

ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 537.525; 533.9.072; 551.593.9

Лабораторная демонстрация в воздухе красных и голубых диффузных мини-струй

В.А. Панарин, В.С. Скакун, Э.А. Соснин, В.Ф. Тарасенко*

*Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3*

Поступила в редакцию 28.09.2016 г.

Проведены исследования импульсно-периодического разряда в воздухе при условиях, соответствующих режиму формирования диффузных мини-струй (апокампов). Подтверждено, что из плазмы разрядного канала, находящегося под плавающим потенциалом, формируются апокампы голубого и красного цветов. Показано, что апокампы, имеющие при низких давлениях размеры единицы – десятки сантиметров, обладают свойствами, присущими гигантским плазменным струям (спрайтам, стартерам и голубым струям), наблюдаемым в атмосфере Земли на высотах 17–100 км. Приводятся морфологические, спектральные и электрофизические параметры апокампов в различных условиях. Установлено, что при положительной полярности канала разряда плазменную мини-струю сформировать проще. Продемонстрировано постепенное изменение цвета диффузных струй с уменьшением давления воздуха.

Ключевые слова: переходные световые явления, спрайты, стартеры, голубые струи, экспериментальное моделирование, апокампы; transient luminous events, sprites, starters, blue jets, experimental simulation, apoamp.

Введение

В наших работах [1, 2] сообщалось о наблюдении нового режима разряда, который было предложено называть апокампом (от греч. *από* – *от* и *κάμπτω* – *изгиб, поворот*). Апокамп был зарегистрирован при атмосферном давлении воздуха и в форме диффузных струй, которые формировались в местах усиления электрического поля около изгибов искрового канала импульсно-периодического разряда. При формировании апокампа канал разряда находился под плавающим потенциалом и нагревал электроды с малым радиусом кривизны до температуры более 1000 °С. Апокампы (диффузные струи) были направлены перпендикулярно каналу и распространялись преимущественно вверх при горизонтальном расположении разрядного канала. При вертикальном положении канала апокампы распространялись почти параллельно поверхности экспериментального стенда [2].

Основные отличия апокампа от широко известных «плазменных струй» [3–6] – это отсутствие дополнительной прокачки газа через область разряда, пороговый характер появления, а также формирование апокампа и импульсно-периодического разряда в открытом пространстве, не ограниченном ди-

электрическими стенками. Сходство «плазменных струй» и апокампа состоит в том, что и те и другие формируются в виде волн ионизации («плазменных пуль» – движущихся ярко светящихся областей). В апокампе «плазменные пули» были зарегистрированы с помощью CCD-камеры [2].

Анализ результатов, полученных в [1, 2], и предварительные исследования свойств апокампа, проведенные нами при пониженном давлении воздуха [7], показали, что с уменьшением давления цвет апокампа изменяется с голубого на красный, а длина и диаметр диффузных струй увеличиваются. Подобные изменения цвета импульсных разрядов и их размеров наблюдаются в атмосфере Земли с увеличением расстояния от ее поверхности [8–14].

Исследованию высотных атмосферных разрядов (переходных световых явлений) уделялось и уделяется большое внимание. В атмосферной физике переходными световыми явлениями (англ. transient luminous events) называют крупномасштабные оптические явления, происходящие на больших высотах в условиях повышенной электрической активности, характерной для гроз, штормов и ураганов [8, 13]. Они, в частности, включают в себя обнаруженные в 1994 г. голубые стартеры (англ. blue starters) – визуально наблюдаемые светящиеся выбросы, формирующиеся с верхней границы грозовых облаков на высоте ~18 км, достигающие высот от 18 до 30 км и распространяющиеся со скоростью 27–153 км/с [9]. Считается, что голубые стартеры тесно связаны с другим феноменом – голубыми струями (англ. blue jets), имеющими среднюю стартовую высоту ~18 км,

* Виктор Александрович Панарин (panarin@yandex.ru); Виктор Семенович Скакун (skakun@loi.hcei.tsc.ru); Эдуард Анатольевич Соснин (badik@loi.hcei.tsc.ru); Виктор Федотович Тарасенко (VFT@loi.hcei.tsc.ru).

достигающими высот ~50 км и скорости в вертикальном направлении ~120 км/с. Наблюдаемое время жизни для голубых струй составляет 200–300 мс, а угловая апертура свечения составляет примерно 14° [10, 12]. В красной области спектра выше 50 км излучают преимущественно разряды, названные спрайтами (англ. sprites) [11, 12, 14]. На высотах 50–70 км они похожи на диффузные стримеры большого размера, а на высотах 70–90 км принимают форму диффузного облака.

В настоящее время исследования переходных световых явлений проводятся в разных направлениях (см. [8–17] и ссылки в них). С одной стороны, уточняются данные о характерных размерах, спектральном составе излучения и химическом составе феноменов, а также строятся теоретические модели происходящих в них процессов. В других работах показано [8–10], что голубые стартеры могут достигать высот 40–50 км. Установлено, что красный цвет струи определяется излучением первой положительной системы азота, а сине-голубой – второй положительной и первой отрицательной системами азота [14]. В ряде моделей показано, что за формирование восходящих струй отвечает накопленный на вершине грозового облака положительный заряд [13].

С другой стороны, природу переходных световых явлений изучают с помощью лабораторных разрядов [18–22]. Для этого в большинстве работ (см., например, [18–20]) использовался импульсный искровой разряд в условиях, соответствующих молниям в нижних слоях атмосферы и шаровой молнии [21]. Разряд формировался в промежутках большой длины с электродов, имеющих малый радиус кривизны. Экспериментальное моделирование условий появления спрайтов и голубых струй было проведено в работе [22]. В результате, при микросекундных разрядах в сухом воздухе пониженного давления (0,02–100 торр), около заряженной майларовой пленки были зарегистрированы области свечения голубого и красного цветов. При проведении эксперимента поверхность пленки вначале заряжалась коронным разрядом положительной или отрицательной полярности, а затем при откачке разрядной камеры наблюдался пробой, развивающийся от пленки в сторону заземленного электрода. Давление, при котором регистрировался пробой, зависело от величины заряда на пленке и, соответственно, от величины напряженности электрического поля в промежутке. Спектральные исследования, а также исследование динамики развития разряда в работе [22] не проводились. В нашей статье [7] впервые было установлено, что в условиях низких давлений апокамп обладает спектральными и морфологическими характеристиками, присущими голубым струям и стартерам, наблюдаемым в верхних слоях атмосферы.

Цель настоящей работы – показать новые возможности для экспериментального изучения высотных разрядов с помощью диффузных струй малого размера, формируемых в воздухе при давлениях, соответствующих высотам, на которых наблюдаются стартеры, голубые струи и спрайты. В условиях импульсно-периодического разряда за счет уменьше-

ния энергии в отдельном импульсе были получены апокампы голубого и красного цветов, что позволило исследовать их свойства в лабораторных условиях.

Экспериментальная установка и методики измерений

На рис. 1 показана схема экспериментальной установки для исследования свойств диффузных мини-струй в воздухе при давлениях 1–760 торр.

