

ФАНО 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 (диссертации) на тему:

**«Транзиентные оптические явления, инициируемые потенциальным каналом импульсного разряда в воздухе, азоте, гелии и аргоне»**

Направление подготовки: 03.06.01 Физика и астрономия

Профиль подготовки (специальность): 01.04.05 – оптика

Аспирант



(подпись)

(Панарин Виктор Александрович)

Научный руководитель:

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

Томск - 2018

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** В 2016 г. в лаборатории оптических излучений Института сильноточной электроники СО РАН было открыто новое явление – образование протяженных световых струй в местах изгиба потенциального канала импульсно-периодического разряда [1\*]. Сами струи были названы апокампами (от греч. *από* – «от» и *καμπή* – «изгиб», «поворот»), а режим разряда, в котором они образуются – апокампическим разрядом. Внешний вид явления показан ниже:

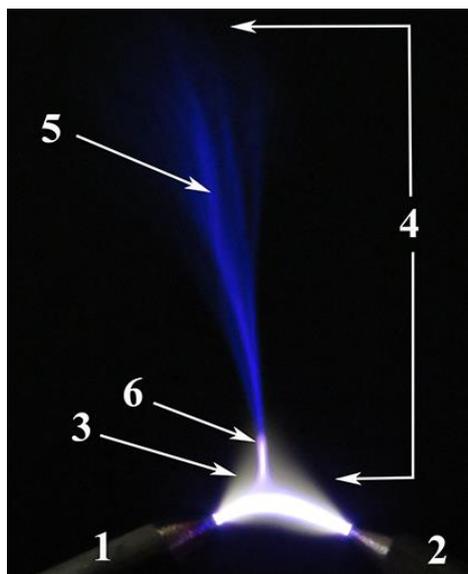


Рис. 1. Внешний вид апокампического разряда при нормальных условиях в воздухе: 1, 2 – электроды; 3 – тепловое «гало». Апокамп (4) включает в себя область диффузной световой струи (5) и яркий отросток (6). Размер кадра по вертикали 4.3 см. Электрод 1 является высоковольтным, электрод 2 находится под плавающим потенциалом

Из проведенного нами анализа научной литературы по физике газового разряда следовала новизна явления, т.е. обнаружение апокампического разряда по существу стало открытием нового **объекта исследований** – световых явлений, инициируемых потенциальным каналом высоковольтного импульсно-периодического разряда. Поэтому наше исследование имело интересную специфику: его актуальность не была напрямую и полностью задана работами предшественников. Актуальность исследований нового объекта исследований – апокампического разряда – во многом предстояло сформулировать в ходе нашей последующей работы.

С другой стороны, в литературе по физике плазмы было описано множество экспериментальных ситуаций, отличных от нашей, в которых были получены т.н. плазменные струи атмосферного давления (ПСАД). Сегодня они являются объектом многочисленных экспериментальных и теоретических исследований (см. ссылки в обзоре [2\*]) как фундаментального, так и прикладного характера.

Такие струи являются сложным физическим объектом – это светящиеся плазменные структуры, обладающие специфической динамикой. Для их изучения используют современные оптические методы высокоскоростной визуализации с временным разрешением от единиц микросекунд до нескольких наносекунд. С их помощью было показано, что наблюдаемые визуально плазменные струи, по существу, являются дискретными, состоящими в микросекундном диапазоне времени из т.н. плазменных пульс [2\*] – светящихся следов от распространения волн ионизации. Специфика явления – его *ско-*

*ротечность* и дискретность, накладывает свой отпечаток на методы его исследования. Помимо уже упомянутой визуализации быстропротекающих процессов, применяются оптическая эмиссионная спектроскопия, лазерно-индуцированная флуоресцентная спектроскопия и т.д. [2\*–5\*]. Весьма широко проводятся исследования по применению ПСАД в медицине, микробиологии, цитологии, модифицировании материалов и т.д. [3\*, 6\*]. Отсюда следовала и логика работы, и её предмет.

**Предметом настоящей научно-квалификационной работы (диссертации)** является накопление и систематизация фактов и закономерностей формирования феномена, методы и методики измерения, качественные модели процессов и аналоги феномена в природе.

Изучение этих вопросов с одной стороны позволит классифицировать апокамп в ряду других известных источников плазменных струй, а с другой стороны, выявить свойства феномена, актуальные для постановки новых научных и практических задач.

Таким образом актуальность исследований в нашем случае раскрывалась постепенно, по мере того, как мы продвигались в изучении апокампа. Например, как будет показано далее, в ходе исследований было доказано сходство плазменных струй в режиме разряда с апокампом и известными в атмосферной оптике феноменами голубых струй и стартеров (от англ. «blue jets» и «blue starters», соответственно). Поскольку для такого рода явлений существует стандартное международное обозначение – транзиентные световые явления (от англ. «transient luminous events») [7\*–9\*], то по существу в настоящей работе речь идёт об лабораторном моделировании этих оптических явлений. Это же обусловило выбор названия научно-квалификационной работы.

**Цель научно-квалификационной работы (диссертации)** – выявление природы транзиентных световых явлений (ТСЯ), инициируемых потенциальным каналом импульсного разряда.

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

1. Выявить условия устойчивого образования транзиентных световых явлений, инициируемых потенциальным каналом импульсного разряда.
2. Разработать и/или адаптировать оптические методы и методики для измерения параметров ТСЯ, инициируемых потенциальным каналом импульсного разряда.
3. Установить закономерности развития транзиентных световых явлений, инициируемых потенциальным каналом импульсного разряда.
4. Сформулировать гипотезы относительно природы ТСЯ.
5. Выявить аналоги феномена в природе.

**Методы исследования и подходы.** Для выявления условий устойчивого образования транзиентных световых явлений были созданы экспериментальные установки, обеспечивающие:

– различные амплитудно-временные характеристики импульсов (частота, фронт, длительность) высокого напряжения, включая режим с заданным количеством пробоев газоразрядного промежутка;

– зажигание разряда в различных газовых средах при давлениях от атмосферы и ниже.

Для получения достоверных экспресс-данных о форме плазменных струй использовалась многократная фиксация явления с помощью цифровой камеры HiSpec 1 (Fastec Imaging) с минимальной длительностью экспозиции 2 мкс и цифровой фотокамеры Canon PowerShot SX60 HS, обеспечивающая покадровую съёмку объектов с экспозицией не ниже 0.125 с.

Для регистрации образования и развития явления с разрешением, достаточным для получения заключений о его динамике и характерных морфологических и динамических свойствах использовали оптическую визуализацию с помощью камеры высокого временного разрешения HSFC-PRO (PCO AG) с временным разрешением до 3 нс, синхронизованную с различными моментами времени от начала пробоя газоразрядного промежутка. Кроме того, для регистрации временного хода излучения в ультрафиолетовом диапазоне спектра (200-400 нм) использовали фотодиод PD025 (Photek) с временем нарастания переходной характеристики  $\sim 100$  пс.

Для регистрации спектральных параметров излучения и определения состава продуктов распада плазмы апокампического разряда использовались стандартные методы спектроскопии (эмиссионная, абсорбционная, ИК-Фурье спектроскопия).

Для моделирования процесса развития плазменной струи в воздухе при нормальных условиях использовалась стримерная модель, в которой стример стартует от заряженной сферы, распределение температуры вдоль оси распространения стримера задаётся по экспоненциальному закону, а ширина зоны прогрева могла варьироваться.

Для определения механизмов, отвечающих за изменение цвета ТСЯ при уменьшении давления от 1 атм до 0.01 Торр использовались как упомянутые спектральные методы, так и теоретические оценки соотношения интенсивностей (интегрированных за период времени, значительно больший времени жизни излучающих частиц) второй и первой положительной систем молекул  $N_2$ .

Для обеспечения экспериментов использовались стандартные типы оптического, электроизмерительного и вакуумного оборудования и соответствующие материалы (спектрометры, насосы, вакуумные посты, оптические световоды, мультиметры, осциллографы, генераторы задержанных импульсов).

#### **Научные положения, на основе результатов исследования:**

1. Канал импульсно-периодического разряда служит источником визуально наблюдаемых световых струй, названных апокампами, при выполнении следующих условий: 1) на один из электродов подаются импульсы напряжения положительной полярности; 2) частота повторения импульсов напряжения составляет единицы-десятки кГц; 3) канал разряда имеет естественный или принудительный изгиб; 4) оба электрода и канал разряда находятся под потенциалом в несколько киловольт относительно “земли”.

2. В нормальных условиях в воздухе спектр апокампа содержит полосы  $N_2(C^3\Pi_u - B^3\Pi_g)$ ,  $N_2^+(B^2\Sigma^+_u - X^2\Sigma^+_g)$ ,  $N_2(B^3\Pi_g - A^3\Pi_u)$  и богаче, чем спектр коронного разряда. В смесях аргона с воздухом эмиссионные спектры дополнительно содержат линии

Ar как в отростке, так и в диффузной струе. В смесях гелия с воздухом основной вклад в эмиссию диффузной струи вносят полосы  $N_2$  и  $N_2^+$ , а в отростке – линии и полосы He,  $N_2$ ,  $N_2^+$ , O и OH.

3. В воздухе, при низких давлениях плазменные струи в режиме с апокампом обладают признаками транзитных световых явлений средней атмосферы – голубых стартеров и струй. Оба феномена: 1) формируются только при положительной полярности напряжения; 2) обладают сходными – по диапазону ( $\lambda \sim 280\text{--}800$  нм) и структуре максимумов – спектрами люминесценции; 3) имеют сходную морфологию (состоят из двух частей, соответствующих отростку и стримерной области, угол раствора конуса свечения от  $12^\circ$  до  $20^\circ$ ); 4) самые длинные апокампы в экспериментах наблюдаются в диапазоне давлений (90–150 Торр), соответствующем высотам от 15 до 12 км возникновения и распространения голубых стартеров и струй; 5) усредненные значения скоростей распространения волн ионизации в апокампе (180 км/с) по порядку величины совпадают со скоростями распространения голубых струй в атмосфере Земли.

4. С уменьшением давления в диапазоне давлений воздуха от 200 до 1 Торр, что соответствует изменению стартовых высот транзитных световых явлений в земной атмосфере с 10 до 40 км возрастает интенсивность всех полос, увеличивается вклад в синюю часть спектра за счет полосы  $N_2^+(B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+)$ , вклад в красную и оранжевую части спектра увеличивается за счет полосы  $N_2(B^3\Pi_g \rightarrow A^3\Pi_u)$ , а соотношение второй положительной к первой положительной систем азота 2P/1P снижается. Описанная динамика спектров излучения согласуется со стримерной моделью явления.

#### **Достоверность и обоснованность научных положений и других результатов работы:**

1. Достоверность **первого** научного положения подтверждается близкой к 100% воспроизводимостью найденного феномена в указанных условиях. Всего за время проведения научных исследований феномена накоплено более 20000 фотографий, демонстрирующих его воспроизводимость.

2. Достоверность **второго** научного положения обусловлена использованием стандартных методов спектromетрии и использования спектрометра, достаточного для разрешения линий He,  $N_2$ ,  $N_2^+$ , O, OH и Ar (рабочий диапазон длин волн 200-1100 нм, спектральная полуширина аппаратной функции  $\sim 1.33$  нм); совпадением значений длин волн определяемых линий с известными спектральными данными NIST Atomic Spectra Database [10\*], включая пропорциональное соотношение между линиями второй положительной системы молекулярного азота.

3. Достоверность **третьего** научного положения:

– по части идентификации и сравнения спектров отвечает тем же критериям, что были перечислены в п. 2;

– по части применения оптического метода регистрации следов распространения волн ионизации в апокампе обеспечивается высоким временным разрешением ( $\sim 3$  нс/кадр) скоростной камеры; повторяемостью результатов ( $\sim 80\%$ ) измерений скорости волны ионизации; близостью (по порядку величины) измеренных значений скорости

волн ионизации в воздухе при нормальных условиях с величинами, измеренными в [11\*];

– по части сопоставления параметров плазменных струй в режиме с апокампом с параметрами голубых струй и стартеров обеспечивается совпадением систематизированных данных наземных и космических наблюдений за ними (см., например, данные [8\*, 9\*]).

