

## Моделирование красных спрайтов с помощью ёмкостного разряда

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

*Работа посвящена изучению свойств плазмы импульсного стримерного разряда, которая по своим свойствам подобна плазме высотных атмосферных разрядов. Создана установка для экспериментального моделирования красных спрайтов, наблюдаемых при разрядах на высотах 40–100 км от поверхности Земли. При низких давлениях атмосферного воздуха определены условия формирования двух волн ионизации (стримеров), которые распространяющиеся в противоположных направлениях из области плазмы, создаваемой ёмкостным разрядом. Измерена скорость фронта волны ионизации, приводятся спектры излучения и фотографии разряда. Анализируется механизм генерации спрайта.*

*Ключевые слова:* экспериментальное моделирование красных спрайтов, ёмкостной разряд, излучение воздуха при давлениях 0,4–3 Торр.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-4-11-17

### Введение

Последние три десятилетия большое внимание уделяется изучению и моделированию красных спрайтов и других скоротечных световых явлений, которые связаны с разрядами огромных размеров в верхних слоях атмосферы Земли [1–14]. Красные спрайты возникают на высоте около 70 км и состоят из нескольких струй, распространяющихся как к поверхности Земли, так и в противоположном направлении [9]. Они обычно наблюдаются над областями грозовой активности. На высоте ~50 км от поверхности Земли спрайты могут менять цвет с красного на голубой [10]. Прогресс в изучении спрайтов обусловлен, в частности, исследованиями, которые проводятся с помощью приборов, установленных на самолётах [1] и на международной космиче-

ской станции [5]. Считается, что красный цвет спрайтов в первую очередь связан с излучением первой положительной системы азота (1+), см., например, [15]. Скорости распространения спрайтов согласно исследованиям, проведённых в [11, 15], составляют  $2\text{--}5 \times 10^6$  м/с. Длительность излучения красных спрайтов достигает ~100 мс [11]. Однако вопрос о причине распространения первых спрайтов вниз, к области грозовых разрядов у поверхности Земли, а затем, из области их появления на высоте ~70 км, вверх, требует дальнейших исследований.

Хорошо известно, см., например, [12], что направление распространения волны ионизации (стримера) и её скорость зависят от направления и величины электрического поля.

При стримерном пробое в неоднородном электрическом поле, величина приведённого электрического поля в 2–3 раза меньше при положительной полярности электрода с малым радиусом кривизны [12]. Красные спрайты, согласно большинству известных работ, также являются стримерами больших размеров [3, 4, 15].

Цель данной работы создать установку, на которой можно формировать и исследовать волны ионизации красного цвета, распростра-

---

**Тарасенко Виктор Федотович**, гл.н.с., д.ф.-м.н.

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

**Бакшт Евгений Хаимович**, с.н.с., к.ф.-м.н.

**Виноградов Никита Петрович**, аспирант.

Институт сильноточной электроники СО РАН.

Россия, 634055, г. Томск, просп. Академический, 2/3.

Статья поступила в редакцию 30 мая 2022 г.

---

© Тарасенко В. Ф., Бакшт Е. Х., Виноградов Н. П., 2022

няющиеся в двух противоположных направлениях при давлениях, соответствующих области наблюдения красных спрайтов.

Отличие данных исследований от известных работ по изучению пробоя в длинных трубках, см., например, [13, 14], состоит в использовании для инициирования волн ионизации плазмы безэлектродного разряда. Как известно, в области формирования спрайтов металлические электроды отсутствуют.

