

СТРИМЕРЫ, ИНИЦИИРУЕМЫЕ ЕМКОСТНЫМ РАЗРЯДОМ
ПРИ ДАВЛЕНИЯХ ВОЗДУХА 0.2–6 Торр© 2023 г. В. Ф. Тарасенко^{а,*}, Е. Х. Бакшт^а, В. А. Панарин^а, Н. П. Виноградов^а^а Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

*e-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 17.02.2023 г.

После доработки 28.02.2023 г.

Принята к публикации 01.03.2023 г.

Проведены исследования плазменных диффузных струй (ПДС), имеющих красный цвет, которые состоят из стримеров (волн ионизации). Обнаружено, что плазма, создаваемая в воздухе при давлениях 0.2–4 Торр импульсно-периодическим емкостным разрядом в диэлектрической трубке, инициирует за один импульс две ПДС, в каждой из которых регистрируется до трех стримеров. Установлено, что по два стримера, которые распространяются от кольцевых электродов в противоположных направлениях, формируются одним импульсом напряжения положительной полярности. С помощью ICCD-камеры и кремниевого ФЭУ показано, что приход фронта положительного стримера в область остановки фронта отрицательного стримера, который генерировался первым на фронте отрицательного импульса напряжения, приводит к формированию третьего тонкого стримера в виде конуса с малым углом при вершине. Установлено, что направление движения третьего стримера совпадает с направлением инициирующих его стримеров, однако его скорость меньше на два порядка. Показано, что при низких давлениях воздуха скорость первых положительных стримеров больше, чем у отрицательных, а расстояние, на которое они распространяются при напряжении генератора 7 кВ и давлении воздуха 0.2 Торр превышает 1 м.

Ключевые слова: воздух низкого давления, емкостной разряд, стример, волна ионизации, моделирование спрайтов

DOI: 10.31857/S0367292123700245, **EDN:** WYLTGE

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучению стримерного пробоя при низких давлениях воздуха и других газов последнее время стало уделяться большое внимание. Это связано, в частности, с исследованиями высотных атмосферных разрядов, в первую очередь, красных спрайтов, которые наблюдаются на высотах 40–100 км над уровнем моря и имеют разнообразную форму [1–4]. Достоверно установлено, что их распространение происходит согласно стримерного механизма [5–7]. Продолжаются исследования волн ионизации между электродами, расположенными с двух сторон диэлектрических трубок [8–10]. Интерес к таким исследованиям, в частности, связан с регистрацией пучков убегающих электронов и тормозного рентгеновского излучения из анода [8, 10]. Также проводятся исследования оптических характеристик воздуха, возбуждаемого тлеющим разрядом при давлениях доли – единицы Торр [11].

В [12–15] было показано, что в воздухе низкого давления можно получать плазменные диффузные струи (ПДС), которые распространяются в

кварцевой трубке с внешними электродами на десятки сантиметров от области их инициирования. Для создания плазмы, инициирующей ПДС, в этих работах применялся высокочастотной емкостной разряд. Особенностью ПДС с длиной в десятки сантиметров было существенное (на порядок и более) превышение интенсивности излучения полос второй положительной системы азота (2+) над интенсивностью полос первой положительной системы азота (1+) при их красном цвете, наблюдаемом и регистрируемом фотоаппаратом при давлениях 0.2–3 Торр. Однако в работах [12–15] формирование и распространение отдельных стримеров (волн ионизации) в ПДС не изучалось.

Цель настоящей работы – исследовать инициирование и распространение стримеров красного цвета в плазменных диффузных струях, формируемых при низких давлениях воздуха.

Исследования с помощью ICCD камеры показали, что при возбуждении воздуха одним импульсом напряжения приход фронта положительного стримера в область остановки фронта отрицательного, который генерировался ранее на

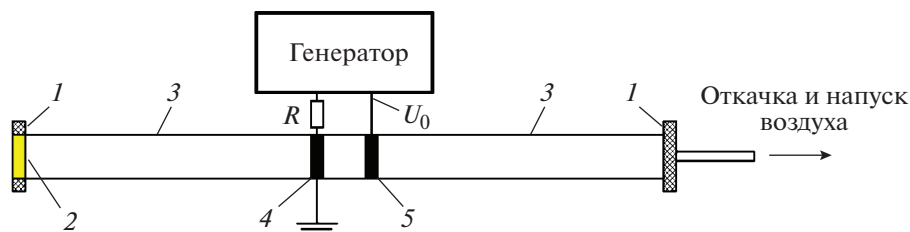


Рис. 1. Установка для изучения стримеров в ПДС, инициируемых емкостным разрядом. 1 – фланцы из капролона, 2 – кварцевое окно, 3 – трубка из кварца, 4 – заземленный кольцевой электрод на поверхности кварцевой трубки, 5 – высоковольтный электрод на поверхности кварцевой трубки. R – сопротивление шунта, U_0 – высоковольтный вывод генератора, к которому подключался делитель напряжения и электрод 5.

фронте импульса напряжения, приводит к формированию третьего тонкого стримера в виде конуса с малым углом при вершине.

2. УСТАНОВКА И МЕТОДИКИ

Исследование характеристик разряда в ПДС проводилось на установке, подобной используемой в работах [12–15]. Основными ее частями являются кварцевая трубка длиной 120 см с внутренним диаметром 5 см, имеющая кольцевые электроды. Трубка располагалась параллельно металлическому стенду на расстоянии 21 см от его поверхности, на которой был установлен импульсный генератор и регистрирующая аппаратура. Схема подключения генератора к электродам, которые устанавливались на внешней поверхности трубки, и другие элементы установки показаны на рис. 1.

Для инициирования стримерных разрядов в отсутствие контакта плазмы с электродами применялся импульсно-периодический генератор, формирующий импульсы напряжения как отрицательной, так и положительной полярности с фронтом и спадом ≈ 350 нс, амплитудой $U_0 = 2$ –7 кВ и длительностью на полувысоте ≈ 1.5 мкс. Разряд зажигался внутри трубки между кольцевыми электродами из фольги шириной 1 см, которые располагались в центральной части кварцевой трубки на ее внешней поверхности. Расстояние между электродами равнялось 6 см. Левый электрод был подключен к генератору и соединен с поверхностью металлического стенда, а на правый подавались импульсы высокого напряжения U_0 . Эксперименты также проводились при установке электродов 4 и 5 у левого фланца, при этом расстояние между ними (6 см) сохранялось. Фотографирование разряда, в том числе, с помощью ICCD-камеры, и регистрация импульсов излучения кремниевым ФЭУ осуществлялись в темной комнате. Частота следования импульсов равнялась 21 кГц. Высокая частота следования импульсов позволяла наблюдать ПДС визуально и фотографировать фотоаппаратом.

