

Минобрнауки России
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт сильноточной электроники Сибирского отделения
Российской академии наук
(ИСЭ СО РАН)
Отдел образовательной деятельности

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
об основных результатах
научно-квалификационной работы (диссертации) на тему:
«ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНЗИЕНТНЫХ
СВЕТОВЫХ ЯВЛЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ЁМКОСТНОГО РАЗРЯДА»

Направление подготовки: 03.06.01 Физика и астрономия
Профиль подготовки (специальность):
1.3.13 Электрофизика, электрофизические установки

Аспирант



(подпись)

Виноградов Никита Петрович

Научный руководитель:
Тарасенко Виктор Федотович,
д.ф.-м.н., профессор,
г.н.с. ИСЭ СО РАН

свечение возникает в свободном разреженном воздухе, а замыкание токов происходит на ионосферу. Следовательно, условия экспериментов [15–17] нельзя считать полностью соответствующими реальной атмосфере. Принимая это во внимание, мы — подобно более поздним работам [18, 19] — выбрали ёмкостный барьерный импульсно-периодический разряд. Такая схема позволяет формировать плотную плазму, из которой волны ионизации распространяются в обе стороны, без прямого контакта плазмы с металлическими электродами, тем самым воспроизводя ключевой признак природных ТСЯ и максимально приближая лабораторные условия к реальным явлениям в мезосфере.

Несмотря на то, что данными исследованиями занимаются уже более 30 лет, до сих пор нет чёткого понимания механизмов зарождения и распространения красных спрайтов. Данная проблема предопределила формулировку цели и конкретных задач настоящего исследования.

Целью научной работы является выявление закономерностей развития ТСЯ с помощью емкостного разряда при различных условиях их инициации.

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие **задачи**:

1. Разработать установку, позволяющую формировать и исследовать волны ионизации красного цвета, распространяющиеся в двух противоположных направлениях, при условиях наблюдения красных спрайтов.
2. Адаптировать комплекс оптических методик и методик измерения основных параметров транзиентных световых явлений, формируемых в ёмкостном разряде — ТСЯ ЁР.
3. Экспериментально выявить факторы, влияющие на развитие ТСЯ ЁР при различных условиях их иницирования.
4. Сформировать дополнительные признаки сходства ТСЯ ЁР с транзиентами верхней атмосфере Земли.

амплитуда импульсов напряжения должна лежать в диапазоне от 1,5 кВ до 7 кВ; 5) длительность импульсов напряжения на полувывоте должна составлять порядка 1,5 мкс.

2. Если в процессе формирования ПДС происходят генерация и последующее столкновение встречных стримеров с различной концентрацией заряженных частиц, то в структуре свечения струи формируются локальные яркие области, аналогичные тем, что наблюдаются в нижней части столбчатых красных спрайтов.

3. Если давление воздуха понижается до значений ниже 0,1 Торр при постоянной амплитуде импульса напряжения, то цвет свечения ПДС изменяется с красного на белый вследствие увеличения относительной влажности воздуха.

4. В воздухе, при низких давлениях плазменные диффузные струи обладают признаками красных спрайтов транзиентных световых явлений средней атмосферы. Оба феномена: 1) формируются как при положительной полярности напряжения, так и при отрицательной; 2) обладают сходными – по диапазону (~250–900 нм) и структуре максимумов – спектрами люминесценции; 3) обладают схожим цветом; 4) обладают схожей скоростью распространения.

Достоверность и обоснованность полученных результатов:

1. Достоверность **первого** научного положения подтверждается близкой к 100 % воспроизводимостью формирования ПДС в указанных условиях. Всего за время проведения научных исследований, отражённых в данной работе, накоплено более 2000 фотографий, демонстрирующих формирования ПДС.

2. Достоверность **второго** научного положения обусловлена использованием стандартных методов спектрометрии и использования спектрометра, достаточного для разрешения линий He, N₂, N₂⁺, O, OH и Ar (рабочий диапазон длин волн 200-1100 нм, спектральная полуширина аппаратной функции ~ 1.33 нм); совпадением значений длин волн определяемых линий с известными спектральными данными NIST Atomic Spectra Database (version 3.1.5) [14], включая пропорциональное соотношение между линиями второй положительной системы

2. Экспериментально показано, что чёткая структура столбчатых спрайтов обусловлена столкновением униполярных стримеров с разной концентрацией заряженных частиц.