### Установка и методики

Для возбуждения воздуха при давлениях 0,1–10 Торр была разработана установка, состоящая из разрядной камеры и высокочастотного генератора. Основной частью установки была камера из кварцевой трубки с высоким пропусканием в УФ и видимой области спектра (кварц GE 214). Трубка имела длину 120 см, толщину стенок 2,5 мм и внутренний диаметр 5 см. Камера располагалась параллельно экспериментальному стенду (поверхности Земли). Установка её перпендикулярно поверхности Земли или под другими углами существенно не влияла на форму и характеристики разряда. На внешней поверхности трубки, в её центре, помещались два кольцевых электрода из фольги шириной 1 см. Расстояние между ними было 6 см. Левый кольцевой электрод был заземлён через шунт, а на второй с частотой 21 кГц подавались импульсы напряжения от высокочастотного генератора с регулируемой амплитудой 1–7 кВ отрицательной или положительной полярности. Длительность импульса напряжения с фронтом  $\approx 350$  нс составляла на полувысоте  $\approx 2$  мкс. Торцы трубки были закрыты фланцами из капролона. На левом фланце помещался дополнительный электрод из проволоки диаметром 1 мм, состоящий из двух частей, который заземлялся или соединялся с высоковольтным источником постоянного напряжения. Это позволяло изменять электрическое поле в левой половине трубки. В экспериментах использовался комнатный воздух с влажностью  $\approx 23$  %, который напускался в камеру после её предварительной откачки до давления 0,01 Торр.

Ток разряда между кольцевыми электродами измерялся с помощью шунта, а напря-

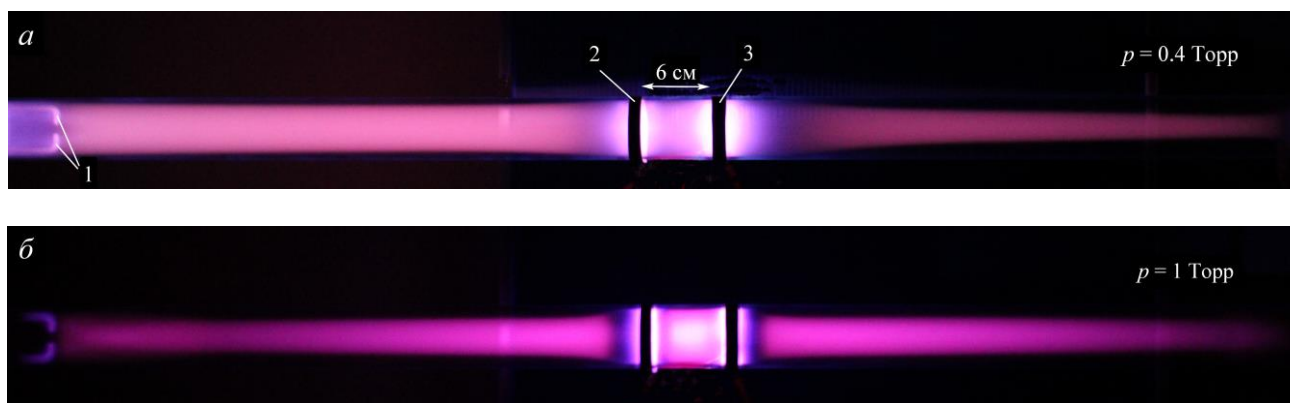
жение на высоковольтном электроде делилось АКТАКОМ АСА-6039. Сигналы с делителя и шунта подавались на осциллограф MDO 3104 (1 ГГц, частота дискретизации 5 выборок/нс). Оптическое излучения плазмы разряда регистрировалось спектрометром HR2000+ES (OceanOptics Inc.) с известной спектральной чувствительностью в диапазоне 190–1100 нм (оптическое разрешение  $\sim 0,9$  нм) и цифровым фотоаппаратом SONY A100.

В экспериментах по определению скорости волны ионизации использовался фотодиод PD025 компании Photek с субнаносекундным временным разрешением, который имел максимальную чувствительность в области 250–500 нм (катод LNS20). Фотодиодом регистрировали излучение из различных областей разряда шириной 4 см, центры этих областей находились от края заземлённого кольцевого электрода на расстоянии 3, 13 или 23 см. Остальная часть трубки закрывалась чёрным экраном.

