

## АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 537.525.99, 551.594.22

# Гипотеза о различиях стартовых условий для кратковременных световых явлений средней атмосферы

Э.А. Соснин<sup>1,2</sup>, В.С. Кузнецов<sup>1</sup>, В.А. Панарин<sup>1</sup>,  
В.С. Скакун<sup>1</sup>, В.Ф. Тарасенко<sup>1,2\*</sup>

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

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина 36

Поступила в редакцию 8.12.2020 г.

Проведен эксперимент по измерению скоростей распространения плазменных шлейфов апокампического разряда в воздухе при давлении, отвечающем высотам возникновения транзиентов средней атмосферы, при наличии внешнего электрического поля. На основе полученных данных сформулирована гипотеза о том, что тип транзиента, стартующего от купола грозового облака (голубая струя, стартер, гигантский джет), зависит от интенсивности внутриоблачных разрядов и соотношения положительного заряда вершины купола и отрицательного заряда внешнего слоя.

**Ключевые слова:** апокампический разряд, плазменная пуля, транзиентные световые явления (ТСЯ); apokampic discharge, plasma bullet, transient luminous events (TLEs).

### Введение

В последнее десятилетие возобновился интерес к изучению разрядных явлений в верхних слоях атмосферы. Собираательно их называют транзиентные световые явления (ТСЯ) [1–3]. Исследования ТСЯ проводятся в трех направлениях: 1) наблюдения с поверхности Земли, с воздушных летательных аппаратов и из космоса; 2) теоретическое моделирование; 3) эксперименты с лабораторными разрядами. Эти направления дополняют друг друга.

Ранее мы показали [3], что лабораторный аналог транзиентов средней атмосферы Земли – апокамп, если его сформировать в условиях, близких к условиям возникновения атмосферных транзиентов. Апокамп (от греческого *από* «от» и *κοιπή* «изгиб») – это узкая плазменная струя, стартующая от места изгиба плазменного канала высоковольтного частотно-импульсного разряда, находящегося под положительным потенциалом. В атмосфере, как мы полагаем, аналогично формируются голубые струи и стартеры, которые стартуют с вершины положительно заряженного грозового облака после того, как происходит внутриоблачный разряд. Лабораторный апокампический разряд удобно использовать для постановки и лабораторной проверки гипотез об условиях образования транзиентов [3, 4].

В [5] было показано, что при атмосферном давлении в воздухе для формирования устойчивого апокампа необходимо небольшое внешнее электрическое поле.

Цель настоящей работы – экспериментально показать, как влияет внешнее электрическое поле на динамику горения и тип разряда в условиях, близких (по давлению) к условиям возникновения транзиентов средней атмосферы в природе.

### Экспериментальная установка и методики

Известно, что голубые струи, стартеры и гигантские джеты образуются на границе верхней облачности, на высотах около 12–18 км [2], что отвечает давлению воздуха  $p \sim 150\text{--}80$  торр. Для экспериментального моделирования этих условий была собрана установка, показанная на рис. 1.

Импульсный разряд зажигался между заостренными стальными электродами 1 и 2 с расстоянием  $d = 8$  мм между ними. Они были расположены в цилиндрической кварцевой колбе 3 внутренним диаметром 5,1 см и длиной 121 см, в которой давление воздуха можно было изменять в диапазоне от 760 до 0,1 торр. Источник питания 5 обеспечивал высоковольтные импульсы напряжения положительной полярности длительностью 1,5 мкс с амплитудой  $4,5 < U_p < 16$  кВ и частотой  $12 < f < 56$  кГц. Импульсы подавались на электрод 1, а электрод 2 находился под плавающим потенциалом, подключенным к заземлению через конденсатор С. В результате в месте максимального изгиба токового

\* Эдуард Анатольевич Соснин (badik@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).