3. Предложена и экспериментально обоснована гипотеза о том, что красный цвет спрайтов обусловлен отсутствием примесей воды в газовой смеси.

4. Экспериментально продемонстрировано, что изменение цвета с красного на синий в нижней части красного спрайта обусловлено увеличением приведённой напряжённости электрического поля при приближении спрайта к вершине грозовых облаков.

Практическая значимость:

1. Расширена область применения ёмкостного разряда в импульсно-периодическом режиме.

2. Созданные установки позволяют моделировать некоторые свойства столбчатых красных спрайтов, инициируемых в верхней атмосфере земли.

Апробация результатов работы

Основные результаты научной работы докладывались и обсуждались на следующих международных научных конференциях: International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (2022, 2024) Томск, Россия; XVI Международная конференция по импульсным лазерам и применениям лазеров AMPL-2023 (2023), Томск, Россия; IV международная конференция Газоразрядная плазма и синтез наноструктур GDP-NANO 2023 (2023).

Личный вклад автора

Основные результаты, изложенные в данной научной работе, получены автором самостоятельно либо в сотрудничестве с соавторами опубликованных статей (В. Ф. Тарасенко, Е. Х. Бакшт, Д. А. Сорокин, В. А. Панарин, В. С. Скакун). Формулировка цели исследования и постановка ключевых задач выполнялись автором совместно с научным руководителем — Тарасенко В. Ф.

Разработка и доведение до рабочего состояния экспериментальных установок, а также проведение измерений осуществлялись автором при участии Е. Х. Бакшта, В. А. Панарина и В. С. Скакуна. Большая часть экспериментальных данных

сильное корпускулярное излучение » (курсив наш. – Авт.) [28]. Вышеупомянутая работа Д.Р. Уинклера инициировала исследование NASA [29] в ходе которого было получено 15 новых свидетельств, полученных от пилотов самолётов, о наблюдении «редкой формы молнии», которая образуется на верхушке грозового облака и развивается вертикально вверх. Тем не менее десятки достоверных сообщений, полученных от наземных наблюдателей и пилотов, не позволяют получить количественные данные, необходимые для классификации и выявления статистически достоверных свойств «высотных молний». Для их получения были необходимы долговременные серии наблюдений с использованием современной регистрирующей фото- и видеоаппаратуры. Это стало отправной точкой для первых полевых исследований по целенаправленной фиксации и картированию проявлений феномена в атмосфере, чем стали заниматься научные группы Д.Д. Сентмана и В.А. Лайонса [30–32].

Оказалось, что явление не является столь редким, как считалось ранее. Кроме того, стало ясно, что световые явления имеют различную форму, яркость и размеры: в 1993 г. с воздушной лаборатории NASA DC-8, курсирующей над американским Средним Западом, за 100 минут были зафиксированы 19 кратковременных атмосферных оптических структур в средней атмосфере. Они имели длительность до 17 мс, яркость, сравнимую с яркими полярными сияниями, средние высоты распространения 60 км, горизонтальную протяженность 10-50 км, а частота их появления составляла $1/200 - 1/400$ по сравнению с отрицательными облачными разрядами и $1/20 - 1/40$ по сравнению с положительными облачными разрядами [33].

Различные крупномасштабные светящиеся структуры, наблюдаемые в условиях повышенной электрической активности, характерной для гроз, штормов и ураганов в средней и верхней атмосфере Земли получили собирательное название – транзиентные (скоротечные) световые явления, или коротко – транзиенты. По мере накопления всё новых и новых наблюдений все транзиенты были классифицированы по характеру свечения, цвету, типичной стартовой высоте, направлению распространения и диапазону высот, в которых они себя проявляют. К транзиентам средней атмосферы относят голубые струи (от англ. «blue jets»), голубые стартеры или

