

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 537.527.9; 537.53

Анализ динамики атмосферных разрядов с помощью данных о стримерах цилиндрической и сферической формы

В.Ф. Тарасенко*

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

Поступила в редакцию 18.11.2021 г.

Проведен анализ последовательности появления различных атмосферных разрядов (молний, эльфы и голубой струи), показанных на видеосъемке с Международной космической станции. Для сравнения привлекаются экспериментальные данные по формированию диффузного, коронного и апокампиического разрядов с участием цилиндрических и сферических стримеров. Предполагается, что образование эльфы инициируют обширные разряды в облаках с последующим образованием в этой области молнии, замкнутой на Землю. При этом молния достигает верхнего слоя облаков, который имеет положительный заряд. Развитие голубой струи, состоящей из цилиндрических стримеров волны ионизации, инициирует плотная плазма верхней части молнии.

Ключевые слова: атмосферные и лабораторные разряды, молния, эльф, голубая струя, волна ионизации, стример; atmospheric and laboratory discharges, lightning, elve, blue jet, ionization wave, streamer.

Введение

Разряды в атмосфере Земли вызывают интерес исследователей из-за их влияния на жизнедеятельность человека, а также сложности физических процессов, которые в них происходят. Особое внимание в последнее время привлекают высотные атмосферные разряды, такие как голубые струи и их аналоги (стартеры, гигантские струи), красные спрайты и эльфы, называемые транзитными световыми явлениями (ТСЯ) [1–4]. В 2021 г. в Интернете появилась видеосъемка ТСЯ с Международной космической станции (МКС) [5], на которой после одной из молний произошло формирование эльфы, а затем голубой струи. Цветные фотографии и видеосъемки молний, красных спрайтов, эльфов, голубых струй различной длины и других ТСЯ приведены во многих публикациях (см., например, [1–7]). Установлено, что наибольшая интенсивность свечения у молний, а синие струи ярче спрайтов и эльфов. Также были определены цвета различных явлений.

Цветная фотография (рис. 1) взята из Интернета [7], подобная фотография приведена в [6]. Однако в большинстве работ изображения ТСЯ были получены без достаточного временного разрешения, что затрудняло определение последовательности их появления. Поэтому новые видеосъемки с МКС имеют большое значение. Так, из [5] следует, что эльф возникает с малой задержкой после обширного электрического разряда (ОЭР) в грозовых облаках.

Вначале свечение эльфы имеет вид диска, затем принимает форму кольца, внешняя граница и центральная темная область которого с большой скоростью распространяются от области возникновения во все стороны параллельно поверхности Земли. Обычно эльфы наблюдаются на высоте ~ 100 км. Отметим, что до наблюдения ОЭР с последующим формированием эльфы и голубой струи в грозовых облаках периодически фиксировались молнии; площадь яркого свечения облаков, вызываемого ими, была меньше. Кроме того, из видео, которое приведено в Интернете [5], следует, что прямая линия, проведенная перпендикулярно Земле, проходит через центры кольца эльфы и области ОЭР.

Голубая струя также возникает на этой условной линии. Ее задержка относительно появления эльфы составляет, согласно видеосъемке, ~ 1 с. Голубая струя начинает распространяться с верхней части облаков примерно из центра ОЭР. В этот момент диаметр темной области внутри кольца эльфы уже превышает расстояние от облаков до его плоскости. В месте старта голубой струи при продвижении ее фронта видна яркая сферическая область. Длина голубых струй обычно больше 10 км [2]. На фронте голубой струи и ее боковой поверхности через некоторое время появляется розоватое свечение. Затем нижняя часть струи отрывается от облаков, а длина области с розоватым свечением на фронте голубой струи увеличивается. Далее голубое свечение сокращается по длине и пропадает, но розоватое свечение еще видно около секунды. Голубая струя, длина которой уменьшилась, а цвет изменился, на поздней стадии своего развития останавливается.

* Виктор Федотович Тарасенко (VFT@loi.hcei.tsc.ru).

