

УДК 537.527.9; 537.53  
 EDN: RANDZX

PACS: 52.50.Dg

## Стример, плазменная диффузная струя и тлеющий разряд при пробое в воздухе низкого давления импульсом напряжения с фронтом около 20 мс

© В. Ф. Тарасенко\*, Н. П. Виноградов, Е. Х. Бакшт

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, 634050 Россия

\* E-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

 Статья поступила в редакцию 27.05.2025; после доработки 20.06.2025; принята к публикации 20.10.2025  
 Шифр научной специальности: 1.3.9

*Исследовано формирование диффузной плазмы в трубках с внутренними диаметрами 8,4 и 14,2 см при скорости роста напряжения  $V \approx 35$  кВ/мкс и  $\approx 100$  В/мс. Приводятся фотографии свечения разряда в различных режимах. Показано, что при  $V \approx 100$  В/мс и давлениях воздуха  $p = 0,4$  и 1 Торр пробой промежутка инициируется за счёт распространения стримера от плоского электрода положительной полярности. Установлено, что после прохождения стримером промежутка плоскость – остриё и образования плазменной диффузной струи красного цвета, происходит формирование тлеющего разряда, который может поддерживаться как в импульсном, так и в стационарном режиме. Показано, что наибольшую мощность излучения из плазмы разряда в этих условиях даёт фронт стримера, а наибольшие энергии излучения первой и второй положительных систем азота достигаются за счёт увеличения длительности импульса возбуждения при переходе в режим тлеющего разряда. Подтверждено, что при  $p = 0,4$  и 1 Торр спектр излучения положительного столба тлеющего разряда соответствует спектру излучения красных столбчатых спрайтов.*

*Ключевые слова:* положительный стример; плазменная диффузная струя; тлеющий разряд; воздух низкого давления.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-5-64-70

### Введение

Известны различные формы высотных разрядов (красных спрайтов, голубых струй, гало, эльфов и других, см., например, обзор [1]). Наибольшее число публикаций посвящено красным спрайтам, изучение которых проводится из наземных лабораторий [2], самолётов [3], спутников [4] и Международной космической станции [5]. Однако при изучении высотных разрядов требуются большие материальные затраты и дорогостоящая аппаратура. Кроме того, хотя появления красных спрайтов наблюдается над грозowymi облаками, они возникают спонтанно, а их размеры, форма и место появления всё время изменяет-

ся. Поэтому проводятся экспериментальные и теоретические работы, в которых моделируются основные свойства высотных атмосферных разрядов, в основном красных спрайтов. При этом используются различные режимы разряда, которые условно можно разбить на две группы. В первой группе применяются разряды между металлическими электродами [6–9]. Во второй группе аналоги красных спрайтов формируются без контакта с металлическими электродами [10–14].

Один из вопросов, который требует изучения – это появление в красных столбчатых спрайтах яркой светящейся области (glow) [15]. Данная область возникает в «столбе» спрайта после прохождения положительного

стримера, стартующего от образования «гало» в мезосфере, которое имеет повышенную концентрацию зарядов [1,15]. При формировании области glow фронт стримера продолжает движение вниз к грозовым облакам, а её интенсивность излучения увеличивается. При этом местоположение области glow практически не меняется.

Цель данной работы – экспериментально смоделировать область яркого свечения, подобного наблюдаемому в столбчатых красных спрайтах, и проанализировать условия, необходимые для её появления. В известных работах задача по экспериментальному моделированию области glow красных спрайтов ранее не ставилась.

### Установка и методики измерений

Для изучения формы и светимости разряда при низких давлениях воздуха использовались две установки, упрощённые схемы которых вместе с фотографиями разряда приведены на рис. 1 и рис. 2.



