

Начальная стадия формирования диффузных струй при импульсном разряде в неоднородном электрическом поле

В.С. Кузнецов¹, В.Ф. Тарасенко^{1,2}, В.А. Панарин¹, В.С. Скакун¹,
Э.А. Соснин^{1,2}, Е.Х. Бакшт^{1*}

¹Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3

²Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 4.04.2019 г.

Проведено лабораторное моделирование условий возникновения голубых «струй» в атмосфере Земли. Для этого в воздухе исследовано формирование плазменных образований и диффузных «струй» при коронном и апокампическом разрядах. Показано, что «струи» формируются за счет стримерного пробоя, а их цвет зависит от давления воздуха. При давлении 30–120 торр в неоднородном электрическом поле зарегистрированы стримеры, стартующие от высоковольтного электрода и различных частей импульсно-периодического разряда. Установлено, что в начальной стадии пробоя между основными электродами апокампического разряда на высоковольтном электроде формируется корона шаровой формы, с которой при увеличении напряжения стартуют цилиндрические стримеры. Приведены данные о размерах стримерной головки и скоростях распространения стримера в коронном и апокампическом разрядах.

Ключевые слова: апокампический разряд, коронный разряд, шаровые и цилиндрические стримеры, микросекундные импульсы напряжения, положительная полярность; apokampic discharge, corona discharge, spherical and cylindrical streamers, microsecond voltage pulses, positive polarity.

Введение

Формирование «струй» плазмы голубого цвета при импульсных разрядах наблюдается как на высотах ~10 км и более в атмосфере Земли [1–5], так и в лабораторных условиях [6–8]. Размеры «струй» существенно отличаются друг от друга, это объясняется различием амплитуд напряжений U на несколько порядков в природных и лабораторных условиях. Теоретическое моделирование формирования диффузных «струй» в различных условиях показывает, что их развитие можно описать с помощью стримерного механизма [9–12].

Как известно, продвижение стримеров с электродов положительной полярности начинается при меньших значениях U (в два и более раз) по сравнению с отрицательным напряжением [13], что, в частности, подтверждается при наблюдении апокампического разряда, инициируемого импульсно-периодическим разрядом между двумя электродами [6, 7, 14, 15]. Так, при смене положительной полярности

высоковольтного электрода на отрицательную (при прочих равных условиях и увеличении амплитуды импульсов напряжения в 2 раза) апокамп не образуется, что дополнительно подтверждает стримерный механизм формирования «струй» в апокампическом разряде. В коронном разряде в воздухе атмосферного давления можно получить диффузные «струи», имеющие длину несколько сантиметров при U в несколько десятков киловольт [13, 16–20], а при увеличении U до сотен киловольт их длина может увеличиваться до нескольких десятков сантиметров [17–19]. Однако подробно этот режим коронного разряда не исследовался, и не проводилось сравнение условий формирования коронного и апокампического разрядов.

Цель настоящей работы – сравнить процесс формирования цилиндрических «струй» в апокампическом и коронном разрядах в воздухе.

Экспериментальные установки и методики

Эксперименты проводились с двумя разрядными промежутками на двух установках. На рис. 1, а представлена схема установки для изучения апокампа. Она была аналогична сборке, применявшейся в [6, 7, 14, 15].

* Владимир Сергеевич Кузнецов (robert_smith_93@mail.ru); Виктор Федотович Тарасенко (VFT@loi.hcei.tsc.ru); Виктор Александрович Панарин (Panarin@yandex.ru); Виктор Семенович Скакун (Skakun54@bk.ru); Эдуард Анатольевич Соснин (badik@loi.hcei.tsc.ru); Евгений Ханмович Бакшт (Beh@loi.hcei.tsc.ru).

