

Минобрнауки России
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт сильноточной электроники Сибирского отделения
Российской академии наук
(ИСЭ СО РАН)
Отдел образовательной деятельности

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
об основных результатах
научно-квалификационной работы на тему:
**«Закономерности развития транзиентных оптических явлений в
условиях апокампического разряда»**

Направление подготовки: 03.06.01 Физика и астрономия

Профиль подготовки (специальность): 01.04.05 – оптика

Аспирант

Кузнецов Владимир Сергеевич



(подпись)

Научный руководитель:
Соснин Эдуард Анатольевич,
д.ф.-м.н., в.н.с. ИСЭ СО РАН

Актуальность. Источники плазменных струй являются важным инструментом для решения научных и прикладных задач. Их отличает сравнительная простота в конструктивном исполнении и эксплуатации, высокая эффективность, разнообразие используемых газовых сред, обеспечивающих необходимый для каждой конкретной задачи состав плазмы, а также многообразие эмиссионных спектров [1–4]. В 2016 г. А Институте сильноточной электроники СО РАН был обнаружен новый тип плазменной струи которая формируется от изгиба канала импульсно-периодического разряда и направлена преимущественно перпендикулярно каналу разряда. Явление было названо апокампом (отсюда название *απο* – от и *καμπη* – изгиб, поворот) [5,6]. Обычно апокамп состоит из двух частей (отростка и плазменного шлейфа) с разной интенсивностью излучения. Вблизи канала импульсного разряда формируется яркий отросток, длина которого зависит от давления и напряжения. Из полученных в [5–8] результатов следует, что отросток в данных условиях является аналогом лидера. В продолжении отростка формируется плазменный шлейф, который, как показала высокоскоростная съемка с разрешением 3 нс/кадр, представляет собой совокупность «плазменных пульс» – светящихся областей, движущихся со скоростями от 100 до 240 км/с, образующихся во время процесса распространения волн ионизации [6,8]. Таким образом показано, что плазменный шлейф апокампа представляет собой положительный стример [1*].

В цикле работ [9, 10] было показано, что в воздухе, при низких давлениях апокамп имеет пять признаков сходства с транзиентными световыми явлениями средней атмосферы Земли – голубыми стартерами и струями [11, 12]. Однако условия образования голубых струй и стартеров не во всём повторяют лабораторные. Тем не менее, лабораторное моделирование атмосферных явлений представляет несомненный интерес как способ выявления ответственных за их появление физических механизмов и условий (см. [13]). Известно, что максимум ионизации атмосферы на высотах 12-18 км

обеспечивается космическими лучами [14]. Однако экспериментальные данные о влиянии электрического поля на формирование голубых струй и стартеров отсутствуют.

Начиная научно-квалификационную работу планировалось, что оценка влияния внешнего электрического поля на начальные условия инициации апокампа поможет связать экспериментальные результаты с условиями формирования транзиентов средней атмосферы Земли. Вопрос о влиянии начальных условий иницирования апокампа на скорость распространения плазменных пульс также оставался слабо изученным. Это обуславливало цель и задачи работы.

Цель научно-квалификационной работы (диссертации) – выявление закономерностей развития транзиентных оптических явлений в апокампиическом разряде при различных условиях их инициации.

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие **задачи**:

1. Адаптировать оптические методы и методики для измерения параметров транзиентных световых явлений в апокампиическом разряде (ТСЯ AP).
2. Экспериментально выявить факторы, влияющие на развитие ТСЯ AP при различных эндогенных и экзогенных условиях их инициации (а именно, влияние внешнего поля и материала электродов).
3. Установить закономерности формирования ТСЯ AP при разной степени выраженности факторов по п. 2.
4. Сформулировать дополнительные признаки сходства ТСЯ AP с транзиентами средней атмосферы Земли.
5. Сформулировать гипотезы для проверки в рамках физики и оптики атмосферы.

Методы исследования и подходы. Для установления закономерностей развития транзиентных световых явлений в условиях апокампиического разряда в рамках работы собраны экспериментальные установки,

позволяющие проводить регистрацию различных параметров системы и влиять на начальные условия апокампического разряда:

– Спектральные характеристики и различия в морфологии апокампа определялись стандартными методами спектроскопии при помощи спектрометров, оборудованных дополнительными оптическими элементами в ряде случаев (линзами, световодами).

– Электрофизические параметры апокампического разряда обеспечивались источниками питания, позволяющими варьировать амплитудно-частотные характеристики (частоту, длительность, амплитуду и др.).

– Получать визуальную временную развёртку динамики формирования апокампического разряда позволяла четырехканальная высокоскоростная камера HSFC-PRO с минимальной экспозицией 3 нс. Несмотря на то, что основная часть излучения рассматриваемых явлений находится в ультрафиолетовой области, часть, всё же, приходится на видимый диапазон, поэтому дополнительно проводилась многократная регистрация разряда при помощи фотоаппарата Canon PowerShot SX60 HS используемого в режиме с регулируемой выдержкой.

Научные положения, на основе результатов исследования:

1. В типичных условиях зажигания апокампического разряда (два острых электрода, на один подаётся напряжение положительной полярности с амплитудой до 13 кВ и частотой 16–56 кГц, другой имеет ёмкостную развязку с землёй) переход от диффузной формы горения в чистых инертных газах к апокампической форме наблюдается при появлении в газовой среде молекулярных примесей, в том числе электроотрицательных газов. Формирование апокампа всегда сопровождается появлением молекулярных и атомарных линий примесей в его эмиссионном спектре.

2. В типичных условиях зажигания апокампического разряда (два острых электрода, на один подаётся напряжение положительной полярности с амплитудой до 13 кВ и частотой 16–56 кГц, другой имеет

ёмкостную развязку с землёй) снижение амплитуды стартового напряжения апокампа до 10% и увеличение длины апокампа и скорости продвижения положительного стримера вдоль распространения электрического поля до 43% осуществимо: 1) использованием электродов, выполненных из легкоионизируемых материалов; 2) внесением легкоплавких материалов (в частности, вулканического туфа) непосредственно в область импульсно-периодического разряда; 3) созданием отрицательно заряженной области над каналом разряда. В п. 1, 2, вместе с увеличением длины апокампа, спектр люминесценции апокампического разряда пополняется линиями материала электродов и компонентами из состава вулканического материала.

3. В апокампическом разряде, в воздухе при давлении 120–30 Торр, напряжении с амплитудой $U \leq 13$ кВ и частотой порядка 16–56 кГц, использование плоского электрода с керамическим слоем повышает среднюю скорость плазменных пульс до 520 км/с. Интенсивность N_2^+ на длине волны 391.4 в стримерной части возрастает. При давлениях воздуха, соответствующих условиям стратосферы Земли, средняя скорость плазменных пульс пропорциональна давлению и снижается в ~ 4 раза при переходе от 120 к 30 Торр.

4. В конфигурации двух острых электродов, расположенных под углом 120 градусов на расстоянии 9 мм друг от друга, в воздухе при давлении 150 Торр и напряжении 7.6 кВ параметры T_e и E/N в окрестности отростка апокампического разряда скачкообразно повышаются на ~ 34 % и затем в зоне стримерного канала снижаются на ~ 18 % при удалении на 75 мм, при этом температура газа снижается в 2 раза.

Достоверность и обоснованность научных положений и других результатов работы:

1. Для **первого** научного положения обусловлена использованием стандартных методов спектрометрии и спектрометра Ocean Optics HR2000+ES (рабочий диапазон длин волн 200-1100 нм, спектральная полуширина аппаратной функции ~ 1.33 нм), достаточного для разрешения эмиссионного

спектра используемых в исследованиях химических элементов (He, N₂, O, OH, Ar, Cu, Al, Fe, W, K, Na); согласованностью их эмиссионных линий и полос с известными спектральными данными NIST Atomic Spectra Database.

2. Для **второго** научного положения обусловлена высокой воспроизводимостью (около 100 %) регистрации видимых изображений апокампа, а по части идентификации и сравнения спектров отвечает тем же критериям, что были перечислены п. 1.