### Результаты

На рис. 1 показаны фотографии свечения плазмы разряда при различных давлениях, полученные в темноте при длительности экспозиции фотоаппарата 0,2 секунды и диафрагме 5,6. За это время в трубке происходит  $\approx 4,2$  тысяч разрядов, что позволяло регистрировать интегральное свечение плазмы состоящее из отдельных импульсов излучения со слабой интенсивностью. Подобный метод регистрации слабых световых сигналов использовался нами ранее при исследованиях диффузных струй апокампического разряда [16, 17].

Было установлено, что пробой воздуха при давлениях 0,4–9 Торр происходит на фронте импульсов напряжения если их амплитуда равнялась 7 кВ. Наибольшие напряжённости электрического поля в данной установке достигались у кольцевых электродов и в пространстве между ними. При уменьшении давления и(или) увеличении напряжения генератора плазма ёмкостного разряда между кольцевыми электродами 2 и 3 инициировала распространение волн ионизации (стримером) в обе стороны от этих электродов. Их скорость зависела от давления и расстояния от кольцевых электродов и составила  $\sim 0,2$  см/нс при давлении 1 Торр.



**Рис. 1. Фотографии свечения разряда при различных давлениях воздуха. 1 – дополнительный электрод (заземлённый), 2 – кольцевой электрод (заземлённый), 3 – высоковольтный электрод положительной полярности. Напряжение генератора 7 кВ**

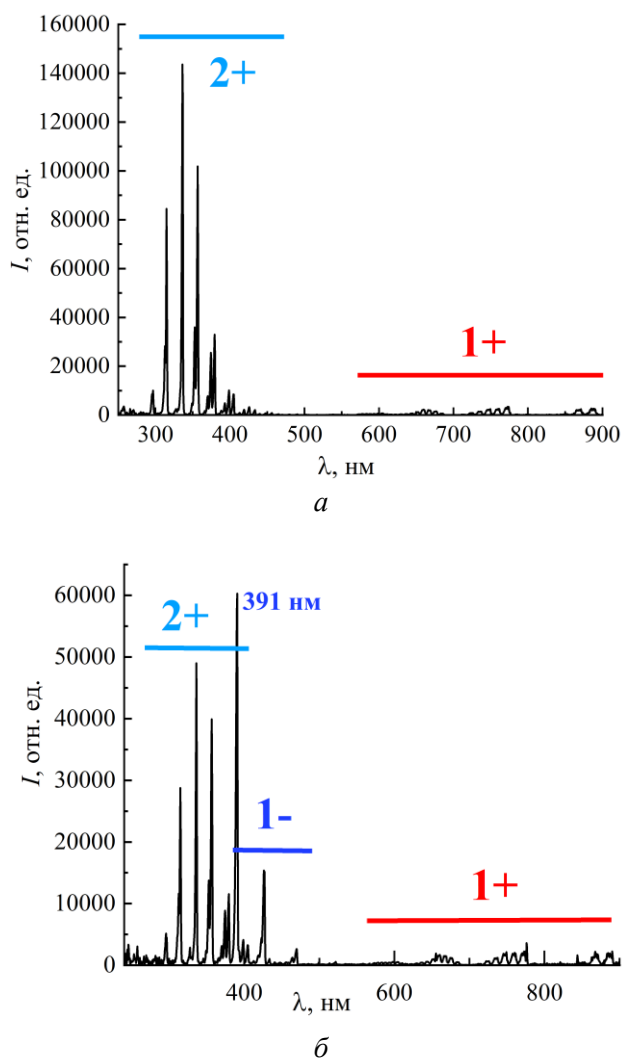
При давлениях воздуха 0,4–3 Торр волны ионизации имели красный цвет, который соответствовал цвету красных спрайтов на высотах 50–100 км [9, 15]. Диаметр волны ионизации в отсутствие дополнительного электрода уменьшался по мере удаления её от кольцевых электродов. Длина волн ионизации увеличивалась с уменьшением давления и достигала десятков сантиметров при давлениях 1 Торр и менее. На длину волны ионизации и её форму влияли полярность и величина напряжения на дополнительном электроде 1. Белый цвет свечения плазмы у кольцевых электродов на рис. 1 обусловлен большой интенсивностью свечения из этих областей и насыщением пикселей цифрового фотоаппарата. При сокращении экспозиции цвет разряда у кольцевых электродов становился красным и соответствовал цвету излучения волн ионизации. На удалении от кольцевых электродов имелись области с более слабой интенсивностью излучения, ширина которых уменьшалась при увеличении давления.