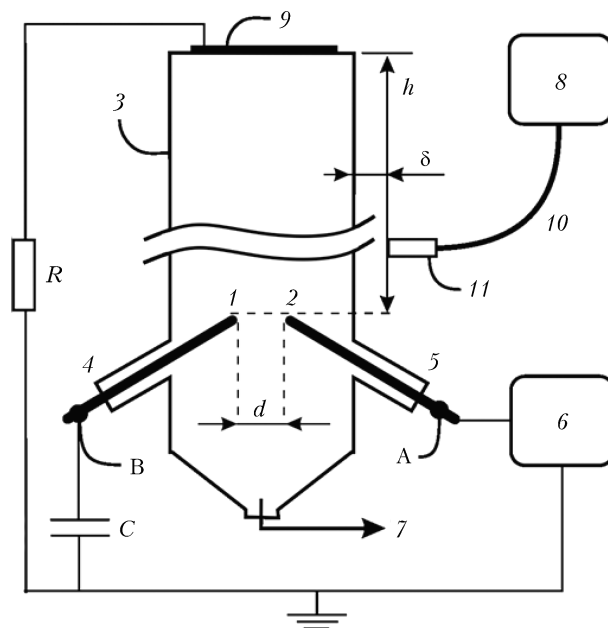


Рис. 1. Схема установки: 1 – электрод под плавающим потенциалом; 2 – высоковольтный электрод; 3 – кварцевая камера с внутренним диаметром 5 см; 4, 5 – входы с уплотнениями; 6 – генератор; 7 – патрубок подачи и откачки воздуха; 8 – спектрометр; 9 – дополнительный съемный электрод; 10 – оптоволоконно; 11 – коллимирующая линза; $C = 10$ пФ, $R = 50$ Ом

Для образования апокампа необходимо предварительно зажечь импульсно-периодический разряд между электродами с малым радиусом кривизны.

Импульсно-периодический разряд, который мы называем основным, формировался между цилиндрическими стальными электродами 1 и 2, имеющими диаметр ~2 мм и образующими промежуток $d = 10$ мм. Концы электродов были заостренными. Электроды помещались в цилиндрическую камеру через входы с уплотнениями 4 и 5. Камера была изготовлена из кварца, прозрачного в области до 200 нм. Для зажигания в ней основного разряда давление воздуха снижали до нескольких сотен торр. После зажигания основного разряда давление в камере могло изменяться от единиц торр до атмосферного при обеих полярностях генератора. Электрод 1 находился под плавающим потенциалом и соединялся с заземленным электродом генератора через конденсатор $C = 10$ пФ. Электрод 2 соединялся со вторичной обмоткой импульсного трансформатора генератора высоковольт-

ных импульсов 6. Генератор формировал импульсы напряжения положительной или отрицательной полярности с длительностью импульса на полувысоте $\tau \sim 1,5$ мкс, частотой следования импульсов $f = 16$ кГц, амплитудой до 13 кВ и фронтом импульса $\sim 0,8$ мкс. При давлении воздуха 760 торр промежуток между электродами 1–2 не пробивался, а на электроде 2 формировался коронный разряд.

Для откачки и напуска воздуха использовали патрубков 7. Давление в камере контролировали с помощью вакуумметра МТИ-11201, имеющего класс точности 0,4.

Чтобы определить рассеиваемую в основном разряде мощность, с помощью осциллографа TDS 3034 (Tektronix, Inc.) записывали временной ход импульсов напряжения и тока. Импульсы напряжения снимали в точках А и В (см. рис. 1) с помощью емкостных делителей напряжения, а импульсы тока – токовым шунтом, установленным за конденсатором, соединенным с точкой В. Кроме того, регистрировались импульсы тока с дополнительного электрода 9 диаметром 4 см, выполненного из фольги и установленного на поверхности верхнего торца кварцевой камеры.

Регистрацию спектров излучения из различных областей разряда проводили с помощью сборки, включающей в себя оптоволокно с известным спектром пропускания 10 и коллимирующую линзу 11 с фокусным расстоянием 30 мм, а также спектрометр HR2000+ES (Ocean Optics, Inc.) на основе многоканальной ПЗС-линейки Sony ILX511B (рабочий диапазон 200–1100 нм, спектральная полуширина аппаратной функции $\sim 1,33$ нм). В экспериментах линза позволяла собирать излучение из пятна диаметром до 5 мм. Она располагалась на расстоянии δ от поверхности колбы и перемещалась по высоте колбы h , при этом величина $h = 0$ соответствовала положению разрядного канала между электродами, а апокамп развивался поперек канала вдоль оси кварцевой камеры.

Интегральное свечение разряда регистрировали фотокамерой Canon PowerShot SX60 HS в режиме серийной покадровой съемки. Для регистрации динамики развития апокампа при атмосферном давлении воздуха использовалась 4-канальная CCD-камера HSFC-PRO с минимальной длительностью одного кадра 3 нс. Кроме того, с помощью фотодиода PD025 (Photek) в диапазоне длин волн от 200 до 400 нм записывали временной ход излучения на различных высотах h .

Результаты экспериментов

При проведении экспериментов было получено около 10 тыс. фотографий апокампа в различных режимах при давлениях воздуха от 1 до 760 торр. Фотографии интегрального свечения разряда с апокампом для различных полярностей генератора при давлениях 30, 90 и 165 торр показаны на рис. 2 (цв. вкладка).

Между электродами в нижней части фотографий видно яркое свечение основного разряда. От основного разряда вверх распространяются диффузные струи – апокампы. При низких давлениях может наблюдаться дополнительная струя, которая направлена вниз (рис. 2, а). Цвет апокампа и его длина при заданном напряжении генератора зависят от давления воздуха. При давлении 50–760 торр цвет апокампа голубой, а при давлениях 1–30 торр становится красным.

На рис. 3 (цв. вкладка) показанный апокамп получен в открытом пространстве при давлении 760 торр. В этих условиях его типичная длина не превышала 6–7 см. Зажигание основного разряда в этом случае осуществлялось за счет замыкания промежутка между электродами 1 и 2 проводником. В результате вначале зажигается канал импульсного разряда 3 и далее на месте его изгиба формируется апокамп, состоящий из яркого «отростка» 4 и продолжающей его диффузной струи 5.

При изменении частоты следования импульсов основного разряда было зарегистрировано одновременное формирование двух и более плазменных струй. Если полярность импульса напряжения отрицательная и давление выше 600 торр, апокамп не формируется даже при максимальной амплитуде импульсов напряжения используемого генератора (13 кВ). Во всем диапазоне исследуемых давлений яркость и размеры апокампа при положительной полярности генератора были больше, чем при отрицательной. При положительной полярности импульсов напряжения длина апокампа увеличивается с уменьшением давления воздуха (см. рис. 2).

На рис. 2 и 3 также видно, что с увеличением давления длина яркого «отростка» сокращается, а длина диффузной струи увеличивается. С уменьшением давления происходит обратный процесс. При давлениях воздуха в десятки торр наблюдалось уменьшение диаметра апокампа на расстоянии 5–10 см от основного разряда, а область яркого свечения вблизи основного разряда отсутствовала (см. рис. 2, а).