диаметр до 100 км. На втором этапе от гало вверх и/или вниз стартуют спрайты. Если от гало вниз стартует одиночная светящаяся колонна, то явление называется С-спрайтом или столбчатым спрайтом. Чаще всего вниз движется не один, а множество спрайтов — т.н. усиков — имеющих различные размеры и интенсивность. Такие множества спрайтов с рассеянными вершинами и нижними усиками, достигающими высот 30-40 км, называют «ангелами» или «атомными бомбами» (в силу сходства внешнего вида явления с облаком от атомного взрыва). Каждый усик похож на стример, развивающийся в головной части лидера обычной молнии, но отличается от молниевоего стримера тем, что его размеры (диаметр и длина) в тысячи раз больше. Общая продолжительность свечения гало и спрайтов составляет 7-10 мс. Верхняя часть спрайта и гало имеют красный цвет ($1P\ N_2$). Каждый усик по мере снижения высоты меняет цвет с красного на слабый фиолетовый, отвечающий системе $2P\ N_2$ и первой отрицательной системе иона азота ($1N\ N_2^+$) [49-52]. Красные спрайты появляются непосредственно над активным грозовым облаком (или группой облаков) спустя несколько миллисекунд после мощных положительных разрядов облако–земля [53]. В ряде случаев усики спрайтов развиваются от гало вверх, в ионосферу и имеют только красный цвет. В силу формы и цвета, такие спрайты, имеющие красный цвет и развивающиеся как вверх, так и вниз от гало называются «морковными» [54]. Гало тоже может расширяться вверх, вплоть до нижней границы ионосферы (80 - 90 км) [55].

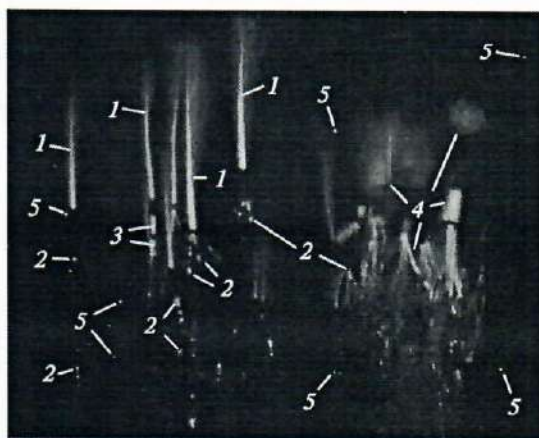


Рисунок 1 — Разные виды спрайтов: столбчатые (1), индивидуальная точечная структура (2), индивидуальная чёточная структура (3), другие формы спрайтов (4), звёзды (5).

спрайтов [2]. Параллельно развивались модели с ключевой ролью runaway-electrons: электроны, разогнанные тем же квазиэлектростатическим полем до энергий > 100 кэВ, вызывают лавино-пробой (runaway breakdown) и создают импульс свечения, сопоставимый по яркости и спектру с реальными спрайтами [66].

Позднее появились гибридные streamer–leader-модели: в нижней ионосфере образуется плазменный «патч», из которого вниз стартуют пучки стримеров, а верхние участки каналов постепенно приобретают лидероподобные черты [67]. Альтернативный подход связывает вспышку со фрактальной внутри облачной (IC) молнией: разветвлённая сеть каналов порождает сложное поле в нижней ионосфере; численные реализации показывают, что такая «фрактальная» модель воспроизводит как пространственную структуру, так и спектр красных спрайтов [68].

Сопоставление моделируемых полей с одновременными VLF/ELF-наблюдениями показало: наиболее согласующийся со статистикой вариант должен объединять мгновенный квазиэлектростатический «подъём» поля и последующий вклад runaway- electrons, особенно для разветвлённой «морковной» геометрии спрайта [69]. Итоговый обзор современных представлений дан в [70]. В свете этих работ красный спрайт сегодня трактуется как каскад нисходящих стримеров, запущенных квазиэлектростатическим импульсом после CG-молнии; их дальнейшее развитие и яркость модифицируются ускоренными («runaway») электронами и пространственно-неоднородной проводимостью нижней ионосферы.

2. Экспериментальная аппаратура и методики исследования

Одним из ключевых параметров при экспериментальном моделировании транзиентных световых явлений (ТСЯ) является морфология формируемой плазмы. Возникновение красных спрайтов связывают с развитием стримеров (волн ионизации), стартующих из областей, в которых формируется плазма с повышенной концентрацией заряженных частиц [2, 3]. В связи с этим первостепенной задачей являлось создание установки, в которой будет инициироваться плотная плазма. При этом, плазма должна формироваться без прямого контакта с металлом электродов, поскольку металлические электроды не принимают участие в формировании красных спрайтов.

