

Лабораторное моделирование голубых струй с помощью апокампического разряда в герцовом диапазоне частот

Э.А. Соснин^{1,2}, Е.Х. Бакшт¹, В.С. Кузнецов¹, В.А. Панарин¹,
В.С. Скакун¹, В.Ф. Тарасенко^{1,2*}

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 29.05.2019 г.

Показано, что при пониженном давлении воздуха канал апокампического разряда при низких частотах следования высоковольтных импульсов напряжения положительной полярности (7–16 Гц) и при амплитудах напряжения 26–35 кВ является источником стримеров. Максимальная стартовая скорость лабораторных стримеров составляла 560 км/с. На основе полученных данных предложена гипотеза о механизме появления голубых струй в природе. Для их старта не нужны высокие частоты следования импульсов напряжения, достаточно пробоев в герцовом диапазоне, но необходим изгиб канала разряда и повышенная напряженность поля в месте изгиба.

Ключевые слова: апокампический разряд, голубая струя, низкие частоты, транзиентные световые явления; *arokampic discharge, blue jets, low frequencies, transient luminous events.*

Введение

Транзиентные световые явления (в англ. научной литературе — Transient Luminous Events), или транзиенты, — это крупномасштабные светящиеся структуры, наблюдаемые в условиях повышенной электрической активности, характерной для гроз, штормов и ураганов в средней и верхней атмосфере Земли. Они привлекают пристальное внимание многих исследовательских групп [1–7]. В настоящее время транзиенты классифицированы по характеру свечения, цвету, типичной стартовой высоте, направлению распространения и диапазону высот, в которых они проявляются. К транзиентам средней атмосферы относят голубые струи, стартеры и красные спайты [8, 9].

Основные исследования транзиентов сосредоточены в трех направлениях. Это наблюдения с поверхности Земли, с воздуха и из космоса, эксперименты с лабораторными разрядами и теоретическое моделирование. Направления дополняют друг друга: например, результаты лабораторного моделирования можно сравнить с результатами натурных наблюдений, что, в свою очередь, позволит уточнить граничные условия той или иной теоретической модели.

В первых лабораторных исследованиях транзиентов был использован тлеющий разряд низкого давления [10]. Далее в качестве лабораторного аналога транзиентов использовались стримерные разряды [11, 12] и разряд в режиме с убегающими электронами [13]. Полученные результаты могут вызвать сомнения, поскольку разряды зажигались в условиях, далеких от реальных условий формирования транзиентов:

– в природе нет электродов, но есть заряженные зоны;

– при моделировании разрядов низкого давления желательно иметь разряд, не связанный непосредственно с источником высокого напряжения, так как свойства источника могут определять характеристики создаваемого разряда.

С учетом этих замечаний в [14] была предложена экспериментальная установка, в которой для иницирования лабораторных аналогов транзиентов вместо электродов использовался заряженный диэлектрик. С ее помощью в интервале давлений ~10–100 торр были получены стримеры, которые были интерпретированы как аналоги голубых струй и стартеров.

В наших работах [15–17] был предложен и обоснован другой подход к лабораторному моделированию транзиентов средней атмосферы, основанный на использовании апокампического разряда. Разряд образуется в воздухе в открытом пространстве и представляет собой протяженную светящуюся структуру (апокамп), ориентированную перпендикулярно изогнутому каналу высоковольтного импульсно-периодического разряда (рис. 1).

* Эдуард Анатольевич Соснин (badik@loi.hcei.tsc.ru); Евгений Хаимович Бакшт (Beh@loi.hcei.tsc.ru); Владимир Сергеевич Кузнецов (Robert_smith_93@mail.ru); Виктор Александрович Панарин (Panarin@yandex.ru); Виктор Семенович Скакун (Skakun54@bk.ru); Виктор Федотович Тарасенко (VFT@loi.hcei.tsc.ru).