4. Достоверность **четвёртого** научного положения отвечает тем же критериям, что были перечислены в п. 2. Кроме того, полученные экспериментальные данные находятся в согласии с данными, полученными в т.ч. с помощью пакета BOLSIG+ (для расчета транспортных коэффициентов электронов и констант скоростей, необходимых для моделирования газовых разрядов в рамках гидродинамических моделей), хорошо зарекомендовавшего себя в других работах, например, в [12].

Все измерения проводились с помощью современной калиброванной аппаратуры.

#### **Новизна полученных результатов:**

1. Обнаружено явление апокампического разряда и выявлены условия его образования в воздухе, азоте и аргоне (2016-2017 гг.).

2. Установлен спектральный состав элементов апокампического разряда (канал разряда, отросток, область диффузной струи) в воздухе, азоте, аргоне и гелии (2016-2017 гг.).

3. Доказано сходство плазменных струй, формируемых в режиме апокампического разряда, и ТСЯ средней атмосферы – голубых стартеров и струй (2016-2017 гг.).

4. Предложен способ получения плазменной струи (патент RU № 2633705, приоритет от 20.06.2016 г.).

5. Установлен состав продуктов распада плазмы апокампического разряда в воздухе при нормальных условиях (2016-2017).

#### **Научная ценность:**

1. Открыт феномен апокампического разряда, расширяющих номенклатуру световых явлений, существенный для прогресса атмосферной оптики и физики газового разряда.

2. Определены условия устойчивого образования транзиентных световых явлений (апокампов) на изгибе потенциального канала импульсно-периодического разряда, что обеспечивает его воспроизводимость для любых исследовательских целей.

3. Полученные экспериментальные данные о пространственно-временных параметрах формирования апокампа и тепловыделении в канале разряда в воздухе при нормальных условиях свидетельствуют в пользу применимости стримерной модели для описания явления. Эти данные были использованы в построении первой качественной теоретической модели явления (выполненной Г.В. Найдисом и Н.Ю. Бабаевой), согласно которой развитие положительного стримера становится возможным благодаря тому, что газ вблизи канала разряда нагрет предшествующими разрядными импульсами настолько, что приведенное поле (отношение электрического поля к концентрации ча-

стиц газа), определяющее скорость ионизационных процессов, оказывается существенно превышающим значение приведенного электрического поля в холодном газе.

4. Создана экспериментальная установка, которая позволяет моделировать в лабораторных условиях транзиентные световые явления средней атмосферы, такие как голубые стартеры и струи.

5. Полученные экспериментальные данные о пространственно-временных параметрах формирования апокампа позволили сделать вывод о том, что апокамп обладает спектральными и морфологическими характеристиками, присущими голубым струям и стартерам, наблюдаемым атмосфере Земли. Сформулировано пять признаков сходства этих явлений (в отличие от других работ, где занимались лабораторным моделированием транзиентов, используя тлеющий разряд в полой катодной трубке и стримерные разряды с острия). Тем самым прояснена природа указанных атмосферных явлений.

6. Предложена гипотеза о том, что добавка электроотрицательного газа стабилизирует плазменную струю в режиме с апокампом. Гипотеза подтверждена экспериментально для указанных условий, что побуждает к постановке новых исследовательских задач по уточнению её границы применимости.

7. Установлено, что химическим маркером прогрева, достаточного для появления апокампа в воздухе при нормальных условиях, служит запуск термохимических механизмов образования  $\text{NO}_2$ .

#### **Практическая значимость:**

1. Предложенный способ получения плазменной струи упрощает конструкцию источника, позволяет получать плазменные струи атмосферного давления в воздухе без принудительной прокачки воздуха и снижает расход газа на порядок в средах, содержащих смеси легкоионизируемых газов с электроотрицательными газами.

2. Определён спектральный состав излучения апокампа при атмосферном давлении в воздухе, азоте и гелии; при давлениях от 10 Торр до 1 атм – для воздуха и азота. Эта система фактов требует отражения в учебной литературе в части, касающейся физики атмосферы и физики газового разряда, а также соответствующей экспериментальной техники.

3. Созданная установка для изучения особенностей формирования апокампиического разряда за первые несколько тысяч пробоев между электродами позволяет делать качественные выводы о динамике развития явления без использования техники высокоскоростной оптической визуализации.

4. Предложенный способ построения профилей интенсивности излучения апокампиического разряда позволяет качественно судить о сопровождающих его процессах тепловыделения.

#### **Внедрение результатов и предложения по их использованию**

Результаты научно-квалификационной работы (диссертации) использованы:

1. В проекте, поддержанном грантом РФФИ № 14-29-00052 «Создание новых технологий модификации, упрочнения и очистки поверхности металлов и диэлектриков им-

пульсной плазмой разрядов атмосферного давления, формируемых за счёт убегających электронов» (2014-2016 гг.).

2. Для иллюстрации решения прямой и обратной задач познания в учебных кейсах курса лекций «Методология эксперимента» (2017-2018 гг.) в Национальном исследовательском Томском государственном университете.

3. При прочтении лекций в школе физики и материаловедения Далянского национального университета (г. Далянь, КНР) (2017 г.).

4. Для проектирования реактора по плазмохимической обработке семян продуктами распада плазмы апокампического разряда, который использовался при выполнении государственного задания ИСЭ СО РАН по теме № 13.1.4.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты научно-квалификационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных и российских конференциях: International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (October 2-7, 2016) Tomsk, Russia; XIII Международная конференция по импульсным лазерам и применениям лазеров AMPL-2017 (10-15 сентября, 2017), Томск, Россия; Всероссийская конференция «Физика низкотемпературной плазмы» с международным участием ФНТП-2017 (5-9 июня, 2017), Казань, Россия; XIII Международная конференция «Газоразрядная плазма и её применение» (5-7 сентября, 2017) Новосибирск, Россия.

**Личный вклад автора.** Представленные в научно-квалификационной работе (диссертации) результаты получены лично автором, а также при совместной работе с соавторами публикаций: *Е.Х. Бакишом, Н.Ю. Бабаевой, Г.В. Найдисом, Д.С. Печенициным, В.С. Скакуном, Э.А. Сосниным, В.Ф. Тарасенко, М.В. Тригубом и Г.С. Евтушенко*. Постановка задач осуществлялась научным руководителем *Э.А. Сосниным* при участии автора научно-квалификационной работы.

Создание экспериментальных установок и проведение экспериментов, относящихся к определению условий устойчивого образования транзиентных световых явлений на изгибе потенциального канала импульсно-периодического разряда, определения их спектрального состава и морфологии, проводилось автором при участии *В.С. Скакуна, Д.В. Печеницина и Э.А. Соснина*.

Создание экспериментального стенда для визуализации процесса формирования транзиентных световых явлений на изгибе потенциального канала импульсно-периодического разряда, проводилось автором при участии *В.С. Скакуна, Е.Х. Бакиша* и – в дополнительной серии экспериментов – с сотрудником Института оптики атмосферы *М.В. Тригубом*.

Создание и апробация оптической методики построения профилей интенсивности излучения от апокампического разряда проводилось совместно с *Э.А. Сосниным, В.С. Скакуном* и сотрудником лаборатории газовых лазеров ИСЭ СО РАН *М.В. Андреевым*.

На основании экспериментальных данных и предложенной соискателем гипотезы сотрудником института высоких температур РАН *Г.В. Найдисом* и *Н.Ю. Бабаевой* было

проведено моделирование процесса формирования положительного стримера в воздухе в условиях, близких к условиям в апогамическом разряде.

Обработка и анализ исходных экспериментальных данных, обсуждение и интерпретация результатов проводились совместно с соавторами публикаций.

**Публикации.** По теме научно-квалификационной работы (диссертации) опубликовано 32 научных работы, в том числе 18 статей в журналах, включенных в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты научно-квалификационной работы (диссертации) на соискание учёной степени кандидата наук (из них 14 статей в научных журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus, 1 коллективная монография (соавтор в одной главе) и 9 публикаций в сборниках материалов международных и всероссийских научных конференций, 2 патента.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дано обоснование актуальности работы; обозначена её цель, определён круг задач; сформулированы научные положения, на основе результатов исследования, отмечены их новизна, научная ценность и практическая значимость.

В **первой главе** предложена краткая классификация существующих традиционных источников плазменных струй атмосферного давления (пп. 1.2–1.4) и применяемая в этой сравнительно новой отрасли знаний терминология (п. 1.1). ПСАД представляют собой весьма сложный объект для исследований, который характеризуется:

– скоротечностью отдельных актов образования и прохождения волн ионизации, о чём в научной литературе говорят, как о транзитных явлениях;

– обилием и разнообразием плазмохимических реакций как в зоне образования плазмы, так и в зоне распространения плазменной струи.

Отмечено, что для изучения процессов формирования плазменных струй важное место занимает оптический подход. Он используется для визуализации явления, и, как следствие – для выяснения его морфологических черт, динамики развития плазменных струй в различных газовых средах при различных условиях возбуждения. Также с его помощью определяют спектральный состав излучения плазменных струй и характерные параметры плазмы (электронную температуру и концентрацию электронов), а полученные в результате данные используются для построения теоретических моделей ПСАД [2\*–6\*].

Во **второй главе** дано описание экспериментальных установок и методик измерения. Поскольку плазменная струя является скоротечным (транзитным) событием, то экспериментальная аппаратура и методы исследований должны обеспечивать: 1) собственно получение устойчивых плазменных струй в широком диапазоне электрофизических параметров возбуждения (п. 2.1); регистрацию образования и развитие явления с разрешением, достаточным для получения однозначных заключений о его динамике (п. 2.2); возможности для варьирования состава газовых сред плазменных струй и оперативного мониторинга их спектральных характеристик (п. 2.3). Кроме того, в ряде ис-

следовательских ситуаций необходимо знать состав продуктов распада плазмы разряда. Краткие сведения о средствах мониторинга этих продуктов даны в п. 2.4.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований феномена апокампа.

В п. 3.1. выявлены условия формирования ТСЯ в воздухе при атмосферном давлении. Показано, что канал разряда становится источником визуально наблюдаемых световых струй, если: на один из электродов были поданы импульсы напряжения положительной полярности с частотой повторения – единицы-десятки килогерц; канал разряда имел естественный или принудительный изгиб; оба электрода и канал разряда находились под потенциалом в несколько киловольт относительно “земли” (рис. 2). Установлено, что на появление ТСЯ от канала разряда критически влияет амплитуда напряжения, а форма и материал электродов иницирующего разряда могут быть разными (рис. 2).

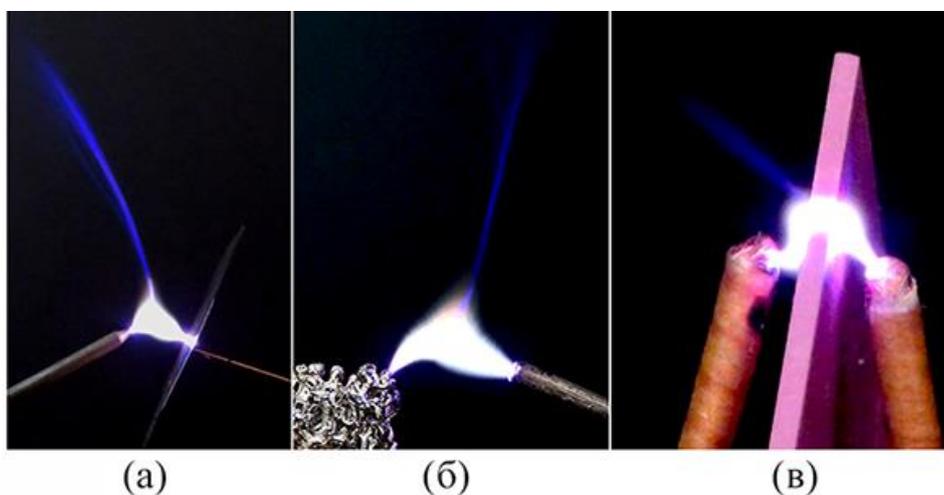


Рис. 2. Формирование апокампа в нормальных условиях в разрядном промежутке в геометрии «острие–плоскость» (а), «острие–пористая металлокерамика» (б) и «острие–острие» с принудительным изгибом канала разряда (в). Высоковольтный электрод расположен слева в случае (а) и справа для случаев (б, в). Противоположный электрод в каждом из этих случаев находится под плавающим потенциалом

Сделан прогноз, что при снижении давления газа место старта ТСЯ от канала разряда станет случайным или передвинется к высоковольтному электроду. Этот прогноз впоследствии оправдался (глава 4). Полученные результаты стали основой для патента способ получения плазменной струи [21].