Напряжение на промежутке измерялось делителем АКТАКОМ АСА-6039 с полосой пропускания 50 МГц, а ток разряда регистрировался с помощью шунта с сопротивлением $R = 5$ Ом, который был включен между генератором и заземленным электродом. Сигналы с делителя и шунта подавались на осциллограф MDO 3104 (1 ГГц, частота дискретизации 5 выборок/нс). Оптическое излучение плазмы разряда регистрировалось четырехканальной ICCD-камерой HSFC-PRO, цифровым фотоаппаратом SONY A100 и спектрометром OceanOptics HR2000+ES (диапазон 200–1150 нм; разрешение по длине волны ≈ 0.9 нм) с известной спектральной чувствительностью.

При определении скорости фронта ПДС проводились измерения интенсивности излучения на различных участках кварцевой трубки вдоль ее длины. Для этого использовался кремниевый ФЭУ (Si-ФЭУ) в составе модуля MicroFC-SMA-10035. Время нарастания переходной характеристики Si-ФЭУ составляло 0.3 нс, время восстановления ячеек – 180 нс. Излучение разряда регистрировалось на Si-ФЭУ, который устанавливался как справа от электродов, так и слева, при этом излучение от разряда к ФЭУ подавалось по световоду. Приемный конец световода располагался на различных расстояниях от края электродов напротив центральной оси трубки. При этом поле зрения световода, охватывающее длину кварцевой трубки 3 см, дополнительно ограничивалось экраном со стороны электрода. Излучение ПДС регистрировалось на расстояниях 11, 21 и 31 см. Это позволяло определять средние скорости распространения фронта стримера при его прохождении от одного участка трубки к другому. Максимальную чувствительность Si-ФЭУ имеет на длине волны 420 нм, и она плавно уменьшается в обе стороны от максимума, при этом на краях диапазона (320–800 нм) чувствительность равнялась $\approx 15\%$ от максимальной. При измерениях записывалось 3–5 импульсов излучения, форма и амплитуда которых повторялись с отклонением от среднего импульса не более 10%. Для выделения излучения различных спектральных диапа-

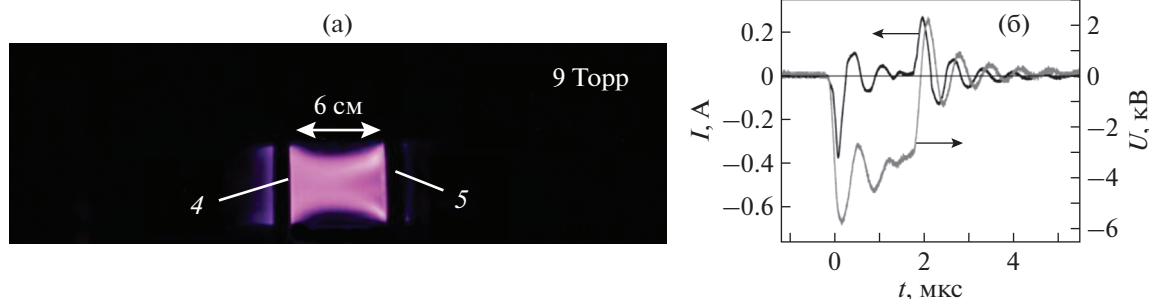


Рис. 2. Фотография разряда в трубке между электродами (а), а также осциллограммы импульсов напряжения U и тока разряда I (б). Давление воздуха $p = 9$ Торр. Напряжение генератора $U_0 = -7$ кВ.

зонов использовались светофильтры УФС-5 и ЖС-16.

Кварцевая трубка откачивалась до давления 10^{-2} Торр, а затем заполнялась комнатным воздухом с относительной влажностью $\approx 23\%$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Основное внимание при проведении исследований было уделено регистрации излучения плазменных диффузных струй при низких давлениях воздуха (0.2–4 Торр), имеющих красный цвет, которые, как было установлено, состоят из стримеров. Известно, что в атмосфере Земли при этих давлениях наблюдаются красные спрайты, также состоящие из стримеров [1–7], которые в “столбчатых спрайтах” располагаются параллельно друг другу.

В нашей работе, по-видимому, впервые, было зарегистрировано по 2–3 стримера в каждой из двух ПДС, распространяющихся в противоположные стороны от предварительно созданной плазмы. Плазма внутри трубки создавалась емкостным импульсно-периодическим разрядом в области внутри трубки между внешними электродами. При низких давлениях воздуха каждый импульс возбуждения приводил к формированию двух ПДС, независимо от положения трубки относительно стенда [12], при этом ПДС распространялись вправо и влево от электродов.

Интенсивность излучения отдельных стримеров в ПДС была сравнительно низкой. Поэтому регистрировать динамику их развития с помощью ICCD-камеры можно только было при сравнительно больших экспозициях одного кадра (~ 100 нс и более), что затрудняло регистрацию фронта стримера во время его движения. При съемке ПДС фотоаппаратом SONY A100, из-за его малой чувствительности (по сравнению с ICCD-камерой), длительность экспозиции приходилось увеличивать до долей секунды и более. Соответственно, на одной фотографии фиксиро-

валось интегральное излучение большого числа ПДС (десятки тысяч), состоящих из стримеров.

Было установлено, что при повышенных давлениях и малых напряжениях ПДС не формируются. Пробой в этих условиях происходит только между электродами 4 и 5, которые показаны на рис. 1, внутри трубки. Фотография разряда при давлении воздуха 9 Торр приведена на рис. 2а.

Между электродами внутри кварцевой трубки видно яркое свечение емкостного разряда, который в отсутствии насыщения матрицы фотоаппарата можно отнести к красному. Однако ПДС при давлении 9 Торр не формировались ни слева, ни справа от электродов. В этих темных областях только слева от заземленного электрода 4 было видно слабое свечение. Все фотографии разряда были сделаны в темной комнате.

