

На правах рукописи



**Кучинская Олеся Ивановна**

**МНОЖЕСТВЕННАЯ ФИЛАМЕНТАЦИЯ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ  
ПРИ УПРАВЛЕНИИ ВОЛНОВЫМ ФРОНТОМ  
СИСТЕМАМИ ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПУЧКОВ**

01.04.05 – Оптика

Автореферат  
на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Томск – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» и Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук.

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук  
**Кабанов Андрей Михайлович**

**Официальные оппоненты:**

**Дмитриев Александр Капитонович**, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», кафедра лазерных систем, главный научный сотрудник

**Степанов Андрей Николаевич**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук, лаборатория сверхсильных полей, заведующий лабораторией

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет»

Защита состоится 26 сентября 2019 года в 14 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.267.04, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», по адресу: 634050, Томск, пр. Ленина, 36 (Главный корпус ТГУ, аудитория 119).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на официальном сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» [www.tsu.ru](http://www.tsu.ru)

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ТГУ:  
<http://www.ams.tsu.ru/TSU/QualificationDep/cosearchers.nsf/newpublicationn/KuchinskayaOI26092019.html>

Автореферат разослан «\_\_» июля 2019 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Пойзнер Борис Николаевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

В конце 20 – начале 21 века за счет прогресса в лазерных технологиях получило бурное развитие новое перспективное направление – фемтосекундная оптика, которое открыло широкий круг задач, в том числе и для атмосферной оптики. К настоящему времени достигнуты ультракороткие длительности импульсов – менее десяти фемтосекунд и, соответственно, тераваттные мощности и интенсивности излучения  $10^{13}$ – $10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup>, при которых реализуются ранее недостижимые в атмосфере нелинейные эффекты, такие как самофокусировка и филаментация лазерного пучка, генерация суперконтинуального свечения, неупругое рассеяние, генерация высших гармоник.

В задачах фемтосекундной атмосферной оптики наиболее перспективным с точки зрения практического применения эффектом является филаментация лазерного пучка. Явление филаментации лазерных пучков связано в основном с двумя нелинейно-оптическими эффектами, возникающими при распространении интенсивного лазерного излучения в изотропных средах: самофокусировки лазерного пучка и увеличения значения интенсивности лазерного излучения, приводящего к ионизации среды [1–2, 5]. Уникальные свойства коротких лазерных импульсов (высокая мощность, обогащение спектра, трансформация энергетических свойств излучения) делают данный класс лазерных источников привлекательным для таких задач атмосферной оптики, как адресный перенос фемтосекундных лазерных импульсов через атмосферу, дистанционный широкополосный анализ состава атмосферы методом многочастотного зондирования, флуоресцентная и эмиссионная спектроскопия, оптических и динамических СВЧ волноводов. Помимо атмосферно-оптических задач существует значительное количество иных приложений: использование ультракоротких импульсов в медицине, создание поверхностных структур, в том числе наномасштабных, сверление металлов, резку алмазов, создание наночастиц, создание элементов микрооптики, дифракционных решеток, инъекцию растворов из микротрубок и др. [3–4].

Остаётся ряд нерешённых фундаментальных и прикладных проблем, которые не позволяют в полной мере использовать явление филаментации в приложениях. Для полноценного практического применения данного явления в различных областях деятельности необходимо знать количественную взаимосвязь между характеристиками области множественной филаментации лазерного пучка, характеристиками лазерного импульса и свойствами среды его распространения. При этом, несмотря на достаточное количество публикаций в данном направлении, именно множественная филаментация, как случай наиболее интересный для атмосферной оптики, не имеет количественно апробированных моделей, позволяющих обеспечить эффективный прогноз формирования области множественной филаментации (ОМФ) с заданными параметра-

ми на заданном удалении от источника. Поэтому проведение комплексных экспериментальных и теоретических исследований, направленных на установление, с одной стороны количественных связей между начальными характеристиками излучения и их эволюцией в процессе филаментации и, с другой стороны, построение прогностических моделей распространения мощных лазерных импульсов, согласованных с экспериментальными данными, несомненно, актуально и последовательно реализуется научным коллективом лаборатории нелинейно-оптических взаимодействий ИОА СО РАН.

В связи с этим целью данной работы являются экспериментальные исследования эволюции пространственного профиля и спектральных характеристик субтераваттных фемтосекундных импульсов титан-сапфирового лазера в условиях филаментации, управляемой системами формирования оптических пучков.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Установить количественные связи между параметрами лазерного излучения (энергия, степень фокусировки и дефокусировки, профиль пучка) и характеристиками области филаментации и постфиламентационных каналов (ПФК) (длина области филаментации, положение, количество филаментов, спектральное уширение различных компонент пучка при филаментации).

2. Определить области формирования различных структурных компонент в поперечном сечении пучка (филаментационные, постфиламентационные, бесплазменные каналы, кольцевая структура отдельных филаментов, кольцевая структура пакета филаментов) при множественной филаментации на воздушной трассе. Измерить угловую и пространственную расходимость каждой компоненты, их спектральный состав.

3. Разработать экспериментальную методику и провести эксперименты по управлению пространственным положением и протяженностью участка филаментации лазерного излучения с использованием деформируемого биморфного зеркала, с мощностью импульсов, многократно превышающей критическую мощность самофокусировки в воздухе, определить интенсивность оптического поля в постфиламентационных световых каналах.

### **Методология и методы исследования**

Совместно с экспериментальной научной группой автором была разработана методика экспериментов по исследованию трансформации пространственных и спектральных характеристик фемтосекундных лазерных импульсов при их филаментации в воздухе на 140 метровой трассе. Эксперименты были реализованы с использованием биморфного деформируемого зеркала, с мощностью импульсов, многократно превышающей критическую мощность самофокусировки в воздухе.

### Защищаемые положения

1. При филаментации субтераваттных фемтосекундных импульсов титан-сапфирового лазера (800 нм) спектры излучения области постфиламентационных каналов, окружающих их концентрических колец и пучка вне данных световых структур отличаются следующим образом: спектр излучения области постфиламентационных каналов обладает симметричным спектральным уширением, и охватывает диапазон 630–1000 нм, уширение спектра излучения области колец ассиметрично и направлено, в основном, в коротковолновую область спектра (630–830 нм), спектр излучения области пучка вне ПФК и колец практически не меняется.

2. При филаментации субтераваттных импульсов титан-сапфирового лазера угловая расходимость отдельных постфиламентационных каналов и их групп, составляющая ~12 и ~30 мкрад соответственно, обеспечивается кольцевой структурой профиля энергии, которая начинает формироваться внутри области филаментации вокруг отдельных филаментов, а после ее окончания трансформируется в общую кольцевую структуру, окружающую область постфиламентационных каналов. Данные высокоинтенсивные ( $\sim 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>) световые каналы формируются до начала области филаментации, при этом не каждый канал образует плазменный филамент.

3. Применение дефокусирующего расширяющего телескопа и деформируемого биморфного зеркала обеспечивает управление положением и протяженностью области множественной филаментации и позволяет реализовать режим передачи ультракоротких лазерных импульсов в воздухе с интенсивностью  $\sim 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup> в виде пучка бесплазменных, протяженных (~100 м), слабо-расходящихся (десятки мкрад) каналов, обладающих широким спектром излучения (650–950 нм) в условиях модельной, контролируемой, 140 метровой трассы.

### Достоверность

В работе представлены результаты, полученные сугубо экспериментальным путем с учетом возможных методических и экспериментальных ошибок. В пользу корректности первого защищаемого положения свидетельствует высокое спектральное разрешение системы регистрации спектральных характеристик излучения (до 0,35 нм). Характер спектрального уширения концентрических колец, окружающих ПФК, а именно их смещение в коротковолновую область спектра (630–830 нм), объясняется влиянием плазменной нелинейности [9].