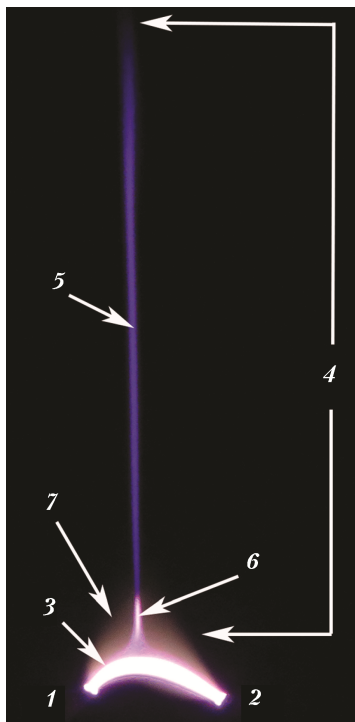


Рис. 1. Вид апокампического разряда в воздухе при частоте следования импульсов напряжения 50 кГц и давлении 760 торр: 1, 2 – электроды; 3 – канал разряда; 4 – апокамп; 5 – протяженная светящаяся структура, соответствующая движению стримера; 6 – отросток; 7 – «гало». Размер кадра по вертикали – 4,8 см. Электрод 1 высоковольтный, электрод 2 находится под плавающим потенциалом

От прочих типов разрядов его отличают следующие особенности:

1) в воздухе атмосферного давления апокамп формируется не от электрода, а на изгибе канала высоковольтного импульсно-периодического разряда (отсюда и название, которое образовано греческими словами *αλυ* – «от» и *καμπη* – «изгиб», «поворот»);

2) оба электрода и канал разряда находятся под потенциалом в несколько киловольт относительно «земли».

Таким образом, апокамп (рис. 1, 4) образуется не от электрода, а от заряженной зоны с повышенной напряженностью поля, что лучше отвечает критериям лабораторного моделирования транзиентов. При высоких частотах следования импульсов напряжения (десятки кГц) свечение апокампа зафиксировано в различных условиях, в том числе не только в воздухе, но и в смесях инертных и молекулярных газов [18].

Важно, что, зажигая апокампический разряд при пониженном давлении воздуха, возможно оперативно получать данные об условиях, в которых формируются голубые стартеры и струи. Голубые струи представляют собой «фонтаны» голубого и/или синего свечения, бьющего вверх с вершины грозового облака. Они возникают на средних стартовых высотах 16–18 км, достигают высот 40–45 км,

распространяются в вертикальном направлении со скоростью 100–150 км/с и имеют время жизни 60–400 мс [7–9].

В работах [15–17, 19, 20] было показано, что апокампический разряд и голубые струи: обладают сходными по диапазону ($\lambda \sim 280\text{--}800$ нм) и структуре максимумов спектрами люминесценции; формируются только при положительной полярности напряжения; имеют сходную морфологию (состоят из двух частей: отростка 6 и стримерной области 5 (рис. 1)). Самые длинные голубые апокампы в этих экспериментах наблюдаются в диапазоне давлений (90–150 торр), примерно соответствующих высотам возникновения и распространения голубых стартеров и струй 12–18 км. Кроме того, усредненные значения скорости распространения стримерной части апокампа (180 км/с) по порядку величины совпадают со скоростями распространения голубых струй в атмосфере Земли.

В указанных работах частоты следования импульсов напряжения составляли десятки кГц, а амплитуды напряжения достигали 14 кВ, в то время как в природе величины напряжения гораздо выше, а частоты существенно ниже. Например, в [3] голубые струи наблюдались с частотой 120 событий в минуту (2 Гц).

Цель настоящей работы – исследовать процесс формирования голубых струй (апокампов) в герцовом диапазоне частот следования импульсов и определить параметры, характеризующие их распространение.

Экспериментальная установка и методики исследований

В ходе исследования зажигался разряд в цилиндрической кварцевой колбе с внутренним диаметром 5,1 см и высотой 121 см на установке, показанной на рис. 2. Для этого в камеру 5 помещались острые электроды 2 и 3, образующие разрядный промежуток d . Каждый электрод выполнен из нержавеющей стали, имеет диаметр 2 мм, угол вершины 15° и радиус скругления 70 мкм. Давление воздуха в колбе 5 в ходе экспериментов можно было регулировать в диапазоне от 0,1 до 760 торр. На электроды подавались импульсы напряжения положительной полярности с амплитудой U_p от 27 до 35 кВ и частотой следования $7 < f < 16$ Гц от источника 1.

В наших предыдущих исследованиях [15–20] использовалась, по крайней мере, в 2 раза меньшая амплитуда импульсов напряжения, а частота их следования составляла десятки кГц. Высокая частота приводила к сложению множества пробоев промежутка d , что позволяло наблюдать и фотографировать апокампы даже с экспозицией 1/8 с. В настоящем эксперименте с уменьшением частоты на 5 порядков интенсивность свечения упала пропорционально, и апокамп стал едва различим. Мы предположили, что увеличить интенсивность свечения апокампа можно, подняв напряжение до 30–35 кВ.

