

Формирование миниатюрных аналогов чёточной молнии в азоте и воздухе при импульсном разряде в неоднородном электрическом поле

В.Ф. Тарасенко, Д.В. Белоплов*

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

Поступила в редакцию 29.12.2017 г.

С помощью ICCD камеры исследована динамика свечения разряда в промежутке «острие—плоскость» при наносекундном пробое воздуха и азота, инициируемом убегающими электронами. Наблюдалось формирование плазменных образований, образующих структуру, аналогичную чёточной молнии. Показано, что число ярких образований в промежутке (отдельных чётков) увеличивается при повышении давления. При давлении азота 400 кПа зарегистрировано до четырех отдельных чётков одинакового размера.

Ключевые слова: формирование миниатюрной чёточной молнии, наносекундный пробой воздуха и азота, неоднородное электрическое поле, убегающие электроны; formation of a miniature bead lightning, nanosecond breakdown of air and nitrogen, inhomogeneous electric field, runaway electrons.

Введение

Разряды, происходящие в атмосфере Земли, постоянно привлекали и привлекают внимание исследователей [1–8]. В последние годы наблюдается значительный прогресс в изучении высотных атмосферных разрядов [5–8]. В частности, благодаря исследованиям, проводимым с борта международной космической станции, удалось зафиксировать динамику формирования голубых струй (англ. blue jets) [8]. Параллельно проводятся исследования атмосферных разрядов в лабораторных условиях [3]. Так, например, в недавних работах [9–11] было показано, что над изгибом канала импульсно-периодического разряда в атмосферном воздухе формируются диффузные струи, аналогичные голубым струям и красным спрайтам (англ. sprites) высотных атмосферных разрядов.

Среди разновидностей атмосферного разряда чёточная (жемчужная, цепная, ожерельчатая, капельная) молния [1] изучена хуже других. Исследовать такую молнию в природных и лабораторных условиях с помощью высокоскоростных камер пока еще не удавалось. В научной литературе последних десяти лет мы смогли найти только одно описание наблюдения чёточной молнии [12]. Автор несколько раз видел необычную молнию из окна шестого этажа, которая в заключительной фазе распадалась на отдельные чётки белого цвета. Сфотографировать это явление не получалось из-за его случайности.

Согласно [12], вначале молния представляла собой ярко светящийся изогнутый искровой канал между двумя облаками и чётки не были заметны. В заключительной стадии разряда интенсивность излучения канала молнии уменьшалась и по всей его длине наблюдались отдельные чётки. Интенсивность их излучения уменьшалась за доли секунды и была низкой по сравнению с интенсивностью излучения канала молнии. Отметим, что подобное поведение чёточной молнии соответствует результатам расчетов [13], в которых показано, что при больших энерговкладах в плазму через нескольких микросекунд после окончания действия источника энергии формируются достаточно устойчивые плазменные образования со временем жизни ~1 с. Предполагается, что свечение этих плазменных образований может быть достаточно интенсивным и заметным невооруженным глазом с расстояния в несколько километров.

В лабораторных условиях аналог чёточной молнии наблюдался в [14]. Во время исследования диффузного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами, в промежутке «острие—плоскость» на фоне свечения плазмы диффузного разряда было зарегистрировано яркое плазменное образование (фрагмент искрового канала, чётка). Вероятность появления таких плазменных образований не превышала 1%. В работе [14] удалось зарегистрировать осциллограммы тока разряда и интенсивности излучения плазмы разряда в условиях отсутствия и наличия плазменного сгустка. На основании полученных данных были сделаны предположения, что наблюдаемые яркие образования —

* Виктор Федотович Тарасенко (VFT@loi.hcei.tsc.ru);
Дмитрий Викторович Белоплов (rff.qep.bdimg@gmail.com).

это аналоги плазменных ступков в чёточной молнии и что физическая природа формирования первичных неоднородностей в канале линейной молнии, из которых формируются плазменные ступки, и в разряде в лабораторных условиях одинакова. Однако в [12] отдельные чётки возникали на заключительной стадии разряда молнии, после формирования яркого канала основного разряда, тогда как в [14] искровой канал до формирования плазменных ступков не наблюдался.