центральной части трубки на внешней её поверхности. Вторая установка состоит из двух кварцевых трубок, одна из которых вставляется в другую. Зажигание разряда происходит в трубке с внутренним диаметром 20 мм, после чего разряд распространяется в трубку с диаметром 50 мм. Третья установка представляет из себя классическую схему на рисунке 2 с дополнительным подключением второй пары кольцевых электродов с возможностью изменять полярность каждой из пар колец.

Эмиссионный спектр плазмы разряда фиксировался спектрометрами HR2000+ES (Ocean Optics Inc.), снабжённым кварцевым оптическим волокном. Характеристики чувствительности прибора и коэффициент пропускания световода в диапазоне 190–1100 нм были предварительно откалиброваны. Спектральное разрешение всей оптической трассы составляло 0,9 нм.

Также в экспериментах использовался спектрометр HR4000 (OceanOptics Inc.) с известной спектральной чувствительностью, снабжённым кварцевым оптическим волокном. Характеристики чувствительности прибора и коэффициент пропускания световода в диапазоне 300–400 нм были предварительно откалиброваны. Спектральное разрешение всей оптической трассы составляло 0,02 нм.

Интегральную картину свечения разряда регистрировали цифровой камерой Canon EOS 2000D.

3. Лабораторное моделирование транзитных световых явлений верхней атмосферы с помощью ёмкостного разряда в кварцевой трубке

3.1 Морфология ёмкостного разряда с кольцевыми электродами в центре кварцевой трубки

Морфологию разряда стоит рассматривать на примере первой установки. Основная зона разряда была расположена в центре кварцевой трубки между кольцевыми электродами, расположенными на внешней поверхности кварцевой трубки. Зазор между кольцевыми электродами во всех экспериментах составлял 6 см. Как говорилось ранее левый кольцевой электрод был заземлен, а правый был под высоким напряжением генератора работающего в импульсно-периодическом режиме. Разряд зажигался как при импульсах напряжения положительной полярности, так и при импульсах напряжения отрицательной полярности. Амплитуда

трубке по обе стороны от кольцевых электродов был красным. При понижении давления до $p = 0,4$ Торр волны ионизации (стримеры) достигали левого конца трубки. Дальнейшее уменьшение p способствовало тому, что стримеры контактировали с обоими концами трубки. Интегральные фотографии свечения плазмы разряда при $p = 1$ Торр и обеих полярностях высоковольтного кольцевого электрода показаны на рисунке 3.

Изменение полярности высоковольтного кольцевого электрода не существенно влияло на морфологию разряда. Смена полярности импульса напряжения генератора не влияла на зажигание разряда и его цвет. Уменьшение амплитуды импульса напряжения, вырабатываемого генератором, приводит к уменьшению длины волны ионизации по обе стороны от кольцевых электродов. Это продемонстрировано на рисунках 4 (а), (b), (c) при давлении воздуха 1 Торр. Следует отметить, что расположение кварцевой трубки не влияет на морфологию разряда. Разряд не отличается при горизонтальном расположении кварцевой трубки и при вертикальном.

