

## АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 537.525.99, 551.594.22

# Энерговыведение в грозовом облаке, необходимое для образования транзиентных световых явлений средней атмосферы

Э.А. Соснин<sup>1,2</sup>, В.С. Кузнецов<sup>1</sup>, В.А. Панарин<sup>1\*</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 17.05.2021 г.

Методом скачка давления определено энерговыведение в апокамписком разряде при различных давлениях воздуха. Максимальное энерговыведение и электролюминесценция в ультрафиолетовом ближнем диапазоне спектра достигаются в диапазоне давлений 85–92 торр, что ориентировочно соответствует высотам формирования таких оптических явлений средней атмосферы, как голубые струи, стартеры и гигантские джеты. Найденные факты позволяют дополнить картину образования указанных явлений.

*Ключевые слова:* апокампиский разряд, скачок давления, транзиентные световые явления; *apokampic discharge, pressure jump, transient light phenomena.*

### Введение

В 2016 г. в Институте сильноточной электроники СО РАН было обнаружено новое разрядное явление – возникновение протяженной светящейся структуры на изгибе канала импульсного высоковольтного разряда в воздухе атмосферного давления. Оно названо апокампом, а разряд в целом – апокамписким. Такой разряд был использован для лабораторных исследований условий образования голубых струй (blue jets) и красных спрайтов (red sprites) – масштабных транзиентных световых явлений (транзиентов) средней атмосферы Земли, образующихся естественным путем над областями с грозовой активностью [1]. Было найдено шесть признаков сходства апокампа и голубых струй [2]. Благодаря этому стало возможным экспериментальное обоснование гипотез об условиях формирования транзиентов и получение оценочных данных для теоретического моделирования транзиентов. В частности, обоснована гипотеза о том, что тип транзиента, стартующего от купола грозового облака, зависит от интенсивности внутриоблачных разрядов и соотношения положительного заряда вершины купола и отрицательного заряда внешнего слоя [3]. В другой работе [4] экспериментально подтверждена гипотеза о том, что вероятность появления голубых струй и стартеров повышается в местах вулканической активности на высотах 10–18 км

(за границей тропосферы), что связано с наличием легкоионизируемых добавок в составе вулканических выбросов.

Предпосылкой для настоящей работы является тот факт, что формированию транзиента средней атмосферы предшествуют активные внутриоблачные разряды [5–7]. Аналог внутриоблачного разряда в апокамписком разряде – инициирующий импульсный разряд.

Мы предположили, что, помимо прочих факторов, чем выше энерговыведение в инициирующих разрядах, тем больше вероятность получения транзиента и тем интенсивнее его люминесценция. Цель настоящей работы – проверка этой гипотезы в лабораторных условиях с помощью апокампиского разряда.

### Экспериментальная установка и методики

Для измерений была собрана установка, показанная на рис. 1. Разряд формировали в цилиндрической кварцевой колбе 1 с внутренним диаметром 5,1 см и высотой 121 см. Давление воздуха в колбе можно было варьировать от 763 до 0,1 торр. Для экспериментов брали воздух из помещения при температуре 25° С и относительной влажности 75%.

В колбе 1 на расстоянии  $d = 9$  мм друг от друга размещали стальные электроды 2 и 3 одинаковой формы: с углом вершины 15° и радиусом кривизны острия 70 мкм. Электрод 2 был высоковольтным,

\* Эдуард Анатольевич Соснин (badik@loi.hcei.tsc.ru); Владимир Сергеевич Кузнецов (robert\_smith\_93@mail.ru); Виктор Александрович Панарин (panarin@yandex.ru).

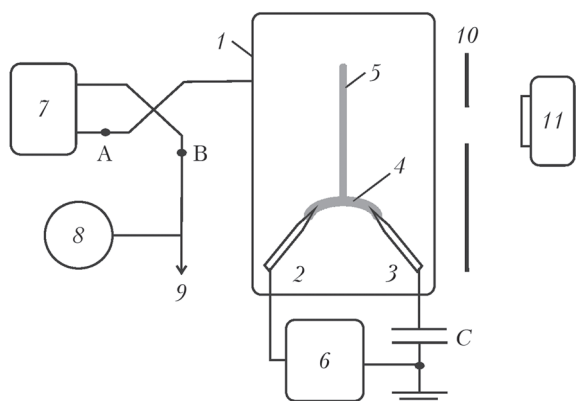


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки: 1 – кварцевая колба; 2 – высоковольтный электрод; 3 – электрод, имеющий емкостную развязку с землей; 4 – канал разряда; 5 – апокамп; 6 – генератор импульсов напряжения положительной полярности; 7 – датчик перепада давления; 8 – манометр; 9 – отвод к откачному тракту с вакуумным насосом; 10 – экран; 11 – фотоприемник