Цель настоящей работы — исследовать динамику формирования плазменных образований (чётков) при наносекундном разряде в промежутке «острие—плоскость».

Экспериментальные установки и методики

Исследования проводились на двух установках с двумя различными генераторами. На первой установке, как и в [14], использовался генератор высоковольтных наносекундных импульсов напряжения отрицательной и положительной полярностей РАДАН-220. Импульсы напряжения подавались на промежуток «острие—плоскость», размещенный в откачиваемой камере. Острийный электрод был изготовлен из швейной иглы диаметром 1 мм и радиусом закругления 0,1 мм; межэлектродное расстояние составляло 18 мм. Амплитуда импульса напряжения достигала в режиме холостого хода ~250 кВ, длительность на полувысоте — ~2 нс, а длительность фронта — ~0,5 нс. Регистрация импульсов напряжения осуществлялась с помощью емкостного делителя напряжения.

Из-за отсутствия согласования генератора и нагрузки (газоразрядный промежуток) длительность импульса тока разряда составляла несколько десятков наносекунд. Ток разряда измерялся с помощью шунта, изготовленного из чип-резисторов.

При отрицательной полярности острейного электрода за анодом из сетки регистрировался сверхкороткий лавинный электронный пучок (СЛЭП) [15]. Для этого за анодом устанавливался коллектор. Кроме того, для устранения электромагнитных наводок между приемной частью коллектора и анодом помещалась алюминиевая фольга толщиной 10 мкм. Измеренная длительность тока СЛЭП на полувысоте составила ~0,1 нс, а амплитуда достигала нескольких десятков ампер. Максимумы импульсов напряжения и тока СЛЭП достигались примерно в один момент времени. Эксперименты проводились в моноимпульсном режиме.

На второй установке использовались два генератора наносекундных импульсов напряжения ГИН-100-1 и ГИН-50-1, разработанные компанией «Антарес» [16]. Эти генераторы позволяют осуществлять точную синхронизацию с регистрирующей аппаратурой. Импульсы напряжения, так же как и на первой установке, подавались на промежуток

«острие—плоскость», находящийся в откачиваемой камере. Острийный электрод был изготовлен в форме конуса с углом раствора 60°; межэлектродное расстояние составляло 3 мм. Генератор ГИН-100-1 формировал импульсы напряжения отрицательной полярности амплитудой 25 кВ на согласованную нагрузку длительностью на полувысоте ~4,2 нс, длительность фронта составляла ~2 нс. Генератор ГИН-50-1 формировал импульсы напряжения положительной полярности амплитудой также 25 кВ на согласованную нагрузку длительностью на полувысоте ~13 нс, с длительностью фронта ~2 нс. Генераторы подключались к газоразрядному промежутку с помощью коаксиального кабеля длиной 3 м и волновым сопротивлением 75 Ом. Эксперименты, так же как и на первой установке, проводились в моноимпульсном режиме.

При отрицательной полярности острейного электрода тоже регистрировался СЛЭП, вышедший из промежутка через анод, изготовленный из алюминиевой фольги толщиной 10 мкм.

Газоразрядная камера на первой установке заполнялась атмосферным воздухом. На второй установке в камеру подавался воздух или азот. Давление воздуха изменялось в диапазоне 12,5–100,0 кПа, а азота — в диапазоне 12,5–400,0 кПа.

Регистрация импульсов напряжения, тока разряда и тока СЛЭП осуществлялась цифровым осциллографом DSO-X 6004A (Keysight Tech) с полосой пропускания 6 ГГц и частотой дискретизации 20 ГС/с.

На первой установке свечение плазмы разряда фотографировалось зеркальным фотоаппаратом Sony A100; на второй — регистрировалось с разрешением во времени с помощью четырехканальной ICCD камеры HSFC PRO (рис. 1).

