

УДК 537.527.9; 537.53

Моделирование цвета высотных атмосферных разрядов с помощью импульсно-периодического разряда в воздухе, азоте и аргоне

В.Ф. Тарасенко, Е.Х. Бакшт, А.Г. Бураченко, Н.П. Виноградов*

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

Поступила в редакцию 28.01.2022 г.

Исследовано влияние материала электродов (алюминия и нержавеющей стали) при образовании мини-струй на цвет импульсно-периодического диффузного разряда в воздухе, азоте и аргоне. Разряд формировался в условиях генерации убегающих электронов при неоднородном электрическом поле. Установлено, что на цвет мини-струй, которые появляются при возникновении ярких пятен на электродах, существенное влияние оказывает материал электродов. Подтверждено, что использование электродов из алюминия окрашивает мини-струи в красный цвет, а из железа – в голубой. Показано, что цвет разрядной плазмы в области мини-струй соответствует цвету высотных атмосферных разрядов (красных спрайтов и голубых струй) и отличается от окраски диффузных разрядов в воздухе и азоте при том же давлении.

Ключевые слова: мини-струи, диффузный разряд, атмосферные разряды, красные спрайты, голубые струи; mini jets, diffuse discharge, atmospheric discharges, red sprites, blue jets.

Введение

Высотные разряды в атмосфере Земли изучаются многими научными группами [1–10]. В последние годы получению новых результатов способствует совершенствование приборов для регистрации различных видов излучения, а также проведение съемок с самолетов и Международной космической станции [10, 11]. В Интернете появилось большое число цветных фотографий высотных атмосферных разрядов, в том числе красных спрайтов, голубых струй и аналогов голубых струй (стартеров, гигантских струй), которые относятся к скоротечным световым явлениям (ССЯ) [12]. В научных лабораториях проводится экспериментальное и теоретическое моделирование этих явлений [1–10, 13–15]. Однако многие вопросы остаются еще не выясненными. К ним относятся механизмы появления различных ССЯ и их влияние друг на друга, а также природа цвета наблюдаемых высотных разрядов.

Считается, что цвет красных спрайтов, которые возникают на высоте ~ 70 км и видны на высотах от 40 до 90 км, определяется излучением первой положительной системы азота (1ПСА) [6, 8, 12, 14]. Цвет голубых струй, которые в основном возникают в верхнем слое облаков на высоте ~ 18 км и дос-

тигают высоты 50 км и более, согласно [8, 12, 14], обусловлен излучением второй положительной (2ПСА) и первой отрицательной (1ОСА) систем азота. Изменение интенсивностей 2ПСА и 1ПСА, в частности, подтверждают исследования режимов разряда в воздухе при различных давлениях. Так, в [15] отмечается, что с уменьшением давления воздуха при импульсных диффузных разрядах соотношение интенсивностей излучения 2ПСА и 1ПСА изменяется в пользу 1ПСА. Однако в экспериментах цвет плазмы при уменьшении давления менялся с сине-фиолетового на красно-розовый, тогда как цвет наблюдаемых спрайтов обычно ярко-красный, а струй – голубой [1–12]. При этом высоты, на которых наблюдались отдельные участки красных спрайтов и голубых струй, могут быть одинаковыми, см. рисунки с несколькими ССЯ [16, 17]. Следовательно, на цвет наблюдаемых ССЯ кроме их высоты влияют линии и полосы другой природы, спектры которых из-за скоротечности и малой интенсивности этих явлений пока с достаточной точностью зарегистрировать не удалось.

С другой стороны, в [18, 19] показано, что при диффузных и искровых разрядах в воздухе у электродов из алюминия и нержавеющей стали регистрируются мини-струи ярко-красного и голубого цветов соответственно.

Цель настоящей работы – получить новые данные о цвете мини-струй и диффузных разрядов при различных давлениях воздуха, азота и аргона в условиях диффузного импульсно-периодического разряда.

* Виктор Федотович Тарасенко (VFT@loi.hcei.tsc.ru); Евгений Хаимович Бакшт (beh@loi.hcei.tsc.ru); Александр Геннадьевич Бураченко (bag@loi.hcei.tsc.ru); Никита Петрович Виноградов (vinikitavin@mail.ru).