В п. 3.2. даны результаты исследования динамики формирования апокампов в воздухе при нормальных условиях оптическими методами (профилометрия интенсивностей излучения и визуализация быстропотекающих световых явлений). Эксперименты с высокоскоростной камерой ICCD–HSFC-PRO, синхронизованной с различными моментами времени от пробоя промежутка (схема синхронизации показана на рис. 3) выявили, что апокамп формируется вблизи максимума импульса напряжения на промежутке.

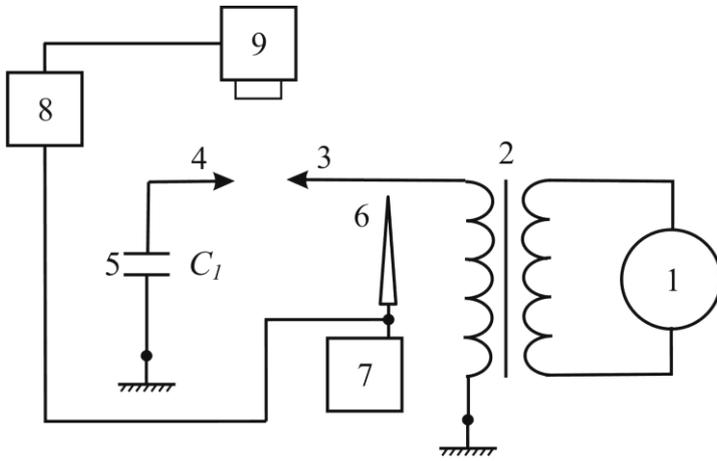


Рис. 3. Блок-схема экспериментальной установки: 1 – генератор импульсов напряжения; 2 – повышающий трансформатор; 3 – высоковольтный электрод положительной полярности; 4 – электрод, имеющий ёмкостную развязку 5 с землей ( $C_1 = 10$  пФ), 6 – высоковольтный делитель, расположенный вблизи электрода 3; 7 – осциллограф; 8 – генератор запуска ICCD-камеры; 9 – ICCD-камера, направленная на разрядный промежуток [9]

Формирование одиночного апокампа иллюстрируется рис. 4. На первом кадре процесс ещё не начался (рис. 4, а). Яркое пятно, расположенное почти в центре всех кадров (рис. 4, б-г) – это место появления яркого плазменного образования, которому отвечает место образования отростка на интегральных фотографиях, представленных ранее (рис. 1, 2). Далее от отростка отрываются светящиеся образования, которые в научной литературе называются «плазменными пулями» [2\*]. В ряде случаев отросток служил источником не одной, а нескольких плазменных пуль, что визуально наблюдалось как множественный апокамп. Совокупность этих «пуль» при высоких частотах следования импульсов напряжения и приводит к визуальному наблюдению апокампа – протяженной световой струи. По смещению плазменной пули между кадрами (рис. 4) плазменной пули оценили, как  $v \sim 215$  км/с. Это по порядку величины совпадает с данными [11\*].

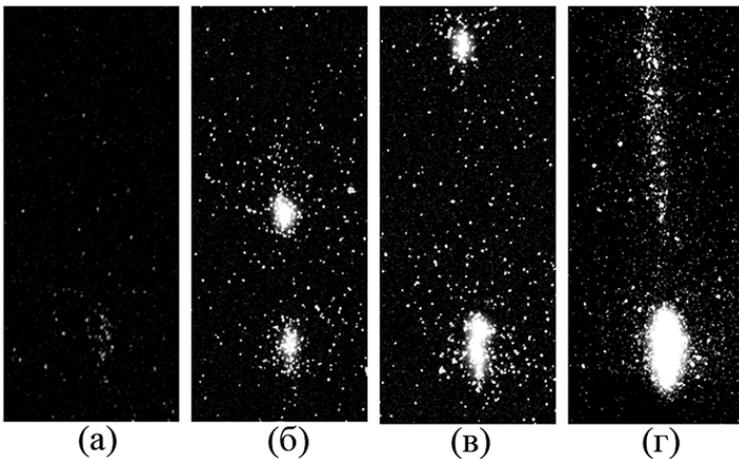


Рис. 4. Динамика развития апокампа: а, б, в – экспозиция 3 нс, пауза между кадрами – 17 нс; г – интегральный кадр с накоплением 120 нс. Размер кадра по вертикали – 26.27 мм [19]

Далее, варьируя величину  $U_p$ , и измеряя скорости движения пуль определили, что: по мере удаления от отростка оценочная скорость пули вначале растёт, затем падает, а величины скоростей лежат в диапазоне от 100 до 220 км/ч [2, 9, 14]. При таких величинах  $v$  как у нас вклад конвекции в развитие апокампа на начальных стадиях его формирования (первые 100 нс) пренебрежимо мал. Тем не менее, прямые измерения показывают, что имеется сильное тепловыделение в канале разряда.

Чтобы лучше понять роль тепловыделения был поставлен эксперимент, в котором плазма разряда формируется за считанное количество пробоев  $N$ , после чего источник

импульсов выключается. Выставляя разные величины  $N$  можно было *визуально* наблюдать переход от одной стадии разряда к другой (рис. 5).

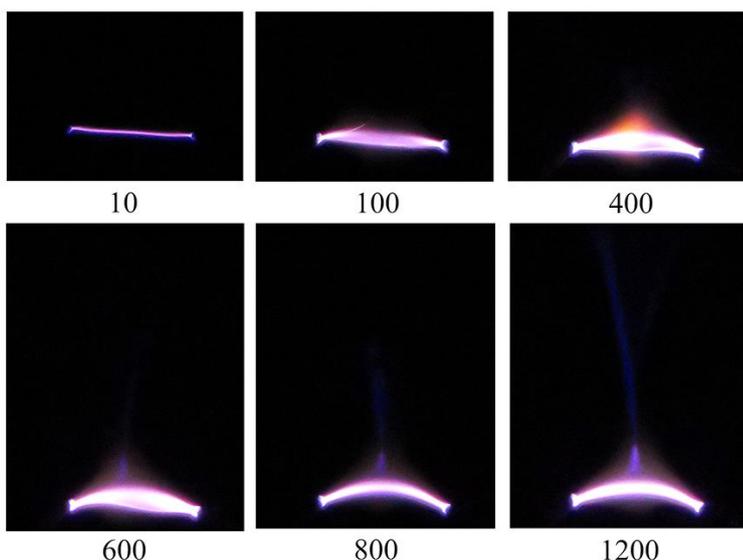


Рис. 5. Этапы формирования апокампического разряда в воздухе ( $C_1 = 3.2$  пФ,  $U_p = 11.5$  кВ,  $f = 54$  кГц). Числа показывают количество пробоев между электродами. Высота кадра 1.28 см для верхнего ряда и 2.35 см для нижнего. Фотографии камерой Canon PowerShot SX60 HS в режиме серийной съёмки с экспозицией не ниже 0.125 с.

В результате показано, что апокампический разряд образуется постадийно: вначале ( $N < 50$ ) образуется искровой разряд; далее вокруг канала образуется гало, т.е. газ в канале нагревается настолько, что начинает вытесняться вовне; затем образуется отросток. И лишь после этого отросток становится источником апокампа (рис. 5).

Для ориентировочной оценки тепловыделения в апокампическом разряде полученные изображения (рис. 5) были подвергнуты профилированию по интенсивности. Сделанные оценки тепловыделения показывают, что для появления протяженного апокампа важную роль играет режим тепловыделения в канале разряда.

Полученные экспериментальные данные были использованы для теоретического моделирования апокампа [12] в предположении, что он представляет собой аналог положительного стримера. В модели рассматривалась только стадия образования (в области сильного электрического поля вблизи изгиба) и распространения, вдоль силовой линии поля, волны ионизации – стримера. Для моделирования:

1) Пространственное распределение поля было принято таким, какое создается положительно заряженной металлической сферой. Потенциал сферы взяли равным 10 кВ, а для радиуса сферы  $R_{sp}$  использовали два значения, 0.5 и 0.7 см. Эти величины поля вблизи поверхности сферы меньше значений, при которых может сформироваться стример в холодном воздухе. Т.е. предполагалось, что развитие стримера становится возможным благодаря тому, что газ вблизи канала разряда нагрет предшествующими разрядными импульсами настолько, что приведенное поле (отношение электрического поля к плотности газа), определяющее скорость ионизационных процессов, оказывается существенно превышающим значение в холодном газе.

2) Распределение температуры вдоль оси распространения стримера  $z$  было задано в виде  $T(z) = T_0 + (T_m - T_0) \cdot \exp[-(z/h)^2]$ , где  $T_0 = 300$  К. Для температуры  $T_m$  у поверхности

сферы, при  $z = 0$ , принято близкое к измеренному ранее в экспериментах значение  $T_m = 1200$  К для канала разряда [5]. Ширина зоны прогрева  $h$ , достигаемая к моменту времени  $t$ , оценивалась, как  $h = 2(\chi\tau_a)^{1/2}$ , где для коэффициента температуропроводности  $\chi$  принималось значение, усредненное по интервалу температур от  $T_0$  до  $T_m$ .

3) Использовали двумерная (осесимметричную) модель, включающая транспортные уравнения для концентраций заряженных частиц и уравнение Пуассона для напряженности электрического поля, учитывающая процесс образования электрон-ионных пар перед фронтом стримера при поглощении молекулами кислорода ионизирующего излучения, генерируемого в области фронта. В качестве начального условия было задано электрон-ионное облако малого размера вблизи поверхности сферы, имеющее форму распределения Гаусса с максимальной концентрацией  $10^{12}$  см $^{-3}$  на оси вблизи поверхности сферы и полушириной 0.02 см.

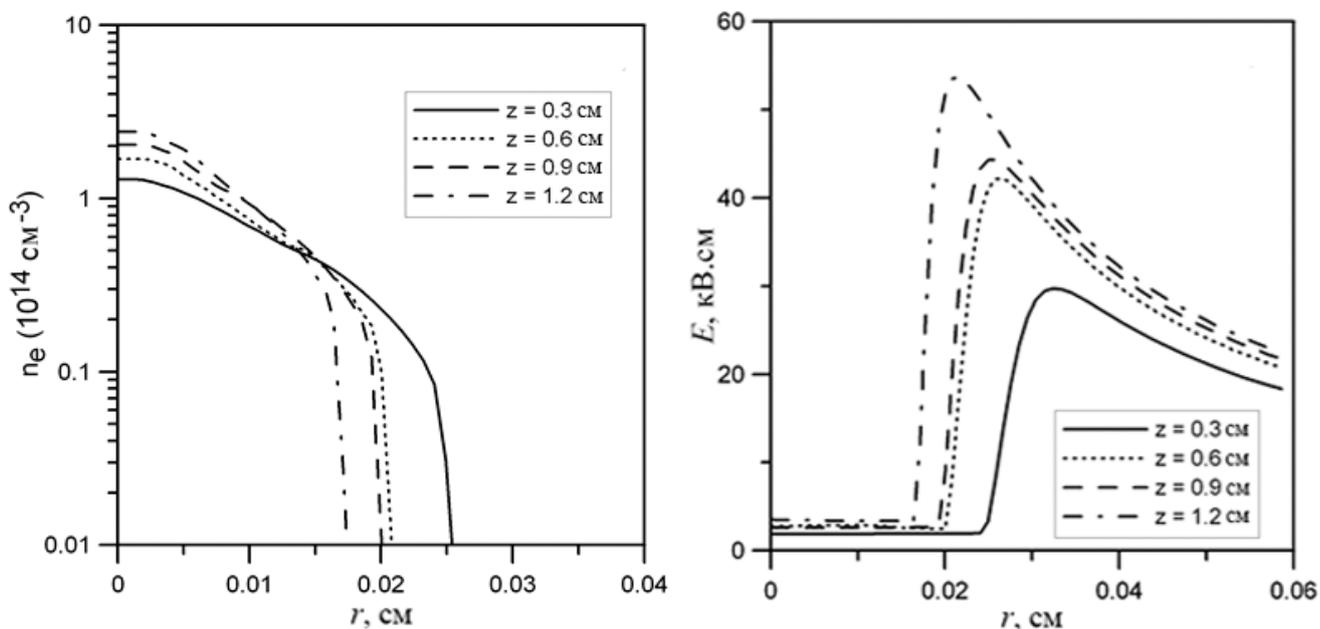


Рис. 8. Радиальные профили концентрации электронов (слева) и электрического поля (справа) в канале стримера