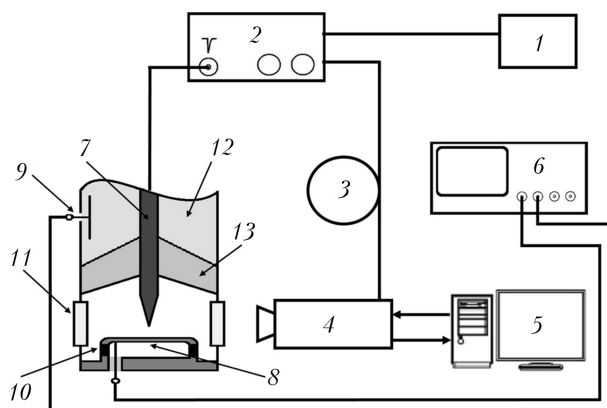


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки: 1 — генератор запуска; 2 — генератор импульсов напряжения; 3 — линия задержки; 4 — четырехканальная ICCD камера; 5 — компьютер; 6 — осциллограф; 7 — высоковольтный электрод; 8 — плоский заземленный электрод; 9 — емкостный делитель напряжения; 10 — чип-резисторы шунта; 11 — кварцевое окно; 12 — трансформаторное масло; 13 — изолятор

Минимальная длительность экспозиции ICCD камеры — 3 нс. Путем подбора длины линии задержки синхросигнала от генератора (рис. 1) удалось осуществлять запуск ICCD камеры на 2–3 нс раньше момента пробоя, что позволяло регистрировать свечение плазмы в предпробойной стадии разряда.

Результаты эксперимента

На первой установке при разряде в воздухе атмосферного давления были зарегистрированы с помощью фотоаппарата ярко светящиеся образования в центральной части промежутка, которые мы называем «чётками» (рис. 2). Полярность острейшего электрода была отрицательной. Вероятность появления таких ярких плазменных образований в промежутке была мала (не более 1%).

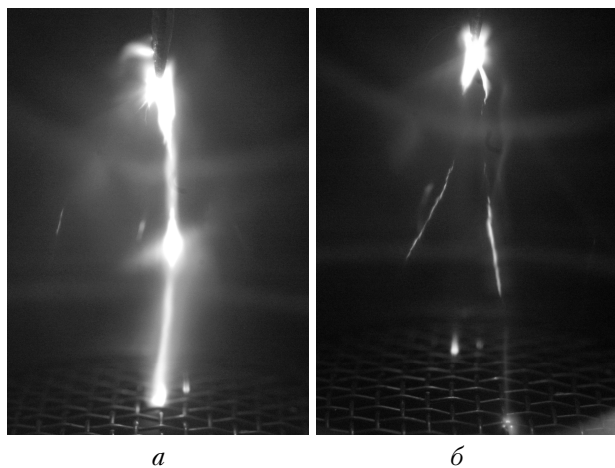


Рис. 2. Фотографии свечения плазмы разряда в воздухе, полученные на первой установке в моноимпульсном режиме при отрицательной полярности импульса напряжения и атмосферном давлении воздуха для двух разных импульсов (*a*, *б*); межэлектродное расстояние 18 мм

На рис. 2, *a* чётка наблюдается на фоне свечения плазмы диффузного разряда. Кроме того, на электродах видны яркие пятна, соединенные между собой относительно ярким каналом контракции, который проходит через чётку. На рис. 2, *б* на фоне свечения плазмы диффузного разряда видны два плазменных образования. Они длиннее и их интенсивность меньше по сравнению с чёткой на рис. 2, *a*. При подаче на острейший электрод серии из $\sim 10^2$ импульсов напряжения положительной полярности отдельные чётки не наблюдались.

На второй установке с помощью ICCD камеры также были зарегистрированы подобные плазменные образования при разряде в воздухе атмосферного давления. С уменьшением давления воздуха и/или положительной полярности импульса напряжения в серии из $\sim 10^2$ импульсов чётки зарегистрировать не удалось. Мы не исключаем возможность появления чётки в этих условиях, но с меньшей

вероятностью. Нам также не удалось зафиксировать на фотографиях несколько чётки в промежутке в воздухе атмосферного давления, хотя при атмосферных разрядах в чёточной молнии обычно наблюдается большое число ярких точек [1, 12].

Не наблюдались чётки и при разряде в азоте с давлением 100 и 200 кПа. Однако при давлении азота 400 кПа с разрешением во времени была зарегистрирована последовательность из четырех чётки при контрагировании диффузного разряда (рис. 3).