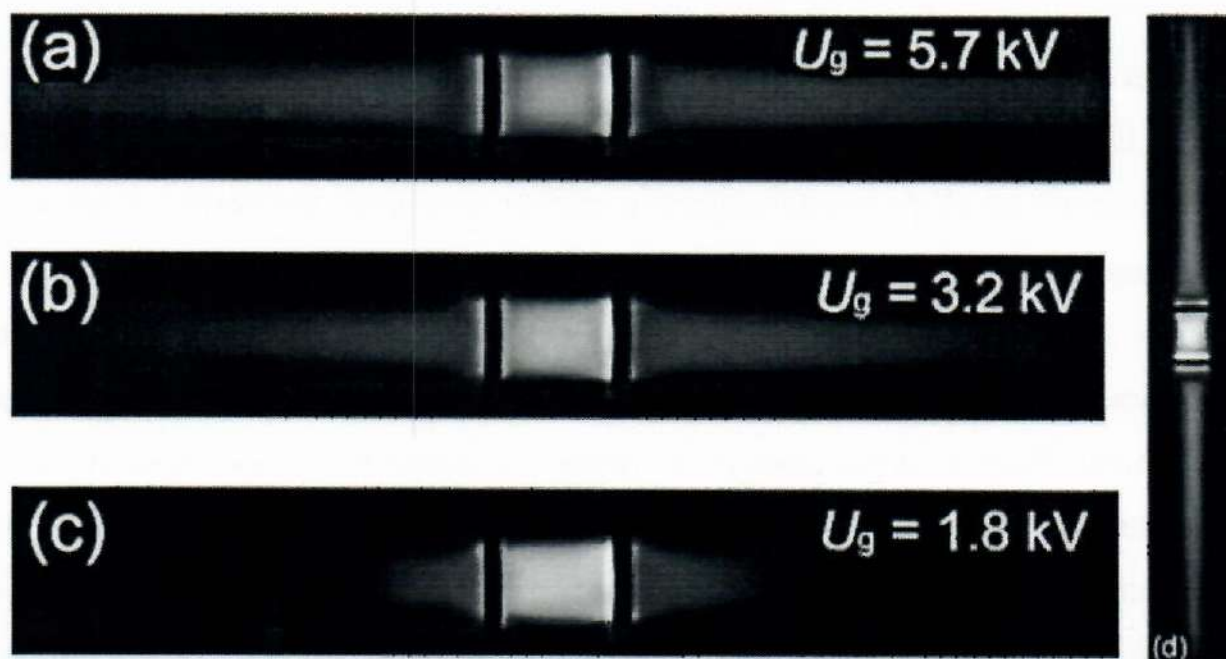


Рисунок 4 - Интегральные фотографии свечения плазмы разряда в кварцевой трубке, заполненной воздухом, расположенной горизонтально (а, b, c) при различных напряжениях генератора и расположенной вертикально при $U_g = 7$ кВ и $p = 1$ Торр (г). Полярность напряжения генератора на всех фотографиях положительная.

цвет изменился на розовый. Подобный эффект проявляется при давлении воздуха ниже 0.1 Торр и обусловлен диссоциацией молекул воды из-за повышения приведенной напряженности электрического поля E/n . Подобный эффект наблюдается и в воздухе, цвет разряда в воздухе меняется с изменением относительной влажности воздуха. В разряде с большим содержанием воды в воздухе цвет разряда приобретает белый оттенок, с меньшим содержанием воды в воздухе, в цвете разряда преобладает красный цвет.

3.3 Морфология ёмкостного разряда в кварцевой трубке с двумя парами кольцевых электродов

Характерной особенностью столбчатых спрайтов является резкая граница свечения в их нижней части, а также формирование чёточных структур на меньших высотах. Физическая природа появления ярких областей (ЯО) в виде точек или коротких цилиндров, равно как и причина формирования резкой нижней границы свечения в столбчатых структурах, до настоящего времени остаётся не выясненной.

Эксперимент по встрече двух ПДС был направлен на лабораторное воспроизведение плазменных образований, сходных по форме и цвету с природными столбчатыми спрайтами. Отдельной задачей являлось установление условий, при которых возникают ЯО в нижней части структуры, отстоящие от главного «столба».

