

## Моделирование голубых струй и стартеров с помощью апокампа, формируемого при пониженных давлениях воздуха

Э.А. Соснин, В.А. Панарин, В.С. Скакун, В.Ф. Тарасенко\*

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

Поступила в редакцию 14.06.2016 г.

В лабораторных условиях при пониженных давлениях воздуха, соответствующих высотам в десятки километров над уровнем океана, сформирован апокамп – плазменная струя, ответвляющаяся от искрового разрядного канала, образованного двумя электродами, один из которых является высоковольтным и имеет положительную полярность, а другой находится под плавающим потенциалом. Установлено, что в условиях низких давлений апокамп обладает спектральными и морфологическими характеристиками, присущими голубым струям и стартерам, наблюдаемым в верхних слоях атмосферы.

*Ключевые слова:* апокамп, искровые разряды, переходные световые явления, стартеры и голубые струи; apokamp, spark discharge, transient luminous events, starters and blue jets.

### Введение

В атмосферной физике переходными световыми явлениями (transient luminous events) называют крупномасштабные оптические явления, происходящие на больших высотах в условиях повышенной электрической активности, характерной для гроз, штормов и ураганов [1]. Они, в частности, включают в себя обнаруженные в 1994 г. голубые стартеры (blue starters). Это визуально наблюдаемые светящиеся выбросы, формирующиеся с верхней границы грозовых облаков на высоте  $(17,7 \pm 0,9)$  км, достигающие высот от 18,1 до 25,7 км и распространяющиеся со скоростью между 27 и 153 км/с [2]. Считается, что голубые стартеры тесно связаны с другим феноменом – голубыми струями (blue jets), имеющими среднюю стартовую высоту 17,7 км, достигающими высот  $(37,2 \pm 5,3)$  км и скорости в вертикальном направлении  $(112 \pm 24)$  км/с. Наблюдаемое время жизни для голубых струй составляет 200–300 мс, а угловая апертура свечения – примерно  $14^\circ$  [3].

В настоящее время исследования переходных световых явлений продолжают в нескольких направлениях.

Во-первых, происходит детализация данных о характерных размерах, спектральном составе излучения и химическом составе феноменов, строятся теоретические модели процессов в них. Так, показано, что голубые стартеры могут достигать высот

40–50 км. За красный цвет струи отвечает главным образом излучение  $1+$  системы азота, а за синеголубой –  $2+$  и  $1-$  систем азота [4]. В ряде моделей показано, что за формирование восходящих струй отвечает накопленный на вершине грозового облака положительный заряд [5].

Во-вторых, природу переходных световых явлений также изучают с помощью лабораторных разрядов [6–9]. Во всех этих работах были использованы известные типы импульсного разряда, формируемые с острых электродов в условиях, соответствующих нижним слоям атмосферы.

В настоящей работе для лабораторного моделирования голубых струй и стартеров мы использовали обнаруженный в 2016 г. тип разряда – апокамп. Наш выбор был обусловлен тем, что апокамп формируется в пространстве как струя, ответвляющаяся от разрядного канала, образованного двумя электродами, один из которых является высоковольтным и имеет положительную полярность, а другой находится под плавающим потенциалом [10, 11]. Однако в этих работах апокамп был получен и исследован только в воздухе атмосферного давления.

Цель данной работы – экспериментально показать, что апокамп в воздухе при давлениях, соответствующих высотам, на которых наблюдаются стартеры и голубые струи, является их аналогом в миниатюре.

### Установка и методики

На рис. 1 представлена схема установки для наблюдения апокампа при пониженных давлениях. Разряд зажигали между стальными электродами 1 и 2,

\* Эдуард Анатольевич Соснин (badik@loi.hcei.tsc.ru); Виктор Александрович Панарин; Виктор Семенович Скакун; Виктор Федотович Тарасенко (VFT@loi.hcei.tsc.ru).