на него от источника питания 6 подавались импульсы напряжения с амплитудой не выше 8 кВ и частотой повторения 27 кГц. Электрод 3 имел емкостную развязку ( $C = 5$  пФ) с землей. При подаче напряжения между электродами зажигается импульсно-периодический канал 4, на изгибе которого формируется плазменный шлейф – собственно апокамп 5 (см. описание в [8]), экспериментально имитирующий голубую струю или стартер.

С точки зрения термодинамики при зажигании разряда происходит выделение энергии при постоянном объеме, что ведет к росту давления в колбе (изохорный процесс) – вначале быстрому, а затем медленному. Быстрая составляющая скачка давления пропорциональна доли мощности разряда, термализованной в газе (см. подробнее в [9]). Таким образом, фиксируя скачок давления после зажигания разряда, можно судить об энерговыделении в разряде за вычетом потерь излучения в форме люминесценции. Чтобы зарегистрировать эти изменения, в настоящей работе был использован дифференциальный датчик давления MPX5010DP с рабочим диапазоном до 76 торр, работающий по принципу сравнения опорного давления  $p$  с давлением в колбе после зажигания разряда  $\Delta p$ . Величина  $\Delta p/p$  пропорциональна мощности разряда, термализованной в газе [9]. Порядок проведения измерений был следующим.

1. При помощи аналогового манометра 8 и откачного тракта 9 в колбе устанавливали необходимое давление, которое было опорным для датчика. Затем опорный вход датчика в точке А закрывали от остальной системы и дополнительно, для повышения точности измерений, лишние участки объема системы перекрывались в точке В.

2. В объеме зажигали апокампиический разряд и фиксировали величину скачка давления, которая не превышала в наших экспериментах десятка торр.

Ради чистоты эксперимента проводилось несколько циклов откачки и напуска воздуха в колбу

(при этом газовый тракт в точках А и В оставался открытым) для максимального удаления из нее продуктов плазмохимических реакций. После этого пункты 1 и 2 повторялись для других значений давления воздуха в колбе.

Независимо от метода скачка давления для оценки мощности излучения апокампа измеряли величину энергетической светимости излучения в диапазоне 200–320 нм фотоприемником HAMAMATSU H8025-222 с известной спектральной чувствительностью. Фотоприемник 11 располагали на расстоянии 15 см от разряда и на высоте 5 см над каналом разряда 4, что соответствовало середине апокампа 5. Чтобы отсечь излучение канала 4, между фотоприемником и апокампом устанавливали экран 10.

Для каждого значения давления проводилось не менее 10 измерений. Относительная погрешность измерений в рабочем диапазоне давлений составляла не более  $\pm 6,5\%$  для метода скачка давления и не более  $\pm 18,5\%$  для определения энерговклада по энергетической светимости.

Таким образом, по скачку давления можно было контролировать величину энергии разряда, термализованной в газе ( $\Delta p/p$ ), а по фотоприемнику – энергию, затраченную на люминесценцию ( $E$ ).

## Результаты и обсуждение

Результаты измерений представлены на рис. 2. Видно, что при давлении 87 торр энергетическая светимость и скачок давления максимальны. Указанному давлению воздуха в природе соответствуют высоты  $\sim 15$ – $16$  км н.у.м. Известно, что стартовые высоты формирования транзитов средней атмосферы соответствуют высотам 12–18 км [1]. Случайно ли это?

Традиционно условия появления разрядов в атмосфере связывают с формированием грозовой облачности. Идеализированная структура иолированного грозового облака состоит из области положительного заряда в его верхних частях и более или менее равного отрицательного заряда на нижних уровнях [10]. Если напряженность электрического поля в облаке достигает  $\sim 2$ – $3$  кВ/см, между указанными областями начинаются внутриоблачные разряды, проходящие по ионизованным следам широких атмосферных ливней. Часть заряженных частиц, прилипая к нейтральным аэрозольным частицам, образует новые заряженные ядра конденсации, что ведет к ускоренному росту частоты внутриоблачных разрядов и концентрации объемных зарядов противоположных знаков в облаке. Благодаря этому рост облака усиливается [11], оно переходит в так называемую стадию зрелости.