Кроме того, было предложено использовать дополнительное обострение поля на изгибе канала разряда. Для этого между электродами 2 и 3 была установлена керамическая пластинка 4 толщиной 1 мм. Как показал наш эксперимент, эти меры увеличили интенсивность свечения апокампа даже при малых частотах следования импульсов напряжения.

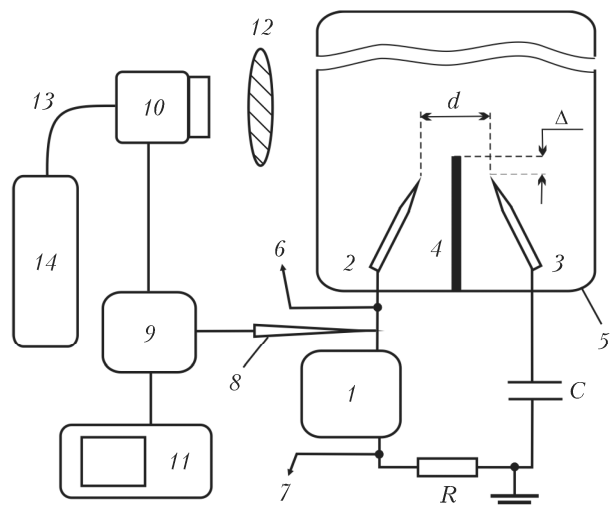


Рис. 2. Блок-схема установки для изучения свойств апокампиического разряда: 1 – высоковольтный импульсный источник напряжения; 2, 3 – острые электроды; 4 – керамическая пластинка, выступающая над электродами на расстояние $\Delta = 3,75$ мм; 5 – кварцевая колба; 6 – вывод сигнала на делитель напряжения; 7 – вывод токового сигнала с шунта R ; 8 – высоковольтный пробник; 9 – генератор запуска; 10 – ICCD-камера; 11 – осциллограф; 12 – объектив; 13 – оптоволоконная линия; 14 – компьютер; $C = 20\text{--}100$ нФ; $R = 0,3$ Ом; $d = 9$ мм

С помощью делителя напряжения (на рис. 1 не показан) и токового шунта R осуществлялся контроль напряжения 6 и тока 7 в цепи разряда.

Для регистрации быстропротекающих процессов появления и развития апокампа использовалась четырехканальная ICCD-камера HSFC-PRO 10 (PCO AG) с минимальной длительностью одного кадра 3 нс и объективом 12, позволяющим выделять для наблюдения поле высотой 17 мм и шириной 22 мм.

Для синхронизации и управления запуском камеры сигнал с высоковольтного делителя напряжения АСА-6039 8 (ЗАО НПП «Эликс»), расположенного у высоковольтного электрода, подавался на генератор задающих импульсов BNC 563 9 (Berkeley Nucleonics Corp.), с помощью которого выставлялись задержки запуска срабатывания камеры 10 и осциллографа 11 (TDS 3034, Tektronics, Inc.). Запуск происходил, когда амплитуда сигнала с делителя уровня напряжения превышала 20 В. Это обеспечивало контроль времени запуска ICCD-камеры относительно импульса напряжения на электродах. Сигнал с одного или нескольких каналов ICCD-камеры 10 через оптоволоконный кабель 13 подавался на компьютер 14.

Результаты и обсуждение

При высоком давлении воздуха в камере керамическая пластинка препятствует пробую разрядного промежутка даже при напряжении 35 кВ. Снижение давления воздуха до ~ 140 торр приводило к пробую. Было установлено, что в диапазоне давления 60–110 торр разряд имел устойчивую форму, а место его принудительного изгиба на керамической пластинке становилось источником апокампа. При этом наблюдались светящиеся низкоинтенсивные структуры высотой до 60 см. Но чувствительности фотокамеры хватало лишь для регистрации их яркой части, прилегающей к каналу разряда (рис. 3). Мы относим эту часть свечения к отростку, который обычно наблюдается в высокочастотном режиме горения (см. рис. 1, 6).