имеющими диаметр 1,95 мм и образующими промежутки  $d = 10$  мм. Электроды помещались в цилиндрическую кварцевую камеру диаметром 55 мм с помощью герметизирующих отростков 4 и 5. Электрод 1 находился под плавающим потенциалом. Электрод 2 соединялся с генератором высоковольтных импульсов 6. Генератор обеспечивал импульсы напряжения положительной полярности длительностью  $\tau = 1,5-2,5$  мкс, частотой следования импульсов  $f = 16$  кГц и амплитудой до 13 кВ на холостом ходу. Для определения рассеиваемой в разряде мощности с помощью осциллографа TDS 3034 (Tektronics, Inc.) регистрировали временной ход импульсов напряжения и тока. Импульсы напряжения фиксировали в точках А и В с помощью емкостных делителей напряжения, а импульсы тока – токовым шунтом, соединенным через конденсатор 10 пФ с точкой В.

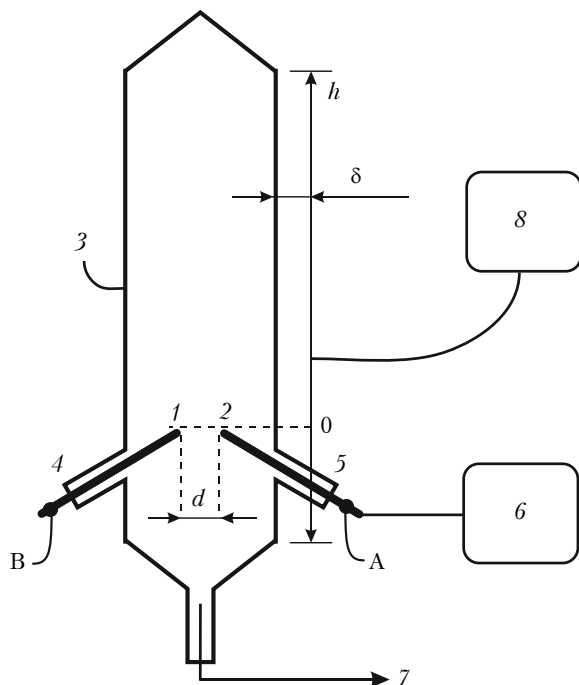


Рис. 1. Схема установки: 1 – высоковольтный электрод; 2 – свободный электрод; 3 – кварцевая камера; 4, 5 – герметизирующие отростки; 6 – генератор; 7 – подача и откачка воздуха; 8 – спектрофотометр

Для откачки и напуска воздуха использовали патрубков 7. Давление в камере контролировали с помощью вакуумметра МТИ-11201, имеющего класс точности 0,4 (на рис. 1 не показан).

Регистрацию спектров проводили с помощью сборки, включающей в себя коллимирующую линзу с фокусным расстоянием 30 мм, оптоволоконно с известным спектром пропускания и спектрометр HR2000+ES (Ocean Optics, Inc.) на основе многоканальной п.з.с.-линейки Sony ILX511B (рабочий диапазон 200–1100 нм, спектральная полуширина аппаратной функции  $\sim 1,33$  нм). Линзу располагали на расстоянии  $\delta$  от поверхности колбы и двигали по высоте колбы  $h$ , при этом величина  $h = 0$  соответ-

ствовала положению разрядного канала между электродами, а апокамп развивался перпендикулярно каналу вдоль оси кварцевой камеры.

Для регистрации внешнего вида разряда использовалась фотокамера Canon PowerShot SX60 HS в режиме серийной покадровой съемки с выдержкой 0,05 с и частотой  $\sim 6,4$  кадра/с.

## Экспериментальные результаты и их обсуждение

При изменении давления газа в кварцевой камере наблюдалось изменение формы и цвета разряда, что иллюстрирует рис. 2.