3. Для **третьего** научного положения подтверждается использованием стандартных оптических методов регистрации возбуждаемого волнами ионизации свечения и высокоскоростной камеры с минимальной экспозицией 3 нс; повторяемостью результатов (~ 70%) измерений скорости волны ионизации.

4. Для **четвертого** научного положения подтверждается согласием расчётной величины газовой температуры на оси апокампа полученной с помощью радиационно-столкновительной модели плазмы и полученной экспериментально [1*], а также находится в согласована с теоретическими расчётами Г.В. Найдиса и Н.Ю. Бабаевой [2*]. По части идентификации и сравнения спектров отвечает тем же критериям, что были перечислены п. 1.

Новизна полученных результатов:

Новизна полученных результатов обусловлена тем, что объект исследований – апокампиический разряд – является сравнительно новым. Выполненные в 2018-2021 гг. эксперименты позволили выдвинуть ряд предположений, касающихся условий формирования апокампов. В частности, предположение о том, что инициация и распространение апокампов зависят не только от приложенного к электродам поля, но и от ряда внешних условий: знака и напряженности внешнего электрического поля, наличия в воздухе легкоионизируемых добавок и материала электродов, а также от давления.

Научная ценность:

1. Проведена дополнительная проверка гипотезы о необходимости наличия молекулярных компонент, в частности электроотрицательных атомов

и молекул для формирования апокампиического разряда, предложенной в работе Панарина В.А.

2. Определён спектральный состав эмиссионного излучения апокампа при пониженных давлениях в CO_2 , Ar, Kr, Xe, Cl_2 , N_2 и их смесях.

3. Показана возможность лабораторного моделирования спектрального состава транзиентных световых явлений в атмосферах ряда планет Солнечной системы.

4. Предложена и экспериментально обоснована гипотеза о том, что пепловые облака повышают вероятность образования транзиентных световых явлений средней атмосферы Земли.

5. Экспериментально показано, что увеличение напряженности поля в месте старта апокампа позволяет повысить скорость распространения плазменных пульс и его протяженность.

6. Полученные экспериментальные данные о пространственно-временных параметрах формирования апокампа позволили сформулировать шестой признак сходства апокампа транзиентов средней атмосферы Земли.

7. Полученные данные о тепловыделении в разных зонах апокампа подтверждают гипотезу о необходимости высокого E/N в области у канала разряда относительно приведенной напряженности электрического поля в холодном газе для формирования апокампа. Показана применимость предложенной Г.В. Найдисом и Н.Ю. Бабаевой стримерной модели формирования апокампиического разряда.

Практическая значимость:

1. Создан источник ультрафиолетового излучения на основе апокампиического разряда на молекулах KrCl^* и XeCl^* .

2. Созданная лабораторная установка позволяет получать оценочные данные для конструирования зондов атмосфер планет Солнечной системы, например, для выбора спектральной чувствительности приборов регистрации.

3. Расширен диапазон управления апокампиическим разрядом с помощью внешних факторов (внешнее поле, легкоионизируемые материалы).

Апробация результатов работы

Основные результаты научно-квалификационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных: 14th International Conference on Gas Discharge Plasmas and Their Applications (сентябрь 15-21, 2019) Томск, Россия; XIII Международная конференция по импульсным лазерам и применениям лазеров AMPL-2019 (10-15 сентября, 2019), Томск, Россия; International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (сентябрь 14-26, 2020) Томск, Россия.

Личный вклад автора

Основные результаты, представленные в научно-квалификационной работе, получены лично автором и при совместной работе с соавторами опубликованных научных материалов (Е.Х. Бакштом, В.А. Панариным, Д.С. Печенициным, В.С. Скакуном, Д.А. Сорокиным, Э.А. Сосниным, В.Ф. Тарасенко). Постановку цели и основных задач научной работы осуществлял автор совместно с научным руководителем Сосниным Э.А.

Созданием и подготовкой экспериментального оборудования, проведением экспериментов занимался автор при участии Панарина В.А., Скакуна В.С., Соснина Э.А. Обработкой большинства результатов занимался автор лично. Анализ, интерпретация и обсуждение полученных результатов осуществлялись автором совместно с научным руководителем. Написание публикаций осуществлялось при активном участии автора и сотрудников лаборатории. Подготовку докладов на конференции автор осуществлял лично.

Публикации

По теме научно-квалификационной работы опубликовано 15 научных работ, в научных журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus, а также 6 публикаций в сборниках материалов международных и всероссийских научных конференций.

Основные результаты работы

1. Экспериментальная аппаратура и методики измерения

Разряд обычно формировался между острийными электродами 2,3 расположенными на расстоянии ~ 9 мм. Электрод 2 соединяется с источником питания 1, формирующим импульсы высокого напряжения положительной полярности с длительностью $\tau = 1.5\text{--}2.5$ мкс, частотой следования импульсов $f = 16\text{--}56$ кГц и амплитудой напряжения $U_p \leq 13$ кВ. электрод 3 находился под плавающим потенциалом и соединен с заземлением через конденсатор емкостью $C_1 = 10$ пФ. Подача на высоковольтный электрод 2 импульсов напряжения ведет к искровому пробое промежутка. Через сотни-тысячи импульсов искровой канал трансформируется в диффузный. При этом канал 4 изгибается, и в месте максимального изгиба появляется апокамп, состоящий из отростка 5 и плазменной струи (стримера) 6.

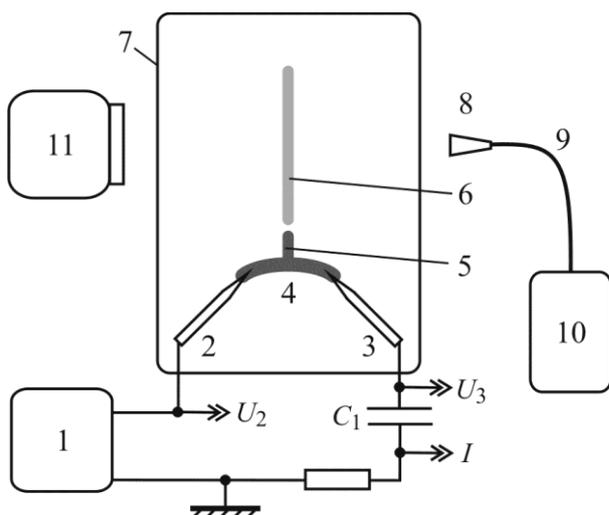


Рис. 1 Блок-схема экспериментальной установки с кварцевой камерой: 1 - генератор импульсов напряжения, 2 - высоковольтный электрод, 3 - электрод, емкостно развязанный с землей ($C_1 = 10$ пФ), 4 - канал разряда, 5 - отросток, 6 - стример, 7 - кварцевая камера, 8 - коллиматор, 9 - световод, 10 - спектрометр, 11 - камера. U_2 , U_3 - напряжения с электродов 2 и 3 соответственно. I - ток от электрода 3.

Нужно отметить, что при малых частотах следования импульсов апокампы могли стартовать от основного канала разряда, однако в данных экспериментах этот режим не использовался. Электродная система при необходимости помещалась в герметичную цилиндрическую кварцевую камеру 7 с внутренним диаметром 6 см и высотой 60 см, давление газовой среды в которой можно было регулировать. В экспериментах использовали воздух, N_2 , Kr, Ar особой чистоты и CO_2 технической чистоты.

С помощью осциллографа (на рисунке не показан) TDS 3034 (Tektronics, Inc.) через токовый шунт и делитель напряжения регистрировали временные характеристики напряжения и тока разряда.

Для регистрации внешнего вида разряда использовалась фотокамера 11 Canon PowerShot SX60 HS в режиме покадровой съемки с выдержкой 1/8 с. Регистрацию спектров проводили с помощью сборки, включающей в себя коллимирующую линзу 8 с фокусным расстоянием 30 мм, оптоволокно 9 с известным спектром пропускания и спектрометр 10 HR2000+ES. Линзу располагали на различных высотах h , собирая излучение из области диаметром 5 мм.