Достоверность второго защищаемого положения подтверждает воспроизводимость результата, близкая к 85%, и его стабильность во времени при повторении эксперимента более 100 раз в одних и тех же условиях. Полученные значения интенсивности световых каналов соответствует значению сред-

ней интенсивности импульса ( $\sim 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>), полученных в [6], и хорошо согласуются с результатами [8]. Теоретическое описание существования данных каналов представлено в [13, 14]. Значения угловой расходимости постфиламентационного канала соответствует результатам численного моделирования [15].

Достоверность третьего защищаемого положения подтверждается: повторяемостью полученных в эксперименте результатов (порядка 100 раз); использованием в качестве приемников оптических сигналов сертифицированных датчиков, а в качестве компонент регистрирующего оборудования – метрологически проверенных приборов; качественным согласием с результатами [7], полученными для частного случая сильносходящихся пучков.

### **Новизна полученных результатов**

Экспериментальные результаты, используемые в первом и втором защищаемых положениях, являются запатентованными, что подтверждает исключительное право ИОА СО РАН, в том числе претендента, на полученный результат интеллектуальной деятельности: база данных № 303 от 23.03.2017 «Пространственные характеристики ПФК образованных при распространении фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе» и база данных № 304 от 23.03.2017 «Трансформация спектральных характеристик ПФК образованных при распространении фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе». Новизна III защищаемого положения состоит в реализации режима управления и передачи высокой интенсивности ( $\sim 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>) ультракоротких лазерных импульсов в виде пучка бесплазменных, протяженных ( $> 100$  м), слаборасходящихся (десятки мкрад) каналов, обладающих широким спектром излучения (300 нм) на 140 метровой трассе в условиях фокусировки и дефокусировки отдельных частей лазерного пучка.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Научная ценность фактов, указанная в первом и втором защищаемых положениях, состоит в том, что оптический канал формируется в поперечный размер, соответствующий его размеру внутри области филаментации, до начала области филаментации, при этом не каждый сформированный до области филаментации канал «превращается» в филамент. Пространственная устойчивость интенсивных световых каналов не связана с балансом керровской и плазменной нелинейностей, а обеспечивается интерференцией расходящихся и сходящихся волн центра канала и периферии пучка. Результаты, полученные в III защищаемом положении, составляют предпосылку определения критерия перехода от бесплазменного режима филаментации к образованию самого филамента, т.е. структуру, сопровождающуюся плазмообразованием и генерацией конической эмиссии.

Практическая значимость защищаемых положений состоит в том, что результаты спектральных характеристик ПФК и бесфиламентационных каналов (БФК) для случая сантиметровых, субтерраваттных пучков применимы для задач дистанционного зондирования атмосферы в части генерации и приема широкополосного излучения, с перестраиваемой шириной спектра. Полученные количественные зависимости между параметрами лазерного излучения (энергия, длительность импульса, степень фокусировки, профиль пучка) и характеристиками области филаментации и ПФК (длина области филаментации, положение, количество филаментов) являются частью эмпирической базы данных, необходимых для разработки рекомендаций по управлению положением области филаментации на протяженных ( $> 1$  км) атмосферных трассах.

Результаты, полученные при подготовке диссертационной работы, использованы при выполнении НИР, в которых О.И. Кучинская была соисполнителем:

*в рамках РФФИ:* мол\_а\_вед «Распространение мощного ультракороткого лазерного излучения в атмосфере и океане: новые модели и приложения» № 12-05-33068, руководитель к.ф.-м.н. Д.В. Апекимов (2013–2014 гг.); р\_мол\_а «Исследование нелинейной трансформации фемтосекундного лазерного излучения в капле с использованием экспериментальных и высокопроизводительных численных технологий» № 19-42-703015, руководитель к.ф.-м.н. А.В. Петров (2019–2021);

*в рамках ФЦП:* «Исследование особенностей распространения мультитераваттного лазерного излучения в атмосфере» № 8381, руководитель д.ф.-м.н. А.А. Землянов (2012–2014 гг.); «Исследование особенностей распространения мультитераваттного лазерного излучения в атмосфере» № 8381, руководитель д.ф.-м.н. А.А. Землянов (2012–2014 гг.);

*в рамках интеграционного проект № 67 СО РАН и ДВО РАН* «Разработка методов фемтосекундного лазерного зондирования океана и атмосферы» № 67, руководитель: д.ф.-м.н. Г.Г. Матвиенко, (2012–2014 гг.);

*в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН* «Фундаментальные основы технологий двойного назначения в интересах национальной безопасности» № 0368-2018-0016, руководитель д.ф.-м.н. А.А. Землянов (2018–2020 гг.);

*в рамках госзадания Минобрнауки России:* проект П.10.3.1, № 0368–2015–0001 «Когерентные и нелинейные световые структуры в атмосфере», руководитель д.ф.-м.н. А.А. Землянов (2015 г.); проект П.11.2 СО РАН, № 0368–2015–0010 «Диагностика состояния биологических объектов на основе лазерной спектроскопии», руководитель д.ф.-м.н. А.М. Кабанов (2015 г.); проект П.10.3 «Управление множественной филаментацией фемтосекундных лазерных импульсов на 150 метровой воздушной трассе с использованием адаптивной оптической системы», руководитель к.ф.-м.н. А.В. Петров (2016 г.); проект П.11.2.4 «Лазерное воздействие в диагностике состояния био-

логических объектов», руководитель д.ф.-м.н. А.М. Кабанов (2016 г.); проект П.2П/П.10–32, № 0368–2015–0014 «Фемтосекундные лазерные технологии дистанционного эмиссионного анализа веществ в атмосфере», руководитель д.ф.-м.н. А.А. Землянов (2015 г.).

### **Апробация результатов работы**

Результаты работы были представлены на 22 международных и всероссийских конференциях: XI и XIII Международная школа молодых ученых «Физика окружающей среды» им. А.Г. Колесника (Томск, октябрь 2014, сентябрь 2018); Международная молодежная научная школа и VII Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы радиофизики» (Томск, 9–12 октября 2014 г., 18–22 сентября 2017 г.); XXI и XXIII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Томск, 22–26 июня 2015 г. Иркутск, 3–7 июля 2017 г.); XII International Conference «Atomic and molecular pulsed lasers» (Томск, 14–18 сентября 2015 г.); VI Всероссийская конференция молодых ученых «Материаловедение, технологии и экология в третьем тысячелетии» (Томск, 11–13 мая 2016 г.); XXV Всероссийская открытая научная конференция «Распространение радиоволн» (Томск, 4–9 июля 2016 г.); XV Международная молодежная конференция по люминесценции и лазерной физике (республика Бурятия, с. Аршан, 18–24 июля 2016 г.); XIII Международная конференция «Импульсные лазеры на переходах атомов и молекул» (Томск, 10–15 сентября 2017 г.); International Conference on Ultrafast Optical Science, (Moscow, October 03–05 октября 2017 г.); XXV Международная конференция Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте – 2017 (г. Новороссийск, 4–9 сентября 2017 г.).

### **Публикации**

По теме диссертации опубликована 31 работа, в том числе 13 статей в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (из них 1 статья в российском научном журнале, входящем в Web of Science, 1 статья в российском научном журнале, входящем в Scopus, 8 статей в российских научных журналах, переводные версии которых входят в Web of Science), 16 статей в сборниках материалов конференций, представленных в изданиях, входящих в Web of Science; получено 2 свидетельства о регистрации баз данных.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка использованных источников и



литературы. Полный объем диссертации составляет 105 страниц, 53 рисунка, 116 цитируемых источников.

