

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 537.527.9; 537.53

Влияние относительной влажности воздуха на свойства плазменных диффузных струй

Н.П. Виноградов[✉], В.Ф. Тарасенко*

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

Поступила в редакцию 4.05.2023 г.;
после доработки 19.06.2023 г.;
принята к печати 29.09.2023 г.

Исследовано влияние относительной влажности воздуха на свойства плазменных диффузных струй (ПДС), инициируемых емкостным разрядом при давлении 0,03–1 торр, которые являются аналогами столбчатых спрайтов. Для этого ПДС фотографировались при различных давлениях, а также регистрировались спектры излучения в УФ-, видимой и ИК-областях. Показано, что снижение относительной влажности воздуха при давлении менее 0,1 торр способствует сохранению красного цвета ПДС. Оценка среднего количества красных и синих пикселей на фотографиях подтверждает данный результат. Установлено, что увеличение приведенной напряженности электрического поля вызывает изменение цвета и спектра ПДС за счет роста интенсивности излучения полос первой отрицательной системы азота.

Ключевые слова: атмосферный воздух, разряд низкого давления, емкостный разряд, плазменные диффузные струи, аналог столбчатого спрайта; atmospheric air, low pressure discharge, capacitive discharge, plasma diffuse jet, analog column sprite.

Введение

Атмосферные разряды, наблюдаемые на высотах от 20 до 100 км н.у.м., активно исследуются последние три десятилетия [1, 2]. Они получили название «скоротечные оптические явления» (СОЯ). СОЯ включают в себя красные спрайты [1–5], синие струи [6–10], эльфы [11–15], ореолы [16–20] и другие более редкие виды высотных разрядов. Наиболее распространенный вид СОЯ – красные спрайты. Обычно они появляются над мезомасштабными конвективными системами и представляют собой оптические красные вспышки, возникающие в результате электрических разрядов в мезосфере над грозовыми облаками (см., например, [1–5, 13]). Красные спрайты зарождаются на высоте 70–90 км н.у.м. и распространяются как к поверхности земли (до высоты около 50 км), так и в противоположном направлении (до высот около 100 км).

Впервые наблюдение красных спрайтов было задокументировано в 1990 г. Их черно-белые фотографии были опубликованы в [10]. Вскоре последовали наблюдения из космоса [13, 21] и с самолета [22]. Форма красных спрайтов очень разнообразна и зависит от многих условий. Результаты регистрации их параметров опубликованы в большом числе работ, см., например, [3–5, 13, 16].

Фотография столбчатых красных спрайтов, сделанная с поверхности Земли, представлена на рис. 1.

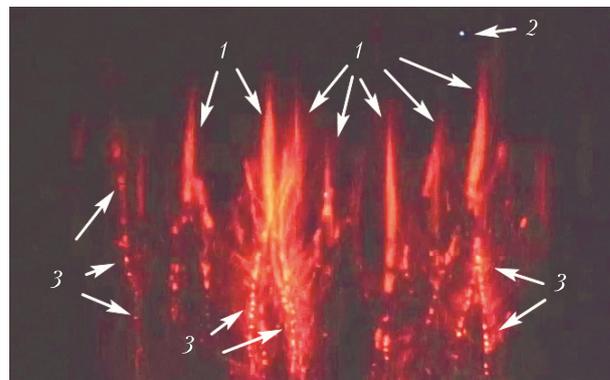


Рис. 1. Столбчатые (column) спрайты (1) со свечением над ними звезды (2), которые распространяются сверху вниз к облакам, принимая чечочную структуру (3). Фотография сделана в Пуэрто-Рико 28 сентября 2020 г. в 04:59:14 UTC (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.11>)

На фотографии видно, что столбчатые спрайты в верхней части состоят из параллельных цилиндров, ниже – из отдельных чечок. Спрайты имеют размеры в десятки километров и с Земли обычно фотографируются с расстояний более 100 км, чтобы расположенные снизу облака не мешали наблюдениям. Установлено, что распространение столбчатых

* Никита Петрович Виноградов (vinikitavin@mail.ru); Виктор Федотович Тарасенко (VFT@loi.hcei.tsc.ru).

спрайтов связано со стримерным механизмом пробоя (см., [3, 6, 8, 20]).