При атмосферном давлении воздуха была проведена съемка апокампа с помощью 4-кадровой CCD-камеры с регулируемой длительностью одного кадра. Интегральный снимок плазменного канала, служащего источником одинарного апокампа, и области яркого свечения, из которой формируется струя, приведен на рис. 4. Видно, что при повышенных давлениях апокамп имеет область более яркого свечения, которая формируются у изгибов на основном разряде и расположена перпендикулярно искровому каналу. Области яркого свечения также были зарегистрированы с помощью фотоаппарата (см. рис. 2, в, г и рис. 3).

Рис. 5 показывает динамику развития апокампа при положительной полярности импульсов напряжения и давлении воздуха 760 торр. Свечение основного разряда обрезалось экраном из черной бумаги. Видна яркая область свечения апокампа у основного разряда, положение которой не изменялось, а также светящаяся область – «плазменная пуля», которая двигалась от канала основного разряда. Светящаяся

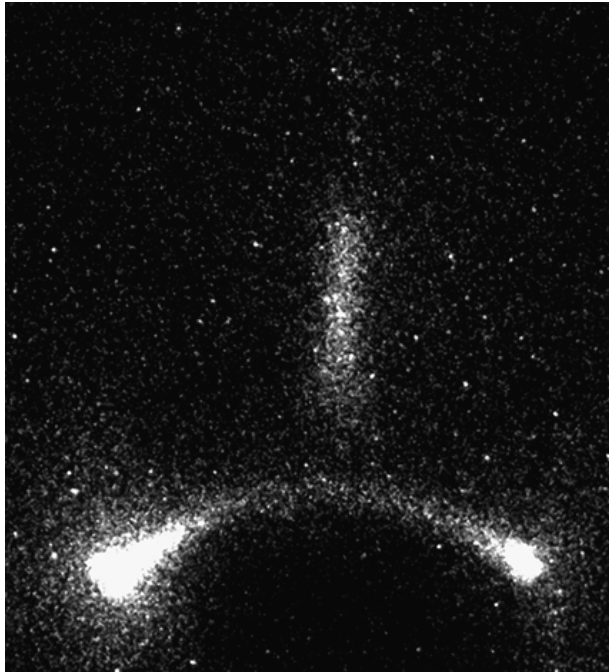


Рис. 4. Интегральный снимок места формирования апокампа. Время накопления 300 нс, размер кадра по вертикали 25 мм. Давление воздуха 760 торр

область на рис. 5 перемещается снизу вверх. Скорость ее движения при атмосферном давлении воздуха достигала 200 км/с.

На рис. 6 приведены спектры излучения основного разряда, а также апокампа на расстояниях 25 и 50 мм от основного разряда при давлении воздуха 120 торр и отрицательной полярности импульса напряжения. Видно, что эмиссионный спектр основного разряда содержит полосы $N_2(C^3\Pi_u - B^3\Pi_g)$, $N_2^+(B^2\Sigma_u^+ - X^2\Sigma_g^+)$, $N_2(B^3\Pi_g - A^3\Pi_u)$, а в спектре апокампа преобладает излучение второй положительной системы азота. Наиболее интенсивные линии на рисунке ограничены по амплитуде. При положительной полярности (рис. 7) с уменьшением давления интен-

сивность всех вышеперечисленных полос увеличивается, причем за счет $N_2^+(B^2\Sigma_u^+ - X^2\Sigma_g^+)$ -полосы увеличивается вклад в голубой и синей частях спектра, а за счет $N_2(B^3\Pi_g - A^3\Pi_u)$ – в красной и оранжевой, что мы и наблюдаем.

Изменение цвета разряда также хорошо видно на интегральных фотографиях (см. рис. 2, а, б). Отметим, что спектры излучения апокампа при низких давлениях подобны спектрам излучения спрайтов (см., например, [13]).

На рис. 8 даны временные вариации импульса напряжения U_A в точке А при положительной полярности генератора; тока разряда I_C через конденсатор С, установленный последовательно с электродом 1; тока разряда I_R апокампа на дополнительный электрод 9 и импульса излучения I_p апокампа. Амплитуда и форма тока апокампа и сигнал с фото диода сильно зависят от давления в камере. Максимальные токи регистрировались при низких давлениях (9–30 торр), а максимальный сигнал с фото диода был зарегистрирован при давлении воздуха 30 торр. Максимумы импульсов тока через апокамп и излучения совпадают (рис. 8, в, г). Увеличение напряжения на основном разряде приводило к увеличению амплитуды тока апокампа. Разница напряжений в точках А и В для обеих полярностей генератора и всех исследованных давлений составляла ~1 кВ. Таким образом, основной разряд находился под напряжением, близким к максимальному напряжению генератора. Апокамп возникал спустя ~500 нс после подачи импульса напряжения на промежуток основного разряда по достижении порогового напряжения, которое зависело от давления воздуха и полярности импульса напряжения.

На рис. 9 показаны зависимости мощности, рассеиваемой основным разрядом, от давления воздуха в камере при различных полярностях импульсов напряжения. Видно, что рассеиваемая мощность при отрицательной полярности несколько меньше, чем при положительной, и с уменьшением давления уменьшается.

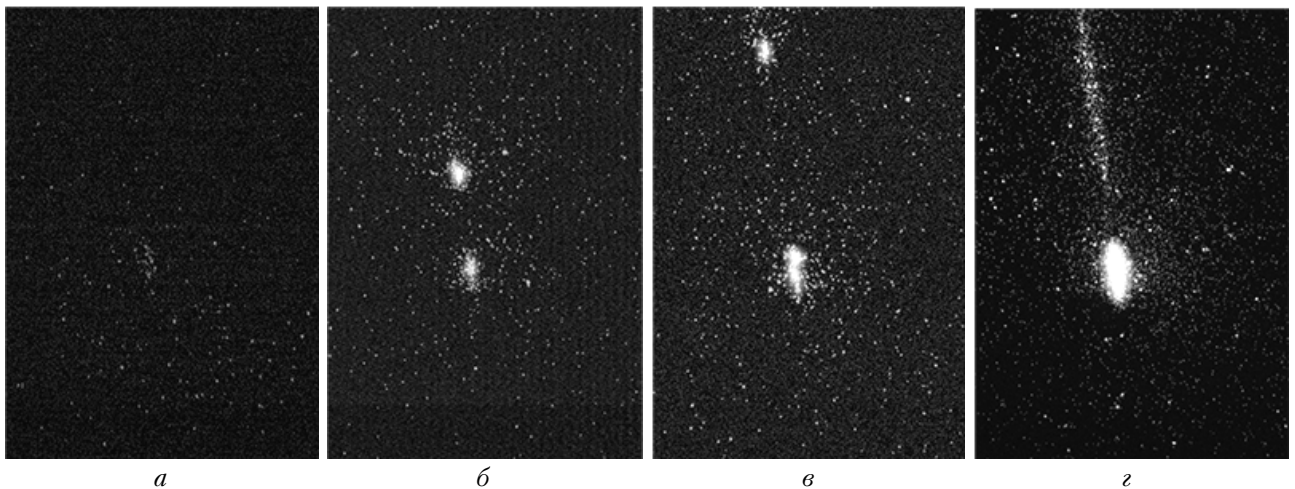


Рис. 5. Динамика развития апокампа: а–в – экспозиция 3 нс, пауза между кадрами 17 нс; г – интегральный кадр с накоплением 120 нс. Размер кадра по вертикали 26,27 мм. Давление воздуха 760 торр