На рис. 2б показаны осциллограммы напряжения и тока разряда, зарегистрированные также при давлении 9 Торр. Пробой воздуха происходил на фронте импульса напряжения, поэтому амплитуда импульса напряжения U меньше напряжения генератора в отсутствие разряда $U_0 = -7$ кВ. На осциллограммах тока разряда можно выделить два пика, которые имеют наибольшие амплитуды, но различную полярность. Первый пик тока связан с пробоем газа в области между электродами на фронте импульса напряжения, и его полярность соответствует полярности импульса напряжения. Второй пик тока имеет противоположную полярность и возникает на спаде импульса напряжения. Дополнительные колебания напряжения и тока обусловлены конструкцией генератора. Однако они не оказывали заметного влияния на формирование ПДС и не приводили к появлению стримеров. Максимальная величина емкостного тока при напряжении генератора 7 кВ в отсутствие пробоя в трубке составила ≈ 35 мА, что на порядок меньше тока разряда как при давлении 9 Торр, так и при 1 Торр (рис. 2б и рис. 3). Поэтому в данной работе мы его влияние на осциллограммы не учитывали.

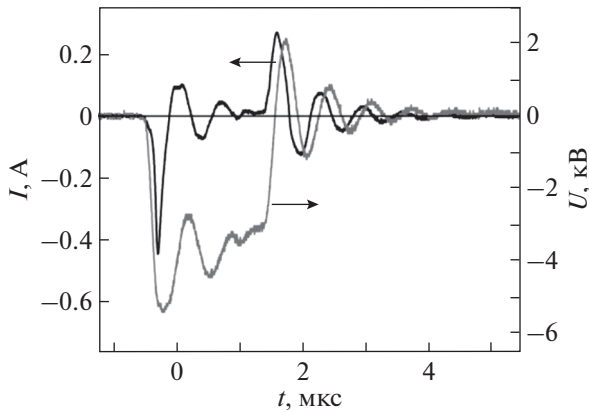


Рис. 3. Осциллограммы импульсов напряжения U и тока разряда I . Давление воздуха $p = 1$ Торр. Амплитуда импульса генератора $U_0 = -7$ кВ.

На рис. 3 показаны осциллограммы напряжения и тока разряда в условиях формирования ПДС при давлении 1 Торр.

Эти осциллограммы по своей форме были подобны осциллограммам, полученным в отсутствии ПДС, рис. 26. Пробой воздуха происходил на фронте импульса напряжения, на осциллограммах тока разряда можно выделить два пика большой амплитуды.

Фотографии свечения ПДС и емкостного разряда между электродами для положительной и отрицательной полярности импульса напряжения показаны на рис. 4.

ПДС появлялись при амплитуде импульсов напряжения 7 кВ, начиная с давления воздуха ≈ 6 Торр. Из сравнения фотографий на рис. 2а и рис. 4 видно, что ПДС распространяются в обе стороны от области емкостного разряда между электродами 4 и 5. Цвет ПДС можно также отнести к красному, но также видно его изменение на различных расстояниях от электродов. Кроме того, у электродов имеются узкие темные области.

Интенсивность излучения разряда из межэлектродной области более высокая, чем у ПДС. Белый цвет плазмы разряда в центре этой области на рис. 4 обусловлен насыщением светочувствительной матрицы фотоаппарата. При уменьшении длительности экспозиции регистрируемый цвет центральной области разряда становился на фотографиях красным и не изменялся при увеличении давления до 9 Торр. Длина ПДС увеличивалась с ростом напряжения генератора и при уменьшении давления, что подтверждает данные, полученные ранее в [12–15].

В настоящих экспериментах было установлено, что при положительной полярности генератора длина ПДС с кольцевыми электродами больше. Кроме того, было обнаружено изменение формы ПДС в месте ее остановки при отрицательной полярности импульса напряжения. Эти части плазменных диффузных струй обозначены цифрами 1 и 2 на рис. 4б. Форма этих областей изменялась при приближении к фланцам на кварцевой трубке. Поэтому на рис. 5 показаны увеличенные изображения ПДС в области их остановки при давлении воздуха 1.5 Торр.

По сравнению с условиями экспериментов, представленных на рис. 4, давление в трубке было увеличено. Это уменьшило длину ПДС и исключило влияние торцевых фланцев на их форму. На рис. 5а видно, что при положительной полярности импульса напряжения форма ПДС в месте ее остановки не имеет особенностей. Подобную форму имела и вторая ПДС, которая одновременно распространялась в левую сторону от электрода 4.

При отрицательной полярности генератора на рис. 5б виден стример меньшего диаметра, который изменяет форму ПДС в месте ее остановки, и является третьим по счету. Такие стримеры формировались при отрицательной полярности генератора как справа, так и слева от электродов. На рис. 5б показана форма третьего стримера, воз-

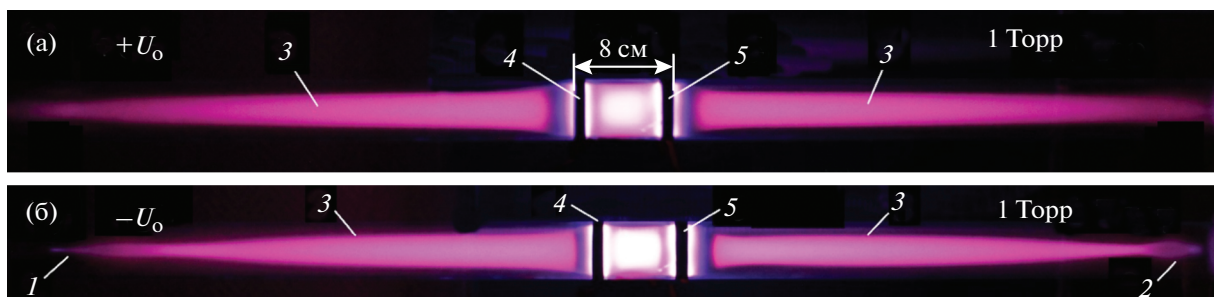


Рис. 4. Фотографии свечения ПДС в кварцевой трубке и емкостного разряда между электродами при $U_0 = +7$ (а) и -7 кВ (б). 1 и 2 — области формирования третьего стримера при отрицательной полярности импульса напряжения, 3 — ПДС, 4 — заземленный электрод, 5 — высоковольтный электрод. Давление воздуха $p = 1$ Торр. Экспозиции 0.2 с.