### **Личный вклад автора**

Все основные результаты, представленные в диссертационной работе, получены лично автором, либо совместно с соавторами при его непосредственном участии, заключавшиеся в подготовке и проведении физического эксперимента, разработке и создании экспериментальных стендов, анализе и интерпретации полученных результатов. Экспериментальные исследования, результаты которых отражены в диссертации, были проведены в период с 2014 по 2019 год в Институте оптики атмосферы СО РАН (г. Томск).

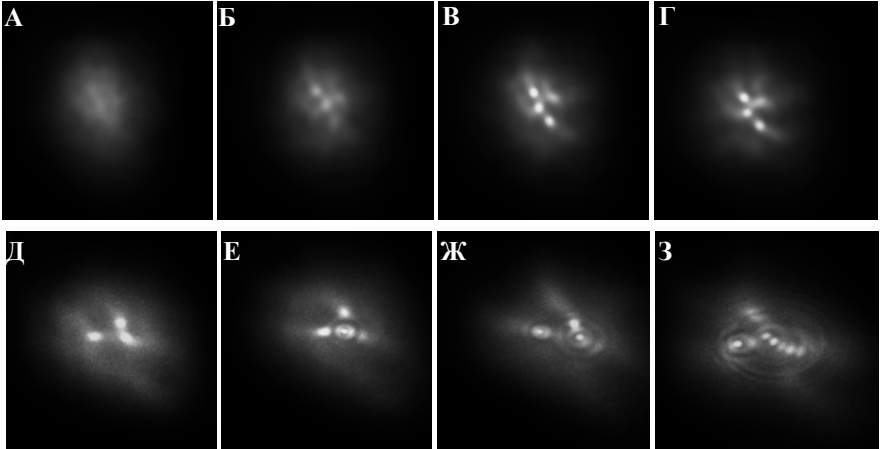
## **СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Во **Введении** определены цели и задачи исследований, представлены основные результаты экспериментов, их новизна, сформулированы защищаемые положения. Обоснована актуальность проведенных исследований, достоверность полученных результатов, а также их научная и практическая значимость.

В **Главе 1** представлен обзор экспериментальных (в основном) и теоретических исследований, посвященных множественной филаментации мощных фемтосекундных лазерных импульсов в различных средах, исследованию распространения и формирования ПФК и БФК. Подробно изучены способы управления положением ОМФ, ПФК и БФК каналов в пространстве. На основе анализа, имеющегося к началу настоящей работы материала, выявлены нерешенные вопросы и сформулированы цели и задачи исследований.

В **Главе 2** представлены результаты экспериментальных исследований пространственной и спектральной трансформации излучения после филаментации на контролируемой трассе для коллимированных пучков. Эксперименты проводились на стенде ИОА СО РАН с использованием  $Ti: Sa$  лазера с излучением:  $t_i = 50$  фс,  $d = 1,5; 2,5; 5$  см,  $E$  импульса до 40 мДж. На снимках рисунка 1 видно, что в начале области филаментации регистрируются только яркие точки, соответствующие филаментам (Рисунок 1 б-д). Во второй половине области филаментации вокруг филаментов появляются кольца, которые к концу области филаментации окружают каждый филамент (Рисунок 1 ж, з). После области филаментации (Рисунок 1 з) кольцевая структура, окружающая отдельные филаменты, трансформируется в общую кольцевую структуру. Наблюдаемая картина соответствует интерференции волн от различных, близко расположенных, источников, которыми в данном случае являются отдельные филаменты. Следует также отметить, что поперечный размер регистрируемых ярких точек внутри области филаментации (~мм) сравним с диаметром ПФК, т.е. в десятки раз превышает диаметр филамента. Это означает, что высокоин-

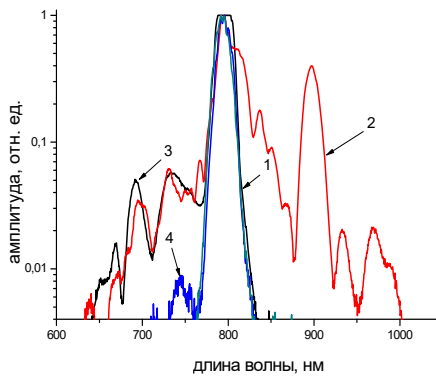
тенсивный ПФК канал формируется в пучке не после прекращения области филаментации, а до начала филаментации и этот канал окружает каждый филамент.



А – 8 м, Б – 13,5 м, В – 16,5 м, Г – 19,2 м, Д – 30 м, Е – 40 м, Ж – 48 м, З – 57 м. Начало ОМФ 30 м, конец ОМФ 45 м.

Рисунок 1 – Изображения поперечной структуры лазерного пучка на различном удалении от источника

На рисунке 2 представлены измеренные спектры ПФК, кольца вокруг пакета ПФК и спектра пучка в целом (за исключением конической эмиссии) на расстоянии 14 м от ОМФ.



1) – спектр исходного импульса; 2) – спектр ПФК; 3) – спектр кольца;  
4) – спектр пучка вне ПФК и колец

Рисунок 2 – Спектральные характеристики элементов лазерного пучка на расстоянии 14 м от ОМФ, с энергией импульса 30 мДж.

Спектр ПФК симметрично уширен относительно несущей длины в диапазоне 630–1000 нм и содержит квазипериодические пики. Данное поведение спектра указывает на его формирование за счет самонаведенной модуляции фазы волны излучения в керровской среде. Спектр колец, окружающих отдельные ПФК и пакет ПФК уширен несимметрично, он содержит только антистоксову компоненту [10].

На рисунке 3 показано, что угловая расходимость отдельных ПФК и их групп, составляющая  $\sim 12$  и  $\sim 30$  мкрад соответственно, обеспечивается кольцевой энергетической оболочкой, которая начинает формироваться внутри области филаментации вокруг отдельных филаментов, а после ее окончания трансформируется в общую кольцевую структуру, окружающую область ПФК.

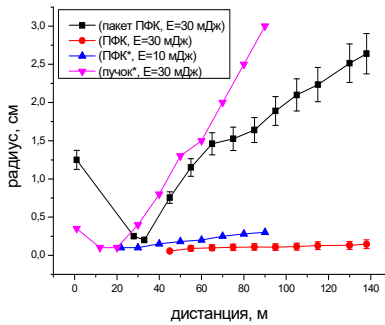


Рисунок 3 – расходимость пучка как целого после области филаментации; расходимость пучка – 200 мкрад, пакета ПФК – 27 мкрад, отдельных ПФК – 12 мкрад для  $E = 30$  мДж и сравнение результатов с [16] для расходимости отдельного ПФК с  $E = 10$  мДж

На рисунке 4 представлены результаты измерений зависимости диаметра исходного лазерного импульса от расстояния на трассе.