Рис. 1. Схема экспериментальной установки №1 с вставленной фотографией свечения плазменной диффузной струи (ПДС), полученной при давлении воздуха 0,4 Торр и экспозиции 0,25 с. 1 и 6 – фланцы из капрлона; 2 – трубка из поликарбоната ESALUX TX с внешним диаметром 15 см и толщиной стенки 4 мм; 3 – заземлённый электрод из дюралюминия с отверстием для кварцевой трубки 4 с внешним диаметром 21 мм и толщиной стенки 1,5 мм; 5 – внешний кольцевой электрод из стальной фольги шириной 10 мм;  $U_1$  – импульсный генератор с амплитудой импульса напряжения на нагрузке  $U = +7$  кВ и частотой  $f = 21$  кГц, подключённый к электродам 3 и 5

В установке №1, показанной на рис. 1, применялась трубка из поликарбоната ESALUX TX с внутренним диаметром 14,2 см, которая была прозрачной в видимой области спектра. Ось трубки были расположена на расстоянии 24 см от металлической плиты экспериментального стенда. Большой диаметр

трубки позволял создавать удалённые от её внутренней стенки плазменные диффузные струи (ПДС). Длина трубки равнялась 55 или 147 см. Плазменные диффузные струи формировались от плазмы, создаваемой за счёт ограниченного одним барьером ёмкостного разряда между электродами 3–5, на которые подавались импульсы напряжения от генератора  $U_1$ . Импульсы напряжения следовали с частотой следования 21 кГц и имели амплитуду в рабочем режиме  $\approx 7$  кВ. Длительность импульсов на полувысоте равнялась  $\approx 1,3$  мкс, а их фронт и спад составляли  $\approx 0,4$  мкс. Так как столбчатые красные спрайты инициируются положительными стримерами [1, 15], то в экспериментах использовались импульсы напряжения положительной полярности, при которых ПДС инициировались положительными стримерами [11, 12]. В установке №2, показанной на рис. 2, использовалась трубка из кварца КУ с внешним диаметром 9 см.

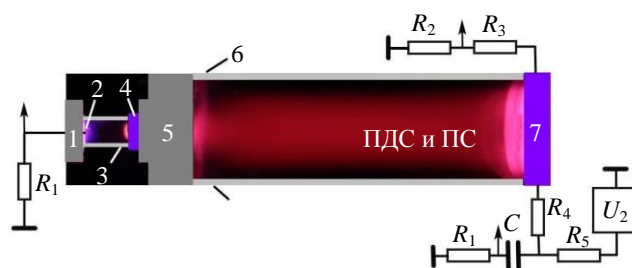


Рис. 2. Схема экспериментальной установки №2 с вставленной фотографией свечения плазменной диффузной струи (ПДС) и положительного столба тлеющего разряда (ПС) при давлении воздуха 0,4 Торр. Фотография получена при экспозиции 3,2 с и однократном включении установки. На фотографии фланцы из капрлона 1 и 5 закрывают электрод 2 и свечение разряда, соответственно. 1 и 5 – фланцы из капрлона с отверстиями; 2 – заземлённый электрод из стали с радиусом кривизны 0,5 мм; 3 – кварцевая трубка с внешним диаметром 21 мм и толщиной стенки 1,5 мм, вставленная в сквозное отверстие фланца 5; 4 – внешний кольцевой электрод из стальной фольги шириной 10 мм, который закрывает свечение разряда; 6 – трубка из кварца КУ с внешним диаметром 9 см и толщиной стенки 3 мм; 7 – высоковольтный плоский электрод из дюралюминия.  $U_2$  – источник постоянного напряжения.  $R_1$  – шунты,  $R_2$  и  $R_3$  – делитель напряжения,  $R_4$  – сопротивление для ограничения тока разряда,  $R_5$  – зарядное сопротивление конденсатора C

Ось трубки 6 была расположена на расстоянии 30 см от металлической плиты экспериментального стенда. От источника постоян-

ного регулируемого напряжения  $U_2$  положительной полярности с амплитудой до 10 кВ через сопротивления  $R_5 = 1$  МОм заряжался конденсатор  $C = 10$  нФ, который был подключён к высоковольтному электроду 7. Второй вывод конденсатора  $C$  через металлическую плиту экспериментального стенда и шунты  $R_1 = 20$  Ом подключался к дополнительному электроду 2, установленному в центре фланца 1 из диэлектрика. Электрод 4 находился под плавающим потенциалом. Напряжение пробоя при его скорости нарастания  $\sim 100$  В/нс на электроде 7 составляло единицы киловольт. Отметим, что на рис. 2 используется фотография разряда в тёмном помещении, поэтому на ней фланцы 1, 5 и электроды 4 и 7 в оригинале имели чёрный цвет. Для лучшего восприятия эти фланцы и электроды были окрашены в другие цвета. Кроме того, надо иметь в виду, что электрод 4 и фланец 5 закрывают свечение разряда в отверстиях.