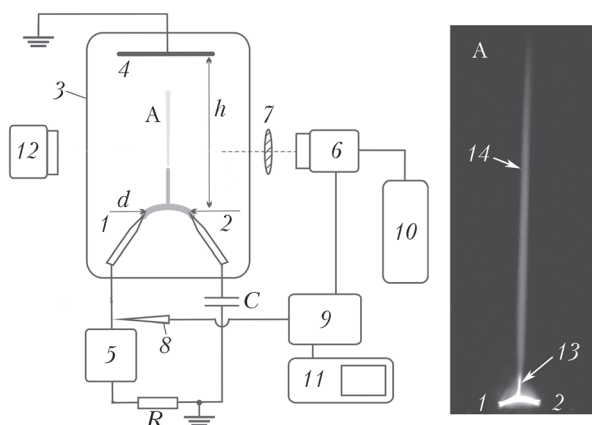


Рис. 1. Экспериментальная установка (слева) и разряд апокампа при давлении воздуха 100 торр (справа): 1, 2 – электроды из нержавеющей стали с острым концом (диаметр 2 мм, угол заточки 15°, радиус закругления 70 мкм); 3 – кварцевая колба; 4 – плоский заземленный электрод; 5 – источник питания; 6 – ICCD-камера; 7 – линза; 8 – высоковольтный зонд; 9 – генератор задержки; 10 – ПК; 11 – осциллограф; 12 – камера; 13 – яркое ответвление апокампа; 14 – стримерная зона апокампа;  $C = 5,5$  пФ,  $R = 3,6$  Ом,  $d = 8$  мм; высота кадра 11,2 см

разряда канала формировалась плазменная струя (апокамп А). На рис. 1 видно, что апокамп состоит из яркого ответвления от канала разряда и сравнительно менее интенсивной, но более протяженной плазменной струи. Ранее было показано [6], что такие плазменные струи формируются за счет распространения так называемых плазменных пуль – стримеров. Но из-за большой частоты повторения разрядного процесса визуально они напоминают голубые струи.

Формирование апокампов регистрировали с помощью четырехканальной ICCD-камеры 6 (HSFC-PRO, PCO AG). Минимальная длительность кадра камеры равна 3 нс; поле зрения линзы 7 на выходе камеры 6 составляет  $17 \times 23$  мм. Камера запускалась сигналом от высоковольтного зонда 8 (ACA-6039, ElikS) через генератор 9 (BNC 565, Berkeley Nucleonics), который устанавливал задержку для ICCD-камеры и осциллографа 11 (TDS 3034, Tektronix). Сигнал с одного или нескольких каналов ICCD-камеры передавался по оптоволокну в компьютер 10. Для получения полной картины свечения использовалась камера Canon PowerShot SX60 HS 12 в режиме последовательной кадровой записи с выдержкой не менее 0,125 с.

Во время эксперимента на различных высотах  $h$  над заостренными стальными электродами размещался заземленный плоский электрод 4 диаметром 40 мм.

## Результаты и обсуждения

На рис. 2 приведен пример высокоскоростных фотографий апокампа, распространяющегося в воздухе ( $p = 150$  торр,  $f = 55$  кГц,  $U_p = 8$  кВ), с  $h = 9$  см.

При распространении от изгиба канала интенсивность плазменной пули увеличивается в течение первых нескольких десятков наносекунд. Средняя величина скорости пули в данном случае составляет 253 км/с.

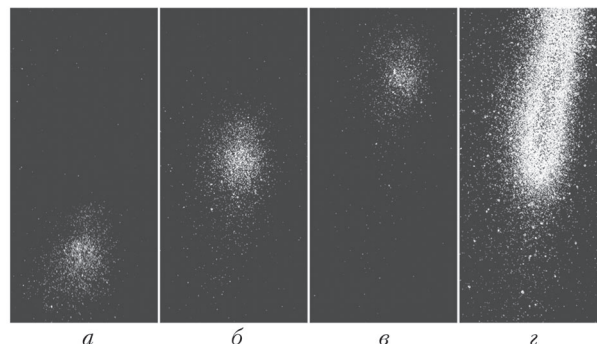


Рис. 2. Динамика апокампа при экспозиции 3 нс с интервалом 37 нс между кадрами (a–v); интегральное изображение при экспозиции 100 нс (z)

На рис. 3 представлена зависимость средней скорости плазменных пуль  $\langle v \rangle$  от расстояния между заостренными электродами 1, 2 и плоским электродом 4. Пунктирная кривая – аппроксимация экспериментальных точек:

$$\langle v \rangle = \frac{ah - b}{h - c},$$

где  $a = 175 \pm 10$ ,  $b = 1500 \pm 86$ ,  $c = 9 \pm 0,1$  – коэффициенты аппроксимации.

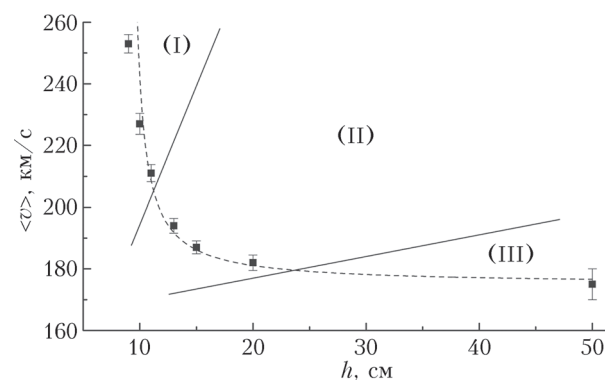


Рис. 3. Средняя скорость плазменной пули в зависимости от положения плоского электрода при  $p = 150$  торр,  $f = 55$  кГц,  $U_p = 8$  кВ

При  $h < 9$  см экспериментальных точек нет, поскольку в этом случае яркий отросток пережигает промежуток между заостренными и плоским электродами и плазменной струи (апокампа) нет. Видно, что средние скорости плазменных пуль наибольшие при минимальных величинах  $h$ . Этот случай отвечает максимальному наведенному отрицательному заряду над зоной горения импульсного разряда.