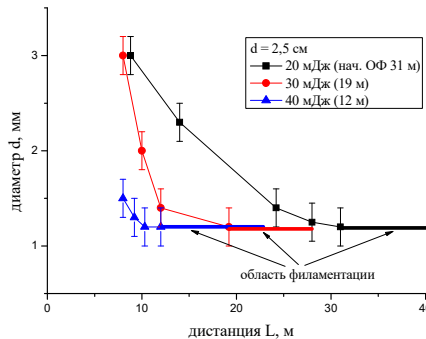
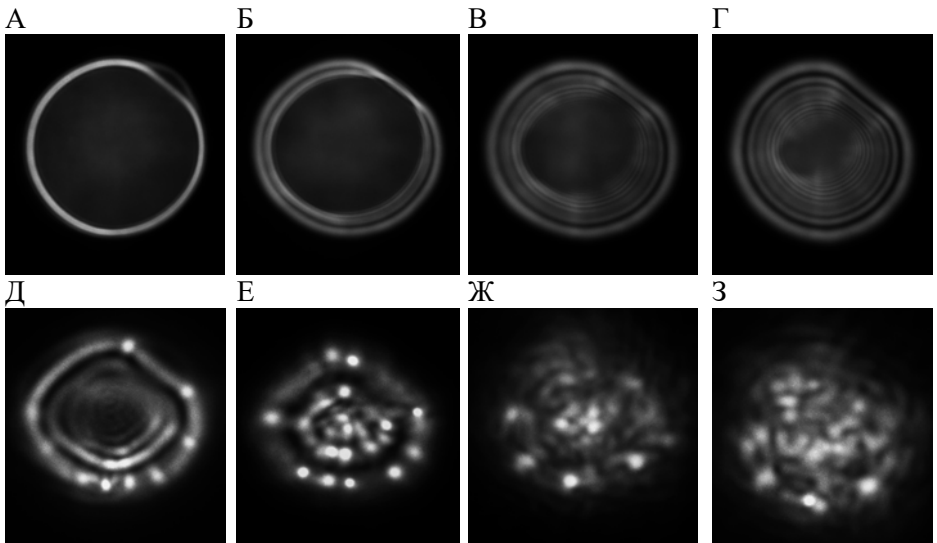


Рисунок 4 – Зависимость диаметра исходного лазерного импульса на разном удалении от источника для различных энергий импульса

Согласно графику, поперечный размер неоднородностей в лазерном пучке, из которых формируется оптический префиламентационный канал в диапазоне энергий импульса 20–40 мДж (мощностей 400–800 ГВт). Оптический канал формируется в поперечный размер, соответствующий его размеру внутри области филаментации, до начала области филаментации. Отношение расстояния  $L$  на котором формируются префиламентационные каналы к длине нелинейной фокусировки  $Z_n$  в диапазоне энергий 20–40 мДж остается почти неизменным  $L/Z_n \approx 0,7$ . Количество каналов возрастает с увеличением энергии импульса. Не каждый сформированный до области филаментации канал «превращается» в филамент, т.е. структуру, сопровождающуюся плазмообразованием и генерацией конической эмиссии, критерий «превращения» канала в филамент определить не удалось.

В **Главе 3** проведены экспериментальные и теоретические исследование филаментации фемтосекундных лазерных импульсов с использованием биморфного деформируемого зеркала, которое позволяет за счет фазовых искажений различных частей лазерного пучка управлять положением области филаментации по всей длине модельной трассы, а также детерминировать локализацию филаментов и высокоинтенсивных каналов в поперечном сечении пучка. Был получен режим бесплазменного каналирования пучка, при котором каналы в атмосфере достаточно высокоинтенсивные и протяженные ( $> 100$  м) [9]. Данный режим зафиксирован с помощью CCD- и фотокамеры, которые перемещались по всей дистанции вместе с экраном, на светочувствительной бумаге по ожогам (рисунок 5).



А – 7,9 м, Б – 10 м, В – 10,7 м, Г – 12,1 м, Д – 43 м, Е – 62, Ж – 91 м, З – 98 м.

Рисунок 5 – Режим бесплазменного каналирования пучка на различных расстояниях от ДЗ

Полноценное удаление области филаментации в конец модельной трассы достигается путем комбинирования телескопической и деформируемой систем – так называемая «гибридная» схема (рисунок 6), при которой мягкая дополнительная дефокусировка пучка происходит за счет изменения базы телескопа, добавляясь дефокусировка центра и фокусировка периферии деформируемым зеркалом. База телескопа равна 49,5 м, что соответствует дефокусировке пучка с  $f = -100$  м. На расстоянии 45 м от ДЗ наблюдаются бесплазменные каналы, область филаментации начинает формироваться на расстоянии 140 м от ДЗ в конце модельной трассы.

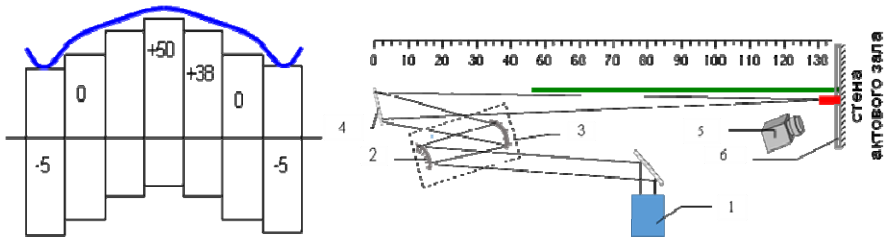


Рисунок 6 – Схематическое изображение элементов конфигураций ДЗ и соответствующие расположение областей филаментации (жирная линия) и бесплазменных каналов (полужирная линия) на трассе (по оси отложено расстояние от ДЗ)

Стоит отметить, что область БФК является в несколько раз более протяженной, чем ОФ, причем ограничения по длине трассы не позволили определить окончание данной области.

В **Главе 4** представлены результаты экспериментов по индуцированию плазмы на аэрозольных частицах, содержащих металлы, помещенных в область филаментации пучка и идентификации элементного состава по эмиссионным спектрам свечения.

В экспериментах по индуцированию плазмы на аэрозольных частицах показано, что эмиссионные спектры свечения аэрозолей, содержащих металлы, инициированные филаментами идентичны спектрам свечения в области фокуса наносекундного импульса. При этом протяженность области филаментации в десятки раз больше области перетяжки даже при мягкой фокусировке.

В работе [11] было показано, что в ряде случаев формируется двойная область филаментации пучка (ОФ) и было изучено влияния параметра астигматизма на характеристики данной области. Нами были проведены исследования влияния энергии лазерного импульса на такие параметры области филаментации как: протяженность ОФ, толщина плазменной колонки, начало ОФ, т.е. положение нелинейного фокуса, расстояние до центров, как первой, так и второй области филаментации. В результате, на формирование двойной облас-

ти филаментации и их пространственные характеристики влияет не только параметр астигматизма на оптических элементах, формирующих сходящиеся пучки, но и от начальной пиковой мощности лазерных импульсов.

### **В заключении сформулированы основные результаты работы**

Результаты экспериментальных исследований пространственной и спектральной трансформации излучения после филаментации на контролируемой трассе для коллимированных пучков показали, что спектры ПФК, колец и пучка существенно отличаются. Спектр ПФК обладает значительным и симметричным спектральным уширением, и охватывает диапазон 630–1000 нм. Уширение спектра колец ассиметрично и направлено, в основном, в коротковолновую область спектра. Данные уширения являются устойчивыми и не изменяются при удалении от области множественной филаментации. Кольцевая структура излучения в поперечном сечении пучка формируется вокруг отдельных филаментов внутри области множественной филаментации, а на удалении десятка метров от нее начинает формироваться общая кольцевая структура, окружающая ПФК. На дистанциях от окончания области филаментации, значительно превосходящих протяженность области филаментации, ПФК содержат интенсивность достаточную для формирования множественной филаментации в оптических элементах. Поперечный размер неоднородностей в лазерном пучке из которых формируется оптический предфиламентационный канал в диапазоне энергий импульса 20–40 мДж (мощностей 400–800 ГВт), уменьшается  $\sim 1,5$  раза. Широкий спектр и высокая интенсивность слабо расходящихся постфиламентационных каналов позволяет использовать их для дистанционного зондирования атмосферы.