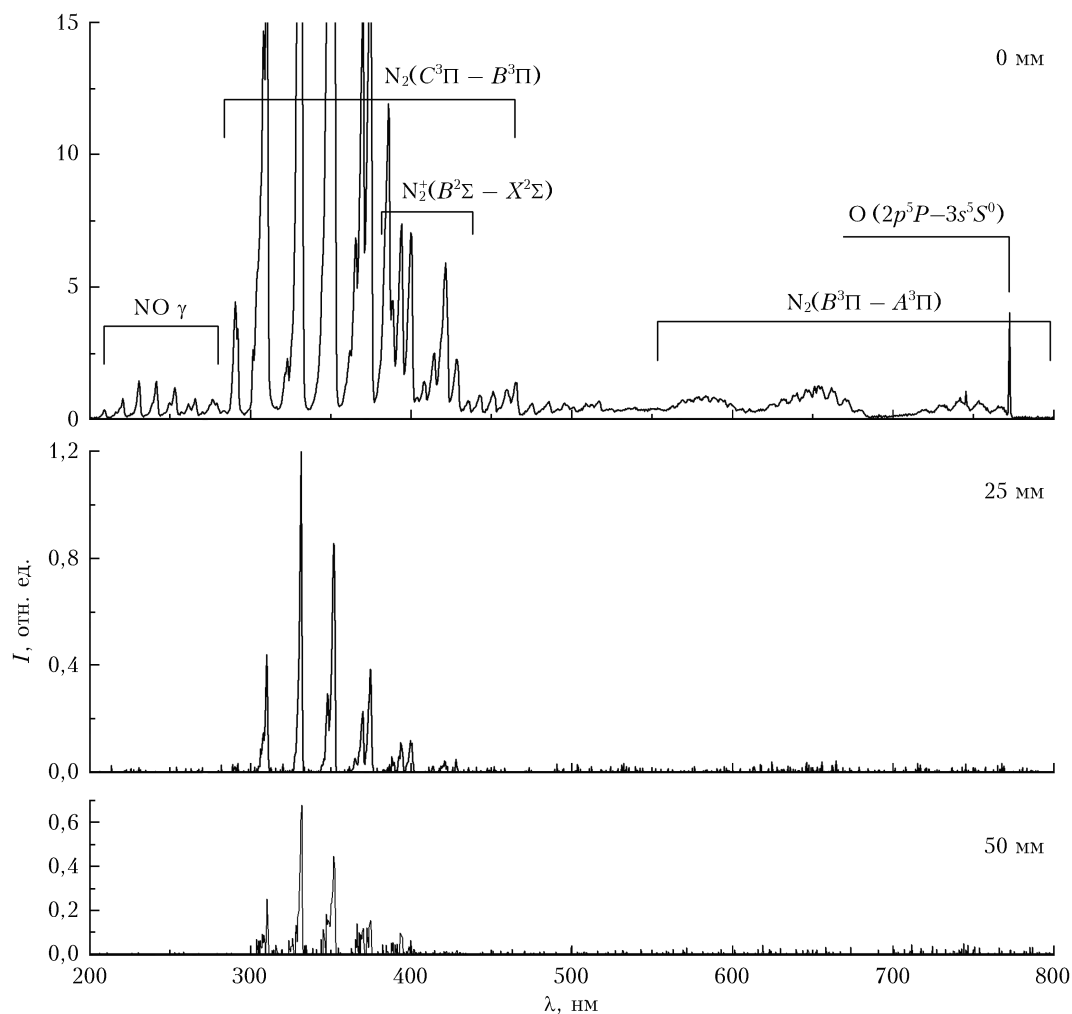


Рис. 6. Спектры излучения основного разряда ($h = 0$ мм) и апокампа ($h = 25$ и 50 мм) при давлении воздуха 120 торр и отрицательной полярности импульса напряжения; $f = 50$ кГц; $\delta = 10$ мм

Обсуждение результатов

Как было отмечено во введении, в последние годы достигнуты значительные успехи в изучении переходных световых явлений (см. [8–17] и ссылки в них). В экспериментах, проводимых на высотных станциях и с помощью спутников, многими научными группами регистрировались спрайты, голубые струи и стартеры, а также фиксировались динамика их развития, спектры излучения и длительность этих явлений. Разработаны теоретические модели, позволяющие моделировать развитие волн ионизации (стримеров) при пониженных давлениях. Однако имеется ряд важных вопросов, относительно которых и в настоящее время нет единой точки зрения. Не ясно, какой процесс инициирует начало формирования голубых струй и спрайтов; почему крупномасштабные разрядные явления, в том числе и на высотах ниже 20 км, развиваются при сравнительно низких электрических полях; что определяет цвет наблюдаемых разрядов и т.д.

Экспериментальное моделирование высотных разрядов способно ответить на эти вопросы. Но

такое моделирование затруднено рядом обстоятельств. Во-первых, размеры переходных световых явлений очень велики и сложно создать их аналог в лабораторных условиях. Во-вторых, время и место формирования переходных световых явлений нельзя контролировать, следовательно, необходимо найти способы стабилизации времени и места их появления.

На основе проведенных исследований можно рекомендовать использование апокампа для изучения свойств переходных световых явлений в лабораторных условиях. К настоящему времени достоверно установлено, что предварительный импульсно-периодический разряд с разрядным каналом под плавающим потенциалом и малые амплитуды импульсов напряжения (~ 10 кВ) позволяют формировать диффузные струи – апокампы – различного цвета. Небольшие размеры диффузных струй реализованы в воздухе за счет малых напряжений и энергии в отдельном импульсе. Применение импульсно-периодического режима разряда позволило нам сформировать апокампы при высоких частотах следования импульсов, что облегчило их наблюдение.