Форма импульсов напряжения измерялась с помощью делителя АКТАКОМ АСА-6039. Сопротивления делителя были 900 кОм (низковольтное плечо) и 900 МОм (высоковольтное). Ток разряда определялся с помощью шунтов с сопротивлением 20 Ом. Сигналы с делителя, шунтов и ФЭУ подавались на осциллограф MDO 3104 (1 ГГц, частота дискретизации 5 выборок/нс). Оптическое излучение плазмы разряда регистрировалось цифровым фотоаппаратом Canon 2000D и через световод спектрометром HR2000+ES (диапазон 200–1150 нм; оптическое разрешение  $\approx 0,9$  нм). Спектральные чувствительности HR2000+ES и световода были известны. Форма импульса излучения определялась с помощью кремниевого ФЭУ (Si-PM) в составе модуля MicroFC-SMA-10035. Время нарастания переходной характеристики ФЭУ составляло 0,3 нс, время восстановления ячеек – 180 нс. Максимальную чувствительность 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%. ФЭУ регистрировали излучение из областей разряда шириной  $\approx 1$  см. Центры этих областей

находились в установке № 2 на её центральной оси на расстояниях 2, 12,5 и 27 см от левой поверхности электрода 7. Остальная часть трубки закрывалась чёрным экраном. Спектры излучения на этой установке определялись в тех же областях, где регистрировались импульсы излучения с ФЭУ. Фотографирование разряда, регистрация импульсов излучения с помощью ФЭУ и измерения спектров проводились в отсутствие внешнего освещения. Относительная влажность воздуха в лабораторном помещении равнялась  $\approx 24\%$ , а температура 23 °С.

### Результаты и их обсуждение

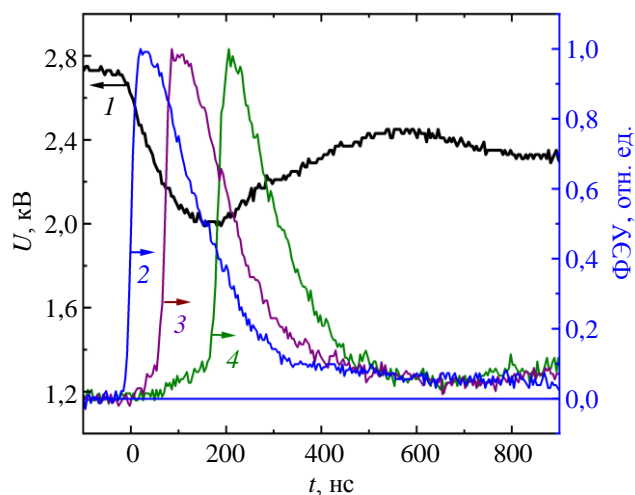
На рис. 1 показана фотография разряда, полученная при давлении атмосферного воздуха 0,4 Торр и частоте следования импульсов 21 кГц. На ней видно интегральное свечение 5250 ПДС, которые имеют красный цвет с голубым оттенком. С увеличением давления до 1 Торр интенсивность излучения ПДС и её длина уменьшались. ПДС в этих условиях являются за счёт положительных или отрицательных стримеров, инициирование которых изучалось в наших предыдущих работах [11, 12]. При низких давлениях воздуха и фронте импульса напряжения от первого генератора  $\approx 0,4$  мкс (скорость роста напряжения  $\approx 35$  кВ/мкс) стримеры формировались за счёт создания плотной плазмы и быстрого роста приведённой напряжённости электрического поля на её границе. Однако удельная плотность энергии излучения ПДС, в которую вносит вклад фронт стримера и его послесвечение, была сравнительно малая. Амплитуда тока разряда и его длительность на установке № 1 были ограничены за счёт диэлектрического барьера, образованного стенкой кварцевой трубки 4. Поэтому для фотографирования разряда надо было использовать импульсно-периодический режим генерации ПДС.