Были определены радиальные профили концентрации электронов и абсолютного значения электрического поля в нескольких сечениях стримерного канала, отвечающие длине стримера (расстоянию между фронтом и координатой  $z = 0$ ) 1.4 см, для  $h = 0.2$  см и  $R_{sp} = 0.5$  см (рис. 8). Также проводился расчёт величин скорости стримера (рис. 9). Рассчитанные таким образом характеристики стримера (скорость распространения, диаметр) находятся в разумном согласии с измеренными параметрами апокампа в воздухе атмосферного давления. Т.е. **область диффузной световой струи апокампа может быть описана стримерным механизмом.**

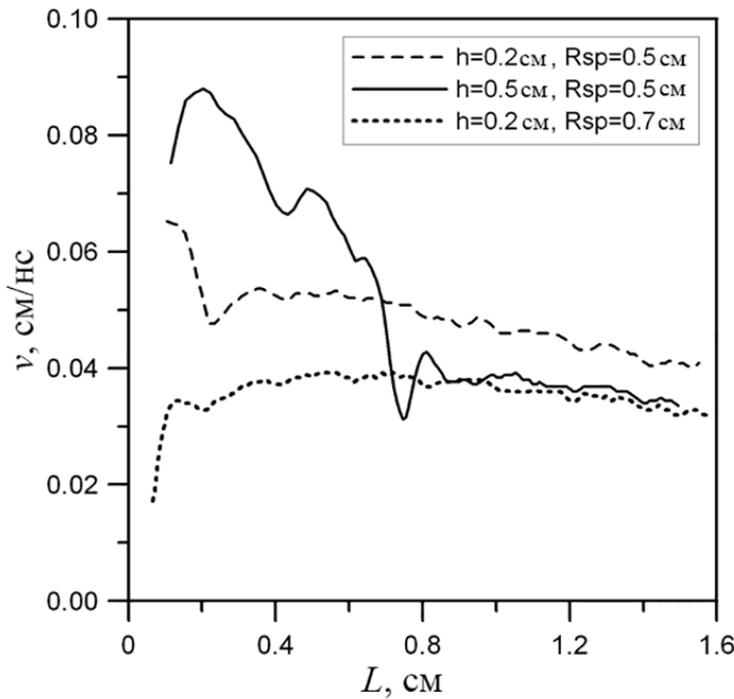


Рис. 9. Скорость стримера в зависимости от его длины ( $v(\times 10^4) = \text{км/сек}$ ,  $h$  – ширина зоны прогрева,  $R_{sp}$  – радиус положительно заряженной металлической сферы)

В п. 3.3 представлены экспериментальные данные об эмиссионных спектрах апокампического разряда в воздухе, гелии и аргоне, полученные на установках, показанных на рис. 10, а, б. Спектр апокампа в воздухе атмосферного давления (рис. 11) содержит полосы  $N_2(C^3\Pi_u - B^3\Pi_g)$ ,  $N_2^+(B^2\Sigma^+_u - X^2\Sigma^+_g)$ ,  $N_2(B^3\Pi_g - A^3\Pi_u)$ . То, что в УФ и видимой части спектра самым интенсивным является излучение второй положительной системы азота  $N_2(C^3\Pi_u - B^3\Pi_g)$ , означает, что температура электронов в этих условиях близка к оптимальной для заселения состояния  $N_2(C)$ .

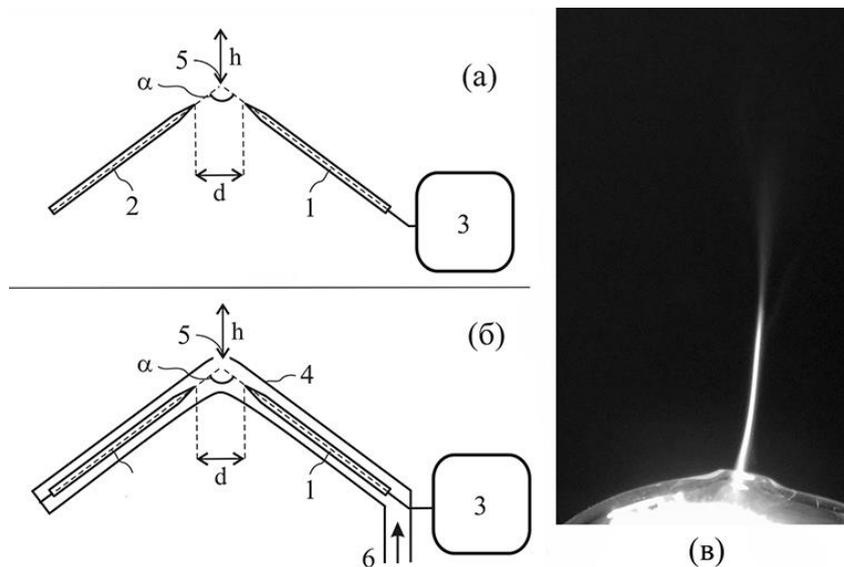


Рис. 10. Установки для изучения спектров (а, б) и фотография свечения апокампа в Ar,  $\alpha = 120^\circ$ ,  $f = 16 \text{ кГц}$ ,  $d = 12 \text{ мм}$ : 1 – высоковольтный электрод; 2 – электрод под плавающим потенциалом; 3 – источник питания; 4 – трубка из диэлектрика для работы в различных газовых средах; 5 – место образования апокампа; 6 – патрубок для нагнетания газов; 7 – диэлектрическая пластина

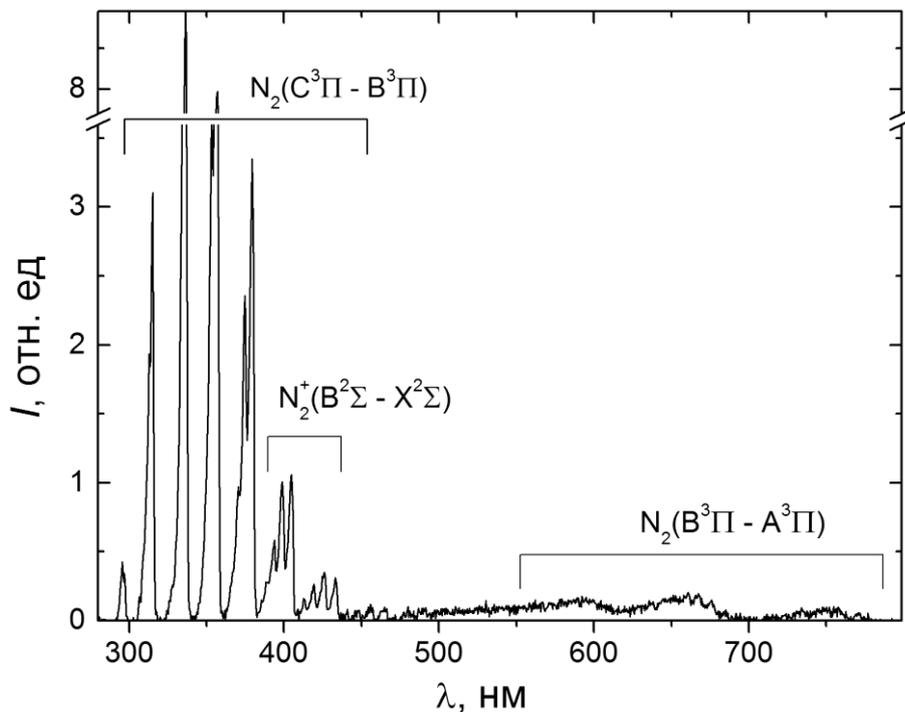


Рис. 11. Спектр излучения апокампа в воздухе на высоте  $h = 5$  мм над электродами,  $\alpha = 120^\circ$ ,  $f = 16$  кГц

Подача аргона и гелия на межэлектродный промежуток в условиях закрытого разряда приводила к трансформации спектров апокампа. Установлено, что:

1. Излучение молекул  $N_2$  и  $N_2^+$  обусловлено в основном переходами из нижних колебательных уровней электронных состояний, что легко объяснить тем, что при атмосферном давлении происходит быстрая колебательная релаксация.

2. В спектре апокампа в гелии основными излучающими компонентами являются He,  $N_2$ ,  $N_2^+$ , а также O и OH (рис. 12).

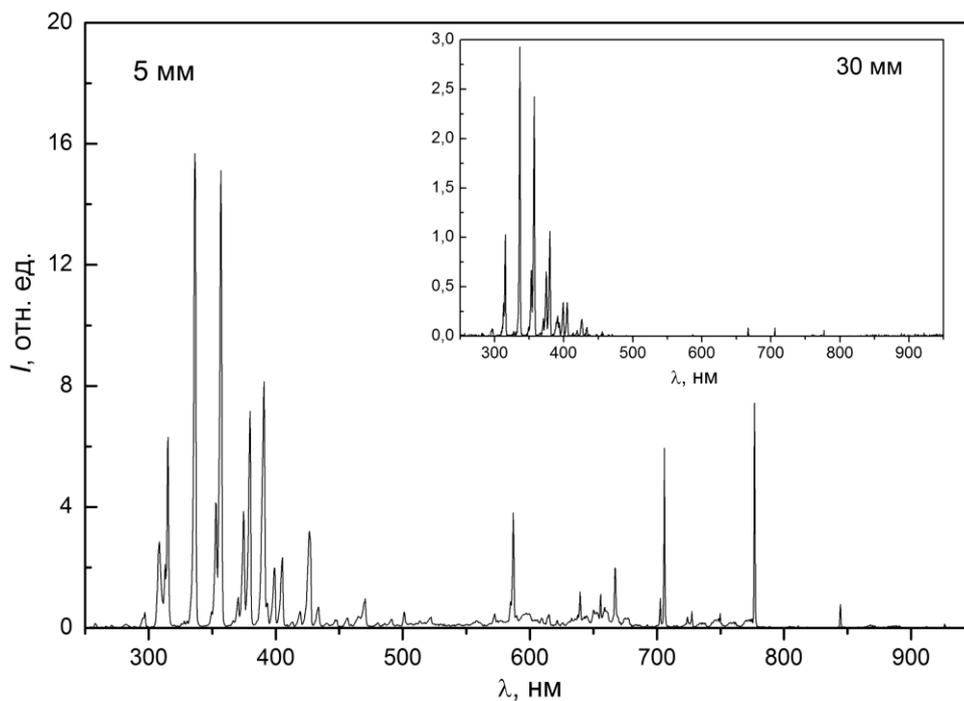


Рис. 12. Спектр излучения апокампа в He на различных высотах  $h$ ,  $\alpha = 120^\circ$ ,  $f = 16$  кГц

В тонком отростке, выходящем из сопла (рис. 3.25, в) различимы все вышеперечисленные компоненты, а в продолжающей его диффузной части основной вклад в эмиссию вносят полосы  $N_2$  и  $N_2^+$ .

В длинноволновой части спектра регистрируются линии атома He (переходы  $3d - 2p$  и  $3s - 2p$ ), Ne (переходы  $3p - 2s$ ) а также линии кислорода на переходах  $3p^5P - 3s^5S^o$  и  $3p^3P - 3s^3S^o$ . На всех расстояниях от сопла была зафиксирована сильная эмиссия молекулярных полос  $N_2(C^3\Pi_u - B^3\Pi_g)$  и  $N_2^+(B^2\Sigma^+_u - X^2\Sigma^+_g)$ . Кроме того, в окрестности сопла идентифицирована слабая полоса молекулы OH ( $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$ ). Появление последней обусловлено наличием влаги в окружающем апокампа пространстве и действием реакции диссоциативного возбуждения  $e + H_2O \rightarrow OH(A^2\Sigma^+) + H + e$ .