Исследование свойств спрайтов в естественных условиях требует больших материальных затрат и сложной аппаратуры, поэтому предпринимаются попытки изучения их аналогов в лабораторных условиях. Основное внимание при экспериментальном моделировании спрайтов уделяется стримерным разрядам [4, 23–26]. В [27–30] мы показали, что для формирования аналогов красных спрайтов в лабораторных условиях можно использовать емкостный разряд, который инициирует плазменные диффузные струи (ПДС) длиной до 100 см. В [31] было установлено, что ПДС состоят из нескольких красных стримеров. Однако остается еще много нерешенных вопросов, связанных с условиями возникновения красных спрайтов, динамикой их распространения и причинами сохранения красного цвета на больших высотах при низких давлениях воздуха. Как известно, давление воздуха на высоте 71 км н.у.м. составляет $\approx 0,04$ торр, а на высоте 100 км н.у.м. — $\approx 2,4 \cdot 10^{-4}$ торр.

Также следует учитывать, что с увеличением высоты над уровнем моря уменьшается не только давление воздуха, но и относительная влажность воздуха. В области появления красных спрайтов, на широтах, которые соответствуют наибольшей вероятности их наблюдений [12], в летнее время относительная влажность составляет единицы процентов [32]. В наших предварительных экспериментах было замечено, что при прочих равных условиях изменение относительной влажности воздуха влияет на цвет ПДС.

Цель настоящей работы — исследовать в лабораторных условиях влияние относительной влажности воздуха на излучательные свойства ПДС — аналога столбчатых красных спрайтов, — инициируемых емкостным разрядом при давлениях, которые соответствуют давлениям на высотах наблюдения красных спрайтов.

Материалы и методы

В экспериментах использовалась установка, подобная описанной в [27], которая состояла из разрядной камеры и высоковольтного генератора. Разрядной камерой, в которой зажигался емкостный разряд, являлась трубка из кварца марки GE214, прозрачная в УФ- и видимой областях спектра (длина 120 см, толщина стенок 2,5 мм, внутренний диаметр 50 мм). На внешней поверхности трубки располагались два кольцевых электрода из нержавеющей стали шириной 1 см, расстояние между которыми было 6 см. Левый кольцевой электрод был заземлен, а на правый подавались импульсы напряжения от высоковольтного генератора. В экспериментах использовался комнатный воздух, который напускался в камеру после ее предварительной откачки до давления 0,01 торр. Относительная влажность исходного воздуха отличалась в различные дни и составила в экспериментах 16 или 20%.

Для возбуждения разряда применялся генератор NPG-15/2000N, который формировал в импульсно-периодическом режиме при согласованной нагрузке импульсы напряжения отрицательной полярности с амплитудой -9 кВ. Частота следования импульсов равнялась 1 кГц, а их длительность на полувывсоте — 9 нс. Длительности фронта и спада импульсов напряжения были одинаковы и равнялись 4 нс. По сравнению с генератором, использованным в работах [27–31], амплитуда формируемых импульсов напряжения была в три раза больше. Это облегчало пробой воздуха на фронте импульса напряжения при уменьшении давления. Как известно, электрическая прочность газов при работе на левой ветви кривой Пашена увеличивается.

Для съемок ПДС применялся цифровой фотоаппарат Canon 2000D. Спектры излучения определялись с помощью спектрометра HR2000+ES (OceanOptics Inc.), оснащенного кварцевым световодом. Чувствительность спектрометра и пропускание световода были известны в диапазоне 200–1100 нм. Разрешение оптической системы составляло $\approx 0,9$ нм.

Результаты и их обсуждение

Формирования плазменных диффузных струй изучалось при давлениях 0,03–1 торр. Подробные измерения оптических характеристик ПДС были проведены для воздуха с относительной влажностью 16 и 20%. Кроме того, в ряде опытов трубка заполнялась азотом, содержание примесей в котором, включая пары воды, было $< 0,001\%$. Азот был использован, поскольку излучение его полос в области 300–900 нм является основным в ПДС [27–31] и содержание азота в атмосфере Земли превышает 70%

На рис. 2 показаны фотографии свечения плазмы разряда при разных значениях относительной влажности воздуха и давлении воздуха 0,03 торр. При установке электродов в центре кварцевой трубки, как и в работах [27, 29, 31], ПДС распространялись в обе стороны от электродов 1, 2 и были примерно одинаковой длины. Фотографии отражают визуальное изменение цвета ПДС при разной относительной влажности воздуха: при $RH = 20\%$ преобладает белый цвет с голубым оттенком, при $RH = 16\%$ доминирует красный цвет.