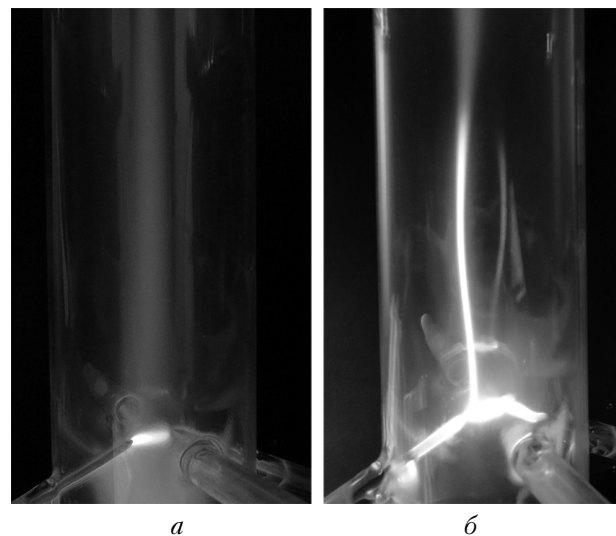


Рис. 2. Свечение разряда и струи в воздухе при давлении 15 (а) и 79 (б) торр

На рис. 2, б – разряд при давлении 79 торр, что примерно соответствует атмосферным высотам 14 км, т.е. условиям, в которых наблюдается образование голубых струй и стартеров. Видно, что при этом давлении апокамп (светящаяся струя, направленная перпендикулярно разряду между электродами) вытянут по всей длине колбы (250 мм) и состоит из двух частей: яркой, имеющей диаметр  $\sim 1,5$  мм, прорастающей от разрядного канала, и менее яркой, имеющей сине-голубой оттенок части, которая конически расширяется кверху. С увеличением давления первая часть сокращается, а вторая – синяя – удлиняется. С уменьшением давления происходит обратный процесс: синяя часть сокращается, а яркая удлиняется. При давлении  $\sim 20$  торр она занимает всю длину колбы, увеличивается ее диаметр и свечение с белого переходит в красно-синее, что соответствует рис. 2, а.

Следует отметить, что на вертикальную ориентацию апокампа не влияют стенки камеры, поскольку в работах [10, 11] апокамп формировался в открытом пространстве при атмосферном давлении, а не в камере.

Кроме того, на рис. 2, а видно, что при низких давлениях помимо вертикально распространяющейся

ся струи разряд замыкается на вакуумный пост через нижнюю часть камеры. Это приводит к тому, что рассеиваемая в разряде мощность увеличивается. Однако при величинах давления более 20 торр указанный канал рассеивания энергии скачком прерывается, и далее энергия разряда расходуется на формирование апокампа, приэлектродного свечения и коронных разрядов (см. рис. 2, б). Последующий рост давления приводит к тому, что вся энергия рассеивается через апокамп (рис. 3), причем ее зависимость от давления становится линейной. Стоит отметить, что выявленные особенности разряда и апокампа ранее не наблюдались или не были описаны в известных нам работах.

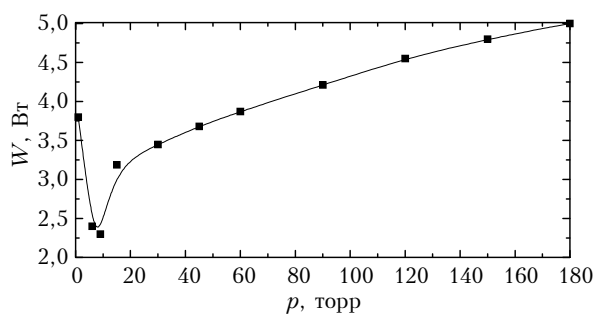


Рис. 3. Мощность  $W$ , рассеиваемая разрядом при различных давлениях  $p$  воздуха в камере

По рис. 4 можно судить об изменениях, происходящих в видимой части спектра при изменении давления: 1) при низком давлении заметный вклад вносит излучение в красно-оранжевой области ( $\lambda \sim 600\text{--}670$  нм), в меньшей степени – фиолетовой ( $\lambda \sim 410\text{--}440$  нм) и синей ( $\lambda \sim 475\text{--}495$  нм) областях; 2) с ростом давления красно-оранжевая область спектра становится исчезающе малой, и основной вклад в свечение вносят фиолетовая и синяя области. В природе наблюдаются аналогичные изменения: чем больше высота, на которой формируется переходное световое явление, тем сильнее выражено красно-оранжевое свечение.