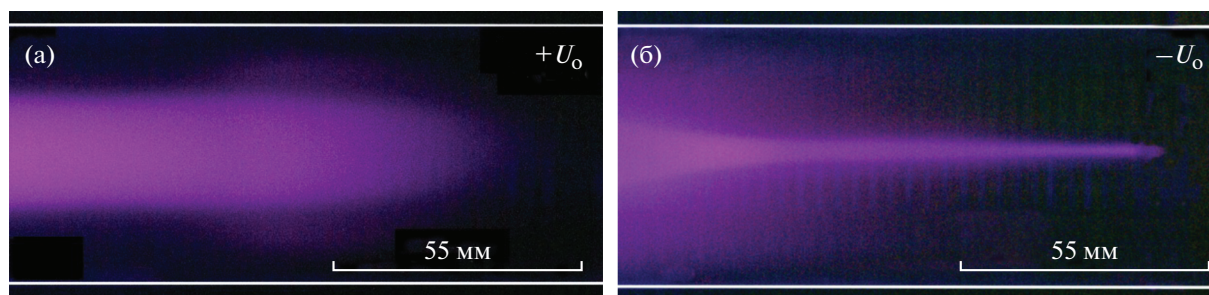


Рис. 5. Фотографии свечения ПДС у их окончания при напряжении генератора $U_0 = +7$ (а) и -7 кВ (б). Край правого электрода 5 (см. рис. 4) расположен слева от левого края фотографий этого рисунка на расстоянии 23 см. $p = 1.5$ Торр. Экспозиция 1 с.

нижнего справа от электродов в области остановки первых двух стримеров.

Как видно из рис. 4 и 5, цвет ПДС и интенсивность их свечения изменяются не только у электродов, но и у их окончания. На рис. 5 заметны как красный, так и синий цвета. В будущем планируется провести более подробные исследования этих областей ПДС.

Для получения информации о продвижении фронта стримера по длине ПДС, с помощью Si-ФЭУ были зарегистрированы импульсы излучения на различных расстояниях от электродов. Осциллограммы тока разряда и импульсов излучения, полученных с помощью Si-ФЭУ, в том числе при установке светофильтров, выделяющих излучения в различных спектральных областях, приведены на рис. 6.

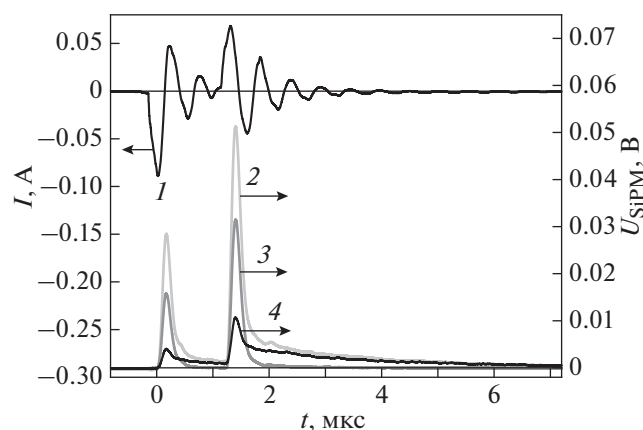


Рис. 6. Осциллограммы тока разряда 1 и импульсов излучения 2–4, полученные при $p = 0.2$ Торр и $U_0 = -3$ кВ. Si-ФЭУ был установлен справа от электродов на расстоянии 21 см от края правого (потенциально) электрода. Импульс 2 зарегистрирован без светофильтров, импульс 3 за светофильтром УФС-5 (пропускание в области 300–400 нм) и импульс 4 за светофильтром ЖС-16 (пропускание в области 440–1000 нм).

Благодаря высокой чувствительности Si-ФЭУ стабильно регистрировались два импульса излучения. Эти импульсы возникали во время пиков тока с наибольшей амплитудой, которые формировались на фронте и спаде импульса напряжения. Импульсы тока разряда и излучения, регистрируемые с помощью Si-ФЭУ, синхронизированы с наносекундной точностью. Было обнаружено, что излучение ПДС состоит из двух импульсов, и это можно объяснить формированием двух стримеров.

Как известно [16, 17], при прохождении стримера через локальную область, основной вклад в его излучение дает возбуждение газа на его фронте при высоком электрическом поле. В условиях, при которых регистрировались осциллограммы на рис. 6, вклад в излучение ПДС давали два стримера, и интенсивность излучения второго превышала интенсивность первого. Было установлено, что при постоянной амплитуде импульсов напряжения генератора амплитуды импульсов излучения стримеров зависят от давления воздуха. При $p = 1$ Торр интенсивность излучения первого импульса была больше, чем второго.

Для определения спектрального состава ПДС применялись как светофильтры, так и спектрометр OceanOptics HR2000+ES. С его помощью были проведены подробные спектральные исследования излучения ПДС при различных давлениях и напряжениях, а также расстояниях от электродов. Один из спектров показан на рис. 7.

В области длин волн излучения 280–900 нм наибольший вклад в излучение ПДС дают вторая (2+) и первая (1+) положительные системы молекулярного спектра азота. При этом спектральная плотность энергии излучения (W) на наиболее интенсивных линиях (2+) системы азота (300–400 нм) на порядок и более превышает W на наиболее интенсивных линиях (1+) системы азота (550–900 нм). Однако красный цвет разряда, как и в излучении красных спрайтов [1–7], определяется излучением молекулярного спектра (1+) си-

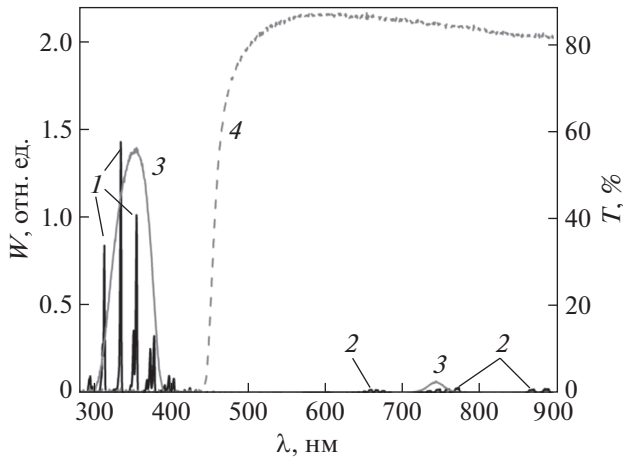


Рис. 7. Спектр излучения ПДС из области, расположенной на расстоянии 11 см от края правого электрода и области пропускания светофильтров. 1 – наиболее интенсивные полосы 2+ системы азота, 2 – наиболее интенсивные полосы 1+ системы азота, 3 – пропускание светофильтра УФС-5, 4 – пропускание светофильтра ЖС-16. $p = 1$ Торр, $U_0 = +7$ кВ, экспозиции 20 с.