Как было показано ранее в работах [27, 31], плазменные струи состоят из стримеров красного цвета. При давлениях более 3–6 торр ПДС не формировались и разряд зажигался только между электродами, в области наибольшей напряженности электрического поля. Длина ПДС и расстояние, на которое распространялись стримеры, зависели от амплитуды импульса напряжения и давления. С увеличением амплитуды импульса напряжения и уменьшением давления воздуха длина ПДС увеличивалась.

Преобладание красного цвета в излучении ПДС при низкой относительной влажности воздуха

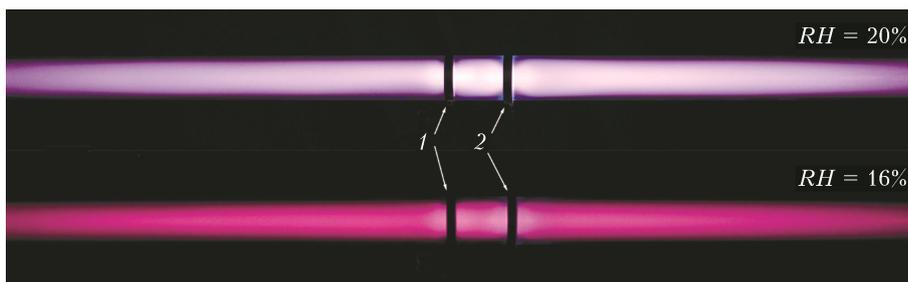


Рис. 2. Фотография свечения плазмы ПДС при давлении воздуха 0,03 торр и разной относительной влажности: 1 – заземленный кольцевой электрод; 2 – высоковольтный кольцевой электрод с отрицательной полярностью (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.11>)

подтвердили эксперименты с азотом, который по сравнению с воздухом имел малую концентрацию всех примесей. Цвет ПДС в азоте при давлениях 0,01 был красным. Более низкие давления в экспериментах не использовались. Следовательно, сохранение красного цвета в верхней части столбчатых спрайтов на больших высотах на рис. 1 можно связать с малой относительной влажностью воздуха [32].

Демонстрируемое на рис. 2 влияние на цвет ПДС относительной влажности воздуха наиболее заметно проявляется при давлениях менее 0,1 торр. При давлениях выше 0,1 торр цвета ПДС при тех же влажностях воздуха существенно не отличались, а формы плазменных струй и их длины практически совпадали (рис. 3).

Необходимо заметить следующее. Подтверждением того, что цветопередача фотографии соответствует цветам, видимым глазом, является результат опыта по съемке емкостного разряда через фильтр УФС-2, который пропускал в основном УФ-излучение. Режим горения разряда соответствовал наибольшей энергии излучения в УФ-области спектра. Эксперимент, как и следовало ожидать, показал отсутствие свечения на фотографии, она была черной.

Для количественной оценки числа красных пикселей на фотографиях была написана программа на языке Python с использованием библиотеки Pillow. Программа позволяет разбить фотографию на отдельные пиксели и посчитать количество красных и синих пикселей. В расчетах использовали фотографии, приведенные на рис. 2 и 3.

Результаты расчета показали, что отношение количества красных пикселей к синим для фотографии разряда при давлении 0,03 торр при $RH = 20\%$ (рис. 2, а) равнялось 0,85, а при $RH = 16\%$

(рис. 2, б) составляло 1,19, что подтверждает преобладание красного цвета ПДС при меньшей относительной влажности воздуха. При давлении 0,4 торр (рис. 3) отношение количества красных пикселей к синим при $RH = 20$ и 16% одинаковое и равно единице.

Из сравнения фотографий на рис. 2 и рис. 3 также следует, что имеется второй механизм, который влияет на цвет ПДС при изменении относительной влажности воздуха. Для его определения, как и в наших предыдущих работах [26–31], подробно исследовались спектры излучения ПДС в различных условиях. Спектры излучения при $RH = 20\%$ и давлении 0,4 и 0,03 торр приведены на рис. 4.