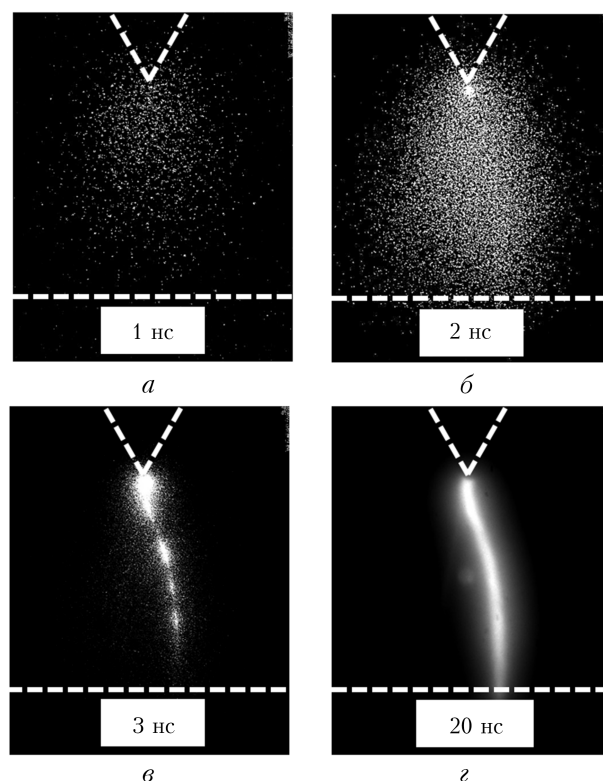


Рис. 3. Свечение плазмы разряда. Изображения получены на второй установке в азоте при давлении 400 кПа; межэлектродное расстояние 3 мм; цифры указывают длительность съемки

Как было отмечено в описании второй установки, запуск ICCD камеры осуществлялся несколько раньше момента пробоя. Это позволило регистрировать свечение плазмы с момента ее формирования в промежутке, т.е. с начала протекания тока через промежуток (нулевой момент времени). На рис. 3, *a* показана стадия формирования разряда (не более 1 нс), когда возникает диффузное свечение (стример шаровой формы с большими поперечными размерами) у острия. На рис. 3, *б* изображено свечение плазмы в течение 2 нс: видно диффузное свечение плазмы и яркое катодное пятно. На рис. 3, *в* представлено изображение свечения плазмы в течение 3 нс, на котором видны сформировавшиеся чётки. Интенсивность их свечения существенно больше, чем интенсивность излу-

чения плазмы разряда в диффузной стадии. Из полученных данных следует, что время формирования чётки составило ~ 1 нс. На рис. 3, *г* приведено интегральное за 20 нс изображение, практически за весь импульс напряжения. В данном случае свечение отдельных чётки не видно из-за большей интенсивности свечения канала искры, так же как и свечение плазмы разряда в диффузной стадии — из-за высокой яркости этого канала. Чтобы избежать перенасыщения четвертого канала ICCD камеры, его усиление было уменьшено в 20 раз по сравнению с третьим каналом. Каналы 1–3 ICCD камеры имели одинаковое усиление.

На рис. 4 показаны осциллограммы импульсов напряжения и тока разряда в азоте при давлении 400 кПа для условий рис. 3. Из осциллограмм видно, что формирование чётки (рис. 3, *в*) приходится на момент уменьшения тока через промежуток.