3. В спектре апокампа в аргоне, в выходящем из сопла тонком отростке (рис. 10, в) идентифицируются преимущественно компоненты Ar и  $N_2$ . В диффузной части плазменной струи основной вклад в эмиссию вносят переходы Ar,  $N_2$  и  $N_2^+$ . В длинноволновой части спектра регистрируются линии атома Ar (переходы (переходы  $4p - 4s$ )). В коротковолновой части спектра, как и в гелии, на всех расстояниях от основного разряда зафиксирована сильная эмиссия молекулярных полос  $N_2(C^3\Pi_u - B^3\Pi_g)$  и  $N_2^+(B^2\Sigma^+_u - X^2\Sigma^+_g)$ , но по мере удаления от сопла её интенсивность становится в несколько раз выше, чем в случае с He.

На основе полученных данных предложена гипотеза о том, что в формировании диффузной струи апокампа в гелии и аргоне важную роль играет окружающий воздух.

В п. 3.4 экспериментально показано, для формирования апокампоческого разряда (при переходе от коронного к искровому и далее – к искрому) в воздухе при нормальных условиях сопровождается запуском термохимических механизмов образования  $NO_2$ .

**Четвёртая глава** посвящена изучению возможностей использования апокампоческого разряда для реконструкции некоторых типов транзиентов в лабораторных условиях. Предпосылкой для постановки этой задачи является внешнее сходство между апокампом (рис. 1) и транзиентными световыми явлениями средней атмосферы Земли (рис. 13).

В п. 4.1 дан краткий обзор исследований транзиентных световых явлений средней атмосферы Земли – голубых струй, стартеров и спрайтов. Исследования ведутся в трёх направлениях: наблюдения ТСЯ (а также их классификация), построение теоретических моделей ТСЯ и эксперименты с лабораторными разрядами. Собраны литературные данные о спектральных и пространственно-временных (динамических) характеристиках указанных транзиентов.

В п. 4.2 на основе анализа результатов лабораторного моделирования транзиентных световых явлений в средней атмосфере Земли (эксперименты с объёмными, стримерными и потенциальными разрядами) сделан вывод о том, что наиболее перспективным для указанной цели является использование потенциальных систем, в которых все разрядные события происходят в потенциальном поле относительно земли.

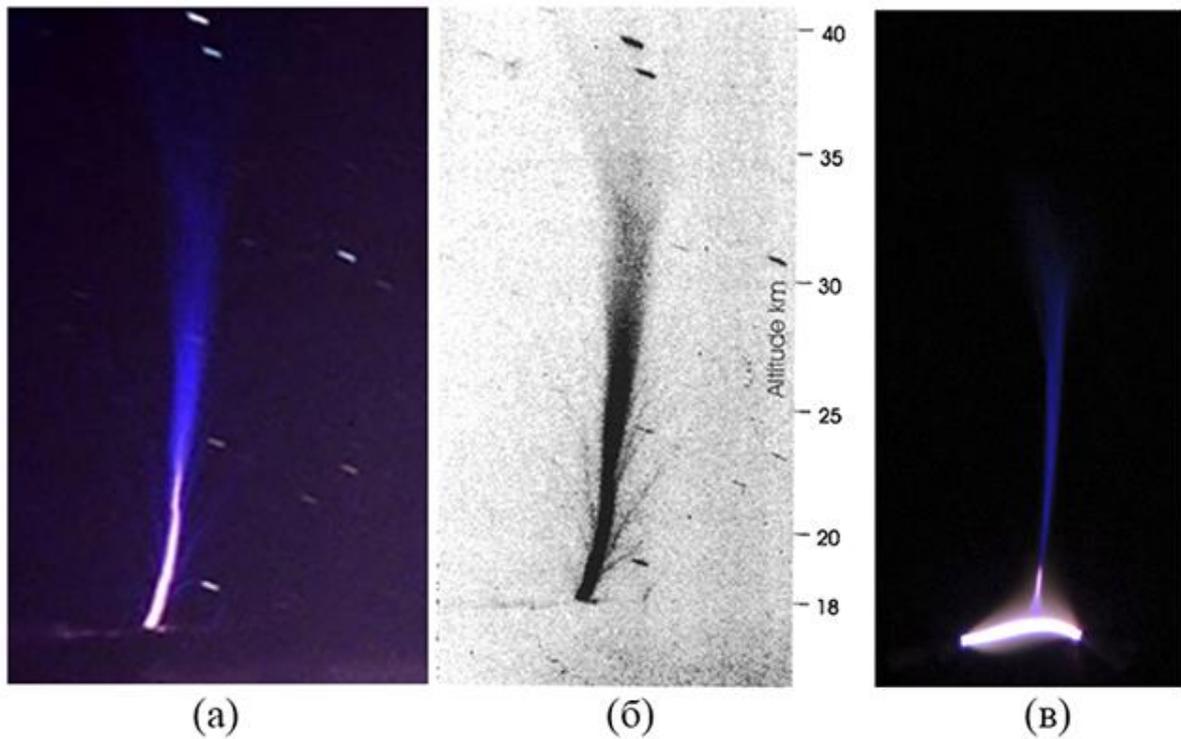


Рис. 13. Фрагмент фотографии голубой струи в природе (а), её укрупненное инвертированное изображение с указанием высот относительно уровня моря (б) [14\*] и апокампического разряда в воздухе при нормальных условиях (в)

В п. 4.3 представлены результаты экспериментальных исследований оптических свойств транзитных световых явлений, инициируемых потенциальным каналом импульсного разряда при пониженных давлениях воздуха. Для этого была создана установка, показанная на рис. 14. Она представляет собой разрядную камеру для осуществления апокампического разряда при пониженных давлениях, характерных для природных транзиентов, а также для регистрации оптических характеристик явления в этих условиях.

Рис. 15, 16 демонстрируют влияние давления воздуха на форму и размер светящейся струи: область, в которой формируются протяженные стримеры в воздухе лежит в диапазоне давлений  $20 < p < 120$  Торр. В атмосфере Земли этому (ориентировочно) соответствуют высоты  $17 < h < 25$  км. Т.е. следы от прохождения волн ионизации, имеющие голубое свечение, возникают в экспериментальной установке в условиях, близких к условиям появления стартеров ( $\sim 17-18$  км). В то же время, если учитывать резкий рост длины отростка при снижении давления вплоть до 11 Торр, то можно говорить об условиях, в которых вместо сравнительно короткого стартера развивается голубая струя. В атмосфере голубые струи состоят из яркого канала (иногда ветвящегося на больших высотах) и сравнительно слабого свечения на его продолжении. Именно эту структуру мы наблюдаем в экспериментах при давлениях  $8 < p < 30$  Торр. Эти величины примерно соответствуют высотам от 20 до 30 км, т.е. тем, до которых поднимаются голубые струи в природе.

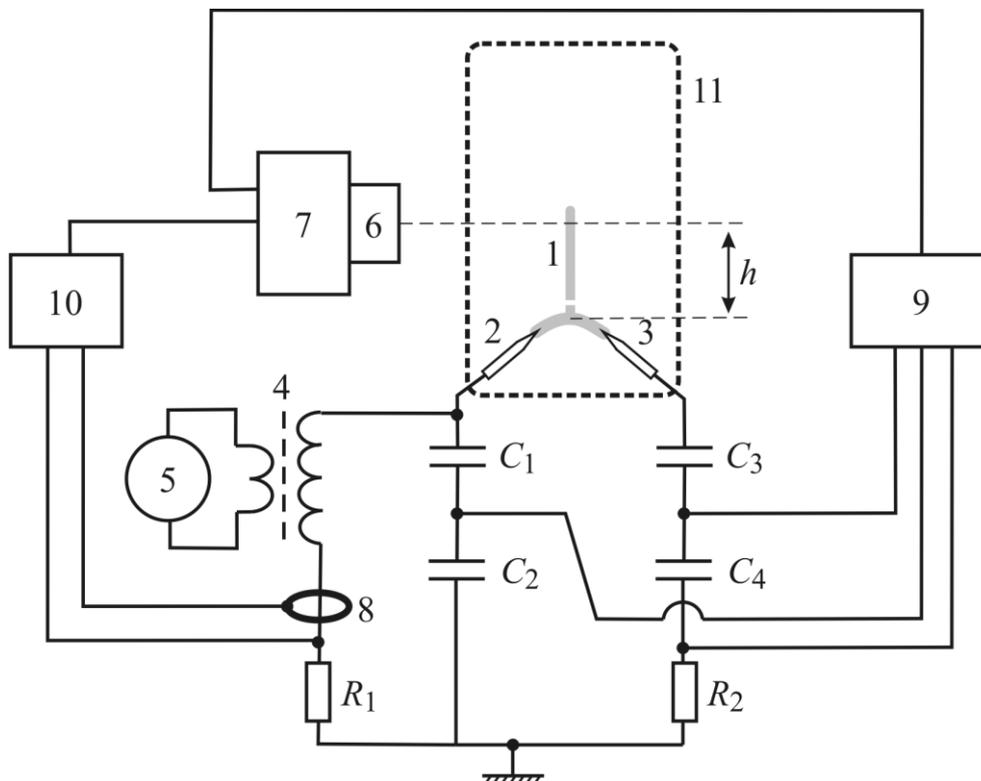


Рис. 14. Блок-схема установки для изучения морфологии импульсного разряда в режиме с апокампом: 1 – плазменная струя; 2, 3 – электроды; 4 – повышающий трансформатор; 5 – импульсный источник напряжения; 6 – коллиматор; 7 – высокоскоростная камера; 8 – пояс Роговского; 9 – осциллограф; 10 – преобразователь; 11 – кварцевая колба.  $C_1 = 1.65$  пФ,  $C_2 = 1.68$  нФ,  $C_3 = 1.65$  пФ,  $C_4 = 1.75$  нФ,  $R_1 = 3.62$  Ом,  $R_2 = 0.98$  Ом [10]

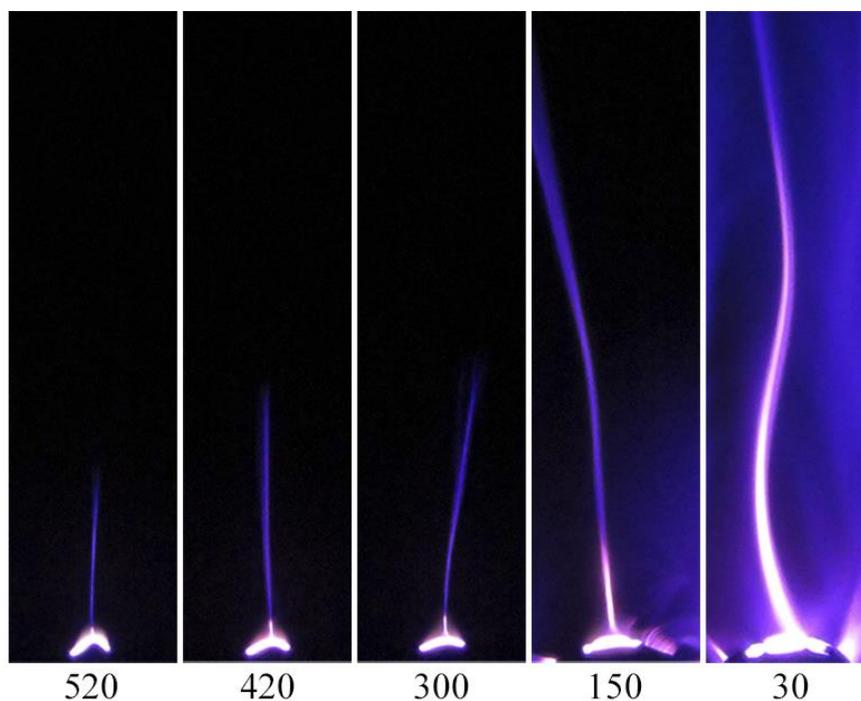


Рис. 15. Влияние давления воздуха на отросток и апокамп. Цифры показывают величину давления в Торр. Высота кадров – 18 см