Рис. 4, а подтверждает, что в спектре излучения ПДС, который был получен на расстоянии 11 см от правого края правого кольцевого электрода, преобладают полосы второй положительной системы молекулярного азота ($2+$) в ближней УФ-области спектра с наибольшей спектральной плотностью энергии излучения (W) на длинах волн 315,9; 337,1 и 357,7 нм. Также на этой спектрограмме видны полосы излучения первой отрицательной системы азота ($1-$) с максимальной интенсивностью на длине волны 391,4 нм и широкие полосы первой положительной системы азота ($1+$) в области длин волн 550–900 нм. Данный спектр излучения является типичным для ПДС в подобных условиях (см., например, [27, 30]). Он мало меняется при удалении световода спектрометра от краев электродов в обе стороны на расстоянии более 10 см. При этом, несмотря на большую интенсивность полос $2+$ системы азота в УФ-области спектра, видимый и фотографируемый красный цвет ПДС определяются

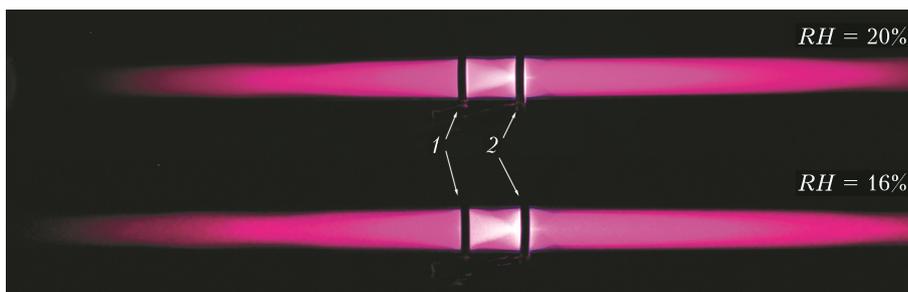


Рис. 3. То же, что и на рис. 1, при давлении 0,4 торр (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.11>)

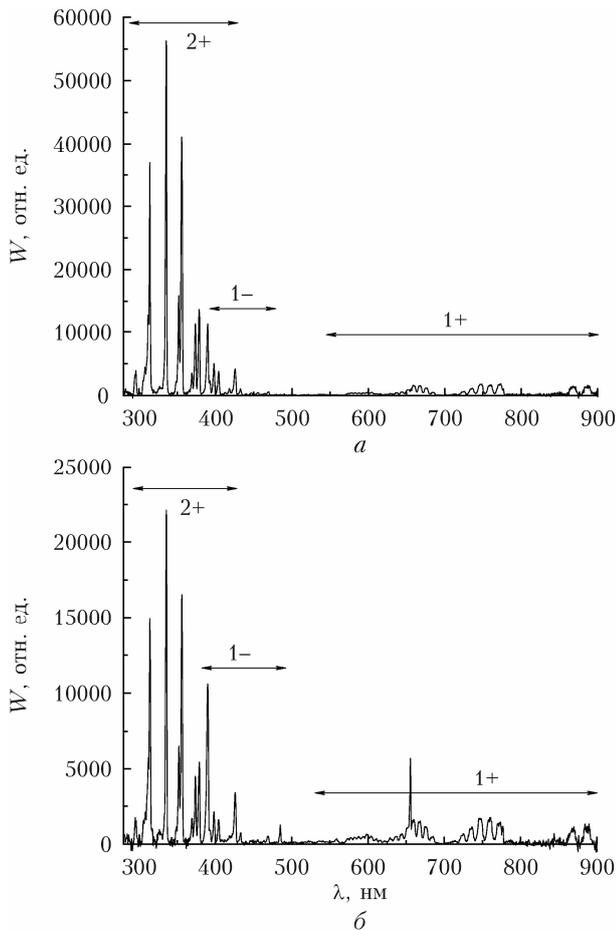


Рис. 4. Спектральное распределение плотности энергии излучения ПДС на расстоянии 11 см от правого кольцевого электрода в диапазоне длин волн 280–900 нм при $RH = 20\%$ и давлении 0,4 (а) и 0,03 торр (б)

полосами излучения 1+ системы азота. Таким образом, в спектре излучения ПДС в данных условиях преобладает излучение 2+ системы азота в ближней УФ-области спектра (см. также [26–29]). В излучении красных спрайтов также присутствует интенсивное излучение 2+ системы азота [8, 9], плотность энергии излучения которого превышает излучение полос 1+ системы азота. Однако при регистрации спектров спрайтов в наземных лабораториях относительная доля УФ-излучения меньше из-за ослабления в атмосфере Земли.