Экспериментальная установка и условия съемки

Исследование цвета разряда проводилось при пробоях между катодом с малым радиусом кривизны и плоским анодом. Такая геометрия облегчает формирование диффузных разрядов, а также генерацию пучков убегающих электронов при различных давлениях [19–21]. В качестве материала электродов использовались алюминий Д14 и нержавеющая сталь. Электрод с малым радиусом кривизны был выполнен в виде конуса с углом у вершины $\approx 40^\circ$ и радиусом скругления, который изменялся при работе от 70 до 380 мкм, или из проволоки диаметром 0,25 мм. Давление газов (воздух, аргон и азот) варьировалось от 0,1 до 760 торр, межэлектродное расстояние – от 1 до 12 мм. Схема экспериментальной установки, состоящей из генератора NPG-15/2000N и коаксиального кабеля длиной 3 м с волновым сопротивлением 75 Ом, а также разрядной камеры, показана на рис. 1.

Амплитуда импульса напряжения генератора в падающей волне составляла 12–15 кВ при фронте импульса напряжения ~ 3 нс и длительности импульса на полувысоте ~ 6 нс. Исследования проводились при частоте следования импульсов от 77 до 1000 Гц. Импульсно-периодический режим был выбран для увеличения концентрации паров расплавленного металла электродов и интенсивности излучения разряда, а также для стабилизации напряжения пробоя промежутка. Используемые давления газов соответствовали давлению воздуха на высотах, при которых наблюдаются голубые струи и красные спрайты. С анодом из сетки подобная установка использовалась в [20] для исследований в импульсно-периодическом режиме пучка убегающих электронов.

Разряд фотографировался цифровой камерой Sony A100. При этом проверялось соответствие цветов красных спрайтов, голубых струй и других ССЯ на снимках, приводимых в работах [10, 17] и Интернете [11, 16], с цветом импульсно-периодического разряда в различных режимах. Для этого фотографии ССЯ переснимались с монитора компьютера. Сравнение исходных фотографий и по-

лученных в результате дополнительной съемки показало их идентичность.

Осциллограммы импульсов напряжения с емкостного делителя и тока пучка регистрировались осциллографом MDO 3104 (1 ГГц, частота дискретизации 5 ГС/с).

Условия импульсного пробоя при атмосферных и лабораторных разрядах

Пробой разрядного промежутка определяется его длиной, формой и материалом электродов, амплитудой и фронтом импульса напряжения, давлением и сортом газа, а также предыонизацией газа «жестким» излучением. При изучении разрядов в лаборатории сравнительно легко контролировать условия эксперимента, в том числе измерять пучки электронов [20, 21]. Кроме того, можно в широких пределах изменять длительность импульса напряжения и энергию генератора. С разрядами в верхних слоях атмосферы ситуация намного сложнее.

При ССЯ надо учитывать не только их высоту и состав атмосферы, но и ее электрические свойства (напряженность электрического поля, плотность тока разряда и длительность импульса). Однако высотные атмосферные разряды возникают спонтанно и электрические параметры очень сложно измерять. Появление ССЯ зависит от наличия облаков, их высоты, плотности и распределения в них зарядов разной полярности, а также от температуры воздуха. Кроме того, формирование высотных атмосферных разрядов связано с наличием молний в нижних слоях атмосферы Земли. Важное значение для накопления зарядов и инициирования пробоя имеют высокоэнергетические частицы, которые приходят от Солнца и из космоса, а также генерируются в высоких электрических полях. Большую роль в ионизации атмосферы Земли играют УФ- и вакуумное УФ-излучение Солнца. Описание части этих процессов можно найти в статьях [1–5, 7, 9, 10, 13, 14] и монографии [12]. Там же приведены результаты измерения распределений по высоте температуры воздуха, концентрации заряженных