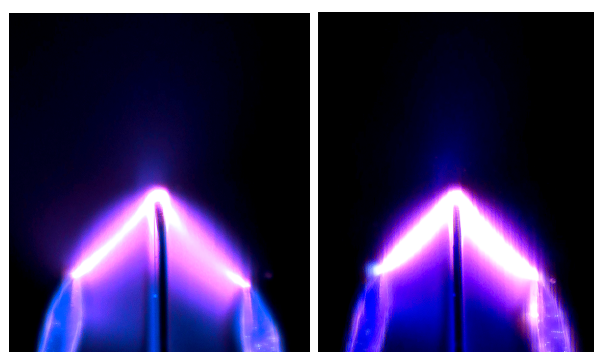


Рис. 3. Внешний вид разряда при $U_p \sim 35$ кВ, $f = 8$ Гц, $p = 30$ (а) и 110 торр (б), $C = 30$ (а) и 100 пФ (б). Время накопления 15 с (сложение 120 импульсов); высота кадра 1,8 см; камера Canon PowerShot SX60 HS в режиме накопления с экспозицией 15 с

Известно, что в апокампиическом разряде в продолжение отростка развиваются стримеры [21, 22]. Типичный сценарий их развития таков: канал разряда между электродами формируется на максимуме тока. Далее, на месте его изгиба – в нашем случае, на краю керамической пластинки, в области максимального электрического поля – за $\sim 10\text{--}40$ нс (в зависимости от условий возбуждения) образуется отросток. Затем от него стартует стример.

Стримеры – светящиеся области, движущиеся со скоростями $\sim 100\text{--}200$ км/с. В литературе их образно называют «плазменными пулями» [23]. Интенсивность их свечения обычно примерно на порядок ниже, чем интенсивность свечения отростка. Поэтому в условиях текущего эксперимента, при частотах следования импульсов напряжения несколько Гц, интенсивность стримерной зоны была настолько мала, что имеющимся фотоаппаратом не фиксировалась.

Высокоскоростной ICCD-камерой было сфотографировано свечение стримеров и зарегистрировано характерное время их распространения.

На рис. 4, 5 показаны примеры покадровой динамики движения стримеров в различных условиях. Длина отростка в условиях наших опытов

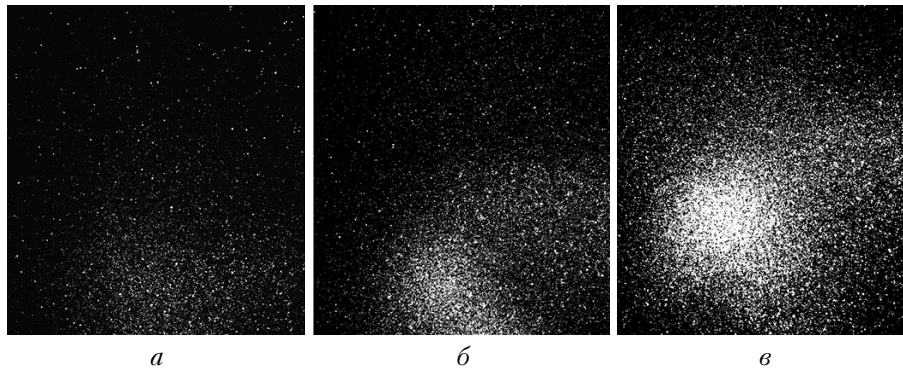


Рис. 4. Динамика развития апокампа при $p = 60$ торр: экспозиция каждого кадра (a – $в$) 3 нс, пауза между кадрами 3 нс. Размер кадра по вертикали 17 мм; $f = 7,5$ кГц; $C = 30$ пФ; $U_p = 33$ кВ