При уменьшении давления спектр излучения воздуха изменился (см. рис. 4, б). В нем возросла интенсивность полос 1- системы азота, в том числе на полосах молекулярного иона азота с $\lambda = 427,8$ и $470,9$ нм, которые расположены в видимой области спектра. Кроме того, появилась интенсивная линия $656,3$ нм, которая принадлежит атомарному водороду (H_α). Ее появление можно связать с диссоциацией воды за счет увеличения приведенной напряженности электрического поля из-за уменьшения давления воздуха.

Анализируя рис. 2–4, можно сделать вывод, что есть дополнительный механизм, влияющий на цвет ПДС и их спектры. Относительная влажность

воздуха не повлияла на цвет ПДС при давлении 0,4 торр (см. рис. 3), как и при более высоких давлениях (см. работу [26]). Можно предположить, что с уменьшением давления воздуха в условиях малых концентраций паров воды красный цвет разряда будет сохраняться только при ограничении приведенной напряженности электрического поля. Как известно, при сохранении пробивного напряжения и увеличении давления приведенная напряженность электрического поля уменьшается. Тогда изменение цвета ПДС на рис. 2, а, а также спектра на рис. 4, б можно объяснить увеличением пробивного напряжения и, следовательно, приведенной напряженности электрического поля с увеличением относительной влажности воздуха. Такой механизм оказывал влияние на спектр и цвет ПДС только при давлениях воздуха менее 0,1 торр. Из этих данных следует, что приведенная напряженность электрического поля на больших высотах, где также наблюдается основное излучение столбчатых красных спрайтов, сравнительно низкая и вклад излучения молекулярного иона азота (1-я отрицательная система) в видимой области спектра мал, следовательно, красный цвет спрайтов сохраняется.

Заключение

В настоящей работе показано влияние относительной влажности воздуха на оптические свойства ПДС при давлениях 0,03–1 торр. Установлено, что при малых давлениях воздуха ($< 0,1$ торр) пробивные напряжения в условиях генерации ПДС увеличиваются с ростом относительной влажности воздуха. В этих условиях цвет ПДС становился красным при относительной влажности воздуха 16% и белым с голубым оттенком при 20%. При давлениях воздуха выше 0,1 торр относительная влажность воздуха существенно не влияла на цвет ПДС. Следовательно, красный цвет спрайтов на больших высотах может быть обусловлен уменьшением относительной влажности воздуха и сравнительно малой приведенной напряженностью электрического поля в этих условиях. Вывод о влиянии влажности воздуха подтверждает эксперимент по формированию ПДС в азоте с малым содержанием примесей. Спектральная плотность энергии излучения полос 1-ой отрицательной системы азота в видимой области спектра увеличивается с ростом приведенной напряженности электрического поля.

Полученные результаты могут найти применение при изучении свойств красных спрайтов и других разрядов низкого давления, которые формируются с участием стримеров.

Благодарности. Авторы благодарят Е.Х. Бакшта за помощь в работе и полезные обсуждения. Авторы выражают глубокую благодарность профессиональному фотографу Frankie Lucena за предоставленный снимок (рис. 1) и разрешение использовать его в статье.