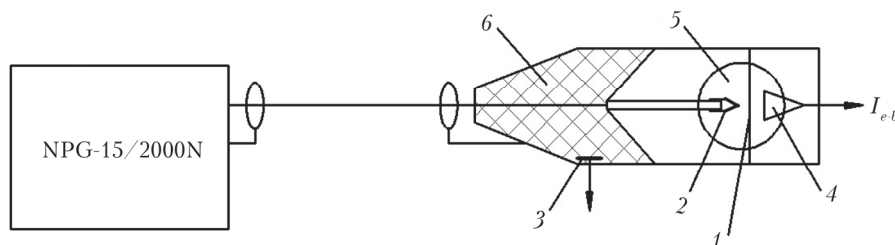


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – плоский анод; 2 – катод в форме конуса; 3 – емкостной делитель напряжения; 4 – приемная часть коллектора, с помощью которого измерялся пучок убегающих электронов; 5 – разрядная камера с кварцевым боковым окном для фотографирования свечения плазмы; 6 – изолятор

частиц и электропроводности. Далее мы будем пользоваться частью известных данных. Кроме того, мы привлечем данные о микрометеоритах, которые в основном сгорают в верхних слоях атмосферы [22].

Влияние материала электродов на цвет импульсных диффузных разрядов

На рис. 2 приведена типичная фотография красных спрайтов, взятая из Интернета [23].

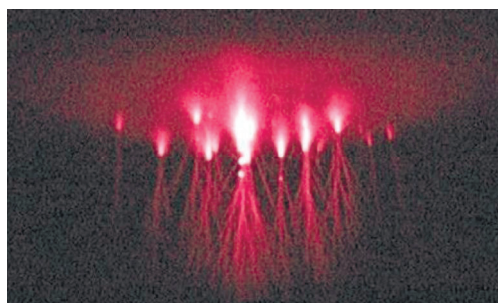


Рис. 2. Красные спрайты. Фотография сделана в обсерватории деревни Ныдек Чешской республики [23] (цвет. рисунок см. <http://iao.ru/ru/content/vol.35-2022/iss.05>)

Как уже отмечалось во введении, цвет спрайтов — ярко-красный. Его обычно связывают с излучением 1ПСА, интенсивность которого увеличивается при уменьшении давления газа [8, 12, 14]. Однако если сравнивать цвет лабораторных разрядов с излучением красных спрайтов и голубых струй в атмосфере Земли, то можно найти и существенные отличия.

В результате проведенных экспериментов было установлено, что цвет мини-струй, которые формируются у электродов из алюминия и нержавеющей стали, ближе к излучению красных спрайтов и голубых струй, чем излучение при диффузном разряде без мини-струй. Было установлено, что цвет плазмы изменяется за счет распыления материала электродов. На рис. 3 приведены фотографии разрядов с электродами из алюминия.

Цвет лабораторных разрядов существенно отличается от цвета красных спрайтов (рис. 2), в том числе при одинаковом давлении (~ 1 торр). При импульсном диффузном разряде без ярких пятен на электродах и мини-струй в воздухе и азоте цвет разряда в промежутке или его части сине-фиолетовый с красноватым оттенком, в том числе при давлениях в единицы-десятки торр. Это давление соответствует высоте над уровнем моря ~ 50 км. Нижние части красных спрайтов наблюдались на этих высотах и ниже.

Как видно из рис. 3, у конических электродов имеются области с более выраженным красным цветом. На рис. 3, *a* распыление электрода еще мало