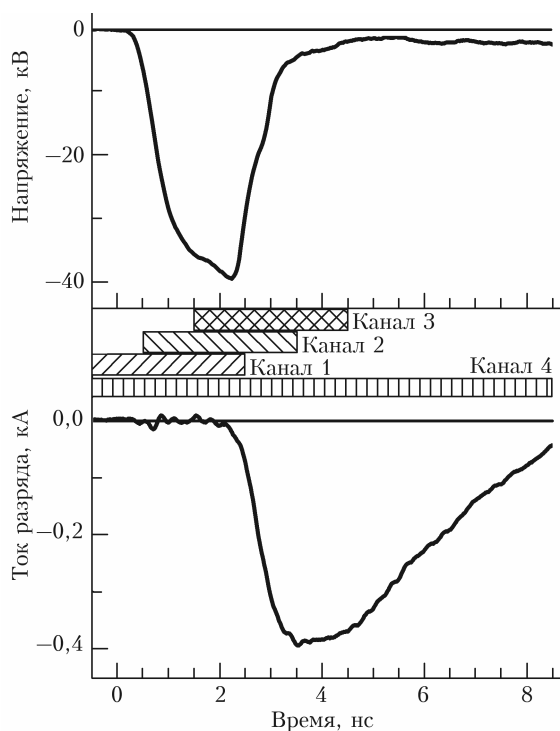


Рис. 4. Осциллограммы импульсов напряжения и тока разряда в азоте при давлении 400 кПа; межэлектродное расстояние 3 мм; прямоугольниками отмечены моменты включения каналов четырехканальной ICCD камеры, ширина прямоугольников соответствует длительности кадра

На рис. 5 изображено свечение плазмы во время другого импульса. Видны две последовательно расположенные чётки (рис. 5, *а*), яркий канал искры (рис. 5, *б, в*), замкнувший промежуток, и вторичное появление чётки (рис. 5, *г*).

Сформировавшиеся чётки, а также яркое пятно на катоде хорошо видны на рис. 5, *а*, свечение на котором примерно соответствует рис. 3, *в*. На рис. 5, *б* чётки все еще хорошо заметны на фоне формирующегося канала, который уже замкнул разрядный промежуток. Рис. 5, *в* подобен рис. 3, *г*:

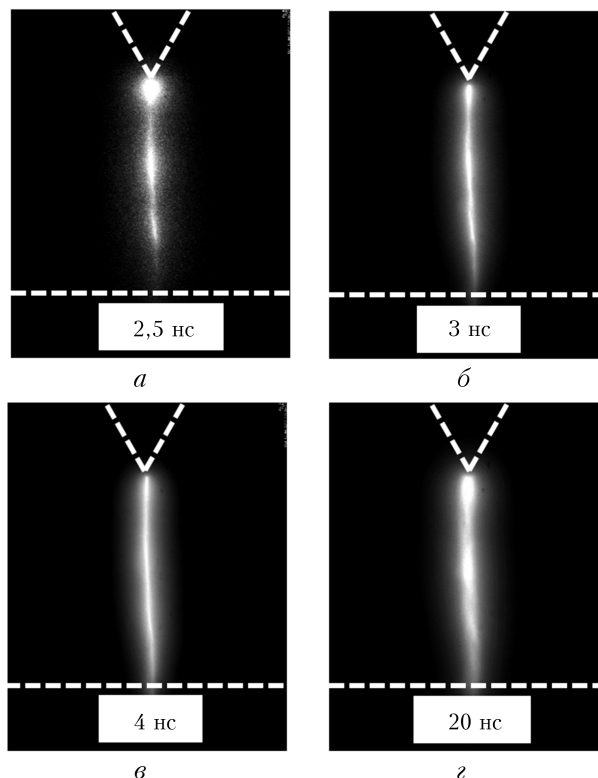


Рис. 5. Свечение плазмы разряда. Изображения получены на второй установке в азоте при давлении 400 кПа; межэлектродное расстояние 3 мм

на нем виден канал искры, замкнувший разрядный промежуток, а свечение отдельных чётки практически не видно. На рис. 5, *г* на фоне канала искры уже можно различить свечение двух чётки, положение которых соответствует положению чётки на рис. 5, *а, б*, и вытянутое яркое пятно у острия. Отсюда следует, что чётки можно наблюдать и на заключительной стадии разряда.

Обсуждение результатов

Рис. 5 доказывает, что неоднородности канала искры, наблюдаемые в виде свечения отдельных чётки на первой стадии разряда, могут проявиться и в его последующие фазы. Следовательно, чёточная структура молнии может быть видна на поздних стадиях развития линейной молнии. Это согласуется с наблюдениями, описанными в [1, 12]. Появление чётки на поздних стадиях молнии следует также из расчетов [13]. Полученные данные уточняют предположение, высказанное в [14], согласно которому регистрируемые в эксперименте яркие образования — это аналоги плазменных сгустков в чёточной молнии.