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

Список литературы

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. *Rodger C.J.* Red sprites, upward lightning, and VLF perturbations // *Rev. Geophys.* 1999. V. 37, N 3. P. 317–336. DOI: 10.1029/1999RG900006.
3. *Pasko V.P.* Red sprite discharges in the atmosphere at high altitude: The molecular physics and the similarity with laboratory discharges // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2007. V. 16, Art. N S13. DOI: 10.1088/0963-0252/16/1/S02.
4. *Williams E., Valente M., Gerken E., Golka R.* Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges. Springer, 2006. P. 237–251.
5. *Stenbaek-Nielsen H.C., McHarg M.G., Kanmae T., Sentman D.D.* Observed emission rates in sprite streamer heads // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34, Art. N L11105. DOI: 10.1029/2007GL029881.
6. *McHarg M.G., Stenbaek-Nielsen H.C., Kammae T.* Observed emission rates in sprite streamer heads // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34, Art. N L06804. DOI: 10.1029/2007GL029881.
7. *Kanmae T., Stenbaek-Nielsen H.C., McHarg M.G., Haaland R.K.* Diameter-speed relation of sprite streamers // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2012. V. 45, N 27. Art. N 275203. DOI: 10.1088/0022-3727/45/27/275203.
8. *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. P. 475–516.
9. *Singh M., Sharma P.K., Pathak P.P.* Radiation phenomenon due to streamers of sprites // *J. Electromag. Analysis Appl.* 2022. V. 14, N 3. P. 31–37. DOI: 10.4236/jemaa.2022.143003.
10. *Franz R.C., Nemzek R.J., Winckler J.R.* Television image of a large upward electrical discharge above a thunderstorm system // *Science*. 1990. V. 249. P. 48–51. DOI: 10.1126/science.249.4964.48.
11. *Sentman D.D., Wescott E.M., Osborne D.L., Hampton D.L., Heavne M.J.* Preliminary results from the Sprites 94 Aircraft Campaign: 1. Red sprites // *Geophys. Res. Lett.* 1995. V. 22, N 10. P. 1205–1208. DOI: 10.1029/95GL00583.
12. *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.* Global transients in ultraviolet and red-infrared ranges from data of Universitetsky-Tatiana-2 satellite // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2013. V. 118, N 2. P. 370–379. DOI: 10.1029/2012JD017501.
13. *Jehl A., Farges T., Blanc E.* Color pictures of sprites from non-dedicated observation on board the International Space Station // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2013. V. 118. P. 454–461.
14. *Neubert T., Ostgaard N., Reglero V., Blanc E., Chanrion O., Oxborrow C.A., Orr A., Tacconi M., Hartnack O., Bhandari D.D.V.* The ASIM Mission on the International Space Station // *Space Sci. Rev.* 2019. V. 215, N 2. P. 1–17. DOI: 10.1007/s11214-019-0592-z.
15. *Pizzuti A., Bennett A., Soula S., Amor S.N., Mlynarczyk J., Füllekrug M., Püdeboy S.* On the relationship between lightning superbolts and TLEs in Northern Europe // *Atmos. Res.* 2022. V. 270, Art. N 106047. DOI: 10.1016/j.atmosres.2022.106047.
16. *Neubert T., Rycroft M., Farges T., Blanc E., Chanrion O., Arnone E., Odzimek A., Arnold N., Enell C.-F., Turunen E., Bössinger T., Mika A., Haldoupis C., Steiner R.J., Velde O. van der, Soula S., Berg P., Bøberg F., Thejll P., Christiansen B., Ignaccolo M., Füllekrug M., Verronen P.T., Montanya J., Crosby N.* Recent results from studies of electric discharges in the mesosphere // *Surveys Geophys.* 2008. V. 29, N 2. P. 71–137. DOI: 10.1007/s10712-008-9043-1.
17. *Stenbaek-Nielsen H.C., Haaland R., McHarg M.G., Kanmae T.* Sprite initiation altitude measured by triangulation // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2010. V. 115, N A8. DOI: 10.1029/2009JA014850.
18. *Qin J., Celestin S., Pasko V.P., Cummer S.A., McHarg M.G., Stenbaek-Nielsen H.C.* Mechanism of column and carrot sprites derived from optical and radio observations // *Geophys. Res. Lett.* 2013. V. 40, N 17. P. 4777–4782. DOI: 10.1002/grl.50910.
19. *Malagon-Romero A., Teuissen J., Stenbaek-Nielsen H.C., McHarg M.G., Ebert U., Luque A.* On the emergence mechanism of carrot sprites // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47, Art. N e2019GL085776. DOI: 10.1029/2019GL085776.
20. *Pasko V.P., Qin J., Celestin S.* Toward better understanding of sprite streamers: Initiation, morphology, and polarity asymmetry // *Surveys Geophys.* 2013. V. 34, N 6. P. 797–830.
21. *Vaughan O.H., Blakeslee Jr.R., Broeck W.L., Vonnegut B., Brook M., McKune J.Jr.* A cloud-to-space lightning as recorded by the space shuttle payload bay camera // *Mon. Weather Rev.* 1992. V. 35. P. 1459–1461. DOI: 10.1175/1520-0493(1992)12<1459:ACTSLA>2.0.CO;2.
22. *Sentman D.D., Wescott E.M.* Observations of atmospheric optical flashes recorded from an aircraft // *Geophys. Res. Lett.* 1993. V. 20. P. 2857–2860. DOI: 10.1029/93GL02998.
23. *Goto Y., Ohba Y., Narita K.* Optical and spectral characteristics of low pressure air discharges as sprite models // *J. Atmos. Electricity*. 2007. V. 27, N 2. P. 105–112. DOI: 10.1541/jae.27.105.
24. *Соснин Э.А., Бабаев Н.Ю., Кожевнико 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. DOI: 10.3367/UFNr.2020.03.038735.
25. *Arcanjo M., Montanya J., Urbani M., Lorenzo V.* Optical signatures associated with streamers and leaders of laboratory discharges // *Geophys. Res. Lett.* 2021. V. 48, Art. N e2021GL095601. DOI: 10.1029/2021GL095601.
26. *Opaitis D.F., Shneider M.N., Howard P.J., Miles R.B., Milikh G.M.* Study of streamers in gradient density air: Table top modeling of red sprites // *Geophys. Res. Lett.* 2010. V. 37, Art. N L14801. DOI: 10.1029/2010GL043996.
27. *Tarasenko V., Vinogradov N., Baksh E., Sorokin D.* Ionization waves, propagating in opposite directions, as in red sprites // *J. Atmos. Sci. Res.* 2022. V. 5, N 4. P. 26–36. DOI: 10.24018/ejgeo.2022.3.6.322.
28. *Бакут Е.Х., Виноградов Н.П., Тарасенко В.Ф.* Формирование стримеров в неоднородном электрическом поле при низких давлениях воздуха // *Оптика атмосф. и океана*. 2022. Т. 35, № 9. С. 777–781; *Baksh E.K., Vinogradov N.P., Tarasenko V.F.* Generation of streamers in an inhomogeneous electric field under low air pressure // *Atmos. Ocean. Opt.* 2022. V. 35, N S1. P. S159–S164. DOI: 10.15372/AOO20220911.