стемы азота. Данный спектр излучения ПДС и стримеров, которые образуют ПДС, соответствует спектрам, приведенным в работах [12–15] для аналогичных условий. Из рис. 6 и 7 также следует, что в этих условиях длительность импульса излучения в УФ-области спектра, которая обусловлена переходами (2+) системы молекулярного азота, существенно меньше длительности импульса (1+) системы азота. Излучение (2+) системы азо-

та было выделено светофильтром УФС-5, а система (1+) – светофильтром ЖС-16.

Подробное исследование свечения стримеров малого диаметра, возникающих у окончаний ПДС при отрицательной полярности генератора, было проведено с помощью ICCD-камеры. Это позволяло зафиксировать как пространственные, так и временные характеристики излучения. На рис. 8 показан импульс тока разряда и изображения свечения разряда в отдельные моменты времени при отрицательной полярности импульса напряжения, полученные при двух включениях ICCD-камеры.

Импульсы тока разряда и изображения кадров с ICCD-камеры были синхронизированы. На первом кадре к1 излучение разряда отсутствует, поскольку промежуток между электродами еще не пробит. На кадре к2 показано излучение фронта первого стримера после прохода им по кварцевой трубке расстояния 11 см и его остановке. Основной вклад в свечение дает фронт стримера, который был инициирован первым пиком импульса тока. Кадр к2, как видно из рис. 8а, соответствует по длительности первому пику импульса тока разряда отрицательной полярности. Далее интенсивность излучения в этой области кварцевой трубки быстро уменьшалась и на кадре к3 видно только слабое свечение. Через 1.3 мкс в эту область приходит фронт второго положительного стримера и интенсивность излучения снова возрастает. Излучение фронта второго стримера показано на кадре к4. Поскольку ICCD-камера позволяла делать не более четырех кадров за один импульс, то для получения изображений трех стримеров были записаны 6 кадров за два отдельных импульса. Начало формирования третьего

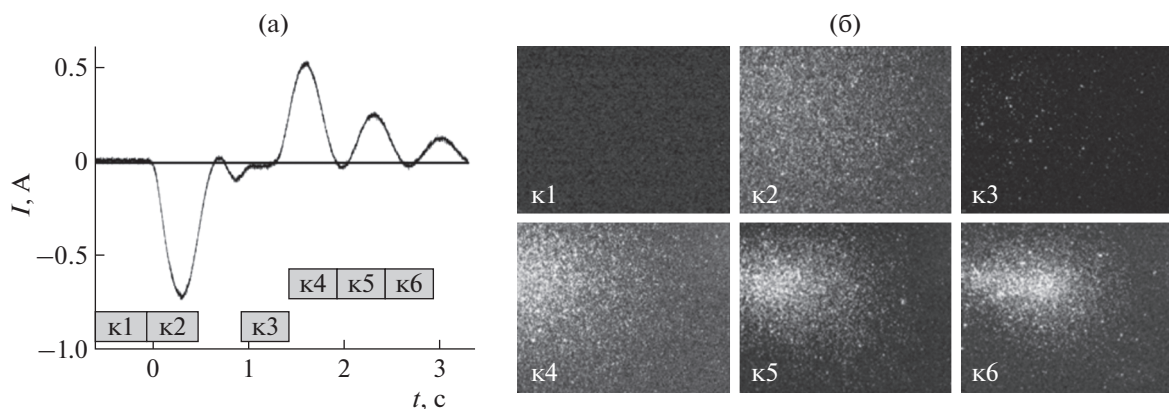


Рис. 8. Осциллограмма тока разряда, на временной шкале которой показаны места привязки отдельных кадров ICCD-камеры (к1, к2, к3) и (к4, к5, к6) во время двух импульсов с их длительностями (а), а также изображения свечения разряда шириной 3 см во время этих кадров, полученные на расстоянии 11 см от края правого (высоковольтного) электрода, который находился слева от изображений (б). Соответственно, все изображения были получены в области трубки между 11 и 14 см от края высоковольтного электрода. Длительность каждого из кадров равна 0.5 мкс. Излучение на кадре к2 наблюдается во время первого пика на импульсе тока, а на кадре к4 во время второго пика на импульсе тока. Задержка между пиками тока равнялась 1.3 мкс. $U_0 = -6$ кВ, $p = 3.6$ Торр.

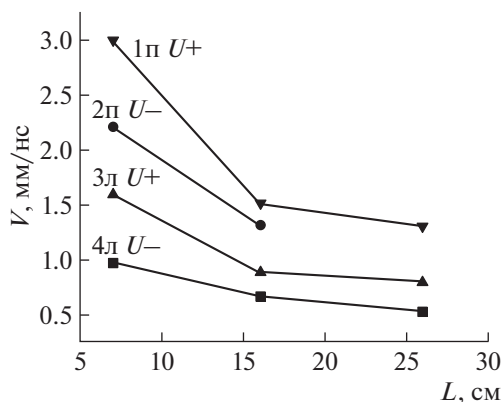


Рис. 9. Зависимости средней скорости фронта первых стримеров, распространяющихся от электродов вправо (1п, 2п) и влево (3л, 4л) при напряжении генератора +4.5 (1п, 3л) и -4.5 кВ (2п, 4л). Точки на зависимостях, которые расположены слева, соответствуют средней скорости прохождения фронтом области трубки от 3 до 11 см, средние точки – от 11 до 21 см и правые – от 21 до 31 см. Эти точки на кривых соответствуют серединам указанных выше областей, а L равняется расстоянию от края ближайшего электрода до середины данной области. $p = 1$ Торр.