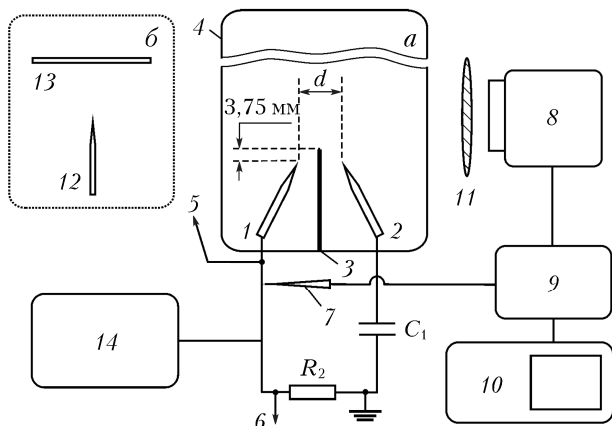


Рис. 1. Блок-схема установки для изучения свойств апокампиического (*а*) и коронного разрядов (*б*): 1, 2 – острийные электроды диаметром 2 мм из нержавеющей стали с углом вершины 15° и радиусом скругления 70 мкм; 3 – керамическая пластинка толщиной 1 мм, выступающая над электродами на 3,75 мм; 4 – кварцевая трубка; 5 – вывод сигнала на делитель напряжения; 6 – вывод токового сигнала с шунта R_2 ; 7 – высоковольтный пробник; 8 – ICCD-камера; 9 – генератор запуска; 10 – осциллограф; 11 – объектив; 12, 13 – острийный и плоский электроды; 14 – импульсный источник питания; $C_1 = 80$ нФ, $R_2 = 0,3$ Ом, $d = 9$ мм

Разряд формировался в кварцевой цилиндрической камере с внутренним диаметром 5,1 см и высотой 121 см с возможностью напуска и откачки воздуха. Давление воздуха в колбе регулировалось в диапазоне от 760 до 0,1 торр. Для изучения апокампиического разряда в камеру 4 помещались два острийных электрода 1 и 2 из нержавеющей стали, образующие разрядный промежуток длиной d . Для создания изгиба канала основного разряда и дополнительного усиления электрического поля между электродами установили керамическую пластинку толщиной 1 мм, выступающую над горизонтальной плоскостью между остриями электродов на 3,75 мм. Источник напряжения формировал импульсы микросекундной длительности с фронтом ≈ 500 нс и амплитудой до 18 кВ, а частота следования импульсов варьировалась в диапазоне от 5 до 50 кГц. Высокая частота импульсов приводила к суммированию излучения плазмы разрядов от большого числа импульсов, что позволяло визуально наблюдать и фотографировать разряд. При низких напряжениях завершения пробоя разрядного промежутка не происходило, а у электрода 1 можно было наблюдать коронный разряд.

Для получения коронного разряда при атмосферном давлении применяли электродный узел (рис. 1, *б*). В этом случае межэлектродное расстояние между иглой из нержавеющей стали 12 и плоским электродом 13 составляло 10 мм. Длина иглы 50 мм, диаметр 0,3 мм, радиус скругления острия 40 мкм. При исследовании коронного разряда использовали два источника напряжения. Один из них был таким же, как на рис. 1, *а*, другой позволял подавать постоянное U , которое варьировалось от 5 до 21 кВ.

Временной ход напряжения и тока разряда определялся с помощью осциллографа 10 TDS-3034 (Tektronics, Inc.), а внешний вид разряда регистрировали фотоаппаратом Canon PowerShot SX 60 HS с экспозицией 1/8 с и светочувствительностью ISO 2500. Свечение плазмы разряда также регистрировалось с разрешением во времени с помощью четырехканальной ICCD-камеры HSFC PRO 8 с использованием фокусирующей линзы 11. Для синхронизации зажигания разряда с запуском высокоскоростной камеры использован импульсный генератор 9. Минимальная длительность экспозиции ICCD-камеры составляла 3 нс.

Результаты экспериментов

На рис. 2 показано формирование стримерной короны шаровой и цилиндрической формы (конфигурация электродов как на рис. 1, *б*, фотография справа повернута на 90°) при постоянном напряжении положительной полярности на высоковольтном электроде 12.