При изучении описанного процесса справедливо обращают внимание на то, что он является многоаспектным и зависит от ветра, давления воздуха, наличия в нем примесей и температуры и т.д. [12]. Наши измерения показывают, что не менее важный фактор – способность газовой среды к выделению

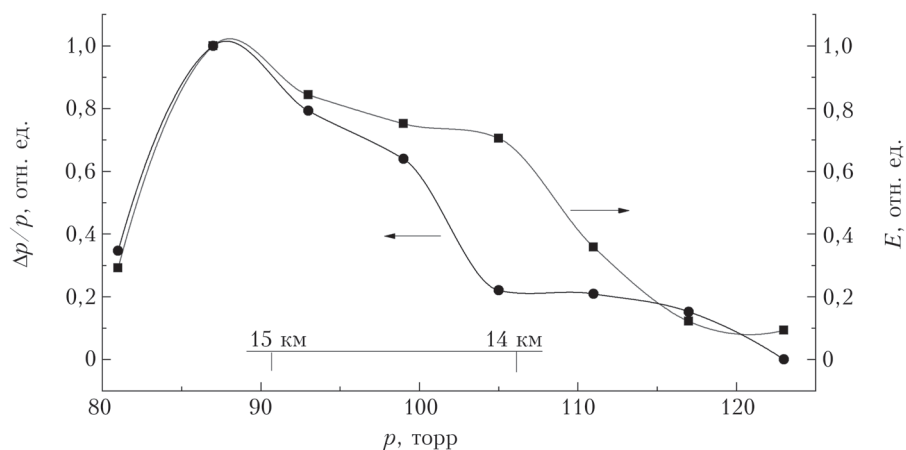


Рис. 2. Зависимости энергетической светимости излучения (квадраты) и скачка давления (кружки) от давления воздуха в колбе; шкала в нижней части рисунка ориентировочно отвечает указанным высотам над уровнем моря

накопленной электрической энергии через разряд. У нас роль внутриоблачных разрядов играет импульсный разряд между электродами 2 и 3, причем разряд имеет положительный потенциал относительно земли как верхняя часть облака. Как показывает наш эксперимент, существует оптимальный диапазон давлений воздуха, в котором разряд (при фиксированной напряженности поля на электроде 2) выделяет максимальную мощность. Причем в этих же условиях достигается и максимум оптической мощности излучения апокампа, особенно излучения интенсивной полосы  $N_2(C^3P_u - B^3P_g)$ . То есть эти условия наиболее выгодны для преобладания реакций, связанных с заселением верхних уровней азота. В природе же в указанном диапазоне давлений (и высот) формируются не просто внутриоблачные разряды, а разряды «вверх», которые и называются голубыми струями, стартерами и гигантскими джетами. То есть высоты (и давления) воздуха, в которых они образуются, сопряжены с максимальным энерговыделением в инициирующих (внутриоблачных) разрядах.

В этом смысле можно трактовать транзиенты как результат развития внутриоблачных разрядов с повышенной мощностью относительно разрядов, образующихся в глубине облака на меньших высотах. Указанный «переизбыток» мощности может приводить к формированию дополнительных каналов сброса энергии, которые мы наблюдаем в форме транзиентов.

Отметим, что наша версия находится в согласии с результатами экспериментальной регистрации компактных внутриоблачных разрядов (от англ. — compact intracloud discharge, CID) [13]. Чем выше их частота, тем большую конвекцию они вызывают в облаке, что приводит к локальному росту температуры, степени ионизации и положительного заряда в его верхней части. А это, как показали наши расчеты и эксперименты [14], — необходимое условие для формирования апокампа (а в природе — транзиента). Для проверки этого утверждения впоследствии можно предложить эксперимент по регистрации частотных и энергетических характеристик

разрядов по высоте облака. Согласно нашему предположению, частоты разрядов и выделяемая в них энергия в грозовом облаке должны увеличиваться по мере приближения к его верхней кромке. Вероятно, должны существовать критические значения этих величин, при которых избыток энергии приведет к появлению транзиента.