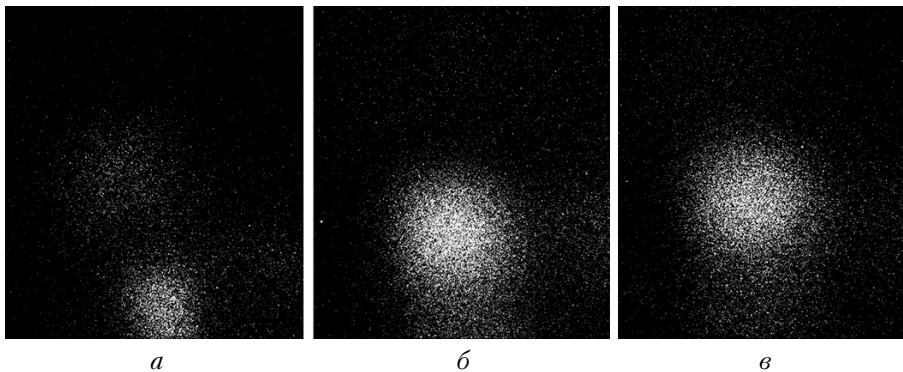


Рис. 5. Динамика развития апокампа при $p = 110$ торр: экспозиция каждого кадра (a – $в$) 3 нс, пауза между кадрами 3 нс. Размер кадра по вертикали 17 мм; $f = 7,5$ Гц; $C = 30$ пФ; $U_p = 33$ кВ

составляла 6–10 мм. Ни сам отросток, ни край керамической пластинки на рис. 4 не показаны ввиду ограниченности обзора объектива. Край керамической пластинки располагается на 8 мм ниже нижней рамки кадров, примерно в центре каждого кадра.

Рассмотрим подробнее динамику движения стримера. Каждому кадру на рис. 4 соответствует экспозиция 3 нс, и пауза между ними 3 нс. Видно, что стример не только удаляется от места старта, но и увеличивается в размерах. По смещению стримера между кадрами можно оценить скорость его движения, которая зависит от давления воздуха, амплитуды и частоты импульсов напряжения. Кроме того, она изменяется по мере продвижения стримера. В нашем случае стартовая скорость v_0 (оцененная по разнице между кадрами a и $б$ на рис. 4) равна 360 км/с и далее снижается до 230 км/с. В таблице приведены типичные величины стартовой и средней за время наблюдения ($\langle v \rangle$) скоростей распространения стримеров в различных условиях.

Скорости распространения стримера в различных условиях возбуждения

p , торр	f , Гц	C , пФ	v_0 , км/с	$\langle v \rangle$, км/с
110	7,5	30	445	335
60	7,5	30	360	230
110	7,5	80	350	247
60	7,5	80	280	215

Обобщим полученные результаты.

Во-первых, они доказывают, что для образования стримеров в воздухе и их старта от канала разряда, находящегося под потенциалом относительно земли, при положительной полярности напряжения совсем не обязательно нужны высокие частоты следования импульсов напряжения, как в [15–17]. В настоящей работе голубые струи и стримеры были зарегистрированы при частоте следования импульсов 7,5 Гц, которая практически не отличается от частоты появления нескольких голубых струй, сфотографированных с космической станции и приведенных в работе [3, рис. 3]. Таким образом, мы считаем доказанным еще один признак сходства апокампоческого разряда и голубых струй, помимо выявленных ранее.

Во-вторых, почти двукратное увеличение напряжения по сравнению с экспериментами [15–19] привело не только к формированию «струй» при малых частотах следования импульсов, но и к двукратному увеличению стартовых скоростей стримеров.

В-третьих, снижение давления со 130 до 30 торр стало причиной уменьшения скорости и падение светимости стримера вплоть до уровня, при котором регистрация свечения невозможна в условиях эксперимента. Но при этом сохранилось слабое свечение на месте изгиба канала у керамической пластинки (см. рис. 3). Последующее снижение давления привело к тому, что разряд стал диффузным, заняв

область между высоковольтным электродом и краем керамической пластинки, и поменял цвет с синего на красноватый.

Таким образом, даже на низких частотах и в условиях повышенной напряженности поля изгиб канала (в нашем случае он принудительный) остается источником апокампов. На больших высотах в атмосфере Земли нет металлических электродов, а каналы молний состоят из сильно ионизированной плазмы, на границах которой также происходит усиление электрического поля. Именно эту ситуацию мы и моделируем в лаборатории.

Мы считаем, что полученный разряд является лабораторным аналогом голубых струй. И лабораторный апокамп, и голубые струи развиваются только при положительной полярности заряда, локализованного в месте старта. Голубая струя состоит из двух частей — яркой «белой», примыкающей к поверхности облака, и сравнительно менее интенсивной части голубого цвета, развивающейся в продолжение яркой части (хотя иногда такого разделения нет). В настоящем эксперименте мы наблюдаем две части явления — отросток и стримерную область (см. рис. 1, 5, 6).