стримера показано на кадрах к5 и к6. Его диаметр меньше, чем у первых двух. Как видно на кадрах к5 и к6 на рис. 8б, фронт третьего стримера удаляется от места остановки первых двух стримеров. Его средняя скорость, рассчитанная по смещению области свечения на кадре к6 по отношению к кадру к5, составила ≈ 12 мкм/нс. Средние скоро-

сти фронта первого и второго стримера при их движении по трубке были на два порядка больше. На рис. 9 показаны средние скорости фронта первых стримеров, распространяющихся в различные стороны от электродов, которые были измерены с помощью Si-ФЭУ.

Видно, что скорости фронта первых двух стримеров в обе стороны от электродов составляют доли единицы мм/нс и больше при положительной полярности импульса напряжения. Скорости фронта второго стримера, который инициируется на спаде импульса напряжения, также составляют доли единицы мм/нс. Уменьшение напряжения генератора и увеличение давления воздуха, как и должно быть согласно [16], снижают скорость фронта стримера. Также скорость фронта стримера уменьшается при удалении от электродов, что видно из рис. 9.

Более подробно движение фронта третьего стримера и его форму при удалении от электродов демонстрирует рис. 10.

В этом эксперименте кольцевые электроды были смещены к левому фланцу кварцевой трубки без изменения расстояния между ними (6 см). На изображении к1 показано свечение фронта третьего стримера, который к этому времени удалился от места его появления, см. рис. 8. Кадр к1 имеет задержку ≈ 1.45 мкс относительно второго пика тока разряда. На рис. 10а он показан первым в верхнем ряду. Как отмечено выше, расстояния, на которые удаляются стримеры от электродов увеличиваются с уменьшением давления. На рис. 10 показаны результаты измерений при дав-

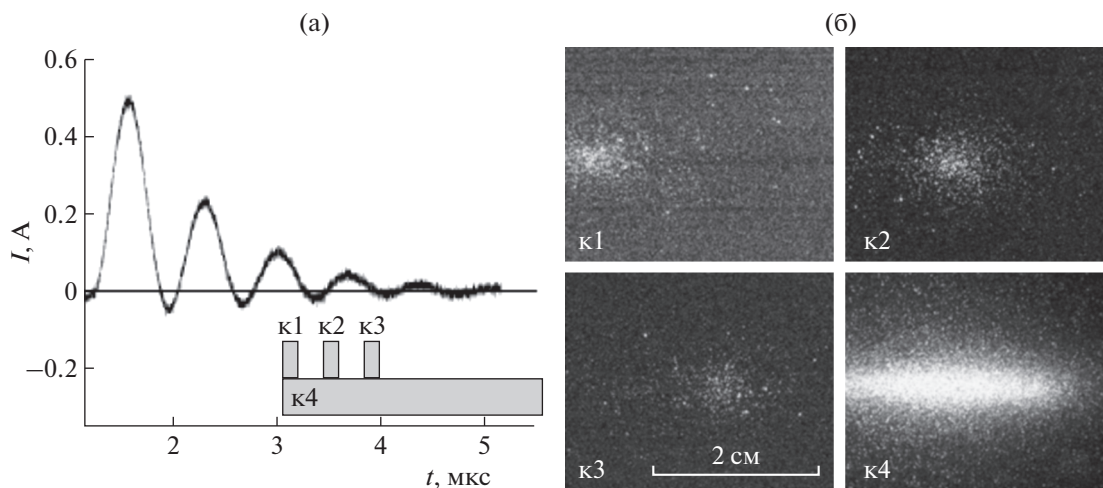


Рис. 10. Оциллограмма тока разряда, приведенная начиная со второго пика импульса тока, на временной шкале которой показаны места привязки отдельных кадров ICCD-камеры (к1, к2, к3, к4) и их длительности (а), а также изображения фронта третьего стримера на расстоянии от 53 до 56 см от правого электрода, который находился с левой стороны от изображений, полученных за 0.14 мкс (к1, к2 и к3) и 2.5 мкс (к4) (б). Ширина каждого изображения 3 см. Задержка между началом кадров к1 и к2, а также кадров к2 и к3 равнялась 0.4 мкс, кадры к1 и к4 начинались одновременно. Съемка была выполнена при одинаковой чувствительности для всех каналов ICCD-камеры. $U_0 = -6$ кВ, $p = 1$ Торр.

лении воздуха 1 Торр. Поэтому для исключения влияния правого фланца кварцевой трубки на формирование третьего стримера электроды были смещены к левому фланцу. В этих условиях появилась возможность увеличить задержку отдельных кадров относительно второго пика импульса тока. Из рис. 10б видно, что на расстоянии 53–56 см от правого электрода диаметр третьего стримера уменьшился, как и при давлении воздуха 1.5 Торр (см. фотографию на рис. 5б). Второй к2 и третий к3 кадры ICCD-камеры демонстрируют продвижение фронта третьего стримера. Его средняя скорость, рассчитанная по изображениям на кадрах к1 и к2, составила ≈ 24 мкм/нс, а по изображениям на кадрах к2 и к3 – ≈ 15 мкм/нс. Основной вклад в свечение дает, как и на рис. 8, фронт стримера.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для формирования стримеров и волн ионизации, которые имеют одинаковую физическую природу при распространении, необходимо создать область с высокой концентрацией плазмы в электрическом поле с приведенной напряженностью электрического поля выше критической. В этих условиях возникает поляризация отрицательных (электронов) и положительных (ионов) зарядов, что приводит к появлению области с усиленным электрическим полем, которая перемещается вдоль силовых линий. Соответственно, в этой области, на фронте стримера, наблюдается интенсивная ионизация газа, см., например, [16]. Поскольку скорость ионов на порядки меньше, чем у электронов, они остаются практически на месте, а перемещается область с высоким электрическим полем, в которой электроны ионизируют газ.