Динамику формирования апокампов определяли с помощью четырехканальной высокоскоростной камеры (HSFC-PRO, PCO AG). Минимальная экспозиция кадра составляла 3 нс, а поле зрения линзы на выходе камеры составляла 17x23 мм. Камера запускалась сигналом от высоковольтного зонда (ACA-6039, ElikS) через генератор (BNC 563, Berkeley Nucleonics), который устанавливал задержку для камеры ICCD и осциллографа (TDS 3034, Tektronix). Сигнал с одного или нескольких каналов камеры ICCD передавался по оптоволокну на компьютер.

2. Влияние молекулярного газа на формирование апокампового разряда

Начальные работы по тематике апокампового разряда отображены в диссертации Панарина В.А. на тему «Транзиентные световые явления, инициируемые потенциальным каналом импульсного разряда».

В вышеупомянутой диссертации была выдвинута гипотеза о необходимости наличия примесей молекулярного газа в смеси для формирования апокампа. Для дополнительной проверки данной гипотезы проведены опыты для смеси Kr-N₂. В чистом Kr разряд существует в форме объёмного свечения (рис. 2(а)), а спектр содержит только линии атома Kr (5p – 5s). Добавка к криптону молекулярного азота приводила к образованию

апокампического разряда, а эмиссионный спектр излучения обогащался полосами $N_2(C^3\Pi_u - B^3\Pi_g)$, $N_2^+(B^2\Sigma^+_u - X^2\Sigma^+_g)$.

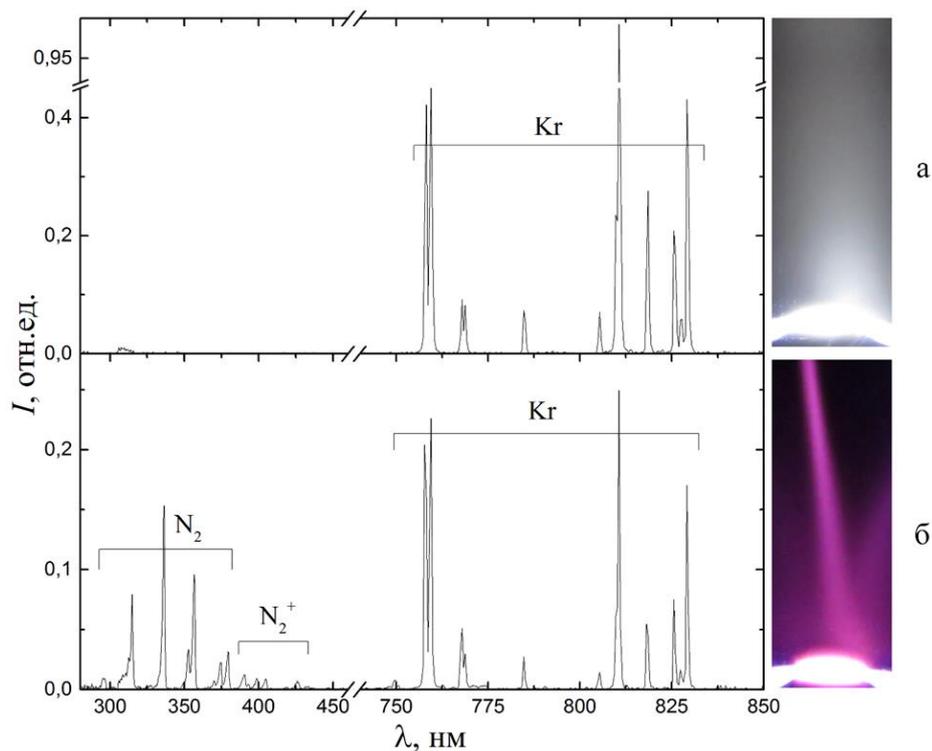


Рис. 2 Спектры излучения апокампа в криптоне (а) и смеси $Kr-N_2 = 1-1$ (б), при общих давлениях $p = 30$ Торр и напряжении $U_p = 5.2$ кВ.

Для более детальной оценки влияния малых примесей молекулярного газа на разряд была проведена серия испытаний в аргоне. Вначале камеру заполняли аргоном и регистрировали спектр и внешний вид разряда. Далее камеру откачивали и вновь заполняли аргоном и регистрацию повторяли. Многократное повторение циклов напуска и откачки аргона приводило к постепенному удалению из камеры остаточных примесей воздуха и влияло на форму разряда, что иллюстрируется на рис. 3. Здесь приведены спектры излучения и отвечающая им форма разряда для четырёх и шестнадцати циклов откачки и напуска аргона в камеру. В обоих случаях спектры получены в условиях умеренного давления до $p = 120$ Торр, напряжения $U = 3.74$ кВ и частоты $f = 56$ кГц. После четырех циклов откачки разряд оставался апокампическим и в спектре помимо атомарных переходов аргона

присутствовали переходы $N_2(C^3\Pi_u - B^3\Pi_g)$ и $N_2^+(B^2\Sigma_u^+ - X^2\Sigma_g^+)$. После шестнадцати циклов напуска и откачки разряд становился объёмным.

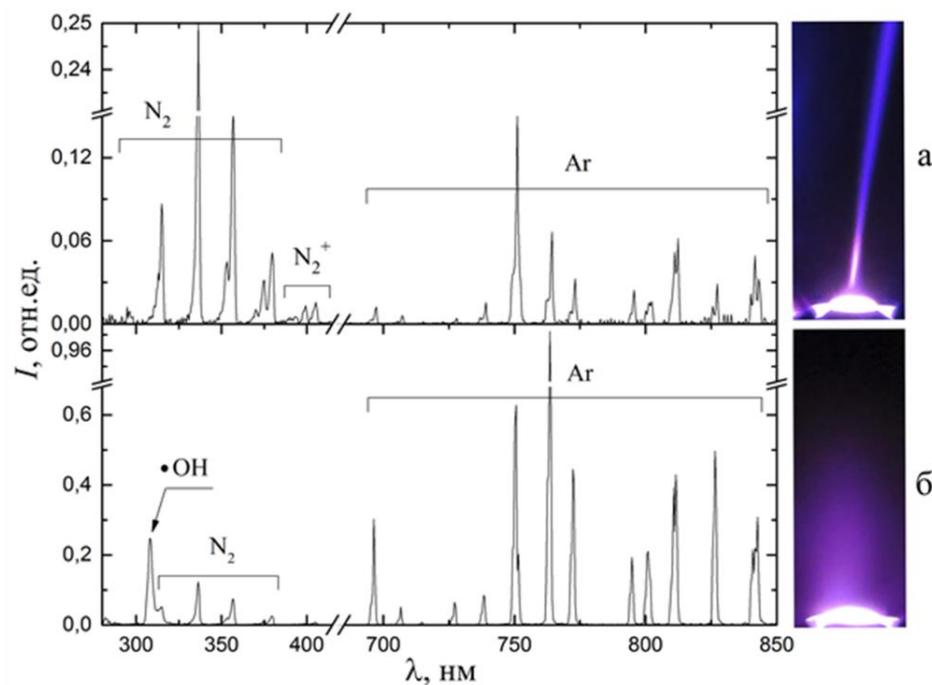


Рисунок 3 Спектры излучения апокампического разряда (слева) на высоте $h = 3$ см от канала, и их типичный вид (справа) после 4 (а) и 16 (б) циклов откачки и напуска аргона.

Подобные опыты были проведены и для других смесей, таких как Ar-CO₂, XeCl₂, KrCl₂. Во всех случаях исключение молекулярного газа из объёма приводило к переходу из апокампической формы горения в диффузную.

В предыдущих работах [7,15] было показано, что апокампический разряд является миниатюрным аналогом масштабных атмосферных явлений (так называемых транзитных световых явлений [16]), возникающих в средней атмосфере Земли между облаками и ионосферой – голубых струй и стартеров. Для этого сегодня строятся теоретические модели [17], а для облегчения расчетов планетарные атмосферы классифицируются по газам, концентрация которых максимальна. Так, модельными системами для Венеры и Юпитера являются газовые смеси CO₂-N₂, H₂-He соответственно [18]. Поэтому полученные данные о спектральном составе и форме разряда в смесях Ar-CO₂ можно использовать для постановки экспериментов по лабораторному моделированию транзитных световых явлений в атмосфере Венеры.