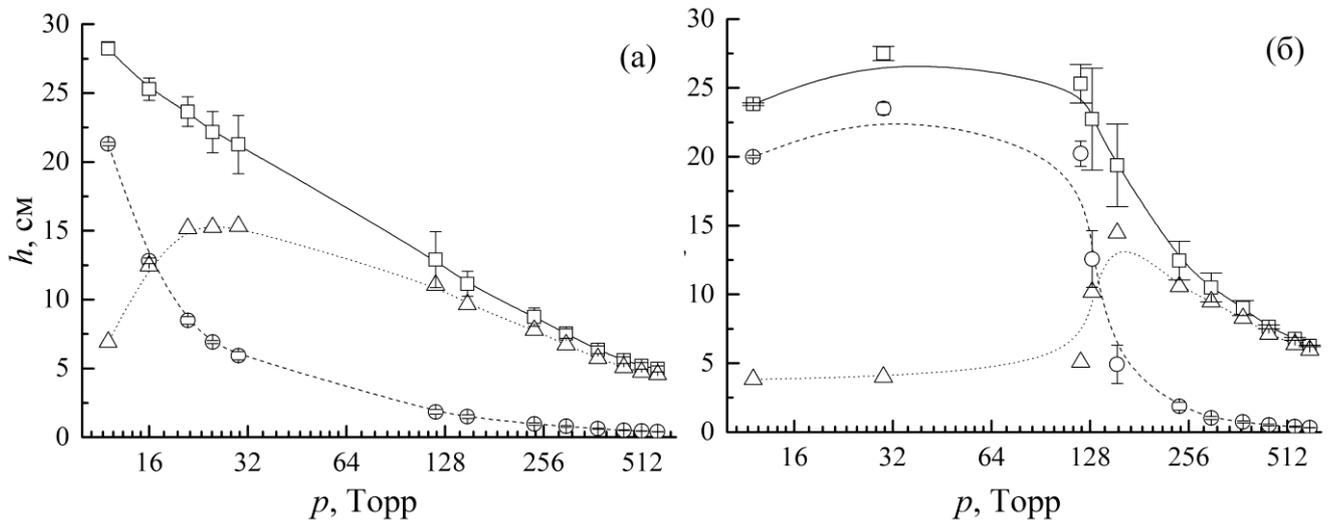


Рис. 16. Зависимость длины отростка  $l_s$  (○), стримера  $l_a$  (△) и полной длины апокампа  $l$  (□) от давления в воздухе (а) и азоте (б) при пиковом значении напряжения на высоковольтном электроде  $U_p \sim 8.5$  кВ

При замене воздуха на азот аналогичные закономерности для длин зависимости  $l_a$ ,  $l_s$  и  $l$  наблюдаются в диапазоне  $p > 120$  Торр, а при более низких давлениях рост указанных величин стабилизируется (рис. 16, б). Т.е. в азоте протяженные синие струи образуются при давлениях примерно на порядок больших, чем в воздухе. Это значит, что высоты (стартовые и распространения), характерные для синих струй и стартеров в атмосфере Земли, обеспечивает именно воздушная среда.

Не менее важным для сравнения экспериментальных и природных плазменных струй является сопоставление скоростей их распространения в характерном для них диапазоне давлений. Экспериментальная оценка скорости стримеров, стартующих от отростка на  $h \sim 17$  мм при различных напряжениях дали величины от 150 до 220 км/с. С учётом этого, а также принимая во внимание то, что в атмосфере Земли голубые струи распространяются в сильно неоднородной по давлению среде, можно сказать, что усредненные значения скоростей распространения «пуль» в наших экспериментах по порядку величины совпадают со скоростями распространения голубых струй в атмосфере Земли.

Спектральные исследования апокампа при различных величинах давления показали, визуально наблюдаемый цвет лабораторного транзиента зависит от соотношения интенсивности излучения полос  $2P N_2$  и красной компоненты первой положительной системы азота  $1P N_2$ . По рис. 17 видно, что при снижении давления интенсивность полос  $N_2(C^3\Pi_u - B^3\Pi_g)$ ,  $N_2^+(B^2\Sigma^+_u - X^2\Sigma^+_g)$ ,  $N_2(B^3\Pi_g - A^3\Pi_u)$  увеличивается, причём за счёт  $N_2^+(B^2\Sigma^+_u - X^2\Sigma^+_g)$  полосы увеличивается вклад в голубой и синей частях спектра, а за счёт  $N_2(B^3\Pi_g - A^3\Pi_u)$  – красной и оранжевой, что мы и наблюдаем визуально. Тогда были проведены экспериментальные измерения и численное моделирование отношения интенсивности полос  $2P/1P$ .

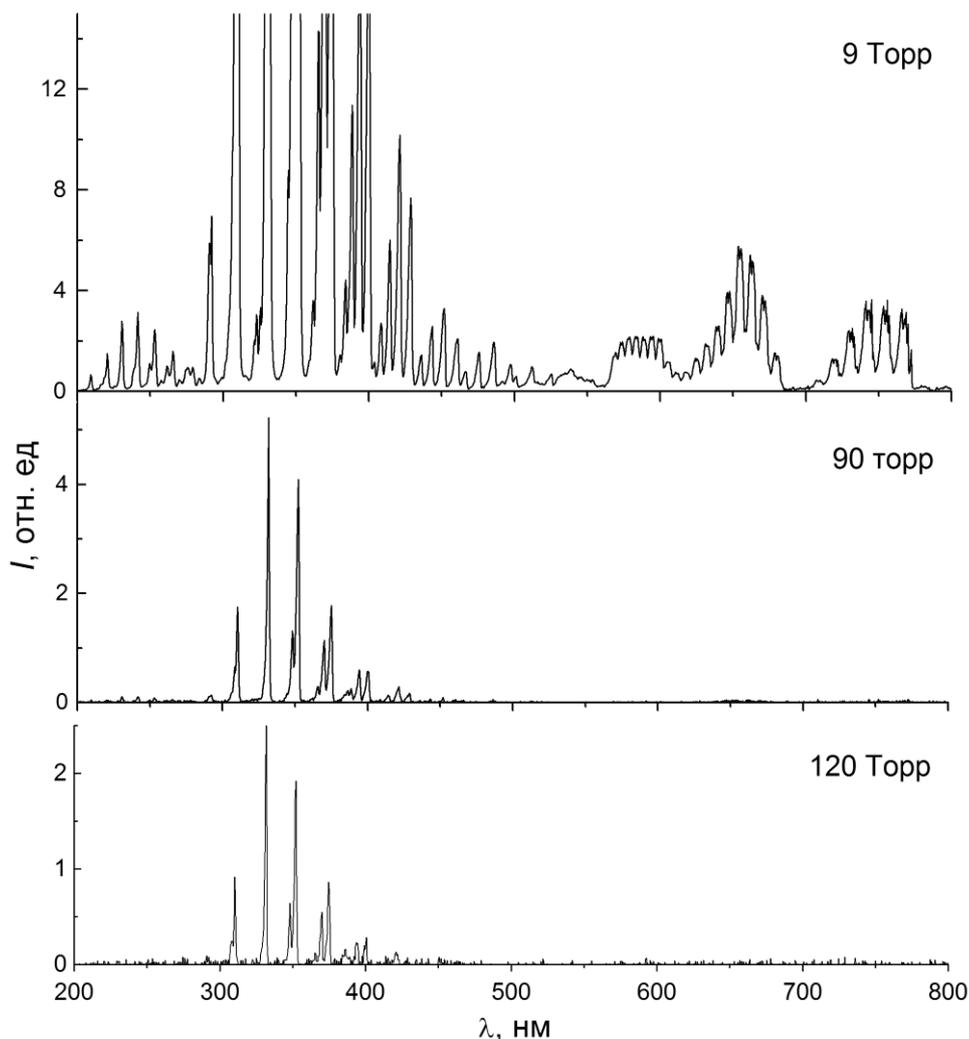


Рис. 17. Спектры излучения апокампа на высоте  $h = 50$  мм при давлении 9, 90 и 120 Торр и положительной полярности импульса напряжения.  $f = 50$  кГц

Теоретически соотношение интенсивностей (интегрированных за период времени значительно больший времени жизни излучающих частиц) второй и первой положительной систем молекул  $N_2$  было оценено в предположении, что молекулы  $N_2(C^3\Pi_u)$  возбуждаются главным образом электронным ударом. Полученный результат приведён на рис. 18. Здесь  $\xi$  – величина, которая в модели меняется от единицы (если доминирует канал тушения  $N_2(C^3\Pi_u) + O_2 \rightarrow N_2(B^3\Pi_g) + O_2$ ) до нуля (если доминирует канал  $N_2(C^3\Pi_u) + O_2 \rightarrow N_2(X^1\Sigma_u^+) + 2O$ ).

Из расчётов следует, что отношение  $2P/1P$  слабо зависит от давления при  $p < 0.08$  Торр, где для  $N_2(B^3\Pi_g)$ - и  $N_2(C^3\Pi_u)$ -состояний доминируют радиационные потери. При  $p > 11$  Торр оба этих состояния тушатся главным образом за счёт столкновений с молекулами воздуха. В промежуточном интервале давлений  $0.08 < p < 11$   $N_2(B^3\Pi_g)$ -состояние теряет энергию главным образом за счёт столкновительного тушения в то время как для  $N_2(C^3\Pi_u)$ -состояния доминируют радиационные потери, а отношение  $2P/1P$  увеличивается с ростом давления.

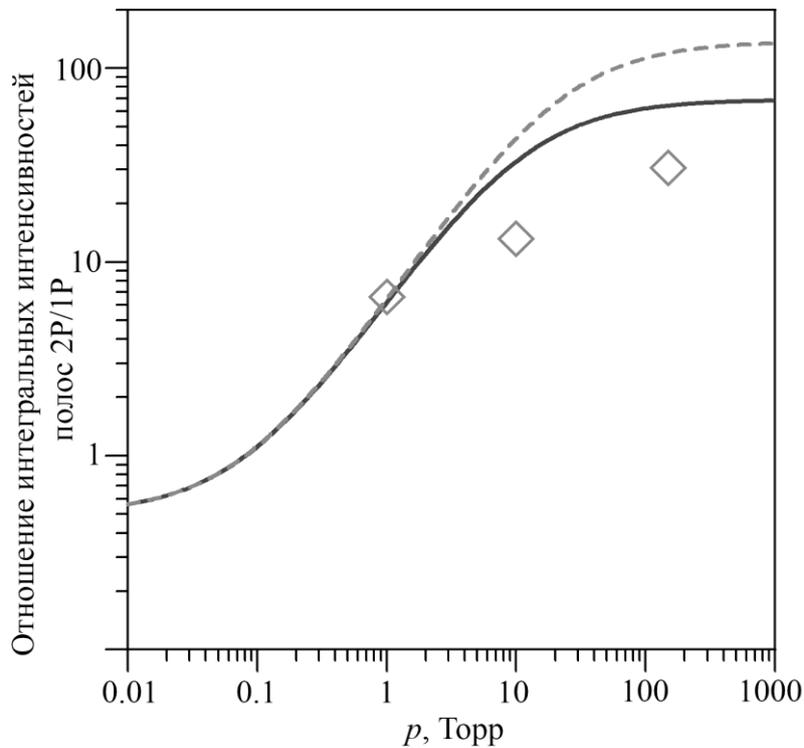


Рис. 18. Отношение интенсивностей полос 2P и 1P  $N_2$  от давления воздуха: символы – экспериментальные точки; линии – расчёт для  $\xi = 1$  (сплошная) and  $\xi = 0$  (пунктирная)

Таким образом и в эксперименте, и в расчётах (и в природе) изменение цвета транзиентов при изменении плотности воздуха (т.е. высоты) происходит аналогичным образом. Цвет струй и спрайтов изменяется от синего (на высотах ниже 40 км) до красного (на высотах выше 50 км). Переход происходит на высотах (40-50 км), соответствующих пониженному давлению около 1 Торр. Согласно современному пониманию этих явлений, все они связаны с распространением стримеров (спрайтов) или лидеров с опережающими их стримерными коронами (голубые и гигантские струи) [13\*]. Возбуждение излучающих состояний молекул воздуха в этих светящихся объектах происходит преимущественно в стримерных фронтах, как в апокампах.