Полученные данные позволяют заключить, что апокамп в условиях низких давлений обладает следующими признаками, присущими голубым струям и стартерам, наблюдаемым в природе.

1. Апокамп формируется при положительной полярности напряжения на высоковольтном электроде, при разряде на электрод с плавающим потенциалом, что соответствует модели голубых струй, предложенной в [5].

2. Форма струи соответствует наблюдаемым в природе феноменам. Так, при типичных для возникновения голубых струй высотах  $\sim 14$  км (соответствующих давлениям около 80 торр) апокамп имеет форму конической струи с узким каналом прорастания. Стартеры в природе достигают больших высот – до 30–50 км (что соответствует давлениям 8,98 и 0,59 торр соответственно). В таких условиях на нашей установке мы наблюдаем многократное расширение диаметра струи (что происходит и в природе [12]). Тем самым эксперимен-

тально подтверждается изменение формы плазменной струи с изменением давления.

3. Спектры излучения апокампа при пониженных давлениях также соответствуют натурным наблюдениям, когда по мере продвижения стартера или струи вверх она меняет свой цвет с белого на синий и голубой (14 км, 80 торр) и далее на красно-оранжевый ( $< 30$  км,  $< 10$  торр).

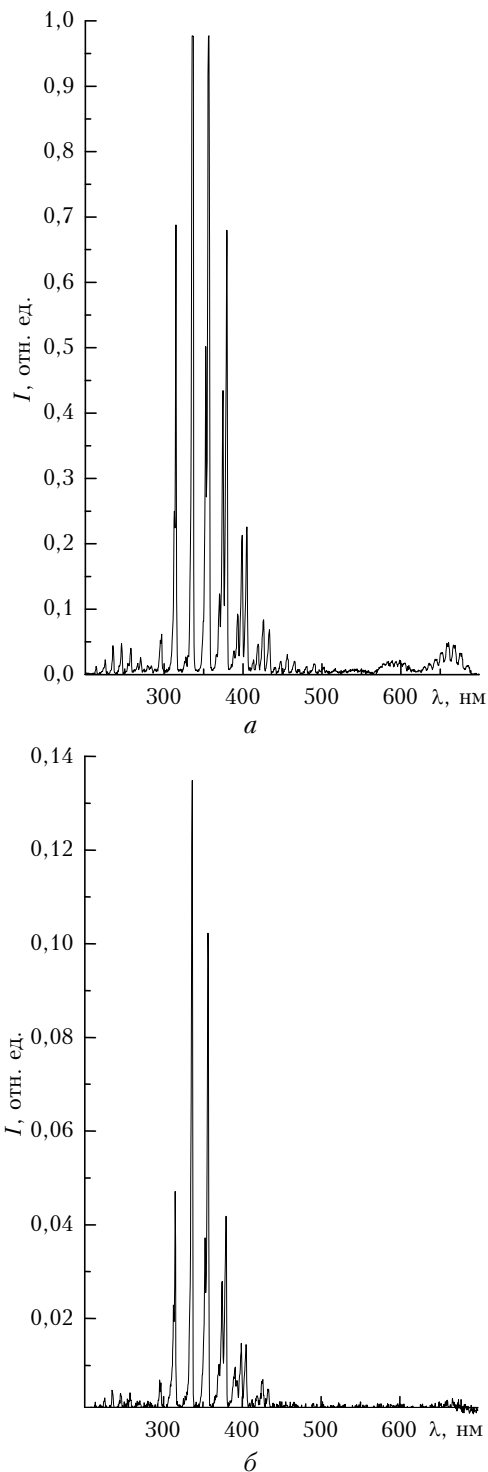


Рис. 4. Спектры излучения при  $p = 15$  (а) и 90 (б) торр,  $h = 100$  мм,  $\delta = 10$  мм

Таким образом, созданная установка позволяет экспериментально моделировать стартеры и голубые струи. Следует отметить, что в дальнейшем эксперименты можно усложнять, например, добавляя в камеру пары воды, кристаллики льда и другие частицы, подсвечивать апокамп сверху источником рентгеновского излучения, т.е. вносить в него факторы, отвечающие развитию переходных световых явлений в природе. Кроме того, мы планируем увеличить размеры установки и учитывать изменение температуры воздуха на различных высотах.