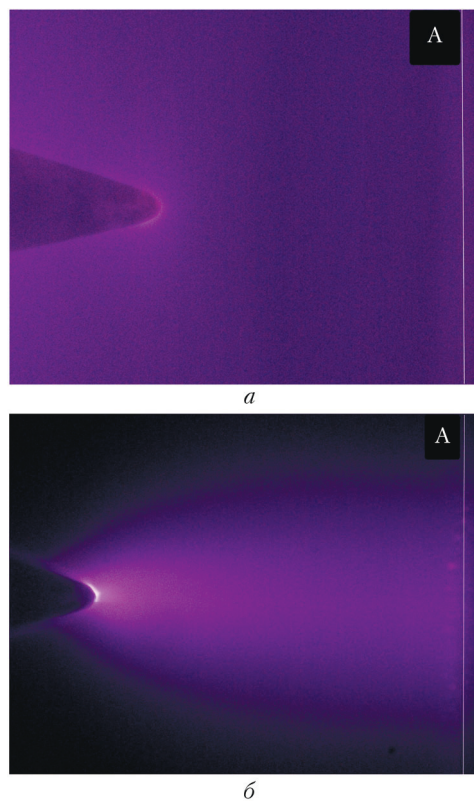


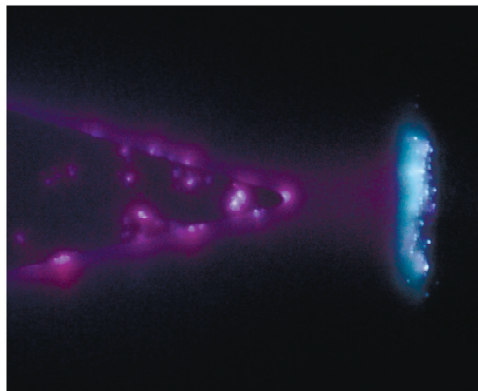
Рис. 3. Разряд в воздухе под давлением 1,5 (*a*) и 30 торр (*б*) при межэлектродном зазоре $d = 6$ (*a*) и 12 мм (*б*); частота следования импульсов $f = 77$ Гц, напряжение падающей волны $U = 12$ кВ; конусные катоды (слева) и плоские аноды (справа) изготовлены из алюминия (цвет. рисунок см. <http://iao.ru/ru/content/vol.35-2022/iss.05>)

и область красного цвета заметна только у острия конуса. При появлении ярких пятен на электродах, которые ускоряют испарение металла электрода, формируются мини-струи красного цвета (рис. 3, *б*). Причем красный цвет мини-струй, как было показано в [19], сохраняется и при высоком давлении воздуха. Такое изменение цвета наблюдается с электродами из алюминия.

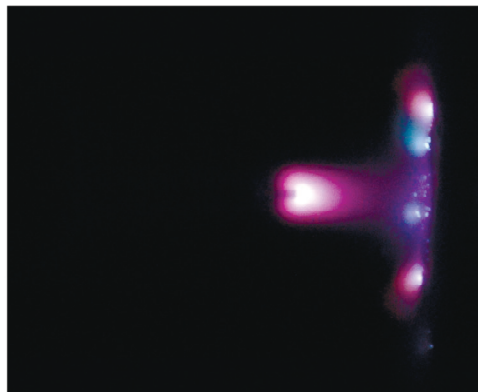
Пары железа из электродов придают разряду голубой оттенок. На рис. 4 показаны фотографии разряда с плоским электродом из нержавеющей стали и вторым электродом (слева) из алюминия.

Эти фотографии получены в аргоне, что позволило более наглядно продемонстрировать цвет струй. У электрода из алюминия формируются струи красного цвета, а у электрода из нержавеющей стали — голубого (рис. 4, *a*). Красный цвет струи был получен в воздухе (рис. 3, *б* и [18, 19]), а также в азоте. Рис. 4, *б* демонстрирует распыление Al катода из тонкой проволоки. В импульсно-периодическом режиме разряда произошло напыление алюминия на периферию плоского электрода, следовательно, кроме красных струй появились и голубые.

На основании полученных данных можно предположить, что пары металлов, которые присутствуют в атмосфере Земли, например, за счет



a



б

Рис. 4. Разряд в аргоне под давлением 30 торр с электродами из алюминия (слева) и нержавеющей стали (плоский, справа); $d = 2$ мм; $f = 100$ Гц; $U = 12$ кВ; катод – кокус (*a*), проволока (*б*) (цвет. рисунок см. <http://iao.ru/ru/content/vol.35-2022/iss.05>)

мелких метеоритов [22], влияют на цвет ССЯ. Возможность влияния паров металлов на зажигание высотных атмосферных разрядов подтвердили исследования апокамписческого разряда в [24]. Использование электродов вспомогательного разряда из различных металлов показало, что с электродами из меди и алюминия апокампис формируется при меньшем напряжении и его длина больше, чем с электродами из железа и вольфрама.

