

На правах рукописи



**Петров Алексей Вадимович**

**УПРАВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ОБЛАСТИ  
МНОЖЕСТВЕННОЙ ФИЛАМЕНТАЦИИ ФЕМТОСЕКУНДНОГО  
ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ВОЗДУХЕ И МОДЕЛЬНЫХ  
НЕЛИНЕЙНЫХ СРЕДАХ**

Специальность 01.04.05 – Оптика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Томск – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН).

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

**Официальные оппоненты:** **Прокопьев Владимир Егорович,**  
доктор физико-математических наук,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук,  
старший научный сотрудник

**Селезнев Леонид Владимирович,**  
кандидат физико-математических наук,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук,  
старший научный сотрудник

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск

Защита состоится 23 декабря 2016 г. в 16 час 00 мин на заседании диссертационного совета Д 003.029.01, созданного на базе Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, по адресу: 634055, Томск, пл. Академика Зуева, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН,  
<http://www.iao.ru/files/iao/theses/thesis83/text.pdf>

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д.ф.-м.н.



Веретенников В.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Распространение мощного лазерного излучения ультракороткой длительности в газовой и конденсированной средах сопровождается его филаментацией. При этом происходят значительные изменения энергетических, пространственных, спектральных и угловых характеристик лазерного излучения. Впервые явление самофокусировки было предсказано и определено в [1] и зафиксировано в эксперименте в [2]. Физической причиной эффекта филаментации является кубичная нелинейность показателя преломления среды, вызывающая искривление волнового фронта и самофокусировку световой волны, что при распространении светового импульса приводит к его прогрессирующему сжатию по пространственным координатам. Фотоионизация среды приводит к нелинейным энергетическим потерям в канале излучения и останавливает филаментацию. Филаментация ультракороткого импульса приводит также к существенным изменениям его частотного спектра. В результате фазовой самомодуляции световой волны формируется излучение с аномально широким спектром – суперконтинуум. Частотная ширина этого излучения значительно превышает исходную и, как правило, захватывает УФ и ближнюю ИК области. Основными факторами такого спектрального уширения являются керровская и плазменная нелинейность среды.

Перспективность использования данных явлений в различных областях деятельности – несомненна [3-6]. В задачах атмосферной оптики интересна возможность проводки молниевых разрядов по заданной траектории за счет создания протяженных ионизированных каналов – филаментов. Существенно расширяется возможность зондирования параметров атмосферы и проведения анализа загрязняющих ее веществ так называемым лидаром белого света. Явление филаментации фемтосекундного лазерного излучения ближнего ИК диапазона в конденсированных средах привлекает внимание, в первую очередь, возможностью микромодификации оптических материалов плазмой филамента и ее применением при создании элементов микрооптики. В условиях управления параметрами лазерного излучения возможно обеспечить доставку области филаментации, т.е. область локализации повышенной интенсивности в лазерном пучке, в заданное место атмосферы.

Описание филаментации, модель множественных фокусов, движущегося фокуса, модель самофокусировки излучения как формирование специфических световых структур – дифракционно-лучевых трубок проведено в [6-9]. При этом данные модели количественно описывают в основном одиночную филаментацию пучка как целого, либо качественно множественную филаментацию на флуктуациях плотности энергии в сечении

пучка. Экспериментальные исследования множественной филаментации проводились в основном для сфокусированного лазерного излучения, как в наших более ранних работах и, например, в [10]. Для построения количественной прогностической модели множественной филаментации, в связи со сложностью чисто теоретического решения и расчета, к моменту начала исследований настоящей работы было явно недостаточно экспериментальных данных о связях начальных параметров лазерных пучков с характеристиками области множественной филаментации. При этом важно подчеркнуть, что, несмотря на существенные различия в физических свойствах сред, в которых реализуется филаментация ультракороткого лазерного излучения (конденсированные, газообразные), сценарии процесса является качественно универсальными [11,12]. Специфика каждой среды распространения проявляется в величинах характерных масштабов нелинейного преобразования излучения и конкретных значениях параметров филаментов в пучке. Очевидно, что при проведении практических исследований в области фемтосекундной атмосферной оптики чрезвычайно важно иметь ясное представление о том, как повлияют на количественные характеристики филаментации лазерного пучка физические свойства среды его распространения. Несмотря на внушительное число доступных к настоящему времени научных публикаций по фемтосекундной тематике, целенаправленного анализа подобия и различий филаментации лазерного пучка в физически разнородных средах не имелось.

### **Цели и задачи диссертационной работы**

Целью работы являлось установление количественных закономерностей зависимости характеристик зоны множественной филаментации на воздушной трассе, а также модельных нелинейных средах от параметров оптической системы: пиковой мощности, степени фокусировки, радиуса излучающей апертуры.

Задачи:

1. Управление характеристиками области множественной филаментации фемтосекундного лазерного излучения на воздушной трассе различной протяженности.
2. Установление закономерностей в характеристиках продольной и поперечной структур зоны филаментации от пиковой мощности и размера пучка фемтосекундного лазерного излучения.
3. Зависимость структуры плазменных каналов фемтосекундных лазерных импульсов в средах с сильной нелинейностью от энергетических и пространственных параметров излучения.

## Научная новизна работы

Впервые показано, что дефокусировка пучка, как метод удаления области множественной филаментации от источника на воздушной трассе, имеет предельные уровни, зависящие от диаметра пучка и его мощности, при превышении которых филаментация пучка прекращается.

Впервые установлено, что распределение филаментов в продольном направлении области множественной филаментации (ОМФ) является уни-модальным, в поперечном сечении ОМФ происходит смещение филаментов от центра пучка в начале ОМФ к его периферии к концу области филаментации.