Свяжем полученные результаты с данными о развитии грозных облаков и сопровождающей

этот процесс разрядной активности. Известно, что грозное облако представляет собой аэрозольный диэлектрик, внутри которого распределены объемные заряды: отрицательные внизу и положительные вверху [7]. На стадии зарождения облака, когда напряженность электрического поля в облаке достигает  $\sim 2\text{--}3$  кВ/см, между этими областями начинаются внутриоблачные разряды, проходящие по ионизованным следам широких атмосферных ливней (рис. 4, *a*). Облако само становится генератором электрических зарядов. Большая часть появившихся пар зарядов рекомбинирует. Оставшаяся часть прилипает к нейтральным аэрозольным частицам, образуя новые заряженные ядра конденсации, которые продолжают участвовать во внутриоблачном разделении зарядов. Это увеличивает частоту внутриоблачных разрядов и существенно увеличивает концентрацию объемных зарядов противоположных знаков в облаке. Благодаря этому рост облака усиливается [8], оно переходит к так называемой стадии зрелости.

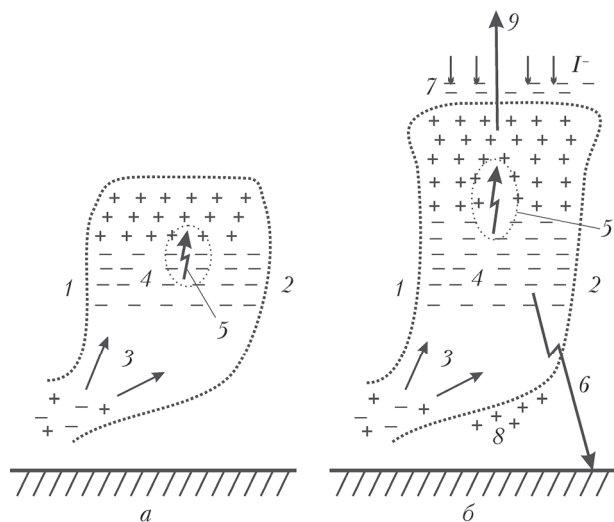


Рис. 4. Стадии образования (*a*) и зрелости (*b*) грозного облака: 1 – область теплового фронта; 2 – область холодного фронта; 3 – восходящие потоки влажного и ионизованного воздуха; 4 – область максимума частиц, создаваемых гигантским воздушным ливнем; 5 – внутриоблачная молния; 6 – молния; 7 – экранирующий слой отрицательных ионов; 8 – положительный заряд у основания облака; 9 – транзиент;  $I^-$  – ток отрицательных ионов, текущий из ионосферы к вершине облака (адаптировано из [9])

Здесь под действием электрических зарядов диполя к вершине облака из атмосферы течет ток легких отрицательных ионов ( $I^-$ ), а к основанию облака – ток положительных ионов (рис. 4, *b*). Ток отрицательных ионов более чем на порядок превышает ток положительных ионов [9] и частично компенсирует объемный положительный заряд облака. При этом у вершины образуется небольшой по толщине отрицательно заряженный экранирующий слой, который «непосредственно» прилегает к области с объемным положительным зарядом,

а внутриоблачные разряды продолжают. Эта ситуация похожа на ситуацию в нашем эксперименте.

У нас роль внутриоблачных разрядов играет импульсный разряд между электродами 1 и 2, причем он имеет положительный потенциал относительно земли, как и верхняя часть облака. Плоский электрод, расположенный над разрядом, является аналогом отрицательно заряженной зоны, расположенной над куполом облака. И чем ближе плоский электрод к разряду, тем выше наведенный заряд.