Влияние стенок на форму разряда проявилось только при давлении 0,4 Торра в левой части трубки с дополнительным электродом, рис. 2а. Оно заключалось в сохранении диаметра светящейся области разряда. Однако при увеличении давления (рис. 1б) для этой части разряда диаметр светящейся области был меньше, чем диаметр разряда в центральной части трубки между двумя кольцевыми электродами. В правой части трубки стримерный разряд красного цвета (волна ионизации), который моделирует спрайт, не касался стенок

и при удалении от кольцевого электрода расстояние от него до стенки увеличивалось. С ростом давления, рис. 1б, оба стримерных разряда не касались стенок и их диаметр уменьшается при удалении от кольцевых электродов. При дальнейшем увеличении давления и неизменном напряжении генератора диаметр и длина красных струй (волн ионизации) уменьшались, но форма разряда сохранялась, рис. 2б. Увеличивая давление воздуха до 6–9 Торр и(или) уменьшая напряжение генератора диффузная плазма ёмкостного разряда формировалась только между кольцевыми электродами 2 и 3 в области наибольшего электрического поля. Цвет плазмы между электродами при давлениях до 9 Торр также был красным, как и у волн ионизации.

Характер зависимости пробойного напряжения от произведения  $pd$  ( $p$  – давление,  $d$  – зазор между кольцевыми электродами) отличался от кривой Пашена для соответствующих  $pd$ . На экспериментальных кривых напряжение пробоя возрастало при уменьшении  $pd$  от 54 до 9 Торр×см, а затем падало. Для кривой Пашена в этой области  $pd$  напряжение пробоя монотонно уменьшается. Кроме того, оно было существенно меньше по амплитуде (при  $pd = 9$  Торр×см в  $\approx 6$  раз). Это можно объяснить применением импульсного напряжения и наличием диэлектрических барьеров у электродов.

Спектры излучения плазмы на расстоянии 13 см от левого электрода и между электродами приведены на рис. 2 с учетом чувствительности спектрометра.



**Рис. 2.** Спектры излучения воздуха при давлениях 1 (а) и 0,4 Торр (б). (а) – место регистрации спектра на расстоянии 13 см от левого кольцевого электрода, (б) – место регистрации спектра между кольцевыми электродами. 2+ – полосы второй положительной системы азота, 1+ – полосы первой положительной и 1- – полосы первой отрицательной

Наибольшую спектральную плотность энергии излучения  $I$  в области 200–900 нм для красных струй слева и справа от электродов при давлении воздуха 0,4 Торр и выше имели полосы второй положительной (2+) системы молекулярного азота в УФ области спектра. Максимальная энергия излучалась на длине волны 337 нм, рис. 2а. Также регистрировались полосы первой положительной (1+) системы азота, интенсивность которых возрастала с уменьшением давления. Известные спектры излучения спрайтов подобны и также состоят из полос 1+ и 2+ систем азота, см., например, [3, 4, 15]. Причём, у красных

спрайтов спектральная плотность энергии излучения 2+ системы азота в УФ области больше, чем у 1+ системы.

В области между электродами при давлении 0,4 Торр наибольшую спектральную плотность энергии излучения при напряжении генератора 7 кВ имела ионная линия азота с длиной волны 391 нм, рис. 2б. Это связано с увеличением приведённого электрического поля в этой области. Следует отметить, что спектр излучения тёмных областей у электродов, см. рис. 1, ширина которых уменьшалась с ростом давления, был подобен приведённому на рис. 2б и при давлении 1 Торр. С другой стороны, спектр излучения волны ионизации при давлении 0,4 Торр на удалении от правого кольцевого электрода 10 см и более был подобен приведённому на рис. 2а.