3 Влияние внешних и внутренних факторов на условия инициирования апокампического разряда

3.1 Материалы электродов

Исследования величин напряжений, при которых формируется апокамп с электродами, выполненными из различных металлов, были проведены в воздухе при пониженном давлении. При высокой частоте следования импульсов в стационарном режиме апокамп стабильно формируется в каждом из импульсов напряжения. Поэтому при кГц частотах следования импульсов его было легко наблюдать визуально и фотографировать, а также регистрировать спектры излучения.

На рис. 4 приведены подробные зависимости средних амплитуд напряжения, необходимых для формирования апокампа и его длины при давлении воздуха 45 Торр.

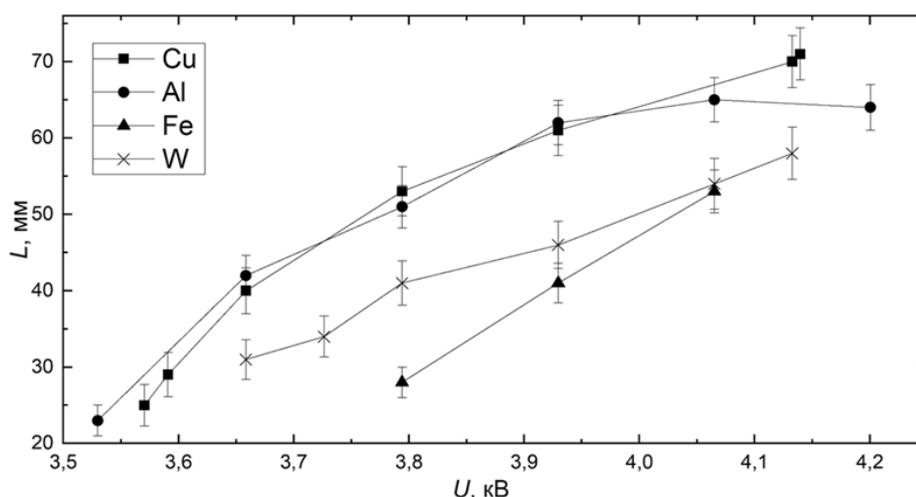


Рис 4. Длина апокампа в воздухе при давлении 45 Торр при использовании различных электродов в зависимости от средней амплитуды напряжения на высоковольтном электроде. $f = 4.47$ кГц.

Минимальные величины амплитуды напряжения на кривых (рис. 4) отвечают появлению апокампа. Эти величины стали меньше по сравнению с величинами напряжений запуска апокампа, полученными при атмосферном давлении воздуха. Кроме того, при одинаковых напряжениях высоковольтного электрода длина апокампа различается в некоторых случаях практически в 2 раза.

На рис. 5 даны спектры излучения разряда в случае медных электродов, с которыми интенсивность излучения атомов металла была максимальной. Вместе с излучением второй положительной системы азота и NO в полученных спектрах присутствовали линии ионов меди с длинами волн 324,7; 327,3; 510,6; 515,3; 521,8 нм.

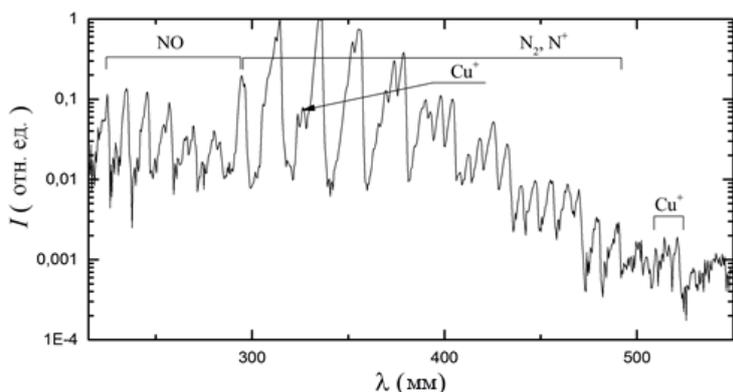


Рисунок 5 Спектры излучения разряда с медными электродами в логарифмической шкале при давлении воздуха 45 Торр и $f = 4.47$ kHz.

Таким образом, есть основания предполагать, что пары металлов в данных экспериментах играли роль легко ионизируемой добавки в воздухе. Использование электродов, с которыми регистрировались наименьшие средние амплитуды напряжения пробоя промежутка, облегчало появление апокампа и увеличивало его длину. Можно также предположить, что с электродами из алюминия и меди около основного разряда создавалась наибольшая концентрация начальных электронов.

3.2 Легкоплавкие материалы в разряде

В сухих газопепловых облаках над вулканами отмечается самая высокая для атмосферных процессов интенсивность разделения электрических зарядов, связанная прежде всего с тем, что в области пеплового столба вверх поднимаются положительно заряженные сгущенные вулканические газы, а падающие частицы золы заряжены отрицательно. Как результат при таких извержениях регистрируются как частые крупные молнии «воздух-земля» (т.н. «грязные молнии»), так и более частые мелкие разряды, а также коронные разряды, а верхняя часть пеплового облака на стадии формирования имеет избыточный положительный заряд. В условиях нашего опыта апокампы стартуют от положительно заряженного канала импульсного разряда.

Известно, что голубые струи и стартеры возникают только над очень активными грозowymi облаками с частотой следования молний до нескольких вспышек в секунду. Старт голубых струй в природе происходит от заряженных зон после того, как внутри них или между ними и Землей происходят разряды [19]. Поэтому электрические условия в вулканическом столбе можно рассматривать как благоприятствующие развитию голубых струй и стартеров. На основе этих данных, было предложено ввести в газоразрядный промежуток вулканический материал, чтобы убедиться в том, что испарения от него будут облегчать стартовые условия для апокампического разряда.

Для этого между электродами была установлена пластинка 3 толщиной 5 мм (рис. б(а)), выступающая над электродами на 5 мм, изготовленная из куска лавы, взятой в воронке вулкана Этна (Сицилия, Италия) в 2015 г. Использованные образцы лавы были диэлектриками в нормальных условиях и сохраняли свойства диэлектрика при подогреве. В ряде опытов для сравнения применялась аналогичная по геометрии и расположению пластинка, выполненная из кварца (КУ-1). После подачи импульсов напряжения разряд огибает пластинку 3, вызывает её разогрев и высвобождение содержащихся в ней легкоплавких веществ. При этом даже визуально заметно, что цвет свечения разряда изменяется.

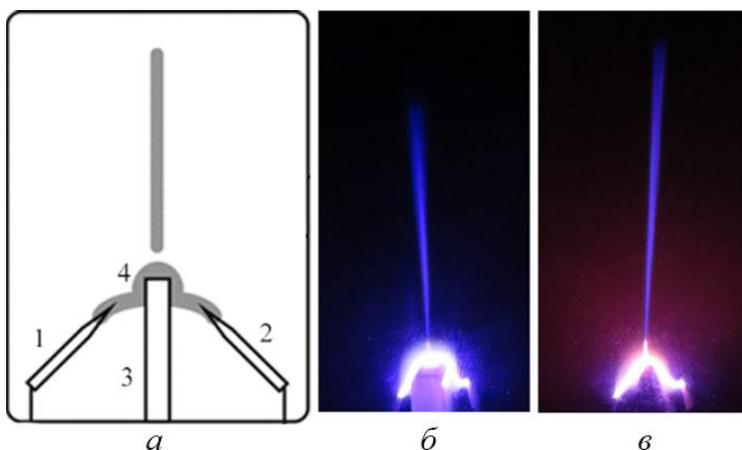


Рис 6 Схематичное представление апокампического разряда с пластинкой (а): 1,2 – острые электроды, 3 – пластинка, 4 – апокампический разряд. Внешний вид апокампического разряда, ограниченного пластинкой из кварца (б) и вулканического материала (в).

Высота кадра 6.2 см. Выдержка кадра 1/8 с. $p = 480$ Торр, $U = 9$ кВ.