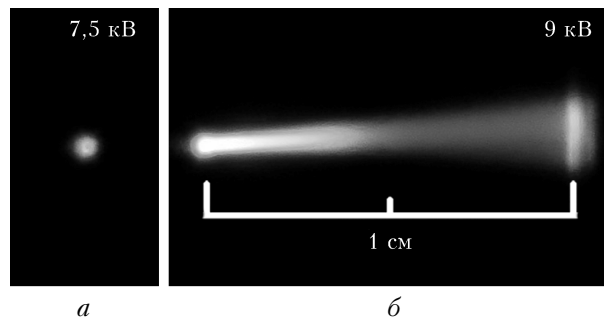


Рис. 2. Коронный разряд в воздухе атмосферного давления на электроде-игле при $U = 7,5$ (*а*) и 9 кВ (*б*)

При напряжении 7,5 кВ возле острия иглы формируется плазменное образование шаровой формы, а с увеличением напряжения до 9 кВ с плазмы в области острия иглы стартует стримерная корона цилиндрической формы. Ее длина увеличивается с ростом напряжения, и при наличии второго электрода она может замыкать промежуток, формируя диффузный разряд, который при дальнейшем увеличении напряжения переходит в искровой.

Для регистрации начальной фазы образования короны был использован импульсный источник напряжения и проведена съемка ICCD-камерой. Установлено, что протяженная «струя» является цилиндрическим стримером. Фотографии, полученные при напряжении 7 кВ, частоте 7 кГц и экспозиции последовательных кадров 10 и 100 нс, приведены на рис. 3.

При высоком временном разрешении (10 нс) наблюдается начало процесса продвижения головки стримера к плоскому электроду (он расположен над острийным электродом и на рис. 3 не показан). На первом кадре свечение отсутствует, а на втором за 10 нс формируется плазменное образование шарообразной формы диаметром $\sim 1,55$ мм. Увеличение экспозиции кадра до 100 нс позволило в рамках

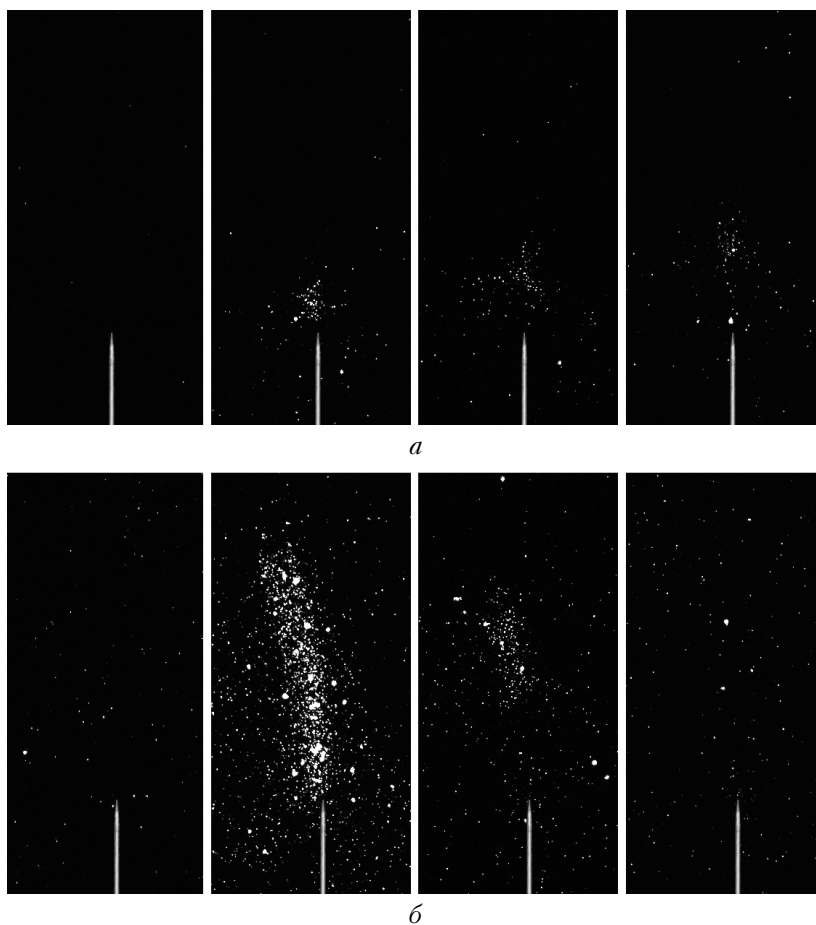


Рис. 3. Динамика формирования «струи» в коронном разряде при атмосферном давлении, длительность экспозиции одного кадра 10 (*а*) и 100 нс (*б*); задержка между последовательными кадрами 10 и 100 нс соответственно. Высота кадра 3 см