Красный цвет плазмы разряда, который наблюдается визуально и фиксируется в данных экспериментах на фотографиях (рис. 1), связан с относительно большой спектральной плотностью энергии излучения 1+ системы азота при малых давлениях. Однако при этом спектральная плотность энергии излучения наиболее интенсивных полос 2+ была существенно больше, чем у 1+. Отношение 2+/1+ уменьшалось от  $\approx 120$  при давлении воздуха 9 Торр до  $\approx 30$  при давлении воздуха 0,4 Торр. В этих условиях, несмотря на то, что отношение спектральных плотностей энергии 2+ и 1+ систем азота с ростом давления от 0,4 до 9 Торр увеличилось в 5 раз, цвет разряда между кольцевыми электродами (наблюдаемый визуально и зафиксированный на фотографиях) был красным при всех давлениях воздуха в диапазоне от 0,4 до 9 Торр. Однако волны ионизации за пределами кольцевых электродов при повышенных давлениях (6 и 9 Торр) не формировались.

## Обсуждение

Проанализируем полученные результаты и сопоставим их с известными данными о развитии красных спрайтов. В экспериментах мы регистрировали формирование волн ионизации из плазмы ёмкостного разряда. При образовании красных спрайтов также необходимо иметь плазму с достаточно высокой концентрацией электронов и ионов. Предполагаем,

что источником предварительной плазмы для части спрайтов являются диффузные разряды между различными областями серебристых облаков. Известно [18], что серебристые облака образуются примерно на тех же высотах, что и красные спрайты. Разделение зарядов в серебристых облаках, которые, как обнаружено в [18], могут состоять из кристаллов льда, происходит подобно разделению зарядов в грозовых облаках у поверхности Земли [19]. При диффузных разрядах излучение плазмы имеет сравнительно малую интенсивность излучения из-за низких давлений воздуха на больших высотах. Поэтому это излучение пока экспериментально не зарегистрировано. Однако предполагаем, что диффузные разряды при достаточной величине приведённого электрического поля  $E/N$  ( $E$  – электрическое поле,  $N$  – концентрация частиц воздуха) инициирует формирование волн ионизации – спрайтов.

Направление движения спрайтов вниз на первом этапе задаёт электрическое поле, которое должно быть направлено от места появления спрайтов к отрицательно заряженной поверхности. Это может быть поверхность Земли или верхнего слоя грозовых облаков. Хотя обычно верхний слой грозовых облаков заряжен положительно [19], но при положительных молниях отрицательный заряд Земли выносится в эту область. Как следует из экспериментов на созданной установке, длина левой волны ионизации увеличивается при подаче отрицательного напряжения на дополнительный электрод или при его заземлении, рис. 1а. При формировании спрайтов, которые направлены вниз, их длину, кроме уменьшения электрического поля, ограничивает увеличение давление газа. Эти спрайты двигаются вниз в направлении повышения давления воздуха. Также следует учитывать, что величина электрического поля над грозовыми облаками из-за наличия молний и развития спрайта изменяется. По-видимому, изменение электрического поля приводит к распространению красных спрайтов вверх от поверхности Земли, а также может приводить к распространению спрайтов в различных направлениях [15]. Наблюдаемое в ряде работ хаотическое направление спрайтов на высотах около 70 км можно также объяснить неравно-

мерностью распределения зарядов в области серебристых облаков.