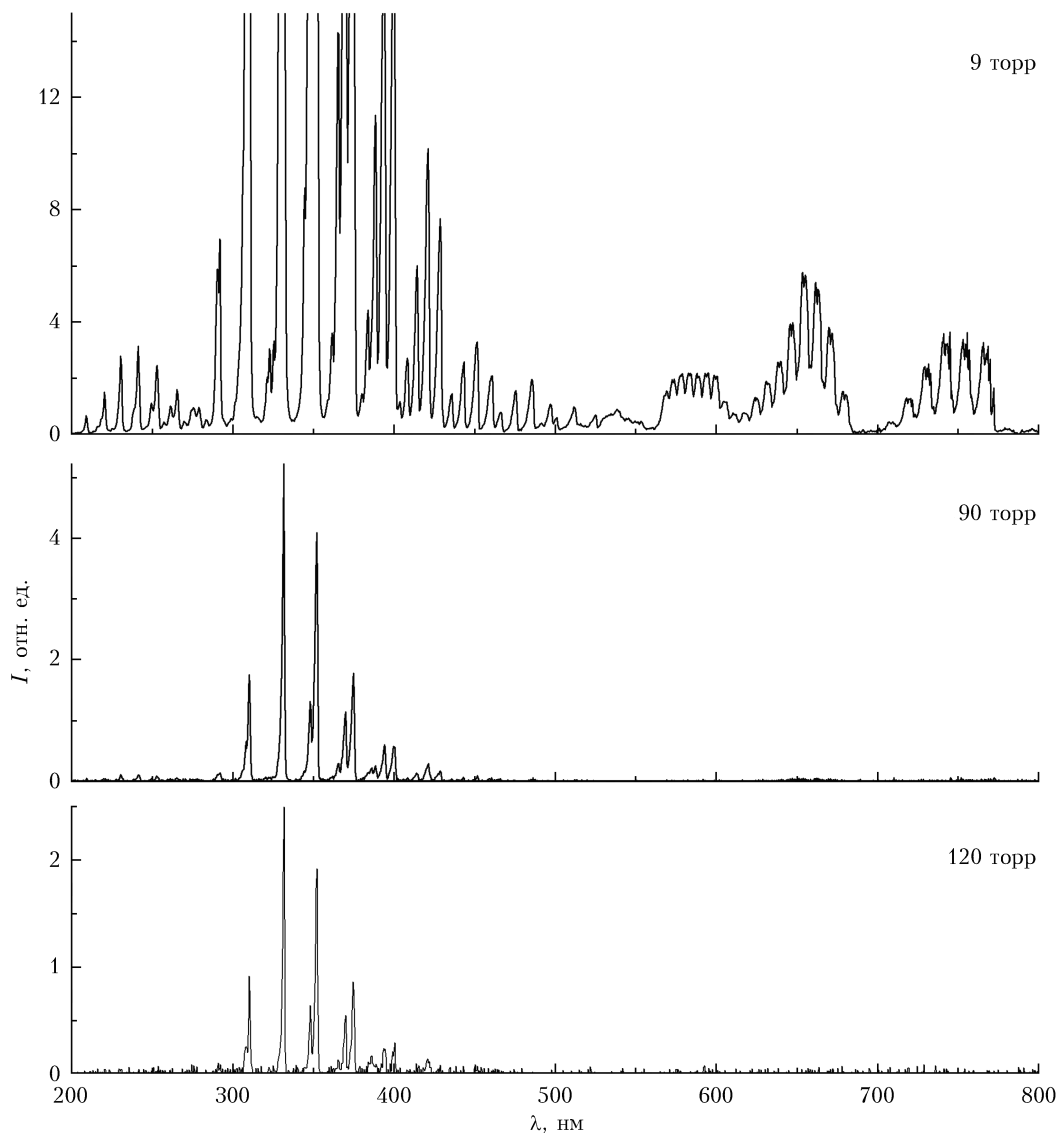


Рис. 7. Спектры излучения апокампа ($h = 50$ мм) при давлении воздуха 9, 90 и 120 торр и положительной полярности импульса напряжения; $f = 50$ кГц; $\delta = 10$ мм

На данный момент выявлены следующие родственные черты между апокампами и такими переходными световыми явлениями, как спрайты, голубые струи, стартеры.

1. Для формирования перечисленных форм рядов не нужны высокие средние электрические поля: в экспериментах по наблюдению апокампа величина напряженности поля составляла ~ 1 кВ/см. Эти поля соответствуют электрическим полям в верхних слоях атмосферы Земли при формировании переходных световых явлений [8–17]. Отметим, что двукратное изменение среднего электрического поля в камере за счет подачи напряжения на дополнительный электрод 9 (см. рис. 1) не влияло на форму апокампа. К изменению формы апокампа приводило только существенное увеличение среднего электрического поля (в 5 и более раз).

2. Изменение цвета апокампа легко достигается изменением давления воздуха. При малых давлениях

диффузные мини-струи имеют красный оттенок, а при давлениях более 50 торр — преимущественно голубой. Это изменение цвета наблюдается при переходе от стартеров и голубых струй к спрайтам. Можно отметить, что на концентрацию частиц в атмосфере Земли с увеличением высоты над уровнем моря влияют не только давление, но и температура воздуха, которая меняется сложным образом. Как известно, она уменьшается с увеличением высоты до ~ 15 км, затем растет до высот 30–35 км, потом снова уменьшается до ~ 90 км, а дальше опять возрастает. Влияние температуры на свойства апокампа планируется исследовать в будущем.

3. Стартеры и голубые струи распространяются вверх от поверхности Земли [8–12]. Апокампы при повышенных давлениях и горизонтальном положении канала импульсно-периодического разряда также направлены вверх от поверхности экспериментального стенда.

4. Спайты могут распространяться как вверх от поверхности Земли, так и вниз [14]. Подобная картина наблюдалась в нашем эксперименте при уменьшении давления в разрядной камере (см. рис. 2, *a*).

На основании полученных данных можно сделать следующие предположения о механизме формирования вышеперечисленных переходных световых явлений.

Во-первых, для их инициирования должны создаваться области с высокой концентрацией заряженных частиц и высокой локальной напряженностью электрического поля. При формировании апокампа такие области формируются за счет импульсно-периодического разряда с диаметром искрового канала около 1 мм. Возле искрового канала происходит локальное усиление электрического поля. Кроме того, при частотах следования основного разряда