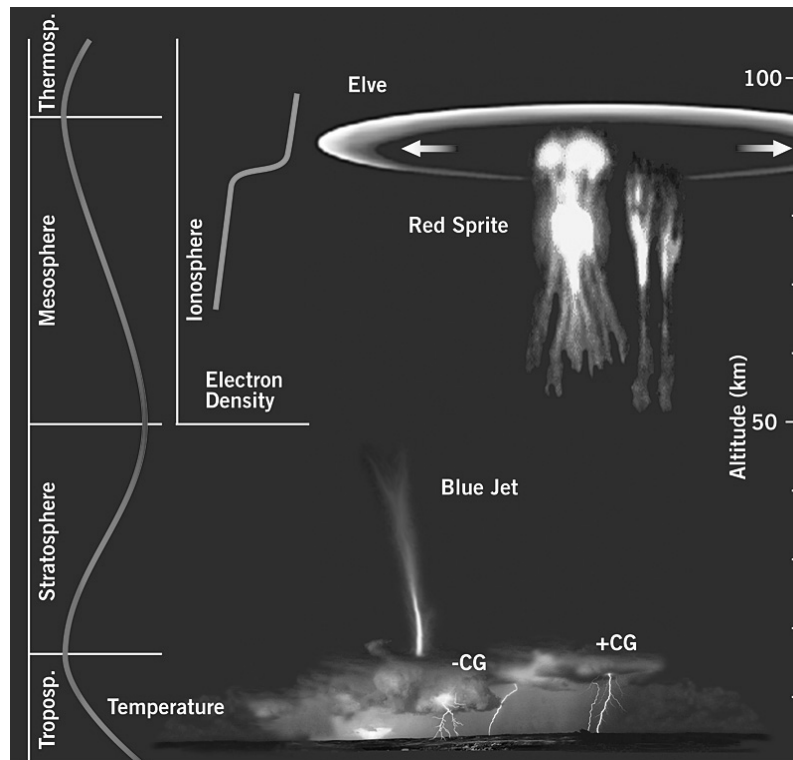


Рис. 1. Форма, высота и цвет различных разрядов в атмосфере Земли [5, 6], а также распределение по высоте температуры воздуха и концентрации электронов (цвет. рисунок см. <http://iao.ru/ru/content/vol.34-2021/iss.12>)

Данные, полученные с помощью МКС, позволяют провести анализ возможных механизмов возникновения этих явлений, а также предложить объяснение наблюдаемой динамики их развития. Для проведения такого анализа были использованы результаты исследований катодонаправленных и анодонаправленных стримеров (цилиндрических, широких, сферической формы) и волн ионизации, состоящих из параллельных стримеров, при диффузном [8] и коронном разрядах [9] в неоднородном электрическом поле, а также апокампов, стартующих с предварительно созданной плазмы импульсно-периодического разряда [10].

Цель настоящей работы — показать, что экспериментальные данные, полученные при изучении лабораторных разрядов (диффузных, коронных и апокампиических), облегчают анализ процессов при транзитных световых явлениях в атмосфере Земли.

Отметим, что анализ свечения ТСЯ ранее проводился во многих работах (например, [11]), но в настоящей работе это сделано на основе видеосъемки на МКС в 2021 г.

Установка и методики для получения экспериментальных данных

В настоящей работе используются экспериментальные данные, аналогичные описанным в [8–10]. Мы приводим только необходимые для анализа данные, полученные при стримерных разрядах в атмосферном воздухе. Диффузные и коронные разряды формировались в промежутках острие–плоскость,

на которые подавалось импульсное или постоянное напряжение различной амплитуды, а также разной полярности. При апокампиическом разряде сначала зажегся импульсно-периодический разряд между двумя дополнительными электродами [10]. Используемые в настоящей работе режимы разрядов и условия их получения описаны в [8–10]. Там же приведены методики регистрации характеристик разрядов и излучения создаваемой плазмы. Интегральное свечение разрядов регистрировалось цифровыми фотоаппаратами, а динамика развития пробоя в различных условиях определялась с помощью ICCD-камеры.

Сравнение излучения атмосферных и лабораторных разрядов

Как видно из [5], только одна из пяти вспышек света в результате молний привела к появлению эльфы и голубой струи, при этом площадь ее области свечения в облаках была наибольшей. Как известно, в атмосфере Земли молнии формируются за счет разделения зарядов внутри облаков. Причем положительный заряд накапливается в верхней части облака, а пробой на Землю обычно происходит с нижней части облака, которая заряжена отрицательно [12].

Предполагаем, что в случае формирования эльфы и голубой струи в [5] в облаках произошли начальные пробой, охватившие значительную площадь, а затем сформировалась молния, которая достигла Земли. Все это привело к резкому уменьшению концентрации положительного заряда в верхнем слое

облаков и замедлило поток электронов из верхней части мезосферы. Плотность отрицательных зарядов в мезосфере, в области над ОЭР, возросла, и во все стороны параллельно поверхности Земли пошла кольцевая волна ионизации, образуя эльф. Как известно, перед фронтом волны ионизации и стримера концентрация электронов должна превышать пороговую [13]. Распространение эльфа в виде кольца параллельно поверхности Земли связано также с резким ростом плотности электронов при увеличении высоты (см. рис. 1). А значит, резкое снижение плотности электронов с уменьшением высоты и увеличение давления газа затрудняют распространение волны ионизации вниз (ниже плоскости эльфа). Толщину кольца эльфа с другой стороны (от Земли) ограничивает экранировка этой части пространства плазмой ионизации.