эксперимента зарегистрировать стример длиной до 17,6 мм. Средняя скорость продвижения головки цилиндрического стримера в коронном разряде составляла ~ 214 км/с, что примерно совпадает с результатами, полученными в [20], где она имела значение 255 км/с.

Таким образом, подавая на высоковольтный электрод положительное напряжение, можно сравнительно просто в воздухе атмосферного давления сформировать при коронном разряде цилиндрический

стример, визуально имеющий голубой цвет, который в первую очередь характеризуется излучением второй положительной системы азота [17–19].

Как известно, подобные «струи» формируются и в апокамписком разряде [6, 7, 14, 15, 21]. В данной работе мы дополнительно усилили электрическое поле на изгибе импульсно-периодического разряда, с которого формируется апокамп. Это было достигнуто за счет установки тонкой керамической пластинки между острийными электродами (рис. 4).

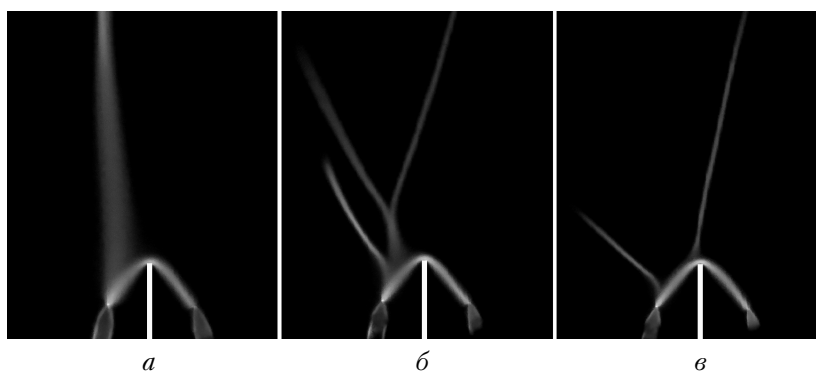


Рис. 4. Внешний вид разряда ($U \sim 17$ кВ, частота следования импульсов $f = 50$ кГц, емкость $C = 1$ пФ) при различных давлениях воздуха: $p = 30$ (*а*), 60 (*б*), 110 торр (*в*). Время накопления $1/500$ с (~ 100 импульсов), высота кадра 3,8 см. Керамическая пластинка белого цвета

Можно заметить, что в условиях эксперимента при давлении 30 торр стример формируется с высоковольтного электрода, а с увеличением давления до 110 торр одна из «струй» стартует от изгиба диффузного канала. Так же наблюдаются «струи», стартующие с боковой поверхности диффузного канала основного разряда. Такое поведение можно обосновать влиянием стенок кварцевой трубки, в которой проводились исследования. При низком давлении воздуха (< 120 торр) стример вначале замыкался на стенки трубки. В условиях апокампического разряда с помощью ICCD-камеры, так же как и при коронном разряде, можно было видеть движение головки стримера, скорость продвижения которой зависела от давления, напряжения, частоты следования импульсов и его положения относительно изгиба диффузного канала. Максимальные скорости движения головки стримера и апокампа достигали 400 км/с при давлении 140 торр. Отметим, что при давлениях воздуха от нескольких сотен торр до 760 стример, как и в работе [21], был голубого цвета, а с уменьшением давления приобретал красный оттенок.

Обсуждение результатов

Проведенные исследования показывают, что для формирования диффузных цилиндрических «струй» при коронном разряде необходимо подавать на высоковольтный электрод напряжение положительной полярности и достигать критического поля для образования стримера. В рамках данного эксперимента как при постоянном, так и при импульсном напряжении на промежутке у кончика высоковольтного электрода формировалось плазменное образование, из которого с увеличением напряжения начинали стартовать цилиндрические стримеры. При атмосферном давлении воздуха на интегральных фотографиях были видны диффузные «струи» голубого цвета.