### Заключение

Проведенные экспериментальные исследования демонстрируют сходство между апокампом, сформированным при низких давлениях, и наблюдаемыми в природе переходными световыми явлениями, такими как стартеры и голубые струи, происходящими в верхних слоях атмосферы Земли.

Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда, проект № 14-29-00052.

1. *Pasko V.P.* Blue jets and gigantic jets: transient luminous events between thunderstorm tops and the lower ionosphere // *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2008. V. 50, N 12. 4050 (22 p.).
2. *Wescott E.M., Sentman D.D., Heavner M.J., Hampton D.L., Osborne D.L., Vaughan O.H.Jr.* Blue starters: brief upward discharges from an intense Arkansas thunderstorm // *Geophys. Res. Lett.* 1996. V. 23, N 16. P. 2153–2156.
3. *Wescott E.M., Sentman D., Osborne D., Hampton D., Heavner M.* Preliminary results from the Sprites94 aircraft campaign: II. Blue jets // *Geophys. Res. Lett.* 1995. V. 22, N 10. P. 1209–1212.
4. *Siingh D., Singh R.P., Kumar S., Dharmaraj T., Singh A.K., Singh A.K., Patil M.N., Singh S.* Lightning and middle atmospheric discharges in the atmosphere // *J. Atmos. Sol.-Ter. Phys.* 2015. V. 134, N 10. P. 78–101.
5. *Pasko V.P., George J.J.* Three-dimensional modeling of blue jets and blue starters // *J. Geophys. Res. A*. 2002. V. 107, N 12. 1458 (16 p.).
6. *Peterson H., Bailey M., Hallett J., Beasley W.* NOx production in laboratory discharges simulating blue jets and red sprites // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114, N 12. A00E07 (11 p.).
7. *Parra-Rojas F.C., Passas M., Carrasco E., Luque A., Tanarro I., Simek M., Gordillo-Vázquez F.J.* Spectroscopic diagnosis of laboratory air plasmas as a benchmark for spectral diagnosis of TLEs // *European Planetary Science Congress 2013*. London, UK. 2013. V. 8. P. 121.
8. *Beloplotov D.V., Lomaev M.I., Tarasenko V.F.* On the nature of radiation of blue and green jets in laboratory discharges initiated by runaway electrons // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, iss. 5. P. 476–480.
9. *Tarasenko V.F.* Mini sprites and mini blue jets in runaway electrons preionized diffuse discharges // *IEEE Int. Conf. on Plasma Sciences (ICOPS)*. Antalya, 2015. 1–1.
10. *Скакун В.С., Панарин В.А., Печеницин Д.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф.* Формирование апокампиического разряда в условиях атмосферного давления // *Изв. вузов. Физ.* 2016. Т. 59, № 5. С. 92–95.
11. *Соснин Э.А., Скакун В.С., Панарин В.А., Печеницин Д.С., Тарасенко В.Ф., Бакут Е.Х.* Феномен апокампиического разряда // *Письма в ЖЭТФ*. 2016. Т. 103, № 12. С. 857–860.
12. *Wescott E.M., Sentman D., Stenbaek-Nielsen H.C., Huet P., Heavner M.J., Moudry D.R.* New evidence for the brightness and ionization of blue starters and blue jets // *J. Geophys. Res. A*. 2001. V. 106, N 10. P. 21549–21554.

#### *E.A. Sosnin, V.A. Panarin, V.S. Skakun, V.F. Tarasenko.* **Blue jets and starters laboratory modelling by underpressure apokamp.**

In laboratory conditions at low pressures of air, corresponding to heights of tens of kilometers above sea level, the apokamp was formed. Apokamp is a plasma jet extending from the spark discharge channel formed by two electrodes, one of which is high voltage and has a positive polarity, and the other is under floating potential. It is established that underpressure apokamp has spectral and morphological features associated with blue jets and starters that observed in the upper layers of the atmosphere.