Формирование голубой струи, как мы считаем, происходит аналогично формированию цилиндрического стримера или множества параллельных стримеров (волны ионизации), которые стартуют из предварительно созданной плазмы с положительным потенциалом при достижении электрическим полем значения выше порогового. Для воздуха при нормальных условиях это значение составляет 4,7 кВ/см [13. С. 586]. При плазме с отрицательно большим потенциалом пороговое значение поля значительно больше. На рис. 2, *а* приведена голубая струя в атмосфере Земли (кадр из [5]), на рис. 2, *б, в* аналогичные по внешнему виду струи, наблюдаемые при коронном и апокамписческом разрядах.

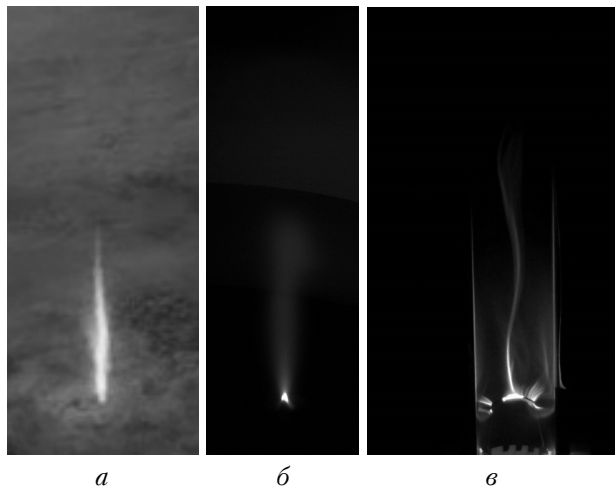


Рис. 2. Голубая струя в атмосфере Земли (*а*) и струи при коронном (*б*) и апокамписческом (*в*) разрядах. Давление воздуха 760 (*б*) и 130 торр в кварцевой трубке (*в*) (цвет. рисунок см. <http://iao.ru/ru/content/vol.34-2021/iss.12>)

Заметно хорошее подобие по форме и старту с яркой области. Следует отметить, что внешний вид, цвет и размеры как голубых струй (сравнительно короткие стартеры, голубые струи средних размеров и гигантские голубые струи, переходящие в красные спрайты), так и катодонаправленных цилиндрических стримеров зависят от многих фак-

торов. Это напряженность электрического поля и напряжение между «электродами», давление и влажность воздуха, а также наличие предварительной ионизации газа высокоэнергетическими частицами, которые регистрируются в атмосфере Земли [14]. Однако форма и условия образования природных и лабораторных голубых струй, как следует из проведенного анализа, очень похожи.

Из исследований различных разрядов в неоднородном электрическом поле следует, что цилиндрический стример стартует из облака плотной плазмы, которая формируется у положительного острия за счет стримера сферической формы [15]. Однако при разряде молнии электроны нейтрализуют положительный заряд облака. Следовательно, задержку в формировании голубой струи можно объяснить временем восстановления положительного заряда в верхнем слое облака и отрицательного – в мезосфере в области над ОЭР. В результате верхняя часть облака снова заряжается положительно и из плотной плазмы, созданной верхней частью молнии, стартует голубая струя. Этому способствует восстановление высокой концентрации электронов в верхней части мезосферы, которая уменьшилась при формировании эльфа. Таким образом, реализуется последовательность разрядов молния – эльф – голубая струя.

Заключение

В настоящей работе с использованием результатов лабораторных исследований проведен анализ последовательности появления атмосферных разрядов (молнии, эльфа и голубой струи) на видео с МКС. Предложен сценарий развития наблюдаемых явлений. Образование эльфа инициируют разряды в облаках, формирующие молнию из верхнего слоя облаков на Землю.

В лабораторных экспериментах голубые струи регистрировались при диффузном, коронном и апокамписческом разрядах с предварительно созданной плазмы с положительным потенциалом. Началом струи при коронном разряде был стример сферической формы у положительного острия, с которого прорастали цилиндрические стримеры (волны ионизации). При напряжениях в сотни киловольт длина таких струй достигала нескольких десятков сантиметров [16]. При апокамписческом разряде стримеры стартовали с предварительно созданной плазмы с положительным потенциалом между двумя электродами, и их длина при низких давлениях и напряжении ~ 10 кВ достигала 1 м [17]. На основе этих данных предполагается, что голубая струя в атмосфере стартует с верхнего слоя облаков из плотной плазмы, созданной молнией.

Автор благодарит сотрудников лаборатории оптических излучений ИСЭ СО РАН за совместную работу при проведении исследований газовых разрядов в неоднородном электрическом поле.

Настоящее исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2021-1026 от 15.11.2021 г.).

