites based on the WWLLN data // Atmospheric Research. – 2022. – V. 276. – P. 106272.

17*. Евтушенко А.А., Свечникова Е.К., Кудрявцев А.С. Анализ спрайтовой активности над территорией России по данным WWLLN за 2015–2021 годы // XXIX Международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосфер". – 2023. – 26–30 июня, г. Москва. – 4 стр.

ЕВТУШЕНКО Андрей Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ
УСЛОВИЙ ИНИЦИАЦИИ, ОСОБЕННОСТЕЙ РАЗВИТИЯ
И ГЛОБАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ВЫСОТНЫХ РАЗРЯДОВ В АТМОСФЕРЕ**

А в т о р е ф е р а т

Подписано к печати 05.07.2023.

Формат $60 \times 90 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 2,25. Тираж 120 экз. Заказ № 23(2023).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН,
603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46