Экспериментально была изучена возможность управления пространственным положением и структурой области филаментации широкоапертурного лазерного пучка (диаметр апертуры 5 см) путем внесения контролируемых искажений фазы волны с помощью многоэлементного биморфного деформируемого зеркала. Эксперименты показали, что в сравнении с обычной сферической фокусировкой использование биморфного деформируемого зеркала позволяет перемещать область филаментации и плазмообразования по всей длине трассы в широком диапазоне дистанций от 20 м до конца трассы без существенного сокращения протяженности ОМФ. Кроме того, появляется возможность осуществлять конфигурирование пространственного расположения высокоинтенсивных световых каналов в поперечном сечении пучка. Для ряда специальных конфигураций волнового фронта пучка реализован режим бесплазменного распространения излучения в форме упорядоченной связки («снопа») высокоинтенсивных ( $\sim 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>) слаборасходящихся (десятки мкрад) световых каналов, имеющих миллиметровый поперечный размер и высокую пространственную протяженность ( $> 100$  м).

Данные результаты расширяют и углубляют представления о физике процесса множественной филаментации лазерных импульсов. Полученный ряд

вышеуказанных новых научных результатов, является перспективным для дальнейшей разработки темы. В частности, результаты экспериментального исследования пространственной и спектральной трансформации излучения после филаментации для коллимированных, сфокусированных и дефокусированных пучков, а также пучков с частичным искажением волнового фронта, применимы для задач дистанционного зондирования атмосферы в части генерации и приема широкополосного излучения, с перестраиваемой шириной спектра. Полученные количественные зависимости между параметрами лазерного излучения (энергия, длительность импульса, степень фокусировки, профиль пучка) и характеристиками области филаментации и постфиламентационных каналов (длина области филаментации, положение, количество филаментов) являются частью эмпирической базы данных, необходимой для разработки рекомендаций по управлению положением области филаментации на протяженных ( $> 1$  км) атмосферных трассах.

### Цитируемая литература

1. Кандидов В.П., Шлёнов С.А. Глубокое каналирование и филаментация мощного лазерного излучения в веществе / Под редакцией В.Я. Панченко. – М.: Интерконтакт Наука, 2009. – 266 с.
2. Кандидов В.П., Шленов С.А., Силаева Е.П. и др. Филаментация мощного фемтосекундного лазерного излучения в воздухе и ее приложения в атмосферной оптике // Оптика атмосферы и океана. – 2010. – Т. 23, №10. – С. 873–884.
3. Sugioka K, Cheng Y. Fabrication of 3D microfluidic structures inside glass by femtosecond laser micromachining // Appl. Phys. – 2014. – Vol. A 114. – P. 215–221.
4. Pfeifenberger M. J., Mangang M., Wurster S. et al. The use of femtosecond laser ablation as a novel tool for rapid micro-mechanical sample preparation // Mater Des. – 2017. – Vol. 121. – P. 109–118.
5. Chin S.L. Femtosecond Laser Filamentation / Springer Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics. London. – 2010. – P. 130.
6. Апексимов Д.В., Букин О.А., Голик С.С., Землянов А.А., Иглакова А.Н., Кабанов А.М., Кучинская О.И., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Петров А.В., Соколова Е.Б. Множественная филаментация лазерных пучков различного радиуса в воздухе на 150-метровой трассе // Оптика атмосферы и океана. – 2016. – Т. 29, № 1. – С 51–55.
7. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г., Степанов А.Н. Экспериментальные исследования филаментации мощного ультракороткого лазерного излучения с начальной геометрической расходимостью в воздухе // Квантовая электроника. – 2013. – Т. 43, № 4. – С. 350–355.
8. Daigle J.-F., Kosareva O., Panov N. et al. Formation and evolution of intense, post-filamentation, ionization-free low divergence beams // Optics Communications. – 2011. – Vol. 284. – P. 3601–3606.
9. Apeksimov D.V., Geints Yu.A., Zemlyanov A.A., Kabanov A.M., Matvienko G.G., Oshlakov V.K., Petrov A.V. Controlling TW-laser pulse long-range filamentation in air by a deformable mirror // Applied Optics. – 2018. – Vol. 57, № 3. – P. 9760–9769.
10. Boyd R.W., Lukishova S.G., Shen Y.R. Self-focusing: Past and Present // Springer Science, Business Media: LLC, 2009. – 605 p.
11. Berge L., Skupin S., Lederer F. et al. Multiple Filamentation of Terawatt Laser Pulses in Air // Phys. Rev. Lett. 2004. – Vol. 92. – P. 22502 (1–4).

12. Дергачев А.А., Ионин А.А., Кандидов В.П., Мокроусова Д.В., Селезнев Л.В., Синицын Д.В., Сунчугашева Е.С., Шленов С.А., Шустикова А.П. Плазменные каналы при филаментации в воздухе фемтосекундного лазерного излучения с астigmatизмом волнового фронта // Квант. электрон. – 2014. – Т. 44, № 12. – С. 1085–1090.

13. Землянов А.А., Булыгин А.Д., Гейнц Ю.Э. Дифракционная оптика светового филамента, образованного при самофокусировке фемтосекундного лазерного импульса в воздухе // Оптика атмосферы и океана. – 2011. – Т. 24, № 10. – С. 839–847.

14. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Минина О.В. Дифракционно-лучевая оптика филаментации: I. Формализм дифракционных лучей и световых трубок // Оптика атмосферы и океана. – 2018. – Т. 31, № 05. – С. 364–371.

15. Землянов А.А., Булыгин А.Д., Гейнц Ю.Э., Минина О.В. Динамика световых структур при филаментации фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе // Оптика атмосферы и океана. – 2016. – Т. 29, № 05. – С. 359–368.

16. Talebpour A., Petit S., Chin S.L. Re-focusing during the propagation of a focused femtosecond Ti:Sapphire laser pulse in air // Opt. Commun. – 1999. – Vol. 171, № 4–6. – P. 285–290.

### Публикации по теме диссертации

*Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:*

[1] Апексимов Д. В. Пространственные характеристики области филаментации гигаваттных лазерных импульсов при их различной фокусировке на атмосферной трассе / Д.В. Апексимов, О.А. Букин, С.С. Голик, А.А. Землянов, А.Н. Иглакова, А.М. Кабанов, **О.И. Кучинская**, Г.Г. Матвиенко, В.К. Ошляков, А.В. Петров, Е.Б. Соколова, Е.Е. Хорошаева // Оптика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 27, № 12. – С. 1042–1046. – 0,31 / 0,02 а.л.

[2] Apeximov D. V. Interaction of femtosecond pulses of a two-harmonic Ti:Sapphire laser with liquid media / D.V. Apeksimov, O.A. Bukin, S.S. Golik, A.A. Zemlyanov, A.M. Kabanov, **O. I. Kuchinskaya**, G.G. Matvienko, V.K. Oshlakov, A.V. Petrov, E.B. Sokolova, E.E. Khoroshaeva // Physics of Wave Phenomena. – 2014. – Vol. 22, № 3. – P. 159–168. – DOI: 10.3103/S1541308X14030017. – 0,62 / 0,07 а.л. (*Web of Science*).