Для увеличения интенсивности излучения разряда в исследуемых аналогах красных столбчатых спрайтов была применена схема, см. рис. 2. В данной схеме для увеличения длительности импульса тока был использован конденсатор  $C$ , который подключался к электродам 2 и 7 через сопротивление  $R_4$ . Кроме

того, к электроду 7 через сопротивление  $R_5$  подключался источник постоянного напряжения  $U_2$ . За счёт конденсатора формировался импульс тока с большей амплитудой и длительностью, чем в случае использования генератора  $U_1$ . Благодаря использованию  $C$ , двух электродов 2 и 7 без диэлектрических барьеров, а также источника  $U_2$ , можно было на установке № 2 после формирования ПДС зажигать тлеющий разряд как в режиме однократных импульсов, так и в непрерывном режиме. Разряд на установке № 2 переходил в тлеющий с положительным столбом в трубке б. В таком режиме энергия излучения разряда существенно увеличилась, см. фотографию разряда за один импульс на рис. 2. В области около электрода 2, который являлся катодом, цвет излучения изменялся, как и должно быть в случае тлеющего разряда. Применение сопротивления  $R_4$ , а также оптимизация ёмкости конденсатора  $C$  позволила исключить при увеличении длительности разряда образование в положительном столбе тлеющего разряда страт, которые наблюдались в работе [13]. Важным результатом, полученным на данной установке в режиме однократных импульсов, оказалось инициирование разряда за счёт положительного стримера при скорости нарастания напряжения  $V \sim 100$  В/мс и его фронте  $\sim 20$  мкс и более. При скорости нарастания напряжения 35 кВ/мкс, как было установлено ранее, см., например, работу [12], стримеры стабильно формируются и иницируют плазменную диффузную струю. Доказательства формирования стримера с плоского электрода при  $V \sim 100$  В/мс приведены на рис. 3.

Свечение фронта стримера появлялось у электрода 7 (осциллограмма 2), затем регистрировалось в центральной части трубки б (осциллограмма 3) и далее у фланца 5 (осциллограмма 4). Длительность импульса на высоте составляла  $\sim 100$  нс, что согласуется с измерениями в работе [12]. Скорость распространения фронта стримера составила 1,8 мм/нс на первом участке от электрода 7 и 1,1 мм/нс на втором участке после прохождения центральной части трубки б. Таким образом было установлено, что при низких давлениях воздуха и малой скорости нарастания напряжения,  $\sim 20$  мс для осциллограммы 1 на

рис. 3, инициирование разряда происходит за счёт положительного стримера, который формирует ПДС, переходящую в режим тлеющего разряда. Длительность разряда, а также его режим в этом случае зависят от величин  $C$ ,  $R_4$ ,  $R_5$  и давления воздуха. Изменение величин  $C$ ,  $R_4$ ,  $R_5$  и напряжения источника  $U_2$  позволяет изменять длительность импульса возбуждения, и, соответственно, длительность импульса излучения. Увеличение сопротивления  $R_5$  до 18 МОм для установки на рис. 2 приводило к ограничению тока от источника  $U_2$  и разряд прекращается за время  $\sim 10$  мс. С трубкой диаметром 15 см на установке № 2 мы также зарегистрировали инициирование пробоя положительным стримером, стартующим от электрода 7.



**Рис. 3. Осциллограммы импульсов напряжения  $U$  (1) и излучения стримера из областей на расстояниях 2 (2), 14,5 (3) и 27 см (4) от левой поверхности электрода 7, который имел положительную полярность.  $C = 10$  нФ,  $R_3 = 1$  МОм,  $R_4 = 10$  кОм,  $p = 0,4$  Торр. Установка № 2. Фотография свечения разряда в этом режиме приведена на рис. 2**

Из сравнения цвета разряда на рис. 1 и рис. 2 видно, что при одинаковом давлении воздуха голубой оттенок разряда во втором случае исчез и цвет разряда стал лучше соответствовать излучению красных столбчатых спрайтов, см., например, фотографии на рисунках под номером 1 в работах [13, 16]. Спектр излучения, полученный на установке № 2 при основном вкладе положительного столба тлеющего разряда, приведён на рис. 4.