Заключение

Проведенные исследования импульсных диффузных разрядов в воздухе, азоте и аргоне показали, что при образовании у электродов из алюминия и нержавеющей стали мини-струй цвет свечения плазмы в этой и прилегающей области разряда изменяется. Оттенки регистрируемого свечения воздуха в области мини-струй более подходят по цвету к излучению красных спрайтов и голубых струй в атмосфере Земли. Предполагаем, что подобное влияние на цвета скоротечных световых явлений оказывают вещества метеоритов, «сгоревших» в верхних слоях атмосферы, в частности алюминий и железо. В дальнейшем предполагается продолжить спектральные исследования излучения мини-струй и определить наиболее интенсивные линии и полосы различных элементов.

Авторы благодарят Д.В. Белоплатова, М.И. Ломаева и Д.А. Сорокина за совместную работу [18] при проведении предварительных исследований мини-струй в диффузных разрядах с неоднородным электрическим полем.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИСЭ СО РАН (проект № FWRM-2021-0014).

1. *Sentman D.D., Wescott E.M.* Red sprites and blue jets: Thunderstorm-excited optical emissions in the stratosphere, mesosphere, and ionosphere // *Phys. Plasmas*. 1995. V. 2, N 6. P. 2514–2522. DOI: 10.1063/1.871213.
2. *Pasko V.P., Inan U.S., Bell T.F., Taranenko Y.N.* Sprites produced by quasi-electrostatic heating and ionization in the lower ionosphere // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. P. 4529–4561. DOI: 10.1029/96JA03528.
3. *Adachi T., Fukunishi H., Takahashi Y., Sato M.* Roles of the EMP and QE field in the generation of columniform sprites // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. P. L04107. DOI: 10.1029/2003GL019081.
4. *Ebert U., Sentman D.D.* Streamers, sprites, leaders, lightning: From micro- to macroscales // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2008. V. 41, N 23. P. 230301. DOI: 10.1088/0022-3727/41/23/230301.
5. *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. DOI: 10.1029/2009JA014645.
6. *Gordillo-Vázquez F.J., Luque A., Simek M.* Spectrum of sprite halos // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2011. V. 116, N A9. P. A093919. DOI: 10.1029/2011JA016652.
7. *Yang J., Qie X.S., Feng G.L.* Characteristics of one sprite-producing summer thunderstorm // *Atmos. Res.* 2013. V. 127. P. 90–115. DOI: 10.1016/j.atmosres.2011.08.001.
8. *Robledo-Martinez A., Palacios G., Vera A., Sobral H.M.* Modelling sprites and blue jets in the lab through the discharge of a dielectric // *Proc. 31st ICPIG Conf.* 2013. P. 1–4.
9. *Huang A., Lu G., Yue J., Lyons W., Lucena F., Lyu F., Cummer S.A., Zhang W., Xu L., Xue X., Xu S.* Observations of red sprites above hurricane Matthew // *Geophys. Res. Lett.* 2018. V. 45, N 23. P. 13–158. DOI: 10.1029/2018GL079576.
10. *Chanrion O., Neubert T., Mogensen A., Yair Y., Sten-del M., Singh R., Singh D.* Profuse activity of blue electrical discharges at the tops of thunderstorms // *Geophys. Res. Lett.* 2017. V. 44. P. 496–503. DOI: 10.1002/2016GL071311.
11. URL: <https://youtu.be/4VR3yBlKsFM>.
12. *Донченко В.А., Кабанов М.В., Кауль Б.В., Нагорский П.М., Самохвалов И.В.* Электрооптические явления в атмосфере. Томск: Изд-во НТЛ, 2015. 316 с.
13. *Nnadih S., Kosch M., Mlynarczyk J.* Estimating the electron energy and the strength of the electric field within sprites using ground-based optical data observed over South African storms // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2021. P. 105760. DOI: 10.1016/j.jastp.2021.105760.
14. *Heumesser M., Chanrion O., Neubert T., Christian H.J., Dimitriadou K., Gordillo-Vazquez F.J., Luque A., Pérez-Invernyn F.J., Blakeslee R.J., Østgaard N., Reglero V.* Spectral observations of optical emissions associated with terrestrial gamma-ray flashes // *Geophys. Res. Lett.* 2021. V. 48, N 4. P. 2020GL090700. DOI: 10.1029/2020GL090700.
15. *Соснин Э.А., Бабаева Н.Ю., Кожевников В.Ю., Козырев А.В., Найдис Г.В., Панарин В.А., Скакун В.С.,*