### Заключение

Таким образом, в настоящей работе сообщается о создании установки, которая позволила при низких давлениях атмосферного воздуха формировать две волны ионизации, распространяющиеся от области плазмы в противоположных направлениях. Установлено, что скорость фронта волн ионизации (стримеров), соответствуют средней скорости распространения красных спрайтов. Показано, что при давлениях 0,4–3 Торр цвет волн ионизации определяется излучением первой положительной системы азота и соответствует излучению красных спрайтов. При этом, спектральные плотности энергии излучения второй положительной системы азота, а при высоком электрическом поле и первой отрицательной, значительно превышают спектральную плотность энергии излучения первой положительной системы. Применение созданной установки позволяет изучать условия появления красных спрайтов, которые распространяются в противоположных направлениях и имеют подобные спектры излучения, а также регистрировать скорость фронта волн ионизации (стримеров).

*Авторы благодарят Д. С. Печеницына за разработку высокочастотного генератора.*

---

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

### ЛИТЕРАТУРА

1. Sentman D. D., Wescott E. M., Osborne D. L., Hampton D. L., Heavner M. J. // Geophysical Research Letters. 1995. Vol. 22. P. 1205.
2. Rodger C. J. // Reviews of Geophysics. 1999. Vol. 37. P. 317.
3. Pasko V. P. // Plasma sources science and technology. 2007. Vol. 16. P. S13.
4. Raizer Y. P., Milikh G. M., Shneider M. N. // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2010. Vol. 115. P. A7.

5. Neubert T., Østgaard N., Reglero V., Blanc E., Chanrion O., Oxborrow C. A., Orr A., Tacconi M., Hartnack O., Bhandari D. D. // *Space Science Reviews*. 2019. Vol. 215. № 2. P. 1.
6. Wang Y., Lu G., Ma M., Zhang H., Fan Y., Liu G., Wan Z., Wang Y., Peng K. M., Peng C., Liu F. // *Earth and Planetary Physics*. 2019. Vol. 3. № 2. P. 111.
7. Jiang F., Huang C., Wang Y. // *Meteorology and Atmospheric Physics*. 2019. Vol. 131. № 3. P. 421.
8. Kuo C. L., Williams E., Adachi T., Ihaddadene K., Celestin S., Takahashi Y., Hsu R. R., Frey H. U., Mende S. B. // *Frontiers in Earth Science*. 2021. Vol. 9. P. 1102.
9. Facebook. Available online: <http://www.facebook.com/frankie.lucena.1> (accessed on 01.11.2021).
10. Füllekrug M., Mareev E. A., Rycroft M. J. (Eds.). *Sprites, elves and intense lightning discharges*. – Springer Science & Business Media. 2006. Vol. 225.
11. Kanmae T., Stenbaek-Nielsen H. C., McHarg M. G., Haaland R. K. // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2012. Vol. 45. P. 275203.
12. Raizer Y. P., Allen J. E. *Gas discharge physics*. – Berlin: Springer, 1991.
13. Williams E. R. // *Phys. Today*. 2001. Vol. 54. № 11. P. 41.
14. Anikin N. B., Zavalova N. A., Starikovskaia S. M., Starikovskii A. Y. // *IEEE transactions on plasma science*. 2008. Vol. 36. № 4. P. 902.
15. Stenbaek-Nielsen H. C., McHarg M. G. // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2008. Vol. 41. P. 234009.
16. Tarasenko V. F., Sosnin E. A., Skakun V. S., Panarin V. A., Trigub M. V., Evtushenko G. S. // *Physics of Plasmas*. 2017. Vol. 24. P. 043514.
17. Соснин Э. А., Панарин В. А., Скакун В. С., Тарасенко В. Ф., Кузнецов В. С. // *Прикладная физика*. 2017. № 1. С. 21.
18. Hervig M., Thompson R. E., McHugh M., Gordley L. L., Russell III J. M., Summers M. E. // *Geophysical Research Letters*. 2001. Vol. 28. P. 971.
19. Bazelyan E. M., Raizer Y. P. *Lightning physics and lightning protection*. – CRC Press, 2000; М.: Fizmatizdat, 2001).