В природе изменение цвета транзиентов при изменении плотности воздуха (т.е. высоты) происходит аналогично тому, что мы наблюдаем в эксперименте с апокампиическим разрядом. Так, цвет струй и спрайтов переходит от синего (на высотах ниже 40 км) к красному (выше 50 км в условиях пониженного давления ~1 торр) [8, 9]. Согласно современному пониманию механизма транзиентов все они связаны с распространением стримеров (спрайтов) или лидеров с опережающими их стримерными коронами (синие и гигантские струи) [9, 24, 25]. Возбуждение излучающих состояний молекул воздуха в этих светящихся объектах происходит преимущественно в стримерных фронтах, как в апокампах.

Из наших экспериментов следует, что существует определенный диапазон давлений, при которых критическая напряженность поля достаточна для старта стримера от изгиба канала. Этот диапазон ориентировочно соответствует диапазону высот образования голубых струй. В природе именно на этих высотах в грозовом облаке разделяются заряды и формируется положительный заряд вершины облака [26]. Значит, голубые струи — это стримеры.

Дополнительным механизмом увеличения локальной напряженности электрического поля (на частицу) служит разогрев газовой среды [22].

Результаты космических наблюдений за развитием голубых струй показывают, что их появлению предшествуют многочисленные пробои внутри грозового облака [3, рис. 3], а также отрицательные разряды по типу «облако — земля». Голубые струи формируются в области турбулентности, где происходит локальный нагрев, увеличивающий напряженность электрического поля и частоту ионизации. В лабораторном эксперименте мы показываем, что в определенном диапазоне давлений, в воздухе, голубые струи формируются в месте увеличения напряженности поля на изгибе канала разряда. Для

этого не нужны высокие частоты следования импульсов напряжения, достаточно пробоев в герцовом диапазоне, но необходим изгиб канала разряда и повышенная напряженность поля в месте изгиба. Таким образом, условия возникновения голубых струй в природе [3] и условия нашего эксперимента практически совпадают, за исключением масштабов наблюдаемых явлений.

Заключение

На основании проведенного лабораторного моделирования можно предложить следующую гипотезу появления голубых струй. Для их старта необходима повышенная напряженность поля, которая возникает на изгибе канала разряда в лабораторных разрядах и на концах молний при грозах. Локальный нагрев газовой среды вносит свой вклад, уменьшая концентрацию частиц и напряжение пробоя [22]. В зоне турбулентности грозового облака и молний, откуда стартуют голубые струи, локальные неоднородности концентрации частиц образуются за счет изменения давления и нагрева среды. Известно [27], что для старта стримеров не обязательно нужен металлический электрод, достаточно сформировать плотную плазму, из которой вытесняется электрическое поле.

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.* Observations of upper atmospheric optical flashes recorded from an aircraft // *Geophys. Res. Lett.* 1993. V. 20, N 24. P. 2857–2860.
2. *Krehbiel P.R., Riousset J.A., Pasko V.P., Thomas R.J., Rison W., Stanley M.A., Edens H.E.* Upward electrical discharges from thunderstorms // *Nat. Geosci.* 2008. V. 1, N 4. P. 233–237.
3. *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, N 1. P. 496–503.
4. *Liu N., Pasko V.P., Adams K., Stenbaek-Nielsen H.C., McHarg M.G.* Comparison of acceleration, expansion, and brightness of sprite streamers obtained from modeling and high-speed video observations // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114, N A3. A00E03.
5. *Suzuki T., Hayakawa M., Hobara Y., Kusunoki K.* First detection of summer blue jets and starters over Northern Kanto area of Japan: Lightning activity // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117, N A7. A07307.
6. *Sadovnichii V.A., Panasyuk M.I., Amelyushkin A.M. et al.* “Lomonosov” Satellite–Space Observatory to Study Extreme Phenomena in Space // *Space Sci. Rev.* 2017. V. 212, N 3–4. P. 1705–1738.
7. *Mishin E.V., Milikh G.M.* Blue Jets: Upward Lightning // *Space Sci. Rev.* 2008. V. 137, N 4. P. 473–488.
8. *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.
9. *Siingh 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, N 11. P. 78–101.