- Тарасенко В.Ф.* Моделирование транзитных световых явлений средней атмосферы Земли с помощью апокампического разряда // *Успехи физ. наук.* 2021. Т. 191. № 2. С. 199–219.
16. URL: <https://uib.no/en/rg/space/56207/asim-research>.
 17. *Siingh D., Singh R.P., Kumar S., Dharmaraj T., Singh A.K., Patil M.N., Singh Sh.* Lightning and middle atmospheric discharges in the atmosphere // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2015. V. 134. P. 78–101. DOI: 10.1016/j.jastp.2015.10.001.
 18. *Тарасенко В.Ф., Белоплотов Д.В., Ломаев М.И., Сорокин Д.А.* О наблюдениях в лабораторных разрядах, инициируемых пучком убегающих электронов, мини-спрайтов и голубых мини-струй // *Оптика атмосф. и океана.* 2014. Т. 27, № 11. С. 1017–1019; *Tarasenko V.F., Beloplotov D.V., Lomaev M.I., Sorokin D.A.* Laboratory observation of mini sprites and blue jets in discharges initiated by runaway electrons // *Opt. Atmos. Ocean.* 2014. V. 27, N 11. P. 1017–1019.
 19. *Tarasenko V.F., Beloplotov D.V., Lomaev M.I.* Colored diffuse mini jets in runaway electrons preionized diffuse discharges // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2016. V. 44, N 4. P. 386–392. DOI: 10.1109/TPS.2016.2528581.
 20. *Бакут Е.Х., Бураченко А.Г., Ерофеев М.В., Тарасенко В.Ф.* Генерация сверхкороткого лавинного электронного пучка и рентгеновского излучения в импульсно-периодическом режиме // *Физика плазмы.* 2014. Т. 40, № 5. С. 480–488.
 21. *Tarasenko V.* Runaway electrons in diffuse gas discharges // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2020. V. 29, N 3. P. 034001. DOI: 10.1088/1361-6595/ab5c57.
 22. *Plane J.M., Flynn G.J., Määttänen A., Moores J.E., Poppe A.R., Carrillo-Sanchez J.D., Listowski C.* Impacts of cosmic dust on planetary atmospheres and surfaces // *Space Sci. Rev.* 2018. V. 214, N 23. P. 1–42. DOI: 10.1007/s11214-017-0458-1.
 23. URL: https://spaceweathergallery.com/indiv_upload.php?upload_id=136395.
 24. *Tarasenko V.F., Kuznetsov V.S., Panarin V.A., Skakun V.S., Sosnin E.A.* Whether and how the vapors of Al, Cu, Fe, and W influence the dynamics of apokamps // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. V. 1499, N 1. P. 012051. DOI: 10.1088/1742-6596/1499/1/012051.

V.F. Tarasenko, E.Kh. Baksh, A.G. Burachenko, N.P. Vinogradov. **Simulation of the color of high-altitude atmospheric discharges based on repetitively pulsed discharges in air, nitrogen, and argon.**

The effect of the electrode material (aluminum and stainless steel) on the generation of mini-jets on the color of a pulse-periodic diffuse discharge in air, nitrogen, and argon is studied. A discharge was generated under generation of runaway electrons in an inhomogeneous electric field. It is found that the material of the electrodes significantly influences the color of the mini jets that originate when bright spots appear on the electrodes. It is confirmed that the use of aluminum electrodes colors the mini jets red, and of iron electrodes, blue. It is shown that the color of the discharge plasma in the mini jet region corresponds to the color of high-altitude atmospheric discharges (red sprites and blue jets) and differs from the color of diffuse discharges in air and nitrogen under the same pressure.