PACS: 52.80.–s

## Modeling red sprites with capacitive discharge

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

Institute of High Current Electronics, SB RAS  
2/3 Akademicheskii Ave., Tomsk, 634055, Russia  
E-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Received May 30, 2022

*The work is devoted to the study of the plasma of a pulsed streamer discharge, which is similar in its properties to the plasma of high-altitude atmospheric discharges. A facility has been created for experimental modeling of the red sprites observed during discharges at altitudes of 40–100 km from the Earth's surface. At low atmospheric air pressures, the conditions for the formation of two ionization waves (streamers), which propagate in opposite directions from the plasma region created by the capacitive discharge, are determined. The velocity of the ionization wave front is measured, and the emission spectra and photographs of the discharge are presented. The sprite generation mechanism is analyzed.*

*Keywords:* experimental modeling of red sprites, capacitive discharge in air, emission at pressures of 0.4–3 Torr.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-4-11-17

### REFERENCES

1. D. D. Sentman, E. M. Wescott, D. L. Osborne, D. L. Hampton, and M. J. Heavner, *Geophysical Research Letters* **22**, 1205 (1995).
2. C. J. Rodger, *Reviews of Geophysics* **37**, 317 (1999).

3. V. P. Pasko, *Plasma sources science and technology* **16**, S13 (2007).
4. Y. P. Raizer, G. M. Milikh, and M. N. Shneider, *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **115**, A7 (2010).
5. T. Neubert, N. Østgaard, V. Reglero, E. Blanc, O. Chanrion, C. A. Oxborrow, A. Orr, M. Tacconi, O. Hartnack, and D. D. Bhandari, *Space Science Reviews* **215**(2), 1 (2019).
6. Y. Wang, G. Lu, M. Ma, H. Zhang, Y. Fan, G. Liu, Z. Wan, Y. Wang, K. M. Peng, C. Peng, and F. Liu, *Earth and Planetary Physics* **3**(2), 111 (2019).
7. F. Jiang, C. Huang, and Y. Wang, *Meteorology and Atmospheric Physics* **131**(3), 421 (2019).
8. C. L. Kuo, E. Williams, T. Adachi, K. Ihaddadene, S. Celestin, Y. Takahashi, R. R. Hsu, H. U. Frey, and S. B. Mende, *Frontiers in Earth Science* **9**, 1102 (2021).
9. Facebook. Available online: <http://www.facebook.com/frankie.lucena.1> (accessed on 01.11.2021).
10. M. Füllekrug, E. A. Mareev, and M. J. Rycroft (Eds.). *Sprites, elves and intense lightning discharges* (Springer Science & Business Media, **225**, 2006).
11. T. Kanmae, H. C. Stenbaek-Nielsen, M. G. McHarg, and R. K. Haaland, *Journal of Physics D: Applied Physics* **45**, 275203 (2012).
12. Y. P. Raizer, and J. E. Allen, *Gas discharge physics* (Springer, Berlin, 1991).
13. E. R. Williams, *Phys. Today* **54**(11), 41 (2001).
14. N. B. Anikin, N. A. Zavialova, S. M. Starikovskaia, and A. Y. Starikovskii, *IEEE transactions on plasma science* **36**(4), 902 (2008).
15. H. C. Stenbaek-Nielsen and M. G. McHarg, *Journal of Physics D: Applied Physics* **41**, 234009 (2008).
16. V. F. Tarasenko, E. A. Sosnin, V. S. Skakun, V. A. Panarin, M. V. Trigub, and G. S. Evtushenko, *Physics of Plasmas* **24**, 043514 (2017).
17. E. A. Sosnin, V. A. Panarin, V. S. Skakun, V. F. Tarasenko, and V. S. Kuznetsov, *Applied Physics*, No. 1, 21 (2017) [in Russian].
18. M. Hervig, R. E. Thompson, M. McHugh, L. L. Gordley, J. M. Russell III, and M. E. Summers, *Geophysical Research Letters* **28**, 971 (2001).
19. E. M. Bazelyan and Y. P. Raizer, *Lightning physics and lightning protection* (CRC Press, 2000; Fizmatizdat, Moscow, 2001).