В случае апокампического разряда образование «струй» при атмосферном давлении начинается из предварительно созданной плазмы в месте изгиба диффузного канала импульсно-периодического разряда. При снижении давления воздуха плазменная «струя» расширяется и приобретает диффузный вид (см. рис. 4), а также может ветвиться или стартовать не только от изгиба диффузного канала, но и с других его частей или с вершины высоковольтного электрода. Это можно объяснить увеличением параметра E/N (E — напряженность электрического поля, N — концентрация частиц воздуха) за счет уменьшения давления, а также нагрева воздуха в импульсно-периодическом режиме. Неравномерный нагрев газа облегчает одновременное достижение критического поля для формирования цилиндрических стримеров в нескольких местах диффузного канала импульсно-периодического разряда.

На основании полученных результатов можно предположить, что при высотных атмосферных разрядах, которые приводят к формированию голубых «струй», также наблюдаются подобные предпробойные стадии. Вначале формируются сгустки плотной

плазмы, которыми выступают части каналов молнии в верхней области грозовой деятельности. Эти части каналов заряжены положительно относительно более высоких слоев атмосферы Земли, следовательно, голубые «струи» направлены вверх.

Заключение

Получены экспериментальные данные о начальной стадии формирования диффузных «струй» в коронном и апокампическом разрядах. Установлено, что в коронном разряде при малых напряжениях положительной полярности на высоковольтном электроде с малым радиусом кривизны возникает шаровой стример. С него при увеличении напряжения (> 9 кВ в данных условиях) стартуют цилиндрические стримеры, за счет которых при дальнейшем увеличении напряжения формируется диффузный разряд, переходящий в искровой.

В режиме апокампического разряда также формируются диффузные «струи» (апокампы), которые при пониженных давлениях могут стартовать как с металлического электрода, так и диффузного канала импульсно-периодического разряда. При этом следует отметить, что устойчивое формирование апокампа с изгиба импульсно-периодического разряда реализовать в стационарном режиме значительно легче при высоких давлениях (> 120 торр). Цвет диффузных «струй» зависит от давления воздуха и изменяется от голубого до красного с уменьшением давления.

Авторы благодарят за помощь в работе А.Г. Русских и Д.С. Печеницина. Работа выполнена в рамках государственного задания ИСЭ СО РАН по теме № 13.1.4.

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.
2. *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 1–4. P. 475–516.
3. *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.
4. *Sadovnichii V.A., Panasyuk M.I., Amelyushkin A.M., Bogomolov V.V., Benghin V.V., Garipov G.K., Kalegarev V.V., Klimov P.A., Khrenov B.A., Petrov V.L., Sharakin S.A., Shirokov A.V., Svertilov S.I., Zotov M.Y., Yashin I.V., Gorbovskoy E.S., Lipunov V.M., Park I.H., Lee J.S., Jeong M.B., Kim H.M., Jeong Y.Y., Shprits V., Angelopoulos C.T., Russell A., Runov D., Turner R.J., Strangeway R., Caron S., Biktemerova A., Grinyuk M., Lavrova L., Tkachev A., Tkachenko O., Martinez H., Salazar E.* Ponce “Lomonosov” Satellite–Space Observatory to Study Extreme Phenomena in Space // *Space Sci. Rev.* 2017. V. 212, N 3, 4. P. 1705–1738.
5. *Chanrion O., Neubert T., Mogensen A., Yair Y., Stenfel M., Singh R., Siingh D.* Profuse activity of blue electrical discharges at the tops of thunderstorms // *Geophys. Res. Lett.* 2017. V. 44, N 1. P. 496–503.
6. *Панарин А.А., Скакун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф.* Лабораторная демонстрация в воздухе крас-