В условиях данного эксперимента, область с наибольшей концентрацией плазмы создается емкостным разрядом между кольцевыми электродами во время двух пиков тока с наибольшими амплитудами. Возникшие стримеры попарно начинают двигаться от этого плазменного образования между электродами в трубке в противоположных направлениях. Данные условия формирования стримеров отличаются от разрядов, которые реализуются при низких давлениях в диэлектрических трубках с электродами на их торцах, см. [8–10]. В этих работах описаны волны ионизации, распространяющиеся между металлическими электродами. Более близкие условия, реализуемые в ПДС, создаются при коронном разряде с уединенным острием [18–20], а также при апокампическом разряде, в котором стримера формируются от изгиба на канале разряда между двумя электродами, установленными под углом, [21, 22]. В обоих случаях цилиндрические стримеры стартуют из плазмы, создаваемой у ме-

таллических электродов, и распространяется в свободное пространство, в котором электрическое поле уменьшается. При коронном разряде вначале возникает сферический стример у острия положительной полярности [19], а при апокампическом разряде появляется отросток на изогнутом канале плазмы между двумя электродами [21], которые имеют положительный потенциал относительно заземленного стенда. В ПДС, стримеры цилиндрической формы, как при коронном разряде с уединенного острия, так при апокампическом разряде, распространяются из предварительно созданной плазмы в свободное пространство. Однако плазма емкостного разряда в кварцевой трубке, инициирующая стримеры, не имеет контакта с металлическими электродами. Кроме того, стримеры формируются как при положительной полярности импульсов генератора, так и при отрицательной полярности.

Отличие условий формирования стримеров в ПДС, от стримеров, описанных в работе [23], где цилиндрические стримеры стартовали с керамического электрода, заключается в отсутствии второго металлического электрода, увеличивающего электрическое поле в направлении распространения стримера. Отметим также отличие условий формирования стримеров в ПДС от условий, описанных в работе [24]. В [24] изучался стример, стартующий при барьерном разряде из волны ионизации, однако область разряда находилась между двумя металлическими электродами, покрытыми диэлектриком.

В настоящей работе установлено, что в ПДС наибольшие концентрации электронов, которые превышали критические и инициировали стримеры, достигались при двух пиках тока с наибольшими амплитудами. Первый пик регистрировался при пробое воздуха на фронте импульса напряжения, обычно около его максимума. Второй пик, с задержкой ≈ 1.3 мкс после первого, возникал на спаде импульса напряжения. При этом, полярность первого пика импульса тока, соответствовала полярности импульса напряжения, а второй пик имел противоположную полярность, см. рис. 2б и 3. Оба пика тока при давлении воздуха 0.2–6 Торр инициировали по два стримера в каждой ПДС. Причем, один из стримеров был положительный, а второй отрицательный, и они распространялись вдоль трубки от электродов как влево, так и вправо. Красный цвет ПДС и ее форма в основном определялись первыми двумя стримерами.

Существенные отличия формы окончания струи наблюдались только при отрицательной полярности генератора. Было обнаружено, что при отрицательной полярности импульса напряжения, положительный стример достигая области, в которой останавливался отрицательный,

формирует третий стримера меньшего диаметра. Это можно объяснить тем, что положительный стример, который формировался вторым всплеском тока (при меньшей амплитуде пика тока) разряда имел в одинаковых условиях большую скорость (см. рис. 9), чем отрицательный. Благодаря большей скорости ему удавалось достигать места остановки первого отрицательного стримера. По-видимому, создаваемая положительным стримером концентрация электронов и остаточная концентрация плазмы от первого отрицательного стримера, в этих условиях были достаточны для инициирования третьего стримера. Уменьшение диаметра третьего стримера и его малая скорость обусловлены уменьшением напряженности электрического поля при удалении от электродов.

На основе полученных результатов можно предполагать, что при локальном увеличении концентрации плазмы в “каналах” красных спрайтов могут возникать и распространяться по первичному направлению, а также в другие стороны, дополнительные стримеры различного диаметра. Распространение красных спрайтов в различных направлениях описано в работах [7, 25, 26].

Причин появления локальных областей с повышенной концентрацией плазмы может быть несколько. Во-первых, это может быть плазма микро- и нанометеоритов, сгоревших в атмосфере Земли. Такой сценарий обсуждался в работах [27–29]. Во-вторых, это могут быть разряды в серебристых облаках между областями с концентрацией зарядов различной полярности. Подобное предположение высказывались в статьях [12, 15, 29]. Об образовании частиц льда в серебристых облаках известно из работы [30]. Механизм разделения зарядов в грозовых облаках, приводящий к разрядам молний, подробно описан в монографии [31]. Можно предположить, что в случае разрядов в серебристых облаках, при наличии достаточного электрического поля, вторичные стримеры могут возникать как в “каналах” красных спрайтов, так и в областях около них, при этом направление движения новых стримеров может быть различным.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе обнаружено, что из плазменного образования, созданного при низких давлениях воздуха емкостным разрядом в диэлектрической трубке, в противоположные стороны распространяется несколько стримеров. Стримеры стартуют во время двух пиков тока разной полярности, имеющих наибольшие амплитуды. Установлено, что при положительной полярности второго пика тока формируется положительный стример, который достигает места остановки первого (отрицательного) стримера и иницирует

третий стример. Диаметр третьего стримера в несколько раз меньше диаметров первых двух стримеров, а его скорость отличается на порядки и составляет всего десятки мкм/нс. Скорости первых двух стримеров в этих условиях в зависимости от давления и расстояния от электродов составляют доли единицы мм/нс. Цвет ПДС и стримеров в их средней части при давлениях воздуха 0.2–4 Торр красный, что определяется излучением первой положительной системы молекулярного азота. Считаем, что изучение плазменных диффузных струй позволит получить новую информацию об иницировании, распространении и форме красных спрайтов в мезосфере Земли.

Авторы благодарят Д.А. Сорокина за поддержку данной работы, Д.С. Печеницина за создание генератора и В.С. Скакуна за помощь в эксперименте.

Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-15-2021-1026 от 15.11.2021.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Füllekrug M., Mareev E.A., Rycroft M.J. (Eds.). Sprites, elves and intense lightning discharges. V. 225. Springer Science & Business Media, 2006.*
2. *Jehl A., Farges T., and Blanc E. // J. Geophys. Res. Space Physics. 2013. V. 118. P. 454. <https://doi.org/10.1029/2012JA018144>*
3. *Garipov G.K., Khrenov B.A., Klimov P.A., Klimenko V.V., Mareev E.A., Martines O., Mendoza E., Morozenko V.S., Panasyuk M.I., Park I.H., Ponce E., Rivera L., Salazar H., Tulupov V.I., Vedenkin N.N., Yashin I.V. // J. of Geophysical Research: Atmospheres. 2013. V. 118. № 2. P. 370. <https://doi.org/10.1029/2012JD017501>*
4. *Huang A., Lu G., Yue J., Lyons W., Lucena F., Lyu F., Cummer S.A., Zhang W., Xu L., Xue X., Xu S. // Geophys. Res. Lett. 2018. V. 45. P. 13. <https://doi.org/10.1029/2018GL079576>*
5. *McHarg M.G., Stenbaek-Nielsen H.C., Kammer T. // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34. P. L06804. <https://doi.org/10.1029/2006GL027854>*
6. *Ebert U., Nijdam S., Li C., Luque A., Briels T., van Veldhuizen E. // JGR: Space Physics. 2010. V. 115. № A7. A00E43. <https://doi.org/10.1029/2009JA014867>*
7. *Pasko Victor P., Jianqi Qin, and Celestin Sebastien // Surveys in Geophysics. 2013. V. 34. P. 797. <https://doi.org/10.1007/s10712-013-9246-y>*
8. *Vasilyak L.M., Kostyuchenko S.V., Kudryavtsev N.N., Filyugin I.V. // Phys. Usp. 1994. V. 37. № 3. P. 247. <https://doi.org/10.1070/PU1994v037n03ABEH000011>*
9. *Anikin N.B., Zavialova N.A., Starikovskaia S.M., Starikovskii A.Y. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2008. V. 36. P. 902. <https://doi.org/10.1109/TPS.2008.924504>*

10. *Huang B., Zhang C., Qiu J., Zhang X., Ding Y., Shao T.* // *Plasma Sourc. Sci. and Technol.* 2019. V. 28. № 9. P. 095001.
11. *Goto Y., Ohba Y., Narita K., Goto Y., Ohba Y., Narita K.* // *Journal of Atmospheric Electricity.* 2007. V. 27. Iss. 2. P. 105.
12. *Tarasenko V., Vinogradov N., Baksht E., and Sorokin D.* // *Journal of Atmospheric Science Research.* 2022. V. 5. Iss. 3. P. 26.
<https://doi.org/10.30564/jasr.v5i3.4858>
13. *Тарасенко В.Ф., Бакшт Е.Х., Виноградов Н.П.* // *Прикладная физика.* 2022. № 4. С. 11.
<https://doi.org/10.51368/1996-0948-2022-4-11-17>
14. *Бакшт Е.Х., Виноградов Н.П., Тарасенко В.Ф.* // *Оптика атмосферы и океана.* 2022. Т. 35. № 9. С. 777.
<https://doi.org/10.15372/AOO20220911>
15. *Sorokin D., Tarasenko V., Baksht E.Kh., Vinogradov N.P.* // *European Journal of Environment and Earth Sciences.* 2022. V. 3. Iss. 6. P. 42.
<https://doi.org/10.24018/ejgeo.2022.3.6.322>
16. *Райзер Ю.П.* *Физика газового разряда.* Долгопрудный: Интеллект, 2009, 736 с.
17. *Starikovskiy A.Yu., Aleksandrov N.L., Shneider M.N.* // *Journal of Applied Physics.* 2021. V. 129. № 6. P. 063301.
<https://doi.org/10.1063/5.0037669>
18. *Wu S., Cheng W., Huang G., Wu F., Liu C., Liu X., Zhang C., Lu X.* // *Physics of Plasmas.* 2018 V. 25. № 12. P. 123507.
<https://doi.org/10.1063/1.5042669>
19. *Tarasenko V.F., Kuznetsov V.S., Panarin V.A., Skakun V.S., Sosnin E.A., Baksht E.K.* // *JETP Letters.* 2019. V. 110. P. 85.
<https://doi.org/10.1063/1.4981385>
20. *Tarasenko V., Baksht E., Kuznetsov V., Panarin V., Skakun V., Sosnin E., Beloplotov D.* // *Journal of Atmospheric Science Research.* 2020. V. 3. Iss. 4. P. 28.
<https://ojs.bilpublishing.com/index.php/jasr>
21. *Tarasenko V.F., Sosnin E.A., Skakun V.S., Panarin V.A., Trigub M.V., Evtushenko G.S.* // *Physics of Plasmas.* 2017. V. 24. № 4. P. 043514.
22. *Sosnin E.A., Babaeva N.Yu., Kozyrev A.V., Kozhevnikov V.Yu., Naidis G.V., Skakun V.S., Panarin V.A., Tarasenko V.F.* // *Phys. Usp.* 2021. V. 64. Is. 2. P. 191.
<https://doi.org/10.3367/UFNe.2020.03.038735>
23. *Panarin V.A., Skakun V.S., Baksht E.K., Sosnin E.A., Kuznetsov V.S., Sorokin D.A.* // *Plasma Physics Reports.* 2022. V. 48. № 7. P. 812.
24. *Hoder T., Bonaventura Z., Prukner V., Gordillo-Vázquez F.J., Šimek M.* // *Plasma Sources Science and Technology.* 2020. V. 29. № 3. P. 03LT01.
<https://doi.org/10.1088/1361-6595/ab7087>
25. *Stenbaek-Nielsen H.C., McHarg M.G., Kanmae T., and Sentman D.D.* // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34. № 11. P. L11105.
<https://doi.org/10.1029/2007GL029881>
26. *Stenbaek-Nielsen H.C., Kanmae T., McHarg M.G., Haaland R.* // *Surveys in Geophysics.* 2013. V. 34. P. 769.
27. *Zabotin N.A., Wright J.W.* // *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28. № 13. P. 2593.
28. *Janalizadeh R., Pasko V.P.* // *Electron Impact Ionization of Metallic Species at Sprite Altitudes as a Mechanism of Initiation of Sprite Streamers.* AGU Fall Meeting. 2018.
29. *Tarasenko V., Vinogradov N., Beloplotov D., Burachenko A., Lomaev M., Sorokin D.* // *Nanomaterials.* 2022. V. 12. № 4. P. 652.
<https://doi.org/10.3390/nano12040652>
30. *Hervig M., Thompson R.E., McHugh M., Gordley L.L., Russell III J.M., Summers M.E.* // *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28 № 6. P. 971.
<https://doi.org/10.1029/2000GL012104>
31. *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* *Физика молнии и молниезащиты.* М.: Физматлит, 2001, 320 с.