Переход от катода-острия, или катодного пятна, или анода направленного лидера, к диффузному разряду происходит за счет генерации убегающих электронов в области с усиленным электрическим полем. Далее источником убегающих электронов выступает фронт волны ионизации (стримера),

который движется к аноду, и в результате формируется диффузный разряд [15].

Возникновение ярких плазменных образований в промежутке происходит при уменьшении тока разряда из-за неоднородности плотности тока в отдельных областях плазмы диффузного разряда. Неоднородности плотности тока разряда приводят к неравномерному изменению температуры газа в этих областях плазмы и последующему уменьшению плотности газа. Из этого следует, что также неоднородно по промежутку изменяется приведенная напряженность электрического поля E/N . В местах, где E/N растет, растет и степень ионизации газа и, следовательно, плотность тока. Таким образом возникает положительная обратная связь. Вероятно, именно так инициируется появление чётки, число которых может изменяться от импульса к импульсу. Данный процесс зависит от многих условий, происходит очень быстро и реализуется с малой вероятностью. Поэтому в природных условиях зарегистрировать чёточную молнию с помощью скоростных камер пока не удалось.

Начальные неоднородности свечения (чётки) при пробое промежутков с неоднородным распределением электрического поля возникают после первой стадии пробоя, в результате которой формируется диффузный разряд. При этом чётки в условиях нашего эксперимента формировались примерно за 1 нс при уменьшении тока через промежуток. Затем формируется яркий канал, на фоне которого плазменные сгустки меньшей интенсивности не заметны. Однако в заключительной стадии разряда (молнии) излучение отдельных чётки может быть видно на фоне уменьшающейся интенсивности излучения канала (см. рис. 5, z и [1, 12]).

Энергия, вложенная в плазму во время контрагирования разряда, как минимум в разы превышала энергию, вложенную в плазму разряда при формировании чётки. Формирование чётки длилось не более 1 нс в той стадии разряда, когда ток через промежуток начинал уменьшаться, а длительность стадии контракции превышала 5 нс (см. рис. 4). Следовательно, интенсивность излучения канала искры была больше. Отметим, что во время формировании диффузного разряда при нарастании тока через промежуток удельные энерговыкладки были еще меньше из-за сравнительно большого (до 3 мм) диаметра светящейся области (стримера) при диффузном разряде.

Так как в экспериментах отдельные чётки наблюдались только при отрицательной полярности электрода с малым радиусом кривизны, то можно предполагать, что формирование чёточной молнии также более вероятно при пробое с отрицательно заряженного облака, когда убегающие электроны осуществляют предыонизацию газа перед фронтом лидера молнии. Известно [3], что во время развития молнии с отрицательно заряженного облака наблюдается ступенчатое движение лидера. Как показывают недавние исследования молний [17] и разрядов с метровыми промежутками [18], после приостановки фронта отрицательного лидера на

некотором расстоянии от него возникает плазменное образование, а затем происходит быстрый пробой между этим плазменным образованием и головкой отрицательного лидера. Это доказывает, что в природных условиях на стадии формирования молнии по ее длине возникают неоднородности.

Заключение

Впервые в лабораторных условиях при исследовании с временным разрешением свечения плазмы наносекундного разряда было зарегистрировано формирование нескольких чётки, а также наблюдалось свечение чётки на фоне «затухающего» искрового канала во время уменьшения тока разряда. Установлено, что чётки появляются после формирования в промежутке диффузного разряда.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИСЭ СО РАН по теме № 13.1.4.