**В заключении** сформулированы основные результаты научно-квалификационной работы (диссертации):

1. Открыт феномен апокампического разряда, расширяющий номенклатуру световых явлений атмосферной оптики и физики газового разряда.
2. Выявлены условия образования апокампов в воздухе при атмосферном давлении. Для этого необходимо, чтобы: на один из электродов были поданы импульсы напряжения положительной полярности с частотой повторения – единицы-десятки килогерц; канал разряда имел естественный или принудительный изгиб; оба электрода и канал разряда находились под потенциалом в несколько киловольт относительно “земли”. Установлено, что образование апокампов не зависит от формы и материала электродов иницирующего разряда, а на его появление критически влияет амплитуда напряжения.

3. Установлен спектральный состав элементов апокампического разряда (канал разряда, отросток, область диффузной струи) в воздухе, азоте, аргоне и гелии при атмосферном давлении.

4. Определена динамика процесса формирования апокампического разряда, и показано, что струи апокампа формируются как набор плазменных пульс, движущихся со скоростями от 100 до 220 км/ч, т.е. это скоротечный (транзиентный) процесс.

5. Показано, что для формирования стабильного апокампа в воздухе при нормальных условиях необходимо несколько тысяч пробоев газоразрядного промежутка. За это время канал разряда последовательно переходит от искровой стадии к диффузной, газ нагревается и около канала разряда образуется гало. На основании этого предложено описать апокампы как развитие стримера, которое становится возможным благодаря тому, что газ вблизи канала разряда нагрет предшествующими разрядными импульсами настолько, что приведенное поле (отношение электрического поля к плотности газа), определяющее скорость ионизационных процессов, оказывается существенно превышающим значение в холодном газе.

6. Экспериментально показано, что для формирования апокампического разряда необходима критическая величина прогрева газовой среды в разрядном промежутке. Химическим маркером прогрева, достаточного для формирования апокампа, служит запуск термохимических механизмов образования  $\text{NO}_2$ .

7. Установлено, что в воздухе, при низких давлениях плазменные струи в режиме с апокампом обладают признаками транзиентных световых явлений средней атмосферы – голубых стартеров и струй. Оба феномена: формируются только при положительной полярности напряжения; обладают сходными – по диапазону ( $\lambda \sim 280\text{--}800$  нм) и структуре максимумов – спектрами люминесценции; имеют сходную морфологию (состоят из двух частей, соответствующих отростку и стримерной области, угол раствора конуса свечения от  $12^\circ$  до  $20^\circ$ ); самые длинные апокампы в экспериментах наблюдаются в диапазоне давлений (90–150 Торр), соответствующем высотам от 15 до 12 км возникновения и распространения голубых стартеров и струй; усредненные значения скоростей распространения волн ионизации в апокампе (180 км/с) по порядку величины совпадают со скоростями распространения голубых струй в атмосфере Земли.

8. Установлено, что отношение интенсивностей излучения второй положительной системы азота к первой в апокампе с повышением давления увеличивается, что приводит к изменению цвета разряда, воспринимаемого визуально, с голубого на красный, что связано с изменением соотношения полос излучения  $2P/1P$   $\text{N}_2$ . Теоретические оценки отношения  $2P/1P$  показали, что: при  $p < 0.08$  Торр она слабо зависит от давления, где для  $\text{N}_2(\text{B}^3\Pi_g)$ - и  $\text{N}_2(\text{C}^3\Pi_u)$ -состояний доминируют радиационные потери; при  $p > 11$  Торр оба указанных состояния тушатся главным образом за счёт столкновений с молекулами воздуха; при  $0.08 < p < 11$  Торр  $\text{N}_2(\text{B}^3\Pi_g)$ -состояние теряет энергию главным образом за счёт столкновительного тушения в то время как для  $\text{N}_2(\text{C}^3\Pi_u)$ -состояния доминируют радиационные потери, и отношение  $S_2/S_1$  увеличивается с ростом давления.

9. Предложенный подход для лабораторного моделирования транзиентных световых явлений является базой для последующих исследований в этой области.

## СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1\*. Скакун В. С. Формирование апокампического разряда в условиях атмосферного давления / В. С. Скакун, В. А. Панарин, Д. С. Печеницин, Э. А. Соснин, В. Ф. Тарасенко // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2016. – Т. 59. – № 5. – С. 92-95.

2\*. Lu X. Reactive species in non-equilibrium atmospheric-pressure plasmas: Generation, transport, and biological effects / X. Lu, G. V. Naidis, M. Laroussi, S. Reuter, D. B. Graves, K. Ostrikov // Phys. Rep. – 2016. – Vol. 630. – No. 4. – P. 1–84.

3\*. Reuter S. Review on VUV to MIR absorption spectroscopy of atmospheric pressure plasma jets / S. Reuter, J. S. Sousa, G. D. Stancu, Hubertus van Helden J.-P. // Plasma Sources Sci. Technol. – 2015. – Vol. 24. – No. 8. – 054001.

4\*. Van Gessel A. F. H. Laser scattering on an atmospheric pressure plasma jet: disentangling rayleigh, raman and thomson scattering / A. F. H. Van Gessel, E. A. D. Carbone, P. J. Bruggeman, J. J. A. M. van der Mullen // Plasma Sources Sci. Technol. – 2012. – Vol. 21. – No. 1. – 15003.

5\*. Schulz-von der Gathen V. Spatially resolved diagnostics on a microscale atmospheric pressure plasma jet / V. Schulz-von der Gathen, L. Schaper, N. Knake, S. Reuter, K. Niemi, T. Gans // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2008. – Vol. 41. – No. 9. – 194004.

6\*. Laroussi M. Room-temperature atmospheric pressure plasma plume for biomedical applications / M. Laroussi, X. Lu // Appl. Phys. Lett. – 2005. – Vol. 87. – No. 11. – 113902.

7\*. Бекряев В. И. Молнии, спрайты и джеты. / В. И. Бекряев // СПб., Изд-во РГГМУ. – 2009. – 96 с.

8\*. Донченко В. А. Электрооптические явления в атмосфере: учебное пособие / В.А. Донченко, М.В. Кабанов, Б.В. Кауль, П.М. Нагорский, И.В. Самохвалов. – Томск: Изд-во НТЛ, 2015. – 316 с.

9\*. Siingh, D. Lightning and middle atmospheric discharges in the atmosphere / D. Siingh, R. P. Singh, S. Kumar, T. Dharmaraj, A. K. Singh, M. N. Patil, Singh Sh. // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. - 2015. - Vol. 134. - No. 11. - P. 78–101.

10\*. Ralchenko Yu. and NIST ASD Team NIST Atomic Spectra Database (version 3.1.5) / Yu. Ralchenko, A. E. Kramida, J. Reader // National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg. – 2008. <http://physics.nist.gov/asd3>.

11\*. Lacoste, D. A. Pure air–plasma bullets propagating inside microcapillaries and in ambient air / D. A. Lacoste, A. Bourdon, K. Kuribara, K. Urabe, S. Stauss, K. Terashima, // Plasma Sources Science and Technology. – 2014. – Vol. 23. – No. 6. – 2006.

12\*. Hagelaar G. J. M. Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models / G. J. M. Hagelaar, L. C. Pitchford // Plasma Sources Sci. Technol. – 2005. – Vol. 14. – No. 4. – P. 722–733.

13\*. Raizer Y. P. Streamer-and leader-like processes in the upper atmosphere: Models of red sprites and blue jets / Y. P. Raizer, G. M. Milikh, M. N. Shneider // J. Geophys. Res.: Space Phys. – 2010. – Vol. 115. – Issue A7. – A00E42 (9pp).

14\*. Wescott E. M. New evidence for the brightness and ionization of blue starters and blue jets / E. M. Wescott, D. Sentman, H. C. Stenbaek-Nielsen, P. Huet, M. J. Heavner, D. R. Moudry // J. Geophys. Res. – 2001. – Vol. 106. – No. A10. – P. 21549–21554.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)

*Статьи в журналах, включенных в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты научно-квалификационной работы (диссертации) на соискание ученой степени кандидата наук, и в журналах, индексируемых Web of Science и Scopus:*

1. Скакун В. С. Формирование апокампиического разряда в условиях атмосферного давления / В. С. Скакун, **В. А. Панарин**, Д. С. Печеницин, Э. А. Соснин, В. Ф. Тарасенко // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2016. – Т. 59. – № 5. – С. 92-95. – 0,38/0.2 п.л.

*в переводной версии журнала*

Skakun V. S. Formation of an apokampic discharge under atmospheric pressure conditions / V. S. Skakun, **V. A. Panarin**, D. S. Pechenitsyn, E. A. Sosnin, V. F. Tarasenko // Russian Physics Journal. – 2016. – V. 59. – № 5. – P. 707-711.

2. Соснин Э. А. Феномен апокампиического разряда / В. С. Скакун, Э. А. Соснин, **В. А. Панарин**, Д. С. Печеницин, В. Ф. Тарасенко, Е. Х. Бакшт // Письма в ЖЭТФ. – 2016. – Т. 103. – № 11-12. – С. 857-860. – 0,32/0,09 п.л.

*в переводной версии журнала*

Sosnin E. A. Phenomenon of apokamp discharge / E. A. Sosnin, V. S. Skakun, **V. A. Panarin**, D. S. Pechenitsin, V. F. Tarasenko, E. K. Baksht // Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters (JETP Letters). – 2016. – V. 103. – № 12. – P. 761-764. – DOI: 10.1134/S002136 4016120146.

3. Соснин Э. А. Источник плазменной струи атмосферного давления, формируемой в воздухе или азоте при возбуждении барьерным разрядом / Э. А. Соснин, **В. А. Панарин**, В. С. Скакун, В. Ф. Тарасенко, Д. С. Печеницин, В. С. Кузнецов // ЖТФ. – 2016. – Т. 86. – № 5. – С. 151-154. – 0,28/0.13 п.л.

*в переводной версии журнала*

Sosnin E. A. Source of an atmospheric-pressure plasma jet formed in air or nitrogen under barrier discharge excitation / E. A. Sosnin, **V. A. Panarin**, V. S. Skakun, V. F. Tarasenko, D. S. Pechenitsin, V. S. Kuznetsov // Technical Physics. – 2016. – V. 61. – № 5. – P. 789-792. – DOI: 10.1134/S10 63784216050224.

4. Соснин Э. А. 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 // Оптика атмосферы и океана. – 2016. – Т. 29. – № 10. – С. 855-858. – DOI: 10.15372/AOO2016. – 0,33/0,1 п.л.

5. Андреев М. В. Температурные характеристики апокампа - нового типа плазменной струи в воздухе атмосферного давления / М. В. Андреев, В. С. Кузнецов, В. С. Скакун, Э. А. Соснин, **В. А. Панарин**, В. Ф. Тарасенко // Прикладная физика. – 2016. – № 6. – С. 32-36. – 0,33/0,1 п.л.

6. Жданова О. С. Источник планарной плазменной струи атмосферного давления / О. С. Жданова, В. С. Кузнецов, **В. А. Панарин**, В. С. Скакун, Э. А. Соснин, В. Ф. Тарасенко // Прикладная физика. - 2016. - № 2. - С. 36-40. 0,34/0,11 п.л.

*в переводной версии журнала*

Zhdanova O. S. A Planar Source of Atmospheric-Pressure Plasma Jet / O. S. Zhdanova, V. S. Kuznetsov, **V. A. Panarin**, V. S. Skakun, E. A. Sosnin, V. F. Tarasenko // Plasma Physics Reports. – 2018. – V. 44. – № 1. – P. 153-156. – DOI: 10.1134/S1063780X18010166.

7. Naidis G. V. Dynamics and structure of nonthermal atmospheric-pressure air plasma jets: experiment and simulation / G. V. Naidis, E. A. Sosnin, **V. A. Panarin**, V. S. Skakun, V. F. Tarasenko // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2016. – V. 44. – № 12. – С. 3249-3253. – DOI: 10.1109/TPS.2016.2618943. – 0,75/0,19 п. л.

8. **Панарин В. А.** Лабораторная демонстрация в воздухе красных и голубых диффузных мини-струй / **В. А. Панарин**, В. С. Скакун, Э. А. Соснин, В. Ф. Тарасенко // Оптика атмосферы и океана. – 2017. – Т. 30. – № 3. – С. 243-252. – DOI: 10.15372/AOO20170310. – 0,33/0,1 п.л.