В случае кварцевой пластинки длина апокампа составляет 3.6 см, а в случае пластинки из лавы 5 см, т.е. на 28% выше. Кроме того, выяснилось, что для

перехода от импульсного разряда к апокампическому в случае кварцевой пластинки необходимы амплитуды напряжения на 0.5-1.5 кВ выше, чем в случае пластинки из лавы

На рис. 7 представлен спектр излучения в середине апокампа при давлении воздуха 485 Торр. В момент зажигания он содержит только полосы молекулярного азота ($C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$) и его иона ($B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+$).

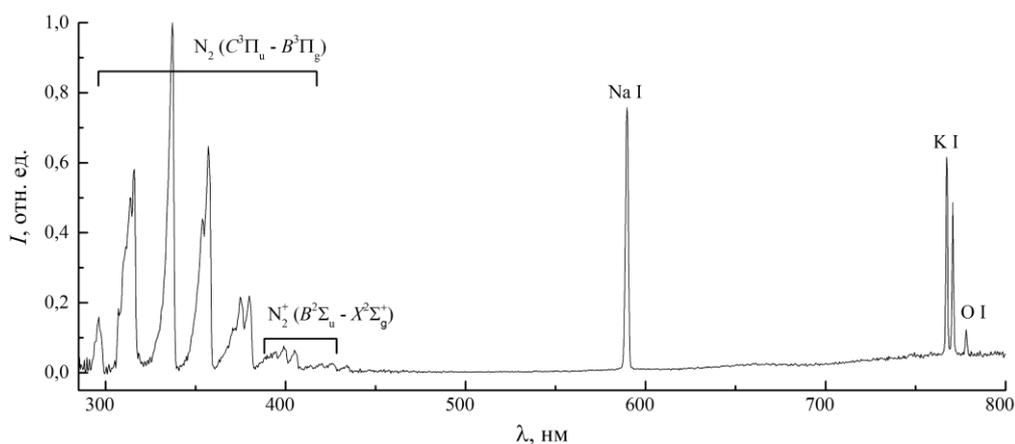


Рис. 7 Спектр излучения апокампа в присутствии пластинки из лавы: $U_p = 9$ кВ, $p = 485$ Торр.

Рентгенофлуоресцентный анализ пепла Этны после последних пепловых извержений, проведенный в 2017 г. [20], выявил достаточно высокую среднюю долю оксидов Na_2O и K_2O в образцах, которая составила ~ 3.8 и 1.9 %. В спектре наблюдаются линии, отвечающие переходам NaI (588.9 нм), KI (766.4, 769.8 нм). Замена лавовой пластинки на кварцевую убирает из спектра обозначенные линии. Из проведенных измерений следует, что наличие в зоне разряда вулканического материала и выделение из него легкоионизируемых элементов: 1) уменьшает напряжение, при котором от канала разряда стартует положительный стример – апокамп; 2) увеличивает скорость его распространения, поскольку увеличивается длина апокампа.

3.3 Внешнее электрическое поле

В [21] показано, что для устойчивого образования апокампа в воздухе атмосферного давления необходимо наличие слабого внешнего электрического поля. В данном разделе экспериментально исследуется вопрос о необходимости внешнего электрического поля при давлениях воздуха,

близких к условиям формирования транзиентных световых явлений (ТСЯ) средней атмосферы в природе. На рисунке 8 показана усовершенствованная экспериментальная установка. В качестве элемента внешнего поля были использованы конденсаторы C_5 с маркировкой К15-4, которые размещались на расстоянии от 5 до 20 см над основными электродами. Они были выполнены из емкости с двумя электродами 4700 пФ и диаметром 46 мм или 1000 пФ диаметром 41 мм. Однако, с керамического торца, направленного к разряду, у них был удален электрод. Таким образом, торец конденсатора, подключенный к источнику питания, имел электрод, а другой, направленный в сторону апокампического разряда, был без металлического электрода. На электрод конденсатора подавалось высокое напряжение в диапазоне $+3.5 < U < +30$ кВ через резистор величиной 18 МОм.

Конденсатор C_4 (720 пФ) обеспечивал сглаживание пульсаций напряжения от источника 6 и медленный спад напряжения на металлическом электроде модифицированного конденсатора C_5 .

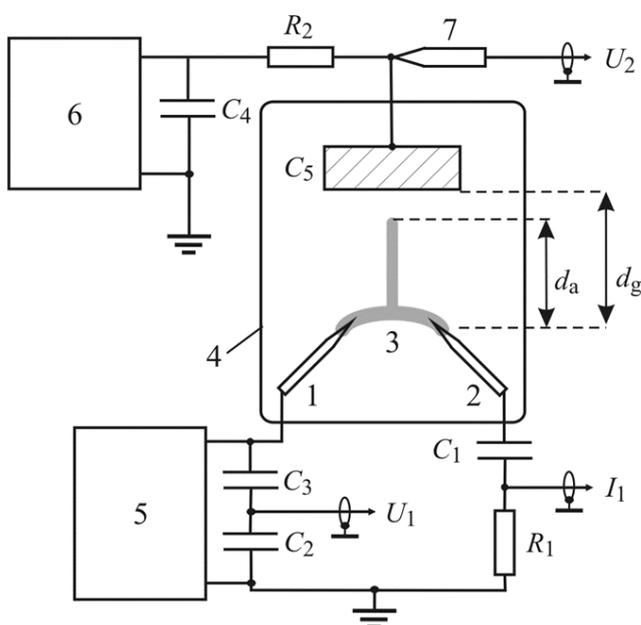


Рисунок 8 Схема установки: 1, 2 – острые электроды; 3 – разрядный промежуток; 4 – кварцевая камера; 5 – источник высоковольтных импульсов напряжения; 6 – источник постоянного напряжения; 7 – делитель напряжения.

Порядок проведения опытов был следующим:

1. Производили зажигание импульсного высоковольтного разряда между электродами 1 и 2, подбирая амплитуду напряжения U такой, чтобы получить обычный импульсно-периодический разряд без апокампа в форме изогнутого канала.

2. От источника б подавали напряжение на конденсатор C_5 . В результате из-за слабotoчного разряда на керамическом торце конденсатора, направленного в сторону электродов, могли собираться электроны и конденсатор частично заряжался.

3. Выключали источник б, что приводило к заземлению электрода конденсатора C_4 через сопротивление R_2 и сопротивление делителя напряжения 7. При этом конденсатор C_4 разряжался, а также уменьшалось напряжение на металлическом электроде конденсатора C_5 . Скорость разрядки определялась постоянной RC -цепи. В момент выключения источника начинали запись величины $U_2(t)$ и фотографировали разряд с различными задержками. Перед каждым опытом варьировали расстояние d_g между электродами 1 и 2 и конденсатором б, а также величину конденсатора C_5 .

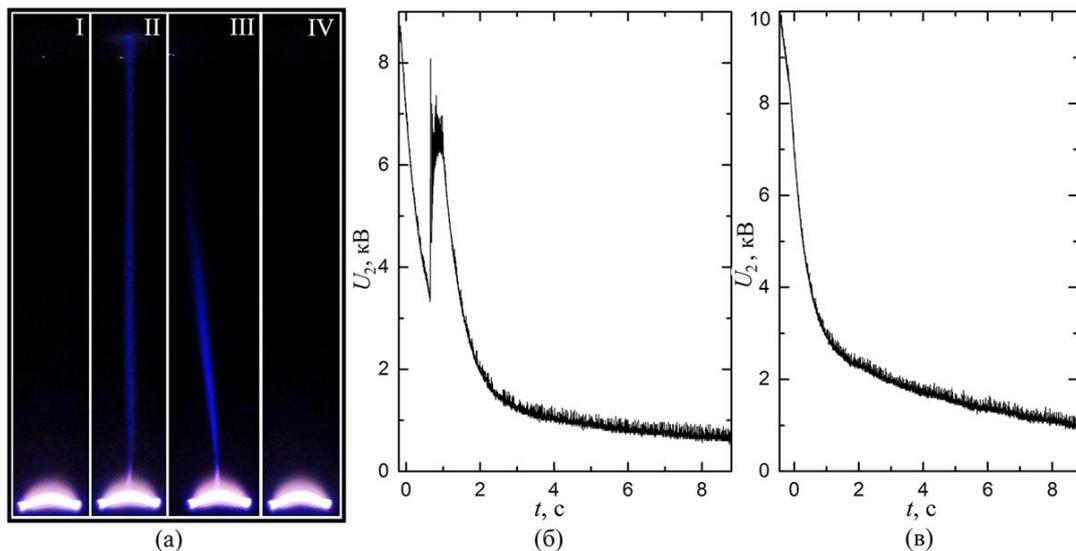


Рис 9. Демонстрация запуска апокампа (а), временной ход напряжения на конденсаторе C_5 с апокампом (б) и без него (в). $U = 5.4$ кВ, $p = 180$ Торр, $f = 50$ кГц, $d_g = 8.8$ см, $C_5 = 1000$ пФ.