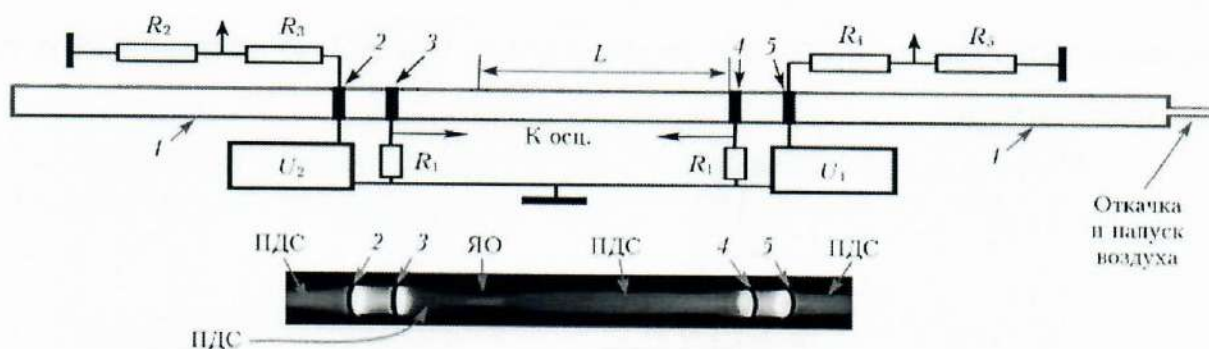


Рисунок 6 - Схема экспериментальной установки для изучения условий появления ЯО при встрече ПДС, инициируемых ёмкостным разрядом (вверху), а также фотография излучения ПДС (экспозиция 0,25 с) при давлении воздуха $p = 1,5$ торр с ЯО в виде цилиндра и свечения ёмкостного разряда между двумя парами электродов (внизу): 1 – кварцевая трубка; 2 – высоковольтный электрод, соединённый с генератором U_2 и делителем напряжения (R_2-R_3); 3 – электрод, заземлённый через шунт R_1 и

В центральной части ЯО, а также на расстояниях 15 см слева и 11 см справа от её центра проводилось сравнение суммарной энергии излучения в спектральных диапазонах 290–460 нм (для 2⁺ системы) и 560–780 нм (для 1⁺ системы). Установлено, что при удалении от центра ЯО величина энергии излучения снижалась на 20–30 % как влево, так и вправо. При этом при регистрации полос первой положительной системы (1⁺) азота длительность отдельных импульсов увеличивалась до ~10 мкс. Это излучение было зафиксировано с использованием светофильтра ЖС-12, который не пропускает излучение короче 450 нм.

Для интерпретации полученных спектров применялись методы оптической эмиссионной спектроскопии, в частности — анализ отношения пиковых интенсивностей излучения молекулярной и ионной полосы азота. Так, по отношению линий N₂⁺ ($\lambda = 391$ нм) и N₂ ($\lambda = 337$ нм) второй положительной системы [23, 24] можно было оценить относительные значения температуры электронов T_e как в ЯО, так и на удалении от неё (в более слабо ионизированной области плазмы).

Установлено, что приведённая напряжённость электрического поля в зоне яркой области составляет $E/N \approx 250$ Тд ($1 \text{ Тд} = 10^{-17} \text{ В} \cdot \text{см}^2$), что соответствует электронной температуре $T_e \approx 2,5$ эВ. Например, на расстоянии 7 см влево от оптической яркой области (ОЯО) величина поля возрастает до $E/N \approx 365$ Тд, а электронная температура достигает значения $T_e \approx 3,65$ эВ.

Заключение

Было продемонстрировано, что уменьшение длины ПДС осуществляется посредством уменьшения напряжения или увеличения давления. Показали, что ориентация кварцевой трубки никак не влияет на морфологию разряда. Также было продемонстрировано влияние изменения полярности импульса напряжения на морфологию ёмкостного разряда в кварцевой трубке.

Был выявлен эффект влияния относительной влажности воздуха на цвет разряда, который проявляется при снижении давления воздуха ниже 0.1 Торр, что связано с ростом приведённой напряжённости электрического поля с уменьшением давления и последующей диссоциацией молекул воды, содержащихся в воздухе. На основании выявленного эффекта, была выдвинута гипотеза о том, что красный цвет

5. Estimating the electron energy and electric-field strength within sprites from ground-based optical data over South-African storms / S. Nnadih, M. Kosch, J. Mlynarczyk // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2021. V.225. P.105760.
6. Transient luminous events: a review of recent observational and modelling results / M. Singh, P.K. Sharma, P.P. Pathak // *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*. 2022. V.14. N.3. P.31–46.
7. Observations of very large sprite events and subsequent VLF perturbations / D.D. Sentman, E.M. Wescott // *Geophysical Research Letters*. 1993. V.20. N.24. P.2857–2860.
8. Preliminary results from the Sprites '95 aircraft campaign: I. Red sprites / D.D. Sentman, E.M. Wescott, D.L. Osborne, D.L. Hampton, M.J. Heavner // *Geophysical Research Letters*. 1995. V.22. N.10. P.1205–1208.
9. Characteristics of transient luminous events observed by the “Tatiana” satellite / G.K. Garipov, B.A. Khrenov, P.A. Klimov, V.V. Klimenko, E.A. Mareev et al. // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2013. V.118. N.2. P.370–379.
10. The ASIM mission on the International Space Station: science objectives and first results / T. Neubert, N. Østgaard, V. Reglero, O. Chanrion, C.A. Oxborrow et al. // *Space Science Reviews*. 2019. V.215. N.2. P.26.
11. High-speed measurements of small-scale features in sprites: sizes and lifetimes / R.A. Marshall, U.S. Inan // *Radio Science*. 2006. V.41. N.6. P.RS6S43.
12. Diameter–speed relation of sprite streamers / T. Kanmae, H.C. Stenbaek-Nielsen, M.G. McHarg, R.K. Haaland // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2012. V.45. N.27. P.275203.
13. Review of recent results on streamer discharges: key concepts for sprites and lightning / U. Ebert, S. Nijdam, C. Li, A. Luque, T. Briels, E. van Veldhuizen // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2010. V.115. N.A00E. P.A00E43.
14. Mechanism of column and carrot sprites derived from simultaneous optical and radio observations / J. Qin, S. Celestin, V.P. Pasko, S.A. Cummer, M.G. McHarg, H.C. Stenbaek-Nielsen // *Geophysical Research Letters*. 2013. V.40. N.17. P.4777–4782.