[3] Апексимов Д.В. Множественная филаментация коллимированных пучков Ti:Sapphire-лазера в воде / Д.В. Апексимов, О.А. Букин, С.С. Голик, А.А. Землянов, А.М. Кабанов, **О. И. Кучинская**, А.Ю. Майор, Г.Г. Матвиенко, В.К. Ошляков, А.В. Петров, Е.Б. Соколова, Е. Е. Хорошаева // Оптика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 27, № 11. – С. 957–961. – 0,25 / 0,02 а.л. *в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:*

Apeximov D.V. Multiple filamentation of collimated Ti:Sapphire laser beams in water / D.V. Apeximov, O.A. Bukin, S.S. Golik, A.A. Zemlyanov, A.M. Kabanov, **O.I. Kuchinskaya**, A.Yu. Mayor, G.G. Matvienko, V.K. Oshlakov, A.V. Petrov, E.B. Sokolova, E.E. Khoroshaeva // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2015. – Vol. 28, № 3. – P. 197–201. – DOI: 10.1134/S1024856015030033.

[4] Апексимов Д.В. Филаментация сфокусированных и коллимированных лазерных пучков в жидкостях // Д.В. Апексимов, О.А. Букин, С.С. Голик, А.А. Землянов, А.М. Кабанов, **О.И. Кучинская**, Г.Г. Матвиенко, В.К. Ошляков, А.В. Петров, Е.Б. Соколова, Е.Е. Хорошаева // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58, № 1. – С.105–111. – 0,43 / 0,04 а.л. *в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:*

Apeximov D.V. Filamentation of focused and collimated laser beams in liquids / D.V. Apeksimov, O.A. Bukin, S.S. Golik, A.A. Zemlyanov, A.M. Kabanov, **O.I. Kuchinskaya**, G.G. Matvienko, V.K. Oshlakov, A.V. Petrov, E.B. Sokolova, E.E. Khoroshaeva // Russian Physics Journal. – 2015. – Vol. 58, № 1. – P. 117–124. – DOI: 10.1007/s11182-015-0470-4.

[5] Апексимов Д.В. Филаментация тераваттных лазерных импульсов на стометровой атмосферной трассе / Д.В. Апексимов, А.А. Землянов, А.Н. Иглакова, А.М. Кабанов, **О.И. Кучинская**, Г.Г. Матвиенко, В.К. Ошляков, А.В. Петров // Оптика атмосферы и океана. – 2015. – Т. 28, № 3. – С. 274–277. – 0,25 / 0,03 а.л.



*в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:*

Apeximov D.V. Filamentation of terawatt laser pulses along hundred-meter atmospheric paths / D.V. Apeximov, A.A. Zemlyanov, A.N. Iglakova, A.M. Kabanov, **O.I. Kuchinskaya**, G.G. Matvienko, V.K. Oshlakov, A.V. Petrov // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2015. – Vol. 28, № 4. – P. 372–375. – DOI: 10.1134/S102485601504003X.

[6] Apeximov Д.В. Множественная филаментация коллимированного лазерного излучения в воде и стекле / Д.В. Апексимов, С.С. Голик, А.А. Землянов, А.Н. Иглакова, А.М. Кабанов, **О.И. Кучинская**, Г.Г. Матвиенко, В.К. Ошлаков, А.В. Петров, Е.Б. Соколова // Оптика атмосферы и океана. – 2015. – Т. 28, № 11. – С. 972–977. – DOI: 10.15372/AOO20151104. – 0,37 / 0,04 а.л.

*в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:*

Apeximov D.V. Multiple filamentation of collimated laser radiation in water and glass / D.V. Apeximov, S.S. Golik, A.A. Zemlyanov, A.N. Iglakova, A.M. Kabanov, **O.I. Kuchinskaya**, G.G. Matvienko, V.K. Oshlakov, A.V. Petrov, E.B. Sokolova // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2016. – Vol. 29, № 2. – P. 135–140. – DOI: 10.1134/S1024856016020020.

[7] Апексимов Д.В. Множественная филаментация лазерных импульсов в стекле / Д.В. Апексимов, О.А. Букин, С.С. Голик, А.А. Землянов, А.Н. Иглакова, А.М. Кабанов, **О.И. Кучинская**, Г.Г. Матвиенко, В.К. Ошлаков, А.В. Петров, Е.Б. Соколова // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58, № 11. – С. 89–94. – 0,38 / 0,03 а.л.

*в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:*

Apeximov D.V. Multiple filamentation of laser pulses in a glass / D.V. Apeximov, O.A. Bukin, S.S. Golik, A.A. Zemlyanov, A.N. Iglakova, A.M. Kabanov, **O.I. Kuchinskaya**, G.G. Matvienko, V.K. Oshlakov, A.V. Petrov, E. B. Sokolova // Russian Physics Journal. – 2016. – Vol. 58, № 11. – P. 1581–1586. – DOI: 10.1007/s11182-016-0686-y.

[8] Апексимов Д.В. Множественная филаментация лазерных пучков различного радиуса в воздухе на трассе длиной 150 м / Д.В. Апексимов, А.А. Землянов, А.Н. Иглакова, А.М. Кабанов, **О.И. Кучинская**, Г.Г. Матвиенко, В.К. Ошлаков, А.В. Петров // Оптика атмосферы и океана. – 2016. – Т. 29, № 1. – С. 51–55. – DOI: 10.15372/AOO20160106. – 0,31 / 0,04 а.л.

*в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:*

Apeximov D.V. Multiple filamentation of laser beams of different diameters in air along a 150-meter path / D.V. Apeximov, A.A. Zemlyanov, A.N. Iglakova, A.M. Kabanov, **O.I. Kuchinskaya**, G.G. Matvienko, V.K. Oshlakov, A.V. Petrov // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2016. – Vol. 29, № 3. – P. 263–266.

[9] Апексимов Д. В. Глобальная самофокусировка и особенности множественной филаментации излучения субтераваттного титан-сапфирового лазера с сантиметровым диаметром выходной апертуры на 150-метровой трассе / Д.В. Апексимов, А.А. Землянов, А.Н. Иглакова, А.М. Кабанов, **О.И. Кучинская**, Г.Г. Матвиенко, В.К. Ошлаков, А.В. Петров // Оптика атмосферы и океана. – 2017. – Т. 30, № 9. – С. 727–732. – DOI: 10.15372/AOO20170901. – 0,38 / 0,05 а.л.

*в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:*

Apeximov D.V. Global self-focusing and features of multiple filamentation of radiation of a subterawatt Ti: Sapphire laser with a centimeter output aperture along a 150-m path / D.V. Apeximov, A.A. Zemlyanov, A.N. Iglakova, A.M. Kabanov, **O.I. Kuchinskaya**, G.G. Matvienko, V.K. Oshlakov, A.V. Petrov // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2018. – Vol. 31, № 1. – P. 31–35. – DOI: 10.1134/S1024856018010037.

[10] Апексимов Д.В. Локализованные световые структуры с высокой интенсивностью при множественной филаментации фемтосекундного импульса титан-сапфирового лазера на воздушной трассе / Д.В. Апексимов, А.А. Землянов, А.Н. Иглакова, А.М. Кабанов, **О.И. Кучинская**, Г.Г. Матвиенко, В.К. Ошлаков, А.В. Петров, Е.Б. Соколова // Оптика атмосферы и океана. – 2017. – Т. 30, № 11. – С. 910–914. – DOI: 10.15372/AOO20171102. – 0,31 / 0,04 а.л.

*в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:*

Apeximov D.V. Localized high-intensity light structures during multiple filamentation of Ti:Sapphire-laser femtosecond pulses along an air path / D.V. Apeximov, A.A. Zemlyanov, A.N. Iglakova, A.M. Kabanov, **O.I. Kuchinskaya**, G.G. Matvienko, V.K. Oshlakov, A.V. Petrov,

E.B. Sokolova // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2018. – Vol. 31, № 2. – P. 107–111. – DOI: 10.1134/S1024856018020033.