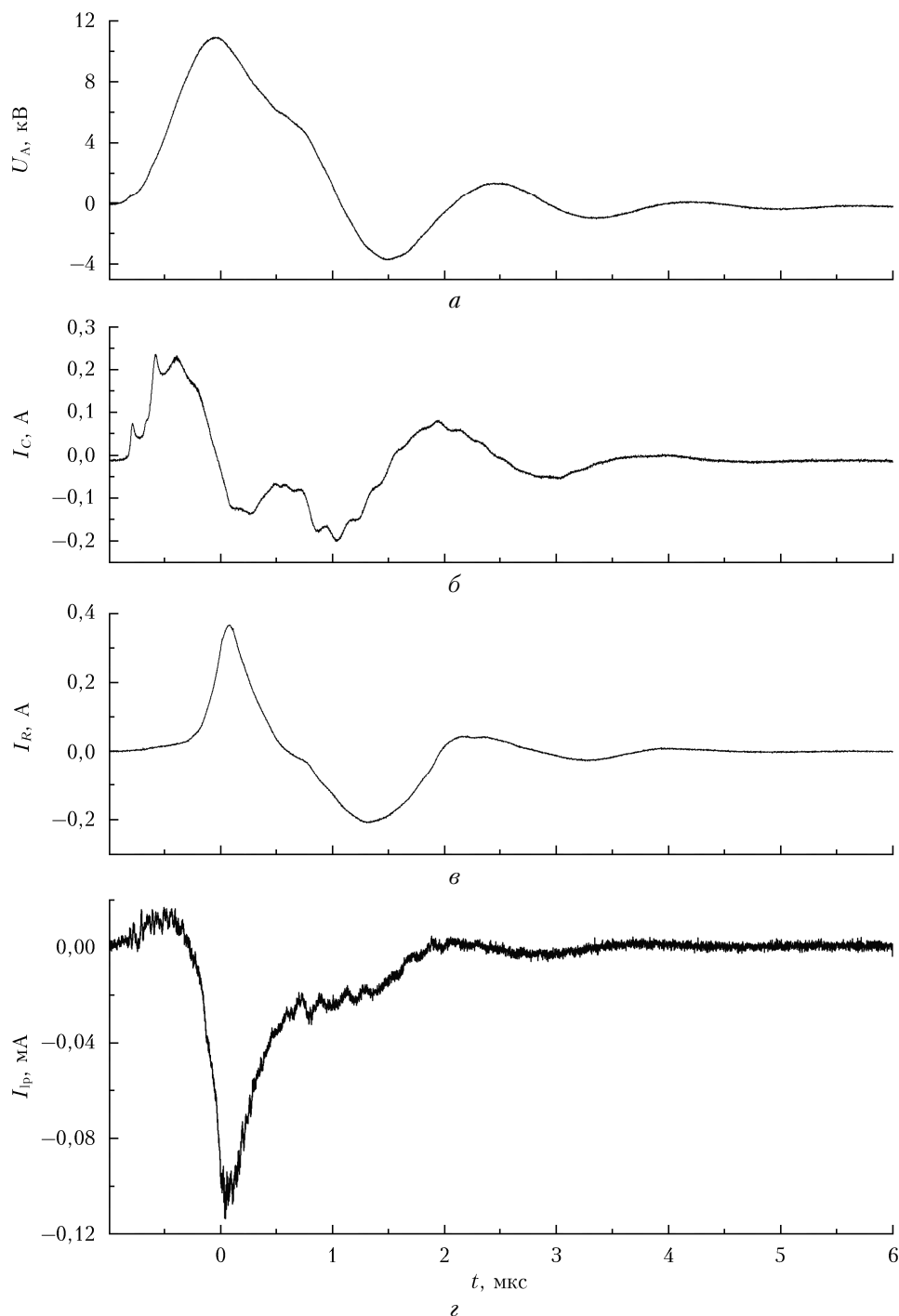


Рис. 8. Временной ход импульсов напряжения U_A в точке А при положительной полярности генератора (*a*); тока разряда I_C через конденсатор, установленный последовательно с электродом 1 (*b*); тока разряда I_R апокампа на дополнительный электрод (*v*); осциллограмма импульса излучения I_{pr} апокампа (*z*)

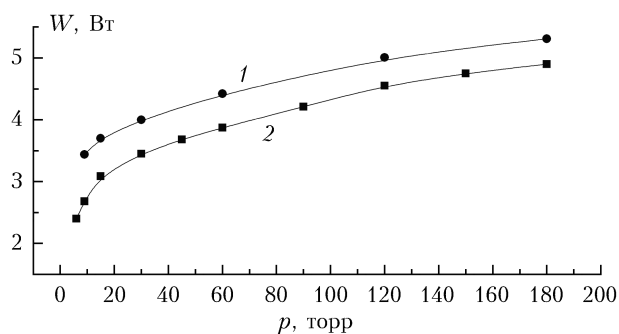


Рис. 9. Мощность, рассеиваемая основным разрядом при различных давлениях воздуха в камере при положительной (1) и отрицательной (2) полярности питающего импульса напряжения; $f = 50$ кГц

в десятки килогерц область камеры, в которой формируется апокамп, предварительно ионизируется коротковолновым излучением основного разряда. В атмосфере Земли газ также ионизован за счет космического излучения и солнечного ветра, а локальные области с высокой концентрацией заряженных частиц создаются при разрядах молний и космическими частицами с высокой энергией [15]. В ряде работ сообщается о корреляции появления стартеров и голубых струй с разрядами молний [14]. На формирование спрайтов, по-видимому, в большей степени влияют космические частицы с высокой энергией, которые создают области повышенной концентрации заряженных частиц, что может приводить к развитию спрайтов как вверх, так и вниз относительно поверхности Земли [14].

Второе предположение касается оптимальных условий формирования голубых струй и спрайтов от области с положительным зарядом. Данное предположение связано с регистрацией убегающих электронов как при атмосферных разрядах [15], так и в лабораторных условиях [23]. Казалось бы, генерация убегающих электронов должна создавать наиболее оптимальные условия для формирования гигантских стримеров (голубых струй и спрайтов) от областей с избыточным отрицательным зарядом, на границе которых формируются пучки убегающих электронов, осуществляя предьонизацию перед фронтом волны ионизации. Но голубые струи и стартеры распространяются преимущественно от областей с положительным зарядом [13, 14]. Кроме того, из экспериментальных работ следует, что скорость катодонаправленного стримера больше, чем анодонаправленного [24]. При исследованиях апокампов также было установлено, что плазменную мини-струю существенно легче сформировать при положительной полярности искрового канала основного разряда.

Для объяснения данного явления можно использовать наши результаты по формированию характеристического излучения в азоте и кислороде. В работе [25] путем моделирования было показано, что эффективность генерации характеристического излучения в легких газах существенно больше, чем тормозного. На основании этих результатов более высокая скорость распространения волны ионизации

от электрода с малым радиусом кривизны положительной полярности была объяснена повышенной напряженностью электрического поля на ее фронте. При катодонаправленной волне ионизации убегающие электроны, которые набирают энергию в высоком электрическом поле на ее фронте, быстро уходят в область волны ионизации. Соответственно, они успевают предьонизовать воздух только в узкой области перед фронтом волны ионизации. Основную предьонизацию воздуха и других газов перед фронтом волны ионизации осуществляют кванты характеристического излучения, которые генерируются при торможении убегающих электронов. Эти кванты осуществляют предьонизацию на сравнительно малых расстояниях от места взаимодействия убегающих электронов с частицами атмосферных газов. Так, в воздухе атмосферного давления квант характеристического излучения азота поглотится на расстоянии 4 мм от места его рождения [25, 26]. Характеристическое излучение распространяется во все стороны, в том числе предьонизирует область перед фронтом волны ионизации. С уменьшением концентрации частиц воздуха расстояние, на котором поглотятся кванты характеристического излучения, будет пропорционально увеличиваться.

В случае волны ионизации, которая движется от электрода с малым радиусом кривизны отрицательной полярности, убегающие электроны, двигаясь синхронно с областью высокого электрического поля, набирают существенно большие энергии и, следовательно, осуществляют предьонизацию на значительных расстояниях от фронта волны ионизации. Однако это уменьшает напряженность электрического поля перед фронтом волны ионизации, а соответственно, и скорость движения стримера [24] и волны ионизации в лабораторных разрядах [27]. Применительно к формированию переходных световых явлений этот механизм приведет к преимущественному формированию их от областей с избыточным положительным зарядом.

Данные о влиянии полярности важны и при определении механизма продвижения лидера молнии различной полярности. Рентгеновское излучение при торможении убегающих электронов было зарегистрировано при разряде молний [15], при искровых разрядах в метровых промежутках [18–21, 28, 29] и при коронном разряде за счет модулированных импульсов напряжения длительностью 5 мс [30]. Мы предполагаем, что при прорастании лидера линейной молнии также генерируются убегающие электроны с энергией в десятки – сотни килоэлектронвольт, которые приводят к появлению как тормозного, так и характеристического излучения. По-видимому, плавное движение положительного лидера молнии [18] обусловлено преимущественной предьонизацией воздуха перед головкой лидера характеристическим рентгеновским излучением. Скачкообразное движение отрицательного лидера молнии [18] можно объяснить периодической предьонизацией области перед головкой лидера убегающими электронами, которые генерируются в данном случае в виде отдельных коротких импульсов. После генерации убегающих

электронов и пробоя, вызванного ими, электрическое поле у головки лидера уменьшается и требуется некоторое время для его увеличения за счет накопления отрицательных зарядов.