29. Recent observations of lightning discharges from the top of a thundercloud into the air above / O.H. Vaughan Jr., B. Vonnegut // *J. Geophys. Res.* 1989. V. 95. N D11. P. 13179–13182.
30. Characteristics of luminous structures in the stratosphere above thunderstorms as imaged by low-light video / W.A. Lyons // *Geophys. Res. Lett.* 1994. V. 21. Is. 10. P. 875–878.
31. The hundred-year hunt for the sprites / W.A. Lyons, R.A. Armstrong, E.R. Williams // *EOS*. 2000. V. 81. N 33. P. 373–380.
32. Observations of upper atmospheric optical flashes recorded from an aircraft / D.D. Sentman, E.M. Wescott // *Geophys. Res. Lett.* 1993. V. 20. Is. 24. P. 2857–2860.
33. Preliminary results from the Sprites94 aircraft campaign: II. Blue jets / E.M. Wescott, D. Sentman, D. Osborne, D. Hampton, M. Heavner // *Geophys. Res. Lett.* 1995. V. 22. Is. 10. P. 1209–1212.
34. Upward electrical discharges from thunderstorm tops / W.A. Lyons, T.E. Nelson, R.A. Armstrong, V.P. Pasko, M.A. Stanley // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2003. V. 84. P. 445–454.
35. Upward electrical discharges from thunderstorms / P.R. Krehbiel, J.A. Rioussset, V.P. Pasko, R.J. Thomas, W. Rison, M.A. Stanley, H.E. Edens // *Nat. Geosci.* 2008. V. 1(4). P. 233–237.
36. Summer thunderstorm associated with cluster of blue jets and starters in Japan / T. Suzuki, M. Hayakawa, Y. Hobara, K. Kusunoki // *XV International Conference on Atmospheric Electricity*, Norman, Okla. 2014. 15–20 June.
37. First detection of summer blue jets and starters over Northern Kanto area of Japan: Lightning activity / T. Suzuki, M. Hayakawa, Y. Hobara, K. Kusunoki // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. Is. A7. A07307.
38. Blue jets: Upward lightning / E.V. Mishin, G.M. Milikh // *Space Sci. Rev.* 2008. V. 137. Is. 4. P. 473–488.
39. Blue jets: Their relationship to lightning and very large hailfall, and their physical mechanisms for their production / E.M. Wescott, D.D. Sentman, M.J. Heavner, D.L. Hampton, O.H. Vaughan // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 1998. V. 60. Is. 7–9. P. 713–724.