[11] Апе́ксимов Д.В. Множественная филаментация лазерных пучков в различных средах / Д.В. Апе́ксимов, А.А. Землянов, А.Н. Иглакова, А.М. Кабанов, **О. И. Кучинская**, Г.Г. Матвиенко, В.К. Ошляков, А.В. Петров // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2017. – Т. 60, № 12/2. – С. 135–138. – 0,31 / 0,04 а.л.

[12] Апе́ксимов Д. В. Влияние фазовых aberrаций на положение и протяженность области филаментации / Д.В. Апе́ксимов, Ю.Э. Гейнц, А.А. Землянов, А.Н. Иглакова, А.М. Кабанов, **О.И. Кучинская**, Г.Г. Матвиенко, В.К. Ошляков, А.В. Петров // Оптика атмосферы и океана. – 2018. – Т. 31, № 12. – С. 941–947. – DOI: 10.15372/AOO20181201. – 0,5 / 0,06 а.л.

[13] Apeximov D.V. Multiple filamentation various diameters laser beams at an atmospheric path / D.V. Apeksimov, A.A. Zemlyanov, A.I. Iglakova, A.M. Kabanov, **O.I. Kuchinskaya**, G.G. Matvienko, V.K. Oshlakov, A.V. Petrov // Optical Memory and Neural Networks. – 2018. – Vol. 27, № 1. – P. 53–57. – DOI: 10.3103/S1060992X18010083. – 0,31 / 0,04 а.л. (*Scopus*).

*Статьи в сборниках материалов конференций, представленных в издании, входящем в Web of Science:*

[14] Apeximov D. V. Multiple filamentation of laser pulses in the glass [Electronic resource] / D.V. Apeksimov, O.A. Bukin, S.S. Golik, A.A. Zemlyanov, A.N. Iglakova, A.M. Kabanov, **O.I. Kuchinskaya**, G.G. Matvienko, V. K. Oshlakov, A.V. Petrov, E.B. Sokolova // Proceedings of SPIE. – 2015. – Vol. 9680: 21st International symposium on atmospheric and ocean optics: atmospheric physics. Tomsk, Russia, June 22–26, 2015. – Article number 96801B. – 4 p. – URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/9680/1/Multiple-filamentation-of-laser-beams-with-different-diameters-in-the/10.1117/12.2205484.full?SSO=1> (access date: 05.05.2019). – DOI: 10.1117/12.2205484. – 0,25 / 0,03 а.л.

[15] Apeximov D.V. Spatial characteristics of the gigawatt laser pulses filamentation area at their different focusing on atmospheric path [Electronic resource] / D.V. Apeksimov, O.A. Bukin, S.S. Golik, A.A. Zemlyanov, A.N. Iglakova, A.M. Kabanov, **O.I. Kuchinskaya**, G.G. Matvienko, V.K. Oshlakov, A.V. Petrov, E.B. Sokolova, E.E. Horoshaeva // Proceedings of SPIE. – 2014. – Vol. 9292: 20th International symposium on atmospheric and ocean optics: Atmospheric physics. Novosibirsk, Russia, June 23–27, 2014. – Article number UNSP92921C. – 5 p. – URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/9292/1/Spatial-characteristics-of-the-gigawatt-laser-pulses-filamentation-area-at/10.1117/12.2075613.full> (access date: 05.05.2019). – DOI: 10.1117/12.2075613. – 0,31 / 0,03 а.л.

[16] Apeximov D.V. Filamentation of terawatts lasers pulses on 100 m atmospheric path [Electronic resource] / D.V. Apeksimov, A.V. Burnashov, A.A. Zemlyanov, A.N. Iglakova, A. M. Kabanov, **O. I. Kuchinskaya**, G. G. Matvienko, V. K. Oshlakov, A. V. Petrov // Proceedings of SPIE. – 2014. – Vol. 9292: 20th International symposium on atmospheric and ocean optics: Atmospheric physics. Novosibirsk, Russia, June 23–27, 2014. – Article number UNSP92921B. – 4 p. – URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/9292/1/Filamentation-of-terawatts-lasers-pulses-on-100m-atmospheric-path/10.1117/12.2075618.full> (access date: 05.05.2019). – DOI: 10.1117/12.2075618. – 0,25 / 0,03 а.л.

[17] Apeximov D.V. Multiple filamentation of collimated beams Ti:Sapphire-laser in water [Electronic resource] / D.V. Apeksimov, O.A. Bukin, S.S. Golik, A.A. Zemlyanov, A.M. Kabanov, **O.I. Kuchinskaya**, A.V. Mayor, G.G. Matvienko, V.K. Oshlakov, V.A. Petrov, E. B. Sokolova, E.E. Horoshaeva // Proceedings of SPIE. – 2014. – Vol. 9292: 20th International symposium on atmospheric and ocean optics: Atmospheric physics. Novosibirsk, Russia, June 23–27, 2014. – Article number UNSP92921D. – 5 p. – URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/9292/1/Multiple-filamentation-of-collimated-beams-TiSapphire-laser-in-water/10.1117/12.2075627.full> (access date: 05.05.2019). – DOI: 10.1117/12.2075627. – 0,31 / 0,03 а.л.

[18] Apeximov D.V. Modeling of multiple filamentation of terawatt laser pulses on a hundred-meter air path [Electronic resource] / D.V. Apeksimov, Y.E. Geints, A.A. Zemlyanov, A.N. Iglakova, A.M. Kabanov, **O.I. Kuchinskaya**, G.G. Matvienko, V.K. Oshlakov, A.V. Petrov // Proceedings of SPIE. – 2015. – Vol. 9680: 21st International symposium on atmospheric and ocean optics: atmospheric phys-

ics. Tomsk, Russia, June 22–26, 2015. – Article number 96801F. – 10 p. – URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/9680/1/Modeling-of-multiple-filamentation-of-terawatt-laser-pulses-on-a/10.1117/12.2205521.full?SSO=1> (access date: 05.05.2019). – DOI: 10.1117/12.2205521. – 0,62 / 0,07 а.л.

[19] Apeximov D.V. Filamentation of focused and collimated laser beams in liquids [Electronic resource] / D.V. Apeksimov, O.A. Bukin, S.S. Golik, A.A. Zemlyanov, A.M. Kabanov, **O.I. Kuchinskaya**, G.G. Matvienko, V.K. Oshlakov, A.V. Petrov, E.B. Sokolova, E.E. Khoroshaeva // Proceedings of SPIE. – 2015. – Vol. 9680: 21st International symposium on atmospheric and ocean optics: atmospheric physics. Tomsk, Russia, June 22–26, 2015. – Article number 96801X. – 7 p. – URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/9680/1/Filamentation-of-focused-and-collimated-laser-beams-in-liquids/10.1117/12.2205790.full> (access date: 05.05.2019). – DOI: 10.1117/12.2205790. – 0,43 / 0,04 а.л.

[20] Apeximov D.V. Multiple filamentation Ti:Sapphire-laser pulses in water [Electronic resource] / D.V. Apeksimov, O.A. Bukin, S.S. Golik, A.A. Zemlyanov, A.M. Kabanov, **O.I. Kuchinskaya**, A.Y. Mayor, G.G. Matvienko, A.V. Petrov, E.B. Sokolova // Proceedings of SPIE. – 2015. – Vol. 9680: 21st International symposium on atmospheric and ocean optics: atmospheric physics. Tomsk, Russia, June 22–26, 2015. – Article number 968015. – 4 p. – URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/9680/1/Multiple-filamentation-TiSapphire-laser-pulses-in-water/10.1117/12.2205323.full> (access date: 05.05.2019). – DOI: 10.1117/12.2205323. – 0,25 / 0,02 а.л.