После выключения источника б импульсный разряд между электродами 1, 2 может переходить в апокампический (рис. 9 (а), II и III) и частично или полностью перекрывать промежуток d_g между электродами 1, 2 и керамическим торцом конденсатора C_5 . Затем апокамп укорачивается и исчезает. По представленным фотографиям время существования апокампов, с учётом экспозиции (0.125 с), можно оценить примерно, как 0.3 с. Следует

учесть, что поскольку импульсный разряд зажигается с частотой 50 кГц, то за указанный промежуток времени образуется ~ 15000 апокампов.

На рис. 9 (б, в) показано, как происходит разрядка конденсатора C_4 в режиме с апокампом и без него. Без апокампа мы имеем почти экспоненциальную зависимость (рис. 9 (в)), характеризующую разрядку конденсатора $U_2(t) \sim \exp(-t/\tau)$, где $\tau \sim 2$ – постоянная времени разрядки. При иницировании апокампа разрядка прерывалась всплеском напряжения, как показано на рис. 9 (б). Это происходит за счет формирования стримеров в промежутке d_g . Таким образом апокамп – положительный стример – служит источником подзарядки конденсатора C_4 и увеличивает напряжение на металлическом электроде конденсатора C_5 .

На основании полученных данных можно сказать, что формирование отрицательно заряженной зоны над каналом импульсно-периодического разряда с положительным потенциалом, приводит как к инициации, так и к удлинению апокампов, а также снижает амплитуду напряжения, необходимую для их формирования.

4 Формирование апокампа от электрода с диэлектрическим покрытием

Апокамп по своей природе дискретен и состоит из множества плазменных пуль, распространяющихся от импульсно периодического канала разряда. Если напряженность поля в точке старта апокампа увеличить за счёт принудительного изгиба канала и повышения напряжения при малых давлениях можно получить апокамп на герцовой частоте. При этом средняя скорость пуль может достигать 335 км/с [22]. Такие условия можно считать экстремальными и труднореализуемыми. Для того, чтобы увеличить напряженность в месте старта апокампа более простым способом была предложена новая электродная конфигурация, показанная на рисунке 10. Вместо двух острых электродов ставился плоский электрод с диэлектрическим слоем, выполненным из керамики.

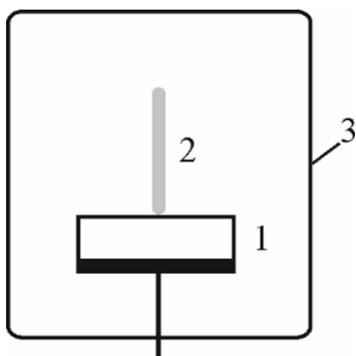


Рис. 10 Схематичное представление апокампиского разряда с области пространственного заряда. 1 – электрод с диэлектрическим слоем, 2 – апокамп, 3 – кварцевая камера.

Подавая импульсы напряжения положительной полярности на такой электрод, на поверхности керамической части конденсатора накапливается заряд и формируется зона повышенной напряженности поля, с которой стартует апокамп.

При помощи высокоскоростной камеры получены изображения представляющие собой следы волны ионизации или как их называют в литературе «плазменные пули» [23] (рис. 11).

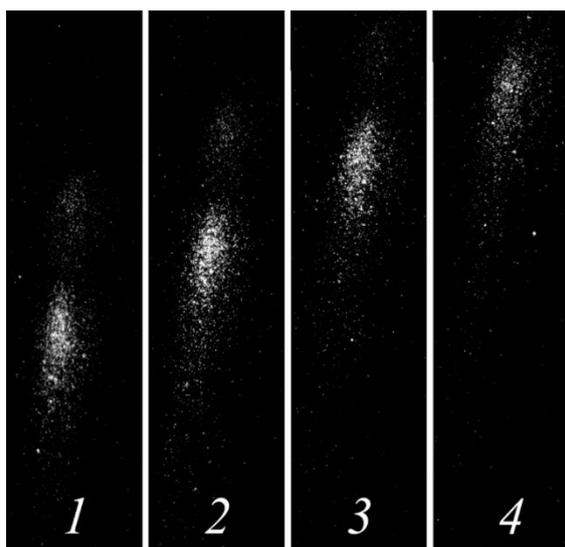


Рис. 11 Серия кадров плазменных пульс с керамической поверхности. Давление 120 Торр, напряжение 8.8 кВ, частота 37 кГц, задержка между кадрами 10 нс.

На основе полученных кадров посчитаны средние скорости распространения плазменных пульс при различных давлениях воздуха. При давлениях около 120 Торр средняя скорость плазменных пульс, в конфигурации с керамическим электродом достигала 520 км/с, в то время как в классической конфигурации максимальная зарегистрированная средняя скорость пули – 267 км/с. На рис. 12 показана зависимость скорости плазменных пульс от давления.

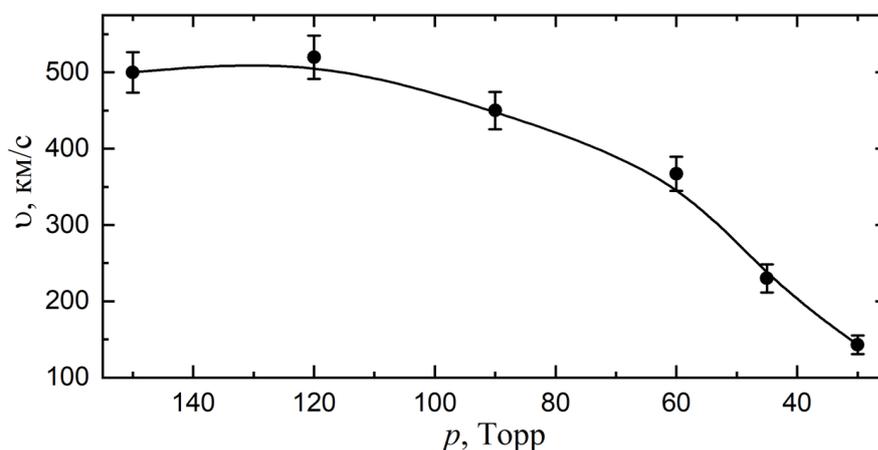


Рис. 12 Зависимость скорости распространения плазменных пуль от давление в кварцевой камере.

Интересен тот факт, что при снижении давления скорость плазменных пуль также снижается и на давлениях около 30 Торр падает более чем в 4 раза.

Зарегистрированы эмиссионные спектры отростка и стримера для апокампа, стартующего от керамической поверхности (рис. 13). Найдено различие между зоной отростка и стримерной части.

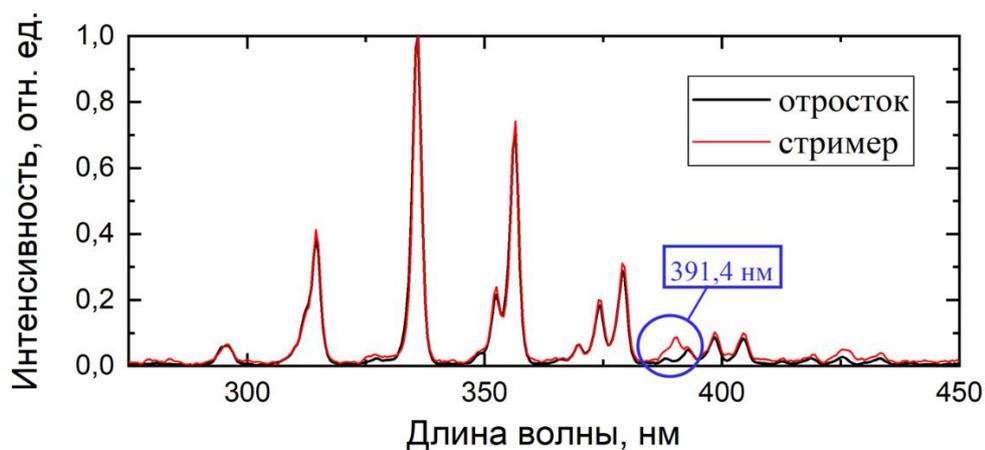


Рис. 13 Спектр люминесценции апокампа с керамического электрода.