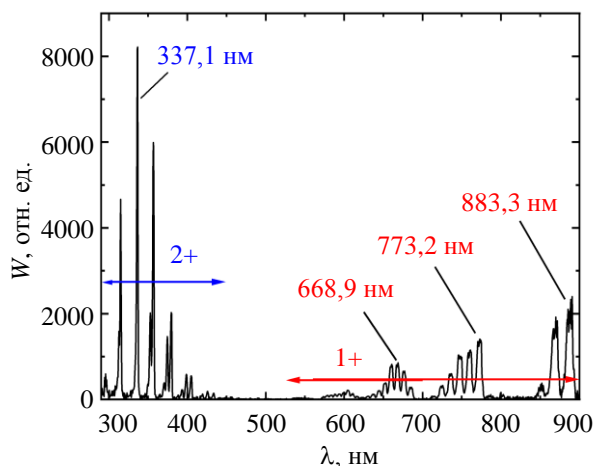


Рис. 4. Спектр излучения для условий на рис. 3 из области, находящейся на расстояниях 14,5 см от левой поверхности электрода 7. Время экспозиции – 30 сек.

Основной вклад в спектр излучения давали полосы второй (2+) и первой положительной (1+) систем молекулярного азота. При этом спектральная плотность энергии излучения трёх полос 2+ системы азота была значительно больше, чем у полос 1+ системы, которые определяют красный цвет ПДС. Особенностью исследованного режима является отсутствие полос первой отрицательной системы (1-) молекулярного иона азота, что соответствует результату, полученному для области glow при измерении спектров излучения красных спрайтов [17]. Кроме того, была зарегистрирована высокая интенсивность излучения полос 1+ системы азота на полосах с длинами волн 869,5 и 888,3 нм в ближней ИК области спектра. В режимах, реализуемых на установке № 1 при микросекундных длительностях импульсов напряжения, как и в работах [11–13, 16], спектральная плотность энергии этих полос меньше, чем у полос с наибольшей  $W$  на длинах волн 668,9 и 773,2 нм. Отметим, что в излучении красных спрайтов также регистрировалось мощное излучение в ИК области спектра [18].

### Заключение

Проведённые исследования показали, что для усиления интенсивности излучения в столбе красных спрайтов надо изменять режим разряда за счёт присутствия дополнительного источника энергии. В лабораторных экспериментах это было осуществлено за счёт

подключения конденсатора и увеличения длительности импульса возбуждения. При этом, начальной пробой воздуха низкого давления осуществлялся за счёт положительного стримера, который формировал плазменную диффузную струю, переходящую в положительный столб тлеющего разряда. В красных столбчатых спрайтах, согласно нашей гипотезе, ярко светящаяся область glow формируется при участии отрицательных зарядов, накапливаемых на высотах от уровня моря 60–70 км за счёт частиц льда, см. работу [19]. Эти заряды обеспечивают дополнительный вклад энергии в излучение столба спрайта после прохождения стримера, формируя область glow. Кроме того, на прохождение тока в этой области могут влиять пары сгоревших метеоритов из элементов с малым потенциалом ионизации, влияние которых обсуждалось в работе [20].

Авторы благодарят В. А. Панарина и В. С. Скакуна за помощь в проведении экспериментов.

Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда за счет гранта № 24-29-00166.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Surkov V. V., Hayakawa M. / *Surveys in Geophysics*. 2020. Vol. 41. № 5. P. 1101–1142.
2. Stenbaek-Nielsen H. C., Haaland R., McHarg M. G., Hensley B. A., Kanmae T. / *J. of Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. Art. no. A00E12.
3. Sentman D. D., Wescott E. M., Osborne D. L., Hampton D. L., Heavner M. J. / *Geophys. Res. Letters*. 1995. Vol. 22. P. 1205–1208.
4. Garipov G. K., Khrenov B. A., Klimov P. A., Klimenko V. V., Mareev E. A., Martines O., Mendoza E. et al. / *J. of Geophys. Res.: Atmospheres*. 2013. Vol. 118. P. 370–379.
5. Jehl A., Farges T., Blanc E. / *J. of Geophys. Res.: Space Physics*. 2013. Vol. 118. P. 454–461.
6. Williams E., Valente M., Gerken E., Golka R. *Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges*. – Dordrecht: Springer, 2006.
7. Goto Y., Ohba Y., Narita K. / *J. of Atmospheric Electricity*. 2007. Vol. 27. № 2. P. 105–112.
8. Opaits D. F., Shneider M. N., Howard P. J., Miles R. B., Milikh G. M. / *Geophys. Res. Letters*. 2010. Vol. 37. Art. no. L14801.
9. Evtushenko A., Kuterin F., Svechnikova E. / *J. of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2021. Vol. 221. Art. no. 105670.

10. Robledo-Martinez A., Garcia-Villarreal A., Sobral H. J. / *Geophys. Res.: Space Physics*. 2017. Vol. 122. P. 948–962.
11. Тарасенко В. Ф., Бакуит Е. Х., Виноградов Н. П. / *Прикладная физика*. 2022. № 4. С. 11–17.
12. Тарасенко В. Ф., Бакуит Е. Х., Панарин В. А., Виноградов Н. П. / *Физика плазмы*. 2023. Т. 49. № 6. С. 590–599.
13. Tarasenko V. F., Vinogradov N. P., Panarin V. A., Skakun V. S., Sorokin D. A., Baksht E. Kh. / *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2024. Vol. 37. Suppl. 1. P. S183–S191.
14. Тарасенко В. Ф., Панарин В. А., Скакун В. С., Виноградов Н. П. / *Прикладная физика*. 2024. № 2. С. 31–37.
15. Marskar R. / *Plasma Sources Science and Technology*. 2024. Vol. 33. Art. no. 025024.
16. Sorokin D. A., Tarasenko V. F., Baksht E. K., Vinogradov N. P. / *Physics of Plasmas*. 2023. Vol. 30. Art. no. 083515.
17. Stenbaek-Nielsen H. C., McHarg M. G., Haaland R., Luque A. / *J. of Geophys. Res.: Atmospheres*. 2020. Vol. 125. Art. no. e2020JD033170.
18. Siefring C. L., Morrill J. S., Sentman D. D., Heavner M. J. / *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. Art. no. A00E57.
19. Hervig M., Thompson R. E., McHugh M., Gordley L. L., Russell III J. M., Summers M. E. / *Geophys. Res. Letters*. 2001. Vol. 28. P. 971–974.
20. Zabotin N. A., Wright J. W. / *Geophys. Res. Letters*. 2001. Vol. 28. P. 2593–2596.

PACS: 52.80.Hc

## Streamer, plasma diffuse jet and glow discharge during breakdown in low-pressure air by a voltage pulse with a front of ~20 ms

V. F. Tarasenko\*, N. P. Vinogradov and E. Kh. Baksht

*Institute of High Current Electronics, SB RAS, Tomsk, 634055 Russia*

\* E-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Received 27.05.2025; revised 20.06.2025; accepted 20.10.2025

*Formation of diffuse plasma in tubes with inner diameters of 8.4 and 14.2 cm at voltage growth rate  $V \sim 35$  kV/ $\mu$ s and  $\sim 100$  V/ms is investigated. Photographs of discharge glow in different modes are presented. It is shown that at  $V \sim 100$  V/ms and air pressures  $p$  0.4 and 1 Torr, breakdown of the gap is initiated by streamer propagation from a flat electrode of positive polarity. It is established that after the streamer passes the gap plane - tip and forms a red diffuse plasma jet, a glow discharge is formed, which can be maintained both in pulsed and in stationary mode. It is shown that the greatest radiation power from the discharge plasma under these conditions is given by the streamer front, and the greatest radiation energies of the first and second positive nitrogen systems are achieved by increasing the excitation pulse duration during the transition to the glow discharge mode. It is confirmed that at  $p = 0.4$  and 1 Torr the radiation spectrum of the positive column of the glow discharge corresponds to the radiation spectrum of red columnar sprites.*

*Keywords:* plasma diffuse jet; low-pressure air; collision of two jets; capacitive discharge.