## Заключение

Мы предположили, что на формирование транзиентов средней атмосферы (голубые струи, стартеры, гигантские джеты), стартующих от верхней части грозовых облаков, влияют особенности энерговыделения во внутриоблачных разрядах на различных высотах. С помощью метода скачка давлений выявлен диапазон давлений, в котором энергия апокампического разряда, термализованная в газе, максимальна. Этот диапазон отвечает максимальной люминесценции полосы  $N_2(C^3P_u - B^3P_g)$  в апокампе. В природе указанному диапазону давлений соответствуют стартовые высоты формирования транзиентов средней атмосферы. На основе этого сделано предположение, что в выявленном диапазоне высот (давлений воздуха) энерговыделение внутриоблачных разрядов заметно выше, чем на более низких высотах, а переизбыток энергии приводит к ее сбросу в среднюю атмосферу, что реализуется в форме транзиента.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИСЭ СО РАН (проект № FWRM-2021-0014) и при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-32-90023).

1. 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. Sol.-Terr. Phys. 2015. V. 134. P. 78–101.
2. 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 апокампического разряда // Успехи физ. наук. 2021. Т. 191, № 2. С. 199–219.

3. *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 атмосфер. и океана*. 2020. Т. 33, № 3. С. 227–231.
4. *Соснин Э.А., Кузнецов В.С., Панарин В.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф.* Гипотеза о различиях стартовых условий для кратковременных световых явлений средней атмосферы // *Оптика атмосфер. и океана*. 2021. Т. 34, № 2. С. 148–151.
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. *Ермаков В.И., Стожков Ю.И.* Физика грозových облаков. Препринт ФИАН №2, 2004. 39 с.
7. *Бекряев В.И.* Молнии, спрайты и джеты. СПб.: Изд-во РГМУ, 2009. 96 с.
8. *Соснин Э.А., Бакшт Е.Х., Кузнецов В.С., Панарин В.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф.* Лабораторное моделирование голубых струй с помощью апокампиического разряда в герцовом диапазоне частот // *Оптика атмосфер. и океана*. 2019. Т. 32, № 7. С. 585–590; *Sosnin E.A., Baksh E.Kh., Kuznetsov V.S., Panarin V.A., Skakun V.S., Tarasenko V.F.* Laboratory simulation of blue jets with apokampic discharge in the Hz frequency range // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 6. P. 710–715.
9. *Пикулев А.А., Цветков В.М., Соснин Э.А., Панарин В.А., Тарасенко В.Ф.* Исследование термодинамических процессов в эксилампах методом скачка давления // *Приборы и техника эксперимента*. 2012. № 5. С. 3–15.
10. *Dwyer J.R., Uman M.A.* The physics of lightning // *Phys. Reports*. 2014. V. 534, N 4. P. 147–241.
11. *Ермаков В.И., Стожков Ю.И.* Физика грозových облаков. Препринт ФИАН №2, 2004. 39 с.
12. *Houze R.A.Jr.* Cloud Dynamics. Oxford: Academic Press, 2014. 432 p.
13. *Smith D.A., Massey R.S., Wiens K.C., Eack K.B., Shao X.M., Holden D.N., Argo P.E.* Observations and inferred physical characteristics of compact intracloud discharges // *Proc. 11th Int. Conf. Atmos. Electricity*. 1999. V. 30, N 42. P. 6–9.
14. *Соснин Э.А., Найдис Г.В., Тарасенко В.Ф., Скакун В.С., Панарин В.А., Бабаева Н.Ю.* О физической природе апокампиического разряда // *Журн. эксперим. теор. физ.* 2017. Т. 152, № 5(11). С. 1081–1087.

***E.A. Sosnin, V.S. Kuznetsov, V.A. Panarin. Energy release in a thundercloud, which is necessary for the transient middle atmosphere light phenomena formation.***

The pressure jump method was used to determine the energy release in an apokampic discharge at various air pressures. The maximum energy release and electroluminescence in the NUV spectral range are achieved in the pressure range from 85 to 92 Torr, which roughly corresponds to the formation heights of such optical phenomena in the middle atmosphere as blue jets, starters, and giant jets. The facts found make it possible to supplement the picture of the formation of these phenomena.