На основании проведенных исследований можно предложить гипотезу о возможной причине различий между тремя видами транзиентов – голубыми струями, стартерами и гигантскими джетами. Они стартуют с одинаковых высот, но отличаются длинами и скоростями распространения. Так, в указанном ряду скорости распространения составляют 20–150, 100–150 и 100–1000 км/с (в зависимости от высоты) соответственно. Можно предположить, что указанные отличия связаны с интенсивностью внутриоблачных разрядов и с соотношением положительного заряда вершины купола и отрицательного заряда экранирующего слоя. Действительно, голубой стартер – самый короткий, что означает самую низкую скорость распространения стримера. Это соответствует области (III) на рис. 3. С увеличением наведенного поля над местом образования транзиента (т.е. с уменьшением  $h$  в нашем эксперименте) скорость пули начинает резко расти, длина транзиента увеличивается – получаем голубые струи. Это область (II) на рис. 3. Дальнейший рост наведенного поля ( $h < 10$  см в эксперименте) существенно удлиняет апокампа, а при  $h < 8$  см (область (I) на рис. 3) приводит к такому удлинению, что отрослок перекрывает промежуток между плоским электродом и каналом разряда. Это можно интерпретировать как формирование длинного лидерного канала, что характерно для старта гигантских джетов.

## Заключение

Изучено действие наведенного внешнего отрицательного заряда на динамику развития апокампа. Результаты (см. рис. 3) свидетельствуют, что величина наведенного поля нелинейно влияет на скорость и высоту распространения апокампа. Полученные данные экспериментально подтверждают нашу гипотезу о том, что в природе различия между тремя видами транзиентов (голубыми струями, стартерами и гигантскими джетами) связаны с соотношением положительного заряда вершины купола и отрицательного заряда экранирующего слоя. Наш эксперимент является продолжением работы [10] и его можно использовать как качественную модель, объясняющую причину образования различных типов переходных процессов начиная с купола грозовой тучи. Предложенная гипотеза может быть подтверждена теоретической моделью апокампа [11]. Кроме того, полученные результаты позволяют ставить новые задачи по наблюдению ТСЯ средней атмосферы.

Мы благодарим Е.Х. Бакшта за его помощь в регистрации плазменных пульс.

Работа выполнена при поддержке государственного задания для ИСЭ СО РАН (проект № 13.1.4.).

1. Chanrion O., Neubert T., Mogensen A., Yair Y., Sten-del 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.
2. 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. Solar-Terrest. Phys. 2015. V. 134. P. 78–101.
3. Соснин Э.А., Бабаева Н.Ю., Козырев А.В., Кожевников В.Ю., Найдис Г.В., Панарин В.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф. Моделирование транзиентных световых явлений средней атмосферы Земли с помощью апокамического разряда // Успехи физ. наук. 2020. Т. 191. №2. DOI: 10.3367/UFNr.2020.03.038735.
4. Соснин Э.А., Кузнецов В.С., Панарин В.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф. Лабораторное моделирование влияния вулканического вещества на формирование транзиентных явлений вблизи границы средней и нижней атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 2020. Т. 33, № 3. С. 227–231.
5. Козырев А.В., Кожевников В.Ю., Коковин А.О., Панарин В.А., Семенюк Н.С., Ситников А.Г. Электро-полевой механизм формирования тонкой плазменной струи в открытом атмосферном разряде // Изв. вузов. Физика. 2019. № 11. С. 55–58.
6. Lu X., Laroussi M., Puech V. On atmospheric-pressure non-equilibrium plasma jets and plasma bullets // Plasma Sourc. Sci. Technol. 2012. V. 21, N 3. P. 034005.
7. Rakov V.A., Uman M.A. Lightning: Physics and Effects. UK: Cambridge University Press, 2002. P. 700.
8. Reiter R. Phenomena in Atmospheric and Environmental Electricity. Amsterdam: Elsevier, 1992. P. 562.
9. Ермаков В.И., Стожков Ю.И. Физика грозных облаков. Препринт ФИАН № 2. 2004. 39 с.
10. Kuznetsov V.S., Panarin V.A., Skakun V.S., Sosnin E.A., Tarasenko V.F. Experimental modelling of apokamp discharge formation under outer electric field // J. Phys.: Conf. Ser. 2020, V. 1499. P. 012016.
11. Kozhevnikov V.Y., Kozyrev A.V., Kokovin A.O., Sitenikov A.G., Sosnin E.A., Panarin V.A., Skakun V.S., Tarasenko V.F. Apokamp-type gas discharge phenomenon: Experimental and theoretical backgrounds // EPL. 2020 V. 129, N 1. P. 15002.

***E.A. Sosnin, V.S. Kuznetsov, V.A. Panarin, V.S. Skakun, V.F. Tarasenko. Hypothesis about differences in starting conditions for transient luminous events of the middle atmosphere.***

The propagation velocity of plasma plumes in the presence of an external electric field was measured in air, at a pressure corresponding to the altitudes of the middle atmosphere transient luminous events. Based on the results, a hypothesis is formulated that the transient type starting from the thundercloud dome (blue jet, starter, gigantic jet) depends on the intensity of intracloud lightings and the ratio of the positive charge of the dome top and the negative charge of the outer layer.