10. Williams E.R. Sprites, elves, and glow discharge tubes // Phys. Today. 2001. V. 54, N 11. P. 41–47.
11. Pancheshnyi S., Nudnova M., Starikovskii A. Development of a cathode-directed streamer discharge in air at different pressures: Experiment and comparison with direct numerical simulation // Phys. Rev. E. 2005. V. 71, N 1. 016407.
12. Стриковский А.В., Евтушенко А.А., Гуцин М.Е., Коробков С.В., Костров А.В. Импульсный высоковольтный разряд в воздухе с градиентом давления // Физика плазмы. 2017. Т. 43, № 10. С. 866–873.
13. Тарасенко В.Ф., Белоплотов Д.В., Ломаев М.И., Сорочкин Д.А. О наблюдениях в лабораторных разрядах, инициируемых пучком убегающих электронов, мини-спрайтов и голубых мини-струй // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 11. С. 1017–1019.
14. Robledo-Martinez A., Sobral H., Ruiz-Meza A. Electrical discharges as a possible source of methane on Mars: Lab simulation // Geophys. Res. Lett. 2012. V. 39, N 17. L17202.
15. Соснин Э.А., Панарин В.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф. Моделирование голубых струй и спрайтов с помощью апокампа, формируемого при пониженных давлениях воздуха // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 10. С. 855–868.
16. Панарин В.А., Скакун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. Лабораторная демонстрация в воздухе красных и голубых диффузных мини-струй // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 3. С. 243–253.
17. 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, № 10. С. 600–604.
18. Кузнецов В.С., Соснин Э.А., Панарин В.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф. Влияние молекулярного газа на формирование апокампиического разряда // Оптика и спектроскопия. 2018. Т. 125, № 9. С. 311–317.
19. Sosnin E.A., Naidis G.V., Tarasenko V.S., Skakun V.S., Panarin V.A., Babaeva N.A., Baksh E.Kh., Kuznetsov V.S. Apokamps produced by repetitive discharges in air // Phys. Plasmas. 2018. V. 25, N 8. 083513.
20. Baksh E.Kh., Sosnin E.A., Skakun V.S., Panarin V.A., Tarasenko V.F., Kuznetsov V.S. The influence of frequency and voltage to apokamp discharge dynamics at moderate pressures // 20th Int. Symp. on High-Current Electronics (ISHCE). 16–22 September, 2018. Tomsk. P. 176–178.
21. Sosnin E.A., Panarin V.A., Skakun V.S., Baksh E.Kh., Tarasenko V.F. Dynamics of apokamp-type atmospheric pressure plasma jets // Eur. Phys. J. D. 2017. V. 71, N 2. P. 25.
22. Соснин Э.А., Найдис Г.В., Тарасенко В.Ф., Скакун В.С., Панарин В.А., Бабаева Н.Ю. О физической природе апокампиического разряда // ЖЭТФ. 2017. Т. 152, № 5(11). С. 1081–1087.
23. Lu X., Laroussi M., Puech V. On atmospheric-pressure non-equilibrium plasma jets and plasma bullets // Plasma Sources Science and Technology. 2012. V. 21, N 3. 034005.
24. Neubert T., Rycroft M., Farges T., Blanc E., Chauvion O., Arnone E., Odzimek A., Arnold N., Enell C.-F., Turunen E., Böisinger N., Mika A., Haldoupis C., Steiner R.J., van der Velde O., Soula S., Berg P., Boberg 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 // Surv. Geophys. 2008. V. 29, N 2. P. 71–137.
25. Naidis G.V. Positive and negative streamers in air: Velocity-diameter relation // Phys. Rev. E. 2009. V. 79, N 5. 057401.
26. Ермаков В.И., Стожков Ю.И. Физика грозowych облаков // Препринт ФИАН. 2004. № 2. 39 с.
27. Raether H. Electron avalanches and breakdown in gases. London, Great Britain: Butterworths, 1964. 191 p.

E.A. Sosnin, E.Kh. Baksh, V.S. Kuznetsov, V.A. Panarin, V.S. Skakun, V.F. Tarasenko. Laboratory simulation of blue jets with apokamp discharge in Hz frequency range.

It is shown that at lower air pressure the channel of apokamp discharge at low repetition frequencies (7–16 Hz) of high-voltage pulses of positive polarity and at voltage amplitudes from 26 to 35 kV is the source of the streamers. The maximum starting speed of laboratory streamers was 560 km/s. From obtained data, a hypothesis about the mechanism of the appearance of blue jets in nature was suggested. For their start, high frequencies of voltage pulses are not needed, breakdowns in the Hz range are sufficient, but the bending of the discharge channel and increased field intensity at the bending site are necessary.