29. Тарасенко В.Ф., Бакиит Е.Х., Виноградов Н.П. Моделирование красных спрайтов с помощью емкостного разряда // Прикладная физика. 2022. № 4. С. 11–17. DOI: 10.51368/1996-0948-2022-4-11-17.
30. Тарасенко В.Ф., Бакиит Е.Х., Виноградов Н.П., Со-рокин Д.А. Спектры излучения воздуха низкого давления при диффузном стримерном разряде // Оптика и спектроскопия. 2022. Т. 130, № 12. С. 1769–1777. DOI: 10.21883/OS.2022.12.54080.4014-22.
31. Тарасенко В.Ф., Бакиит Е.Х., Панарин В.А., Виноградов Н.П. Стримеры, инициируемые емкостным разрядом при давлениях воздуха 0,2–6 торр // Физика плазмы. 2023. Т. 49, № 6. С. 590–599. DOI: 10.31857/S0367292123700245, EDN: WYLTGE.
32. Yue J., Russell J., Gan Q., Wang T., Rong P., Garcia R., Mlynczak M. Increasing water vapor in the stratosphere and mesosphere after 2002 // Geophys. Res. Lett. 2019. V. 46, N 22. P. 13452–13460. DOI: 10.1029/2019GL084973.

N.P. Vinogradov, V.F. Tarasenko. Effect of relative air humidity on the properties of diffuse plasma jets.

The paper is devoted to the study of the effect of relative air humidity on the color of diffuse plasma jets (DPJs) initiated by a capacitive discharge at pressures of 0.03–1 torr, which are analogues of columnar sprites. Photographs and emission spectra of DPJs are given, as well as a photograph of a sprite. The results of the study showed that a decrease in the relative air humidity at pressures less than 0.1 torr contributes to the preservation of the red color of DPJs. Quantifying the average number of red and blue pixels in the photographs confirms this result. It has been established that an increase in the reduced electric field leads to a change in the color and spectrum of the periodic domain structure due to an increase in the intensity of the emission of the bands of the first negative nitrogen system.