Интенсивность N_2^+ на длине волны 391.4 в стримерной части апокампа выше относительно отростка. Это говорит в пользу более высокой ионизации газа в стримере.

5 Диагностика плазменных параметров апокампа по эмиссионным спектрам излучения

Когда стало известно, что спектр люминесценции в разных участках апокампа отличается (глава 4) было предложено измерить спектры с малым шагом начиная от канала разряда в сторону распространения апокампа, для

выявления дополнительных отличий между отростком и стримером. Для этого совместно с Д.А. Сорокиным, спектры люминесценции разных участков апокампа сопоставлялись со значениями, получаемыми в ходе моделирования эмиссионных спектров плазмы разряда при помощи кода, в основе которого заложена радиационно-столкновительная модель плазмы и как итог определялись параметры плазмы: электронная (рис. 14а), вращательная, колебательная и газовая температура (рис. 14б), а также, приведенная напряженность электрического поля на разных расстояниях вдоль распространения апокампа от канала разряда при давлении воздуха 150 Торр, напряжении 7.6 кВ и частоте импульсов напряжения 35 кГц.

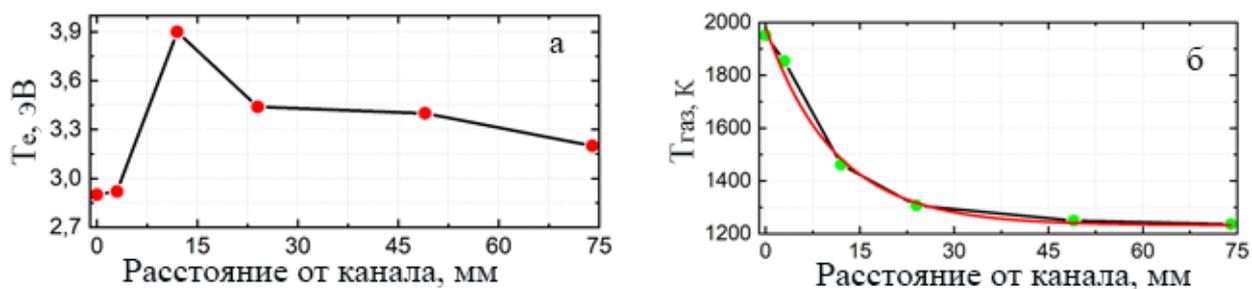


Рис. 14 Электронная температура (а) и температура газа при удалении от канала разряда (б) с экспоненциальной экстраполяцией.

При удалении на 75 мм температура газа снижается в 2 раза. Данная зависимость описывается экспоненциальной кривой по формуле:

$$y = y_0 + Ae^{R_0x},$$

где $y_0 = 1231,54734 \pm 27,15923$; $A = 749,14582 \pm 39,5491$; $R_0 = -0,09045 \pm 0,01342$.

Электронная температура при удалении от канала разряда резко возрастает на расстоянии около 9 мм от канала. Так же себя ведет и график приведенного электрического поля. На этой высоте находится вершина отростка и начало стримера. Мы считаем, что именно в этом участке апокампа скорость распространения плазменных пульс максимальна. На данный момент это лишь предположение и для подтверждения необходимы дополнительные исследования.

Заключение

Углублены знания о закономерностях формирования апокампического разряда. Экспериментально показано, что для формирования апокампического разряда требуется наличие молекулярного газа, в том числе электроотрицательного. Определено влияние электродов, выполненных из различных металлов на условия инициации апокампа. Показано, что наличие веществ вулканического происхождения в газоразрядном промежутке облегчают зажигание апокампа и увеличивают его длину. Подтверждено, что величина отрицательного поля над разрядом играет важную роль в формировании апокампа и может как инициировать его появление, так и увеличивать его протяженность. Выявлены дополнительные признаки сходства апокампа, сформированного при низких давлениях и наблюдаемыми в природе переходными световыми явлениями, наблюдаемыми в верхних слоях атмосферы Земли.

Список цитируемой литературы

1. Lu X., Naidis G.V., Laroussi M., Reuter S., Graves D.B., Ostrikov K. A non-equilibrium diffuse discharge in atmospheric pressure air // Phys. Rep. 2016. Vol. 630. № 4. P. 1.
2. Winter J., Brandenburg R., Weltmann K.-D. Atmospheric pressure plasma jets: an overview of devices and new directions // Plasma Sources Sci. Technol. 2015. Vol. 24. № 10. P. 064001.
3. Ehlbeck J., Schnabel U., Polak M., Winter J., von Woedtke T., Brandenburg R., von dem Hagen T., Weltmann K.-D. Perspective: The physics, diagnostics, and applications of atmospheric pressure low temperature plasma sources used in plasma medicine // J. Phys. D. 2011. Vol. 44. № 12. P. 013002.
4. Plasma for BioDecontamination, Medicine and Food Security / NATO Science for Peace and Security Series A: Chemistry and Biology / Ed. by Machala Z., Hensel K., Akishev Yu. 2012. V. XVII. Springer Science+Business Media B.V.: Springer Netherlands. 2012. 479 p.

5 Скакун В.С., Панарин В.А., Печеницин Д.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. Формирование апокампического разряда в условиях атмосферного давления // Известия вузов. Физика. 2016. Т. 59. № 5. С. 92.

6. Соснин Э.А., Скакун В.С., Панарин В.А., Печеницин Д.С., Тарасенко В.Ф., Бакшт Е.Х. Феномен апокампического разряда // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 103. № 12. С. 857.

7. Sosnin E.A., Baksht E.H., Panarin V.A., Skakun V.S., Tarasenko V.F. Ministarters and mini blue jets in air and nitrogen at a pulse-periodic discharge in a laboratory experiment // JETP Lett. 2017. Vol. 105. № 10. P. 641.

8. Sosnin E.A., Panarin V.A., Skakun V.S., Baksht E.Kh., Tarasenko V.F. Dynamics of apokamp-type atmospheric pressure plasma jets / Eur. Phys. J. D. 2017. Vol. 71. № 2. P. 25.

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 атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 10. С. 855–858.

10. Sosnin E.A., Naidis G.V., Tarasenko V.S., Skakun V.S., Panarin V.A., Babaeva N.A., Baksht E.Kh., **Kuznetsov V.S.** Apokamps produced by repetitive discharges in air // Physics of Plasmas. 2018. Vol. 25. №. 8. 083513.

11. Бекряев В.И. Некоторые вопросы физики облаков и активных воздействий на них. учебное пособие // СПб.: Изд-во РГГМУ. 2009. 96 с.

12 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. Vol. 115. № A7. A00E42.

13. 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.

14. 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.

15. Панарин А.А., Скакун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. Лабораторная демонстрация в воздухе красных и голубых диффузных мини-струй // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 3. С. 243.

16. 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. Atmosph. Solar-Terrestrial Phys. 2015. Vol. 134. № 10. P. 78.

17. Yair Y., Takahashi Y., Yaniv R., Ebert U., Goto Y. A study of the possibility of sprites in the atmospheres of other planets // J. Geophys. Res. 2009. Vol. 114. № E0.E09002.

18. Sentman D.D. // ISUAL workshop, Natl. Chen-Kung Univ., Tainan City, Taiwan. 2004.

19. Chanrion O., Neubert T., Mogensen A., Yair Y., Stendel M., Singh R., Siingh, D. Profuse activity of blue electrical discharges at the tops of thunderstorms // Geophys. Res. Lett. 2017. Vol. 44. № 1. P. 496–503.