- ных и голубых диффузных мини-струй // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 3. С. 243–253.
7. *Соснин Э.А., Бакут Е.Х., Панарин В.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф.* Министартеры и миниголубые струи в воздухе и азоте при импульсно-периодическом разряде в лабораторном эксперименте // Письма в ЖЭТФ. 2017. Т. 105, № 10. С. 600–604.
 8. *Robledo-Martinez A., Garcia-Villarreal A., Sobral H.* Comparison between low-pressure laboratory discharges and atmospheric sprites // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017. V. 22, N 1. P. 948–962.
 9. *Raizer Y.P., Milikh G.M., Shneider M.N.* On the mechanism of blue jet formation and propagation // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33, N 23. P. L23801.
 10. *Roussel-Dupré R., Colman J.J., Symbalisty E., Sentman D., Pasko V.P.* Physical processes related to discharges in planetary atmospheres // *Space Sci. Rev.* 2008. V. 137, iss. 1–4. P. 51–82.
 11. *Naidis G.V.* Positive and negative streamers in air: Velocity-diameter relation // *Phys. Rev. E.* 2009. V. 79, N 5. P. 057401.
 12. *Popov N.A., Shneider M.N., Milikh G.M.* Similarity analysis of the streamer zone of Blue Jets // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2015. V. 147. P. 121–125.
 13. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. Долгопрудный: Интеллект, 2009. 736 с.
 14. *Sosnin E.A., Naidis G.V., Tarasenko V.F., Skakun V.S., Panarin V.A., Babaeva N.Yu., Baksht E.Kh., Kuznetsov V.S.* Apokamps produced by repetitive discharges in air // *Phys. Plasmas.* 2018. V. 25, N 8. P. 083513.
 15. *Sosnin E.A., Naidis G.V., Tarasenko V.F., Skakun V.S., Panarin V.A., Babaeva N.Y.* On the physical nature of apokampic discharge // *J. Exp. Theor. Phys.* 2017. V. 125, N 5. P. 920–925.
 16. *Леб Л.* Основные процессы электрических разрядов в газах. М.: Госиздат, 1950. 672 с.
 17. *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 атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 1. С. 85–90; *Rybka D.V., Andronikov I.V., Evtushenko G.S., Kozhyrev 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.
 18. *Shao T., Tarasenko V.F., Zhang C., Rybka D.V., Kostyrya I.D., Kozhyrev A.V., Kozhevnikov V.Y.* Runaway electrons and X-rays from a corona discharge in atmospheric pressure air // *New J. Phys.* 2011. V. 13, N 11. 113035 (20 p.).
 19. *Тарасенко В.Ф., Бакут Е.Х., Соснин Э.А., Бураченко А.Г., Панарин В.А., Скакун В.С.* Характеристики импульсно-периодического коронного разряда в атмосферном воздухе // Физика плазмы. 2018. Т. 44, № 5. С. 447–460.
 20. *Naidis G.V., Sosnin E.A., Panarin V.A., Skakun V.S., Tarasenko V.F.* Dynamics and structure of nonthermal atmospheric-pressure air plasma jets: Experiment and simulation // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2016. V. 44, N 12. P. 3249–3253.
 21. *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 repetitive pulsed discharge // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 24, N 4. P. 043514.

V.S. Kuznetsov, V.F. Tarasenko, V.A. Panarin, V.S. Skakun, E.A. Sosnin, E.Kh. Baksht. **The initial stage of the diffuse jet formation in a pulsed discharge with a non-uniform electric field in air.**

Laboratory simulation of the conditions for the blue “jet” beginning in the Earth’s atmosphere has been carried out. For this purpose, the diffuse “jet” formation and plasma buildup in corona and apokampic discharges on air has been studied. It is shown that “jet” are formed due to streamer breakdown, and their color depends on pressure. At atmospheric air pressures of 30–120 Torr, streamers starting from different parts of a repetitively pulsed discharge are recorded in a non-uniform electric field. It has been established that, before the breakdown, between the pointed electrodes, a corona discharge of a spherical shape is formed near a metal high-voltage electrode of positive polarity, from which streamer coronas start with increasing voltage. Data on the dimensions of the streamer head and the streamer propagation speeds in the corona and apokampic discharges are presented.