9. Sosnin E. A. Dynamics of apokamp-type atmospheric pressure plasma jets / E. A. Sosnin, V. A. Panarin, V. S. Skakun, E. K. Baksht, V. F. Tarasenko // The European Physical Journal D. – 2017. – V. 71. – № 2. – С. 25. – DOI: 10.1063/1.4981385. – 0,53/0,15 п.л.

10. Соснин Э. А. Мини стартеры и мини голубые струи в воздухе и азоте при импульсно-периодическом разряде в лабораторном эксперименте / Э. А. Соснин, Е. Х. Бакшт, **В. А. Панарин**, В. С. Скакун, В. Ф. Тарасенко // Письма в ЖЭТФ. – 2017. – Т. 105. – № 9-10. – С. 600-604. – DOI: 10.7868/S0370274X17100046. – 0,41/0,1 п.л.

*в переводной версии журнала*

Sosnin E. A. Ministarters and mini blue jets in air and nitrogen at a pulse-periodic discharge in a laboratory experiment / E. A. Sosnin, E. K. Baksht, **V. A. Panarin**, V. S. Skakun, V. F. Tarasenko // JETP Letters. – 2017. – V. 105. – № 10. – P. 641-645. – DOI: 10.1134/S0021364017100137.

11. **Панарин В. А.** Эмиссионные свойства апокампа атмосферного давления в воздухе, аргоне и гелии / **В. А. Панарин**, В. С. Скакун, Э. А. Соснин, В. Ф. Тарасенко // Оптика и спектроскопия. – 2017. – Т. 122. – № 2. – С. 185-192. – 0,51/0,13 п.л.

*в переводной версии журнала*

**Panarin V. A.** Emission Properties of Apokamp Discharge at Atmospheric Pressure in Air, Argon, and Helium / V. A. Panarin, V. S. Skakun, E. A. Sosnin, V. F. Tarasenko // Optics and Spectroscopy. – 2017. – V. 122. – № 2. – P. 168-174. – DOI: 10.1134/S0030400X17020217.

12. Соснин Э. А. О физической природе апокамписического разряда / Э. А. Соснин, Г. В. Найдис, В. Ф. Тарасенко, В. С. Скакун, **В. А. Панарин**, Н. Ю. Бабаева // ЖЭТФ. – 2017. – Т. 152. – № 5. – С. 1081-1087. – DOI: 10.7868/S0044451017110232. – 0,53/0,13 п.л.

*в переводной версии журнала*

Sosnin E. A. On the physical nature of apokampic discharge / E. A. Sosnin, G. V. Naidis, V. F. Tarasenko, V. S. Skakun, **V. A. Panarin**, N. Yu. Babaeva // Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 2017. – V. 125. – № 5. – P. 920-925. – DOI: 10.1134/S1063776117100168.

13. Соснин Э. А. Апокамп на основе барьерного разряда в смесях ксенона и криптона с молекулярным хлором / Э. А. Соснин, **В. А. Панарин**, В. С. Скакун, В. Ф. Тарасенко, В. С. Кузнецов // Прикладная физика. – 2017. – № 1. – С. 21-25. – 0,34/0,07 п.л.

14. Tarasenko V. F. Dynamics of apokamp-type atmospheric pressure plasma jets initiated in air by a repetitive pulsed discharge / V. F. Tarasenko, E. A. Sosnin, V. S. Skakun, **V. A. Panarin**, M. V. Trigub, G. S. Evtushenko // Physics of Plasmas. – 2017. – V. 24. – № 4. – 043514. – DOI: 10.1063/1.4981385. – 0,54/0,14.

15. Соснин Э. А. Формирование окислов азота в источнике плазмы на основе апокампа / Э. А. Соснин, П. А. Гольцова, **В. А. Панарин**, В. С. Скакун, В. Ф. Тарасенко, М. В. Диденко // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2017. – Т. 60. – № 4. – С. 126-130. – 0,43/0,11 п.л.

*в переводной версии журнала*

Sosnin E. A. Formation of nitrogen oxides in an apokamp-type plasma source / E. A. Sosnin, P. A. Goltsova, V. A. Panarin, V. S. Skakun, V. F. Tarasenko, M. V. Didenko // Russian Physics Journal. – 2017. – V. 60. – № 4. – P. 701-705. – DOI: 10.1007/s11182-017-1126-3.

16. Тарасенко В.Ф. Характеристики импульсно-периодического коронного разряда в атмосферном воздухе / В. Ф. Тарасенко, Е. Х. Бакшт, Э. А. Соснин, А. Г. Бураченко, **В. А. Панарин**, В. С. Скакун // Физика плазмы. – 2018. – Т. 44. – № 5. – С. 447-460. – 1,21/0,30 п.л.

*в переводной версии журнала*

Tarasenko V. F. Characteristics of a pulse-periodic corona discharge in atmospheric air / V. F. Tarasenko, E. K. Baksht, E. A. Sosnin, A. G. Burachenko, **V. A. Panarin**, V. S. Skakun // Plasma Physics Reports. – 2018. – V. 44. – № 5. – P. 520-532. – DOI: 10.1134/S1063780X18050100.

17. **Panarin V. A.** Production of nitrogen oxides in air pulse-periodic discharge with apokamp / **V. A. Panarin**, V. S. Skakun, E. A. Sosnin, V. F. Tarasenko // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2018. – Vol. 51. – № 20. – 204005. – DOI: 10.1088/1361-6463/aab7cf. – 0,47/0,12 п.л.

18. Кузнецов В. С. Влияние молекулярного газа на формирование апокампиического разряда / В. С. Кузнецов, Э. А. Соснин, **В. А. Панарин**, В. С. Скакун, В. Ф. Тарасенко // Оптика и спектроскопия. – 2018. – Т. 125. – № 3. – С. 311–317. – 1,21/0,30 п.л.

*Монография:*

19. Sosnin E. A. Apokamp: a new type of plasma jet / E. A. Sosnin, V. F. Tarasenko, **V. A. Panarin**, V. S. Skakun – Horizons in World Physics. Volume 292 / Ed. A. Reimer. – NOVA Science, 2017. – P. 5–51. – 1,92/0,48 п.л.

*Патенты:*

20. Пат. 2616445 С1 Российская Федерация, МПК H05H 1/24, 2006.01. Источник плазменной струи / **В. А. Панарин**, Д. С. Печеницин, В. С. Скакун, Э. А. Соснин, В. Ф. Тарасенко; патентообладатель – ФГБУН Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (RU). № 2015150026 заявл. 20.11.2015; опубл. 17.04.2017. Бюл. № 11. – 6 с.

21. Пат. 2633705 С1 Российская Федерация, МПК H05H 1/24, 2006.01. Способ получения плазменной струи и устройство для его осуществления / Соснин Э.А., **Панарин В.А.**, Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Печеницин Д.С.; патентообладатель - ФГБУН Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (RU). № 2015150026; заявл. 20.06.2016; опубл. 17.10.2017. Бюл. № 29. – 6 с.

*Публикации в прочих научных изданиях:*

21. – Соснин Э. А. Первый опыт применения апокампиического разряда для инактивации микроорганизмов [Электронный ресурс] / Э. А. Соснин, В. С. Скакун, **В. А. Панарин**, В. Ф. Тарасенко, О. С. Жданова, П. А. Гольцова // Современные научные исследования и инновации. – 2016. – № 4(60). – С. 103-106. – Режим доступа: <http://web.snauka.ru/issues/2016/04/67337>. – 0,34/0,11 п.л.

22. Kuznetsov V.S. Temporal and spatial profiles of ionization waves of apokamp / V. S. Kuznetsov, V. S. Skakun, E. A. Sosnin, **V. A. Panarin**, E. Kh. Baksht, V. F. Tarasenko // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2016. – Т. 59. – № 9/2. – С. 82-85. – 0,21/0,05 п.л.
23. Жданова О. С. Фунгицидная активность продуктов распада плазмы импульсно-периодического разряда в воздухе, проявляющаяся в отношении грибов, контаминирующих семена зерновых культур [Электронный ресурс] / О. С. Жданова, П. А. Гольцова, М. В. Диденко, Э. А. Соснин, **V. A. Panarin**, В. С. Скакун, И. А. Викторова // Современные научные исследования и инновации. – 2016. – № 11(67). – С. 219-225. – Режим доступа: <http://web.snauka.ru/issues/2016/11/74282>. – 0,37/0,09 п.л.
24. Соснин Э. А. Стимулирующее действие ультрафиолетового излучения и продуктов распада низкотемпературной плазмы на семена пшеницы (сорт иргина) / Э. А. Соснин, П. А. Гольцова, И. А. Викторова, **V. A. Panarin**, Ю. В. Чудинова // Научная жизнь. – 2017. – № 5. – С. 34-46. – 0,39/0,1 п.л.
25. Tarasenko V. F. Laboratory demonstration in the air red and blue mini-jets / V. F. Tarasenko, **V. A. Panarin**, V. S. Skakun, E. A. Sosnin // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – V. 927. – № 1. – 012062. – 0,28/0,07 п.л.
26. Sosnin E. A. A new DBD-driven atmospheric pressure plasma jet source on air or nitrogen / E. A. Sosnin, **V. A. Panarin**, V. S. Skakun, V. F. Tarasenko, D. S. Pechenitsin, V. S. Kuznetsov // Proc. SPIE 98101, XII International Conference on Atomic and Molecular Pulsed Lasers. – 2015. – V. 9810. – 98101I. – DOI: 10.1117/12.2224924. – 0,34/0,08 п.л.
27. Sosnin E. A. Emission spectra of apokamp-type atmospheric pressure plasma jets in air, argon, and helium / E. A. Sosnin, **V. A. Panarin**, V. S. Skakun, V. F. Tarasenko // Digest of the XIII International Conference «Atomic and Molecular Pulsed Lasers», Tomsk (10.09.17-15.09.17), 2017. – E-8. – P. 111. – 0,03/0,01 п.л.
28. Didenko M. V. NO<sub>x</sub> formation in apokamp-type atmospheric pressure plasma jets initiated in air by a repetitive pulsed discharge / M. V. Didenko, E. A. Sosnin, **V. A. Panarin**, V. S. Skakun, V. F. Tarasenko, D. P. Liu, Y. Song Y. // Digest of the XIII International Conference «Atomic and Molecular Pulsed Lasers», Tomsk (10.09.17-15.09.17), 2017. – H-18. – P. 142. – 0,031/0,01 п.л.
29. **Panarin V. A.** Apokamp - a new source of ionisation waves in potential pulse-periodic discharge / **V. A. Panarin**, V. S. Skakun, D. S. Peshenitsyn, E. A. Sosnin, V. F. Tarasenko // Digest of the XIII International Conference «Atomic and Molecular Pulsed Lasers», Tomsk (10.09.17-15.09.17), 2017. – H-12. – P. 138. – 0,05/0,05 п.л.
30. **Panarin V.A.** A pulsed discharge excilamps in apokamp mode / **V. A. Panarin**, E. A. Sosnin, V. S. Skakun, V. F. Tarasenko, V. S. Kuznetsov // Digest of the XIII International Conference «Atomic and Molecular Pulsed Lasers», Tomsk (10.09.17-15.09.17), 2017. – E-7. – P. 111. – 0,027/0,01 п.л.
31. Тарасенко В. Ф. Лабораторная демонстрация в воздухе мини-струй голубого и красного цвета / В. Ф. Тарасенко, **V. A. Panarin**, В. С. Скакун, Э.А. Соснин // Всероссийская (с международным участием) конференция «Физика низкотемпературной плазмы» ФНТП-2017: сборник тезисов. – Казань: Изд-во «Отечество», 2017. – С. 73. – 0,033/0,01 п.л.
32. Sosnin E. A. NO<sub>x</sub> formation in apokamp-type atmospheric pressure plasma jets in air initiated by a pulse-repetitive discharge / E. A. Sosnin, M.V. Didenko, **V. A. Panarin**, V. S. Skakun, V. F. Tarasenko, D. P. Liu, Y. Song // Proc. SPIE 10614, XIII International Conference on Atomic and Molecular Pulsed Lasers. – 2018. – 106141Ю – DOI: 10.1117/12.2301027. – 0,53/0,13 п.л.