### REFERENCES

1. Surkov V. V. and Hayakawa M., *Surveys in Geophysics* **41** (5), 1101–1142 (2020).
2. Stenbaek-Nielsen H. C., Haaland R., McHarg M. G., Hensley B. A. and Kanmae T., *J. of Geophys. Res.* **115**, Art. no. A00E12 (2010).
3. Sentman D. D., Wescott E. M., Osborne D. L., Hampton D. L. and Heavner M. J., *Geophys. Res. Letters* **22**, 1205–1208 (1995).
4. Garipov G. K., Khrenov B. A., Klimov P. A., Klimenko V. V., Mareev E. A., Martines O., Mendoza E., Morozenko V. S. et al., *J. of Geophys. Res.: Atmospheres* **118**, 370–379 (2013).
5. Jehl A., Farges T. and Blanc E., *J. of Geophys. Res.: Space Physics* **118**, 454–461 (2013).

6. Williams E., Valente M., Gerken E. and Golka R. *Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges*. Dordrecht, Springer, 2006.
7. Goto Y., Ohba Y. and Narita K., *J. of Atmospheric Electricity* **27** (2), 105–112 (2007).
8. Opaitis D. F., Shneider M. N., Howard P. J., Miles R. B. and Milikh G. M., *Geophys. Res. Letters* **37**, Art. no. L14801 (2010).
9. Evtushenko A., Kuterin F. and Svechnikova E., *J. of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **221**, Art. no. 105670 (2021).
10. Robledo-Martinez A., Garcia-Villarreal A. and Sobral H. J., *Geophys. Res.: Space Physics* **122**, 948–962 (2017).
11. Tarasenko V. F., Vinogradov N. P and Baksht E. Kh., *Applied Physics*, № 4, 11–17 (2022) [in Russian].
12. Tarasenko V. F., Baksht E. K., Panarin V. A. and Vinogradov N. P., *Plasma Physics Reports* **49** (6), 786–794 (2023).
13. Tarasenko V. F., Vinogradov N. P., Panarin V. A., Skakun V. S., Sorokin D. A. and Baksht E. Kh., *Atmospheric and Oceanic Optics* **37** (1), S183–S191 (2024).
14. Tarasenko V. F., Panarin V. A., Skakun V. S. and Vinogradov N. P., *Applied Physics*, № 2, 31–37 (2024) [in Russian].
15. Marskar R., *Plasma Sources Science and Technology* **33** (2), Art. no. 25024 (2024).
16. Sorokin D. A., Tarasenko V. F., Baksht E. K., Vinogradov N. P., *Physics of Plasmas* **30**, Art. no. 083515 (2023).
17. Stenbaek-Nielsen H. C., McHarg M. G., Haaland R. and Luque A., *J. of Geophys. Res.: Atmospheres* **125**, Art. no. e2020JD033170 (2020).
18. Siefring C. L., Morrill J. S., Sentman D. D. and Heavner M. J., *J. of Geophys. Res.* **115**, Art. no. A00E57 (2010).
19. Hervig M., Thompson R. E., McHugh M., Gordley L. L., Russell III J. M. and Summers M. E., *Geophys. Res. Letters* **28**, 971–974 (2001).
20. Zabolotin N. A. and Wright J. W., *Geophys. Res. Letters* **28**, 2593–2596 (2001).

#### Об авторах

**Тарасенко Виктор Федотович**, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН (634050, Россия, Томск, просп. Академический, 2/3. E-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru SPIN-код: 2449-8880, AuthorID: 18759

**Виноградов Никита Петрович**, аспирант. Институт сильноточной электроники СО РАН (634050, Россия, Томск, просп. Академический, 2/3. E-mail: vinogradov@loi.hcei.tsc.ru SPIN-код: 7766-5493, AuthorID: 1186281

**Бакшт Евгений Хаимович**, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник. Институт сильноточной электроники СО РАН (634050, Россия, Томск, просп. Академический, 2/3. E-mail: BEH@loi.hcei.tsc.ru SPIN-код: 3676-6490, AuthorID: 40278