[21] Apeximov D.V. Multiple filamentation of laser beams with different diameters in the air at a 150-meter path [Electronic resource] / D.V. Apeksimov, A.A. Zemlyanov, A.N. Iglakova, A.M. Kabanov, **O.I. Kuchinskaya**, G.G. Matvienko, V.K. Oshlakov, A.V. Petrov // Proceedings of SPIE. – 2015. – Vol. 9810: 12th International conference on atomic and molecular pulsed lasers. Tomsk, Russia, September 13–18, 2015. – Article number 98100G. – 4 p. – URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/9810/1/Multiple-filamentation-of-laser-beams-with-different-diameters-in-the-air-at-a-150-meter-path/10.1117/12.2222973.full> (access date: 05.05.2019). – DOI: 10.1117/12.2222973. – 0,25 / 0,03 а.л.

[22] Apeximov D.V. Filamentation of collimated Ti:sapphire-laser pulses in the glass [Electronic resource] / D.V. Apeksimov, O.A. Bukin, S.S. Golik, A.A. Zemlyanov, A.N. Iglakova, A.M. Kabanov, **O.I. Kuchinskaya**, G.G. Matvienko, V.K. Oshlakov, A.V. Petrov, E.B. Sokolova // Proceedings of SPIE. – 2015. – Vol. 9810: 12th International conference on atomic and molecular pulsed lasers. Tomsk, Russia, September 13–18, 2015. – Article number 98100H. – 4 p. – URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/9810/1/Filamentation-of-collimated-Ti-sapphire-laser-pulses-in-the-glass/10.1117/12.2222974.full> (access date: 05.05.2019). – DOI: 10.1117/12.2222974. – 0,25 / 0,02 а.л.

[23] Apeximov D.V. Filamentation of collimated Ti:sapphire-laser pulses in water [Electronic resource] / D.V. Apeksimov, O.A. Bukin, S.S. Golik, A.A. Zemlyanov, A.M. Kabanov, **O.I. Kuchinskaya**, A.Y. Mayor, G.G. Matvienko, A.V. Petrov, E.B. Sokolova // Proceedings of SPIE. – 2015. – Vol. 9810: 12th International conference on atomic and molecular pulsed lasers. Tomsk, Russia, September 13–18, 2015. – Article number 98100I. – 4 p. – URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/9810/1/Filamentation-of-collimated-Ti-sapphire-laser-pulses-in-water/10.1117/12.2220772.full> (access date: 05.05.2019). – DOI: 10.1117/12.2220772. – 0,25 / 0,02 а.л.

[24] Apeximov D.V. Macroscopic model of formation of the domain of multiple filamentation in glass and water [Electronic resource] / D.V. Apeksimov, A.D. Bulygin, A.A. Zemlyanov, A.M. Kabanov, **O.I. Kuchinskaya**, O.V. Minina, A.V. Petrov // Proceedings of SPIE. – 2015. – Vol. 9810: 12th International conference on atomic and molecular pulsed lasers. Tomsk, Russia, September 13–18, 2015. – Article number 98100Q. – 5 p. – URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/9810/1/Macroscopic-model-of-formation-of-the-domain-of-multiple-filamentation-in-glass-and-water/10.1117/12.2225427.full> (access date: 05.05.2019). – DOI: 10.1117/12.2225427. – 0,31 / 0,04 а.л.

[25] Apeximov D.V. Postfilamentation channels of terawatt pulses Ti: sapphire-laser in distribution on 150-meter path [Electronic resource] / D.V. Apeksimov, A.A. Zemlyanov, A.N. Iglakova, A.M. Kabanov, **O.I. Kuchinskaya**, G.G. Matvienko, V.K. Oshlakov, A.V. Petrov // Proceedings of SPIE.

– 2016. – Vol. 10035: 22nd International symposium on atmospheric and ocean optics: atmospheric physics. Tomsk, Russia, June 30–July 03, 2016. – Article number 100352M. – 4 p. – URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10035/1/Postfilamentation-channels-of-terawatt-pulses-Ti-sapphire-laser-by/10.1117/12.2249483.full> (access date: 05.05.2019). – DOI:10.1117/12.2249483. – 0,25 / 0,03 а.л.

[26] Apeximov D.V. Spatial and spectral characteristics of the distribution post-filamentation zone of the of femtosecond laser pulses [Electronic resource] / D.V. Apeksimov, A.A. Zemlyanov, A.N. Iglakova, A.M. Kabanov, **O.I. Kuchinskaya**, G.G. Matvienko, V.K. Oshlakov, A.V. Petrov // Proceedings of SPIE. – 2017. – Vol. 10466: 23rd International symposium on atmospheric and ocean optics: atmospheric physics. Irkutsk, Russia, July 03–07, 2017. – Article number UNSP104661A. – 4 p. – URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10466/2286020/Spatial-and-spectral-characteristics-of-the-distribution-post-filamentation-zone/10.1117/12.2286020.full> (access date: 05.05.2019). – DOI: 10.1117/12.2286020. – 0,25 / 0,03 а.л.

[27] Apeximov D.V. Influence of the phase front of the fs-pulse on the characteristics of the multiple filamentation [Electronic resource] / D.V. Apeksimov, A.A. Zemlyanov, A.I. Iglakova, A.M. Kabanov, **O.I. Kuchinskaya**, G.G. Matvienko, V.K. Oshlakov, A.V. Petrov // Proceedings of SPIE. – 2018. – Vol. 10833: 24<sup>th</sup> International symposium on atmospheric and ocean optics: atmospheric physics. Tomsk, Russia, July 02–05, 2018. – Article number UNSP108332K. – 10 p. – URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10833/2504581/Influence-of-the-phase-front-of-the-fs-pulse-on/10.1117/12.2504581.full> (access date: 05.05.2019). – DOI: 10.1117/12.2504581. – 0,37 / 0,05 а.л.

[28] Apeximov D.V. The emission spectra in a femtosecond plasma of aerosols [Electronic resource] / D.V. Apeksimov, A.A. Zemlyanov, A.I. Zemlyanov, A.N. Iglakova, A.M. Kabanov, **O.I. Kuchinskaya**, G.G. Matvienko, V.K. Oshlakov, A.V. Petrov. // Proceedings of SPIE. – 2018. – Vol. 10833: 24th International symposium on atmospheric and ocean optics: atmospheric physics. Tomsk, Russia, July 02–05, 2018. – Article number UNSP108332L. – 4 p. – URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10833/2504587/The-emission-spectra-in-a-femtosecond-plasma-of-aerosols/10.1117/12.2504587.full> (access date: 05.05.2019). – DOI: 10.1117/12.2504587. – 0,25 / 0,03 а.л.

[29] Apeximov D.V. Structure of post-filamentation zone by propagation of the femtosecond laser pulses [Electronic resource] / D.V. Apeksimov, A.A. Zemlyanov, A.N. Iglakova, A.M. Kabanov, O.I. Kuchinskaya, G.G. Matvienko, V.K. Oshlakov, A.V. Petrov // Proceedings of SPIE. – 2018. – Vol. 10614: 13th International conference on atomic and molecular pulsed lasers. Tomsk, Russia, September 10–15, 2017. – Article number UNSP106140G. – 4 p. – URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10614/2301348/Structure-of-post-filamentation-zone-by-propagation-of-the-femtosecond/10.1117/12.2301348.full> (access date: 05.05.2019). – DOI: 10.1117/12.2301348. – 0,25 / 0,03 а.л.