1. Барри Дж. Шаровая молния и четочная молния. М.: Мир, 1983. 288 с.
2. Стаханов И.П. О физической природе шаровой молнии. М.: Научный мир, 1996. 264 с.
3. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. 320 с.
4. Rakov V.A., Uman M.A. Lightning. V. 1. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 698 p.
5. 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.
6. 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, N A7. P. A00E42.
7. Sadoonichii V.A., Panasyuk M.I., Amelyushkin A.M., Bogomolov V.V., Benghin V.V., Garipov G.K., Kalegaev V.V., Klimov P.A., Khrenov B.A., Petrov V.L., Sharakin S.A., Shirokov S.A., Svertilov S.I., Zotov M.Y., Yashin I.V., Gorbovskoy E.S., Lipunov V.M., Park I.H., Lee J., Jeong S., Kim M.B., Jeong H.M., Shprits Y.Y., Angelopoulos V., Russell S.T., Runov A., Turner D., Strangeway R.J., Caron R., Biktemerova S., Grinyuk A., Lavrova M., Tkachev L., Tkachenko A., Martinez O., Salazar H., Ponce E. "Lomonosov" Satellite – space observatory to study extreme phenomena in space // Space Sci. Rev. 2017. V. 212, N 3–4. P. 1705–1738.
8. Chanrion O., Neubert T., Mogensen A., Yair Y., Stendel M., Singh R., Singh D. Profuse activity of blue electrical discharges at the tops of thunderstorms // Geophys. Res. Lett. 2017. V. 44, N 1. P. 496–503.
9. Соснин Э.А., Панарин В.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф. Моделирование голубых струй и стартеров с помощью апокампа, формируемого при пониженных давлениях воздуха // Оптика атмосфер. и океана. 2016. Т. 29, № 10. С. 855–868.
10. Панарин В.А., Скакун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. Лабораторная демонстрация в воздухе красных и голубых диффузных мини-струй // Оптика атмосфер. и океана. 2017. Т. 30, № 3. С. 243–253.
11. Соснин Э.А., Бакшт Е.Х., Панарин В.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф. Мини стартеры и мини голубые струи в воздухе и азоте при импульсно-периодическом разряде в лабораторном эксперименте // Письма в ЖЭТФ. 2017. Т. 105, вып. 10. С. 600–604.
12. Бычков В.Л. Новые наблюдательные данные о шаровых молниях // Proc. of the 15th Russ. Conf. on Cold

Nuclear Transmutation of Chemical Elements and Ball Lightning. Dagomys city of Sochi, 1–8 October, 2008. Moscow-2009. P. 139–146.

13. *Бойченко А.М.* К вопросу о природе чёточных молний // Физика плазмы. 1996. Т. 22. С. 1012–1016.
14. *Тарасенко В.Ф., Белоплотов Д.В., Бакит Е.Х., Бураченко А.Г., Ломаев М.И.* Аналог чёточной молнии в воздухе атмосферного давления при импульсном разряде, формируемом за счет убегающих электронов // Оптика атмосфер. и океана. 2015. Т. 28, № 7. С. 661–665; *Tarasenko V.F., Beloplotov D.V. Baksh E.Kh., Burachenko A.G., Lomaev M.I.* Analogue of bead lightning in a pulse discharge initiated by runaway electrons in atmospheric pressure air // Atmos. Ocean. Opt. 2015. V. 28, N 6. P. 591–597.
15. *Генерация убегающих электронов и рентгеновского излучения в разрядах повышенного давления / под ред. В.Ф. Тарасенко.* Томск: STT, 2015. 568 с.
16. *Efanov V.M., Efanov M.V., Kricklenko A.V., Yarin P.M., Komashko A.V., Savastianov, N.K.* Nanosecond all-solid-state pulse generators on basis of FID technology for plasma chemistry applications // 28th ICPIG, 15–20 July, 2007. Prague: Czech Republic. 2007. P. 1515–1517.
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 атмосфер. и океана. 2013. Т. 26, № 1. С. 85–90; *Rybka D.V., Andronikov I.V., Evtushenko G.S., Kozyrev 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. *Kochkin P., Köhn C., Ebert U., van Deursen L.* Analyzing x-ray emissions from meter-scale negative discharges in ambient air // Plasma Sources Sci. Technol. 2016. V. 25. P. 044002.

V.F. Tarasenko, D.V. Beloplotov. The formation of miniature analogues of bead lightning in nitrogen and air during pulsed discharge in nonuniform electric field.

The discharge glow dynamics in a point–plane gap during a nanosecond breakdown of air and nitrogen initiated by runaway electrons is studied with an ICCD camera. Formation of plasma clots that form a structure similar to the even lightning has been observed. It is shown that the number of bright plasma clots in the gap (individual beads) increases with an increase in the pressure. Up to four individual beads of equal size have been recorded in nitrogen at a pressure of 0.4 MPa.