52. Sprites, ELF transients, and positive ground strokes / D.J. Boccippio, E.R. Williams, S.J. Heckman, W.A. Lyons, I.T. Baker, R. Boldi // *Science*. 1995. V. 269. Is. 5227. P. 1088–1091.
53. Dependence of positive and negative sprite morphology on lightning characteristics and upper atmospheric ambient conditions / J. Qin, S. Celestin, V.P. Pasko // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2013. V. 118. Is. 5. P. 2623–2638.
54. Charge moment change and lightning-driven electric fields associated with negative sprites and halos / J. Li, S. Cummer, G. Lu, L. Zigoneanu // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. Is. A9. A09310 (9 pp.).
55. Red sprites: Lightning as a fractal antenna / J.A. Valdivia, G.M. Milikh, K. Papadopoulos // *Geophys. Res. Lett.* 1997. V. 24. Is. 24. P. 3169–3172.
56. The role of the Space Shuttle videotapes in the discovery of sprites, jets and elves / W.L. Boeck, O.H. Vaughan, R.J. Blakeslee, B. Vonnegut, M. Brook // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 1998. V. 60. Is. 7–9. P. 669–677.
57. Космическая видеофотометрическая система для регистрации оптических излучений в атмосфере Земли / Б.И. Беляев, Ю.В. Беляев, В.В. Веллер, Л.В. Катковский, Э.И. Нестерович, В.А. Сосенко // *Журнал прикладной спектроскопии*. 2003. Т. 70. № 5. С. 678–687.
58. Быстрые вспышки электромагнитного излучения в верхней атмосфере / Б.А. Хренов, Г.К. Гарипов, П.А. Климов, М.И. Панасюк, В.И. Тулупов, А.В. Широков, И.В. Яшин // *Космические исследования*. 2008. Т. 46. № 1. С. 27–36.
59. Space observations of transient luminous events and associated emissions in the upper atmosphere above thunderstorm areas / E. Blanc // *Comptes Rendus Geoscience*. 2010. V. 342. Is. 4–5. P. 312–322.
60. Атмосферные вспышки в ультрафиолетовом и красном-инфракрасном диапазонах по данным спутника «Университетский-Татьяна-2» / Н.Н. Веденькин, Г.К. Гарипов, П.А. Климов, В.В. Клименко, Е.А. Мареев et al. // *ЖЭТФ*. 2011. Т. 140. № 5. С. 900–910.

2а. Влияние относительной влажности воздуха на свойства плазменных диффузных струй / Н. П. Виноградов, В. Ф. Тарасенко // Оптика атмосферы и океана. 2023. Т. 36. № 11. С. 928–933.

3а. Влияние частоты следования импульсов на формирование плазменных диффузных струй при давлении воздуха 1 Торр / Н.П. Виноградов, В. Ф. Тарасенко, Е.Х. Бакшт // Известия вузов. Физика. 2024. № 10. С. 17–22.

4а. Influence of Nanoparticles and Metal Vapors on the Color of Laboratory and Atmospheric Discharges / V. Tarasenko, N. Vinogradov, D. Beloplotov, A. Burachenko, M. Lomaev, D. Sorokin // Nanomaterials. 2022. V. 12. N. 4. P. 652.

5а. Формирование стримеров в неоднородном электрическом поле при низких давлениях воздуха / Е. Х. Бакшт, Н. П. Виноградов, В. Ф. Тарасенко // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 9. С. 777–781.

6а. Моделирование цвета высотных атмосферных разрядов с помощью импульсно-периодического разряда в воздухе, азоте и аргоне / В. Ф. Тарасенко, Е. Х. Бакшт, А. Г. Бураченко, Н. П. Виноградов // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 4. С. 279–283.

7а. Experimental Simulation of Red Sprites in a Laboratory / V. Tarasenko, N. Vinogradov, E. Baksht, D. Sorokin // Journal of Atmospheric Science Research. 2022. V. 5. N. 3. P. 26–36.

8а. Моделирование красных спрайтов с помощью ёмкостного разряда / В. Ф. Тарасенко, Е. Х. Бакшт, Н. П. Виноградов // Прикладная физика. 2022. № 4. С. 11–17.

9а. Спектры излучения воздуха низкого давления при диффузном стримерном разряде / В. Ф. Тарасенко, Е. Х. Бакшт, Н. П. Виноградов, Д.А. Сорокин // Оптика и спектроскопия. 2022. Т. 130. № 12. С. 1769–1777.

10а. Цилиндрические стримеры, формируемые в воздухе и азоте при низких давлениях / В. Ф. Тарасенко, Е. Х. Бакшт, Н. П. Виноградов, Д.А. Сорокин // Известия высших учебных заведений. 2022. Т. 65. № 11. С. 155–162.

11а. Ionization Waves, Propagating in Opposite Directions, as in Red Sprites / D. A. Sorokin, V. F. Tarasenko, E. Kh. Baksht, N. P. Vinogradov // European Journal of Environment and Earth Sciences. 2022. V. 3. N. 6. P. 42–48.