В будущих экспериментах планируется модернизация установки, которая позволит увеличить размеры разрядной камеры и изменять температуру воздуха, приближая условия эксперимента к условиям разрядов в верхних слоях атмосферы. Кроме того, планируется варьировать длительность, фронт и амплитуду импульса напряжения, а также частоту следования импульсов.

Заключение

Проведены экспериментальные исследования разрядов в воздухе при давлениях 1–760 торр, которые формируются в местах усиления поля на изгибах канала импульсно-периодического разряда между электродами с малым радиусом кривизны и имеют форму диффузных струй (апокампов). Апокамп распространяется в виде волны ионизации со скоростью до 200 км/с. Спектр излучения апокампа изменяется от голубого (при давлениях сотни – десятки торр) до красного (при давлениях десятки – единицы торр). Апокамп формируется при электрических полях ≤ 1 кВ/см, сопоставимых с электрическими полями в верхних слоях атмосферы Земли. При напряжениях ~ 10 кВ размер апокампа составляет единицы – десятки сантиметров. Предложено экспериментально моделировать атмосферные разряды (голубые струи и спрайты) на больших высотах (> 20 км) с помощью апокампа.

Исследование выполнено в рамках гранта РФФИ (проект № 14-29-00052).

1. Скакун В.С., Панарин В.А., Печеницин Д.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. Формирование апокампического разряда в условиях атмосферного давления // Изв. вузов. Физ. 2016. Т. 59, № 5. С. 92–95.
2. Соснин Э.А., Скакун В.С., Панарин В.А., Печеницин Д.С., Тарасенко В.Ф., Бакшт Е.Х. Феномен апокампического разряда // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 103, № 12. С. 857–860.
3. Shao T., Zhang C., Wang R., Zhou Y., Xie Q., Fang Z. Comparison of atmospheric-pressure He and Ar plasma jets driven by microsecond pulses // IEEE Trans. Plasma Sci. 2015. V. 43, N 3. P. 726–732.
4. Lacoste D.A., Bourdon A., Kuribara K., Urabe K., Stauss S., Terashima K. Pure air-plasma bullets propagating inside microcapillaries and in ambient air // Plasma Sources Sci. Technol. 2014. V. 23, N 6. P. 062006.
5. Sosnin E.A., Panarin V.A., Skakun V.S., Tarasenko V.F., Pechenitsin D.S., Kuznetsov V.S. Source of an atmospheric-pressure plasma jet formed in air or nitrogen under barrier discharge excitation // Tech. Phys. 2016. V. 61, N 5. P. 789–792.
6. Li X., Naidis G.V., Laroussi M., Reuter S., Graves D.B., Ostrikov K. Reactive species in non-equilibrium atmospheric-pressure plasmas: Generation, transport, and biological effects // Phys. Rep. 2016. V. 630, N 5. P. 1–84.
7. Соснин Э.А., Панарин В.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф. Моделирование голубых струй и спрайтов с помощью апокампа, формируемого при пониженных давлениях воздуха // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 10. С. 855–858.
8. Pasko V.P. Blue jets and gigantic jets: Transient luminous events between thunderstorm tops and the lower ionosphere // Plasma Phys. Controlled Fusion. 2008. V. 50, N 12. P. 4050.
9. Wescott E.M., Sentman D.D., Heavner M.J., Hampton D.L., Osborne D.L., Vaughan O.H.Jr. Blue starters: Brief upward discharges from an intense Arkansas thunderstorm // Geophys. Res. Lett. 1996. V. 23, N 16. P. 2153–2156.
10. Wescott E.M., Sentman D., Osborne D., Hampton D., Heavner M. Preliminary results from the Sprites94 aircraft campaign: II. Blue jets // Geophys. Res. Lett. 1995. V. 22, N 10. P. 1209–1212.
11. Pasko V.P., Yair Y., Kuo C.-L. Lightning related transient luminous events at high altitude in the Earth's atmosphere: Phenomenology, mechanisms and effects // Space Sci. Rev. 2012. V. 168, N 1–4. P. 475–516.
12. Singh D., Singh R.P., Kumar S., Dharmaraj T., Singh A.K., Singh A.K., Patil M.N., Singh S. Lightning and middle atmospheric discharges in the atmosphere // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2015. V. 134, N 10. P. 78–101.
13. Pasko V.P., George J.J. Three-dimensional modeling of blue jets and blue starters // J. Geophys. Res. 2002. V. 107, N A12. P. 1458.
14. Blanc E. Space observations of Transient Luminous Events and associated emissions in the upper atmosphere above thunderstorm areas // C. R. Geosci. 2010. V. 342, N 4–5. P. 312–322.
15. Гуревич А.В., Караштин А.Н., Рябов В.А., Чубенко А.П., Щенетов А.Л. Нелинейные явления в ионосферной плазме. Влияние космических лучей и пробоя на убегающих электронах на грозовые разряды // Успехи физ. наук. 2009. Т. 179, вып. 7. С. 779–790.
16. Pasko V.P., Qin J., Celestin S. Toward better understanding of sprite streamers: Initiation, morphology, and polarity asymmetry // Surv. Geophys. 2013. V. 34, N 6. P. 797–830.
17. Raizer Y.P., Milikh G.M., Shneider M.N. Streamer and leader-like processes in the upper atmosphere: Models of red sprites and blue jets // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2010. V. 115. P. A00E42.
18. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001. 320 с.
19. Rakov V.A., Uman M.A. Lightning: Physics and effects. UK. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 687 p.
20. March V., Montanya J. Influence of the voltage-time derivative in X-ray emission from laboratory sparks // Geophys. Res. Lett. 2010. V. 37, N 10. P. L19801.
21. Егоров А.И., Степанов С.И., Шабанов Г.Д. Демонстрация шаровой молнии в лаборатории // Успехи физ. наук. 2004. Т. 174, вып. 1. С. 107–109.
22. Robledo-Martinez A., Palacios G., Vera A., Sobral H.M. Modelling sprites and blue jets in the lab through the discharge of a dielectric // 31st ICPIG. Granada, 2013. PS2-001.
23. Генерация убегающих электронов и рентгеновского излучения в разрядах повышенного давления / Под ред. В.Ф. Тарасенко. Томск: STT, 2015. 568 с.
24. Wang D., Jikuya M., Yoshida S., Katsuki S., Akiyama H. Positive- and negative-pulsed streamer discharges generated by a 100-ns pulsed-power in atmospheric air // IEEE Trans. Plasma Sci. 2007. V. 35, N 4. P. 1098–1103.
25. Козьрев А.В., Тарасенко В.Ф., Бакшт Е.Х., Шутько Ю.В. Генерация мягкого рентгеновского излучения и его роль в развитии пробоя воздушного промежутка при повышенных давлениях // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37, вып. 22. С. 26–33.