1. *Neubert T., Chanrion O., Heumesser M., Dimitriadou K., Husbjerg L., Rasmussen I.L., Østgaard N., Reglero V.* Observation of the onset of a blue jet into the stratosphere // *Nature*. 2021. V. 589, N 7842. P. 371–375. DOI: 10.1038/s41586-020-03122-6.
2. *Chanrion O., Neubert T., Mogensen A., Yair Y., Sten-del M., Singh R., Siingh 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.
3. *Qiu S., Wang N., Soon W., Lu G., Jia M., Wang X., Xue X., Li T., Dou X.* The sporadic sodium layer: A possible tracer for the conjunction between the upper and lower atmospheres // *Atmos. Chem. Phys.* 2021. V. 21, N 15. P. 11927–11940. DOI: 10.5194/acp-21-11927-2021.
4. *Донченко В.А., Кабанов М.В., Кауль Б.В., Назорский П.М., Самохвалов И.В.* Электрооптические явления в атмосфере. Томск: Изд-во НТЛ, 2015. 316 с.
5. URL: <https://youtu.be/4VR3yB1KsFM> (дата обращения: 18.10.2021).
6. *Singh 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.
7. URL: <https://www.uib.no/en/rg/space/56207/asim-research> (дата обращения: 18.10.2021).
8. *Tarasenko V.F., Naidis G.V., Beloplotov D.V., Kostyrya I.D., Babaeva N.Y.* Formation of wide streamers during a subnanosecond discharge in atmospheric-pressure air // *Plasma Phys. Rep.* 2018. V. 44, N 8. P. 746–753. DOI: 10.1134/S1063780X18080081.
9. *Тарасенко В.Ф., Кузнецов В.С., Бакут Е.Х., Панарин В.А., Скакун В.С., Соснин Э.А.* Формирование стримеров шаровой и цилиндрической формы при коронном разряде в воздухе атмосферного давления // *Оптика атмосфер. и океана*. 2020. Т. 33, № 11. С. 897–904. DOI: 10.15372/AOO20201111.
10. *Tarasenko V.F., Sosnin E.A., Skakun V.S., Panarin V.A., Trigub M.V., Evtushenko G.S.* Dynamics of apokamp-type atmospheric pressure plasma jets initiated in air by a repetitive pulsed discharge // *Phys. Plasmas*. 2017. V. 24, N 4. P. 043514. DOI: 10.1063/1.4981385.
11. *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.
12. *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001. 308 с.
13. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Интеллект, 2009. 691 с.
14. *Heumesser M., Chanrion O., Neubert T., Christian H.J., Dimitriadou K., Gordillo-Vazquez F.J., Luque A., Pérez-Invernón 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. *Tarasenko V.F., Kuznetsov V.S., Panarin V.A., Skakun V.S., Sosnin E.A., Baksht E.K.* Role of streamers in the formation of a corona discharge in a highly nonuniform electric field // *JETP Lett.* 2019. V. 110, N 1. P. 85–89. DOI: 10.1134/S0021364019130137.
16. *Рыбка Д.В., Андроников И.В., Евтушенко Г.С., Козырев А.В., Кожевников В.Ю., Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф., Тригуб М.В., Шутько Ю.В.* Коронный разряд в воздухе атмосферного давления при модулированном импульсе напряжения длительностью 10 мс // *Оптика атмосфер. и океана*. 2013. Т. 26, № 1. С. 85–90; *Rybka D.V., Andronikov I.V., Evtushenko G.S., Kozыrev A.V., Kozhevnikov V.Yu., Kostyrya I.D., Tarasenko V.F., Trigub M.V., Shut'ko Yu.V.* Corona discharge in atmospheric pressure air under a modulated voltage pulse of 10 ms // *Atmos. Ocean. Opt.* 2013. V. 26, N 5. P. 449–454.
17. *Sosnin E.A., Babaeva N.Y., Kozhevnikov V.Y., Kozыrev A.V., Naidis G.V., Panarin V.A., Skakun V.S., Tarasenko V.F.* Modeling of transient luminous events in Earth's middle atmosphere with apokamp discharge // *Physics-Uspokhi*. 2021. V. 64, N 2. P. 191–210. DOI: 10.3367/UFNe.2020.03.038735.

V.F. Tarasenko. Analysis of the dynamics of atmospheric discharges based on data on cylindrical and spherical streamers.

The sequence of appearance of various atmospheric discharges (lightning, elve, and blue jet) shown on video from the International Space Station is analyzed. For comparison, experimental data on the formation of diffuse, corona, and apokamp discharges with participation of cylindrical and spherical streamers are used. It is assumed that the formation of the elve filmed from the space is initiated by extensive discharges in clouds with subsequent formation of lightning closed to the Earth in this area. In this case, the lightning reaches the positively charged upper cloud layer. The dense plasma of the upper part of the lightning initiates the development of a blue jet, consisting of cylindrical streamers of the ionization wave.