20. Horwell C.J., Sargent P., Andronico D., Lo Castro M.D., Tomatis M., Hillman S.E., Michnowicz S.A.K., Fubini B. The iron-catalysed surface reactivity and health-pertinent physical characteristics of explosive volcanic ash from Mt. Etna, Italy // J. Appl. Volcanology. 2017. Vol. 6. № 1. P. 16.

21. Kozyrev A.V., Kozhevnikov V.Y., Kokovin A.O., Panarin V.A., Semeniuk N.S., Sitnikov A.G. Electric Field Mechanism of Thin Plasma Jet Formation in an Open Atmospheric Discharge // Russ Phys J. 2020. Vol. 62. №. 11. P. 2020-2023.

22. Э.А. Соснин, Е.Х. Бакшт, **В.С. Кузнецов** Лабораторное моделирование голубых струй с помощью апокампического разряда в герцовом диапазоне частот // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32, № 7. С. 585-590.

23. Xian Y., Lu X., Wu S., Chu P.K., Pan Y. Are all atmospheric pressure cold plasma jets electrically driven? // Applied Physics Letters. 2012. Vol. 100. № 12. P. 123702.

Список дополнительной литературы

1*. Соснин Э.А., Найдис Г.В., Тарасенко В.Ф., Скакун В.С., Панарин В.А., Бабаева Н.Ю. О физической природе апокампического разряда // ЖЭТФ. 2017. Т. 152. № 5(11). С. 1081-1087. (Sosnin E.A., Naidis G.V., Tarasenko V.F., Skakun V.S., Panarin V.A., Babaeva N.Yu. On the Physical Nature of Apokampic Discharge // Journal of Experimental and Theoretical Physics. 2017. Vol. 125, №. 5. P. 920–925.)

2*. Соснин Э.А., Андреев М.В., Диденко М.В., Панарин В.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф. Профили интенсивности излучения на различных этапах формирования апокампического разряда // Теплофизика высоких температур. 2018.

Vol. 56. № 6. С. 911-918. (Sosnin E.A., Andreev M.V., Didenko M.V., Panarin V.A., Skakun V.S., Tarasenko V.F. Radiation Intensity Profiles at Different Stages of the Formation of Apokamp Discharge // High Temperature. 2018. – Vol. 56. №. 6. – P. 837–842.).

Список публикаций по теме научно-квалификационной работы

Статьи в журналах, включенных в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты научно-квалификационной работ, и в журналах, индексируемых Web of Science и Scopus:

1. **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. № 3. С. 311-317.

В переводной версии журнала

Kuznetsov V.S., Sosnin E.A., Panarin V.A., Skakun V.S., Tarasenko V.F. The Influence of Molecular Gas on the Apokamp Discharge Formation // Optics and Spectroscopy. 2018. Vol. 125 № 3. P. 324–330.

2. Соснин Э.А., Панарин В.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Козырев А.В., Кожевников В.Ю., Ситников А.Г., Коковин А.О., **Кузнецов В.С.** Апокампиический разряд: условия образования и механизмы формирования // Известия высших учебных заведений. Физика. 2019. Т. 62. № 7 (739). С. 182-190.

В переводной версии журнала

Sosnin E.A., Panarin V.A., Skakun V.S., Tarasenko V.F., Kozyrev A.V., Kozhevnikov V.Y., Sitnikov A.G., Kokovin A.O., **Kuznetsov V.S.** Apokampic Discharge: Formation Conditions and Mechanisms // Russian Physics Journal. 2019. Vol. 62. № 7. P. 1289-1297.

3. **Кузнецов В.С.**, Соснин Э.А., Панарин В.А., Скакун В.С., Печеницин Д.С., Тарасенко В.Ф. Наблюдение стримерных корон, предшествующих формированию апокампиического разряда // Известия высших учебных заведений. Физика. 2019. Т. 62. № 6 (738). С. 64-67.

В переводной версии журнала

Kuznetsov V.S., Sosnin E.A., Panarin V.A., Skakun V.S., Pechenitsyn D.S., Tarasenko V.F. Observation of Streamer Coronas Preceding the Formation of an Apokampic Discharge // Russian Physics Journal. 2019. Vol. 62. № 6. P. 992-995.

4. Соснин Э.А., Бакшт Е.Х., **Кузнецов В.С.**, Панарин В.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф. Лабораторное моделирование голубых струй с помощью апокампического разряда в герцовом диапазоне частот // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 7. С. 585-590.

В переводной версии журнала

Sosnin E.A., Baksht E.K., **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 // Atmospheric and Oceanic Optics. 2019. Vol. 32. № 6. P. 710–715.

5. **Кузнецов В.С.**, Тарасенко В.Ф., Панарин В.А., Скакун В.С., Соснин Э.А., Бакшт Е.Х. Начальная стадия формирования диффузных струй при импульсном разряде в неоднородном электрическом поле // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 5. С. 414-418.

В переводной версии журнала

Kuznetsov V.S., Tarasenko V.F., Panarin V.A., Skakun V.S., Sosnin E.A., Baksht E.K. The Initial Stage of Diffuse Jet Formation in a Pulsed Discharge with a Non-Uniform Electric Field in Air // Atmospheric and Oceanic Optics. 2019. Vol. 32 № 5. P. 607–611.

6. Соснин Э.А., **Кузнецов В.С.**, Панарин В.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Ивлев Г.А., Козлов А.В. Формирование окислов азота в лабораторном разряде, имитирующем голубые струи // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 12. С. 958–961.

7. 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 атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 3. С. 227-231.

В переводной версии журнала

Sosnin E.A., **Kuznetsov V.S.**, Panarin V.A., Skakun V.S., Tarasenko V. F. Laboratory Simulation of the Effect of Volcanic Material on the Formation of Transient Phenomena Near the Boundary between the Middle and Lower Atmosphere // Atmospheric and Oceanic Optics. 2020. Vol. 33. № 4. P. 419–423.

9. 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 атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 2 (385). С. 148-151.

10. Sosnin E.A., Tarasenko V.F., Skakun V.S., Panarin V.A., Baksht E.K., **Kuznetsov V.S.**, Naidis G.V., Babaeva N.Y. Apokamps produced by repetitive discharges in air // Physics of Plasmas. 2018. Vol. 25. № 8. P. 083513.

11. Baksht E., Skakun V., Tarasenko V., Sosnin E., Panarin V., **Kuznetsov V.** The Influence of Frequency and Voltage to Apokamp Discharge Dynamics at Moderate Pressures // 20th International Symposium on High-Current Electronics (ISHCE). 2018 P. 176-178.

12. **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 // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1499. 012016.

13. Tarasenko V.F., **Kuznetsov V.S.**, Panarin V.A., Skakun V.S., Sosnin, E.A. Whether and how the vapors of Al, Cu, Fe, and W influence the dynamics of apokamps // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1499. 012051.

Публикации не связанные с тематикой научно-квалификационной работы:

14. **Кузнецов В.С.**, Соснин Э.А., Панарин В.А., Скакун В.С., Печеницин Д.С., Тарасенко В.Ф. Наблюдение стримерных корон, предшествующих формированию апокампиического разряда // Известия высших учебных заведений. Физика. 2019. Т. 62. № 6 (738). С. 64-67.

В переводной версии журнала

Kuznetsov V.S., Sosnin E.A., Panarin V.A., Skakun V.S., Pechenitsyn D.S., Tarasenko V.F. Observation of Streamer Coronas Preceding the Formation of an Apokampic Discharge // Russian Physics Journal. 2019. Vol. 62. № 6. P. 992-995.

15. **Кузнецов В.С.**, Тарасенко В.Ф., Соснин Э.А. Об импульсных режимах светящейся области короны // Известия высших учебных заведений. Физика. 2019. Т. 62. № 5 (737). С. 149-154.

В переводной версии журнала

Kuznetsov V.S., Tarasenko V.F., Sosnin E.A. On Pulsed Modes of the Glowing Corona Region // Russian Physics Journal. 2019. Vol. 62. № 5. P. 893-899.