26. Козырев А.В., Кожевников В.Ю., Костыря И.Д., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф., Шутц Д.В. Излучение диффузного коронного разряда в воздухе атмосферного давления // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 11. С. 1009–1017; Kozzyrev A.V., Kozhevnikov V.Yu., Kostyrya I.D., Rybka D.V., Tarasenko V.F., Schitz D.V. Radiation from a diffuse corona discharge in atmospheric pressure air // Atmos. Ocean. Opt. 2012. V. 25, N 2. P. 176–184.
27. Тарасенко В.Ф., Белоплотов Д.В., Ломаев М.И. Динамика ионизированных процессов в азоте, воздухе и SF₆ высокого давления при субнаносекундном пробое, инициируемом убегающими электронами // Физ. плазмы. 2015. Т. 41, № 10. С. 902–917.
28. Dwyer J.R., Saleh Z., Rassoul H.K., Concha D., Rahman M., Cooray V., Jerauld J., Uman M.A., Rakov V.A. A study of X-ray emission from laboratory sparks in air at atmospheric pressure // J. Geophys. Res. D. 2008. V. 113, iss. 23. P. D23207.
29. Nguyen C.V., van Deursen A.P.J., Elbert U.M. Multiple X-ray bursts from long discharges in air // J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. V. 41, N 23. P. 234012.
30. Рыбка Д.В., Андроников И.В., Евтушенко Г.С., Козырев А.В., Кожевников В.Ю., Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф., Тригуб М.В., Шутько Ю.В. Коронный разряд в воздухе атмосферного давления при модулированном импульсе напряжения длительностью 10 мс // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 1. С. 85–90; Rybka D.V., Andronikov I.V., Evtushenko G.S., Kozzyrev A.V., Kozhevnikov V.Yu., Kostyrya I.D., Tarasenko V.F., Trigub M.V., Shut'ko Yu.V. Corona discharge in atmospheric pressure air under a modulated voltage pulse of 10 ms // Atmos. Ocean. Opt. 2013. V. 26, N 5. P. 449–454.

V.A. Panarin, V.S. Skakun, E.A. Sosnin, V.F. Tarasenko. Laboratory simulation of blue and red diffuse minijets in air environment.

Air environment pulse-periodic discharge in apokamp mode is studied. It is confirmed that the blue and red diffuse minijets (apokamps) form from the plasma discharge channel under the floating potential. It is shown that at low pressures the apokamps are units–tens of centimeters in size and possess the properties inherent to giant plasma jets (sprites, starters, and blue jets) observed in the Earth's atmosphere at altitudes of 17–100 km. Morphological, spectral, and electrophysical parameters of apokamps in various conditions are ascertained. It is found that plasma minijets are easier implementable at the positive polarity of the discharge channel. A gradual change in the color of diffuse jets with a decrease in the air pressure is demonstrated.

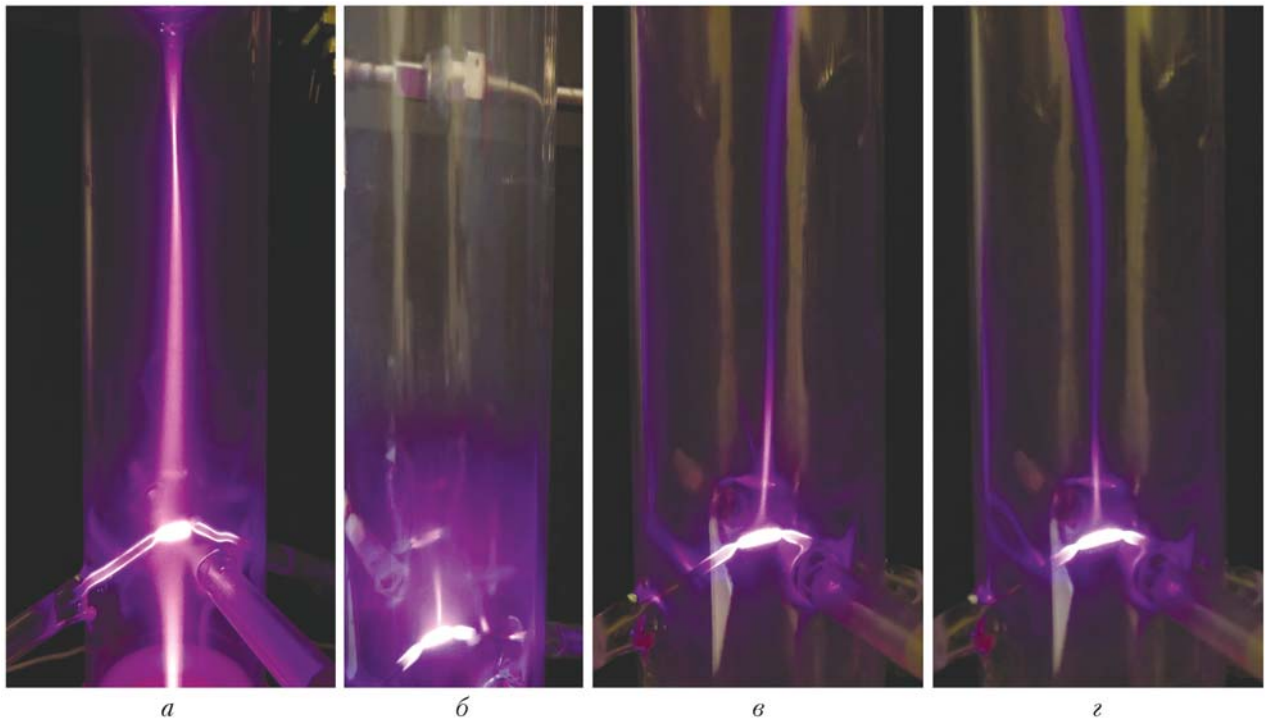


Рис. 2. Свечение разряда при положительной (*а, в, г*) и отрицательной (*б*) полярностях импульсов напряжения. Давление воздуха 30 (*а, б*), 90 (*в*) и 165 торр (*г*). Экспозиция 1/8 с

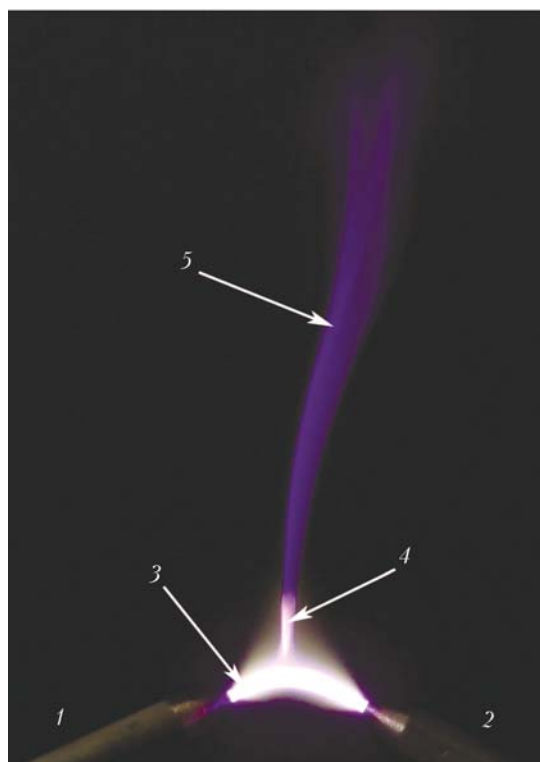


Рис. 3. Вид апокампа при атмосферном давлении и положительной полярности импульса напряжения: 1, 2 – электроды; 3 – канал импульсного разряда; 4 – яркий «отросток» на месте изгиба токового канала; 5 – диффузная струя; $f = 50$ кГц; $d = 1$ см; h кадра 6 см. Экспозиция 1/8 с