Впервые установлено, что при филаментации пучка с гауссовым распределением плотности энергии в средах с сильной керровской нелинейностью (вода, стекло) при достижении в нем средней интенсивности лазерного импульса значений  $>7 \cdot 10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup> ОМФ приобретает форму полого конуса вершиной направленной к источнику излучения. При дальнейшем увеличении средней интенсивности (энергии, мощности) импульса конус становится усеченным со стороны вершины.

Впервые установлена количественная связь между начальной мощностью лазерных импульсов с количеством филаментов в ОМФ и длиной области филаментации. Длина ОМФ с увеличением мощности импульса сначала возрастает, затем убывает. Диаметр ОМФ увеличивается с ростом мощности (энергии) импульса и, при достижении определенных пороговых значений мощности, рост диаметра насыщается и становится равным диаметру пучка на входе в среду с кубичной нелинейностью.

При достижении средней интенсивности лазерного импульса порогового значения ( $8,1 \cdot 10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup>) в стекле формируется вторичная ОМФ, также имеющая вид полого конуса. Распределение филаментов в продольном направлении становится бимодальным. При этом характеристики вторичной ОМФ (длина, координата начала, диаметр) зависят от времени воздействия импульсно-периодическим излучением.

Впервые установлено для одинакового диапазона мощностей импульса длина отдельных филаментов в воздухе увеличивается с увеличением мощности лазерного импульса, а в стекле уменьшается. Данное обстоятельство свидетельствует о том, что зависимость длины филамента от мощности имеет максимум.

Все филаменты в ОМФ параллельны оси пучка, что указывает на отсутствие т.н. «дочерних» филаментов, которые появляются вследствие взаимодействия «первичных» филаментов и (как правило) отклоняются от их направления.

Впервые, на основе полученных результатов по филаментации в воде и стекле импульсов гигаваттной и тераваттной мощности, сделан вы-

вод о том, что происходит не самофокусировка пучка как целого, а его отдельных элементов, каждый из которых самофокусируется на дистанции, соответствующей содержащейся в нем мощности.

**Достоверность** научных результатов и выводов подтверждается:

- методической проработкой регистрации и обработки оптических сигналов;
- корректным учетом возможных методических и экспериментальных ошибок;
- использованием в качестве приемников оптических сигналов сертифицированных датчиков, а в качестве компонент регистрирующего оборудования – метрологически поверенных приборов;
- статистической обеспеченностью получаемых данных, их повторяемостью и соответствием аналогичным результатам, полученным другими исследователями;
- совпадением результатов, полученных в настоящей работе при использовании независимых экспериментальных методик, совпадением результатов, полученных в настоящей работе с результатами других работ, для частных случаев совпадения условий экспериментов;
- соответствием полученных экспериментальных данных результатам модельных теоретических расчетов, проведенных другими авторами.

### **Научная и практическая значимость**

Результаты, полученные в работе, расширяют и углубляют представления о физике процесса множественной филаментации лазерных импульсов. Полученные количественные экспериментальные данные о связях начальных характеристик лазерных импульсов с параметрами области множественной филаментации являются основой для построения прогностических моделей множественной филаментации лазерных пучков в средах с различной кубичной нелинейностью.

Материалы, представленные в диссертации использовались при выполнении государственных контрактов: грант РФФ «Дистанционные оптические методы исследования газовых и аэрозольных компонент атмосферы и элементного состава морской воды» (№15-17-10001); грант РФФ «Дальнее распространение мощного лазерного излучения ультракороткой длительности в атмосфере в режиме множественной филаментации» (№16-17-10128), грант РФФИ №14-28-02023 офи-м «Создание источников суперконтинуального и эмиссионного спектров свечения в атмосфере с помощью мощных ультракоротких лазерных импульсов для целей дистанционного зондирования примесных газов и аэрозолей антропогенного и биологического происхождения»; Проект П.10.3.1. «Когерентные и нелинейные

световые структуры в атмосфере»; интеграционный Проект 67 ИОА СО РАН, ИАПУ ДВО РАН, ДВФУ «Разработка методов фемтосекундного лазерного зондирования океана и атмосферы»; Проект П.11.2.4. «Современные направления лазерных биомедицинских технологий»; Программа фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные основы технологий двойного назначения в интересах национальной безопасности»; Программа фундаментальных исследований президиума РАН «Экстремальное лазерное излучение: физика и фундаментальные приложения».

### **Защищаемые положения**

1. Для слабого и умеренного режимов филаментации коллимированных пучков фемтосекундного лазерного излучения, что соответствует пучкам сантиметровых диаметров с субгерваттной и тераваттной мощностями соответственно, существенна зависимость длины области филаментации от радиуса и энергии пучка. На воздушной трассе длина области филаментации возрастает с увеличением энергии импульса и при вариации диаметра пучка с 0,5 см до 5 см изменяется с 7 м до 50 м. Для воздуха пространственное распределение филаментов вдоль зоны филаментации представляет собой унимодальный вид с ярко выраженным максимумом. Координата максимума локализована в области нелинейного фокуса лазерного пучка.

2. При управлении характеристиками множественной филаментации на воздушной трассе с использованием систем фокусировки лазерного пучка длина области филаментации определяется энергией лазерного импульса и числовой апертурой пучка. При изменении числовой апертуры в масштабах  $2 \cdot 10^{-3} \div 0$  для энергии импульса 40 мДж (пиковая мощность  $\sim 10^{12}$  Вт) и диаметром пучка 2,5 см продольный размер области филаментации возрастает с 14 до 46 м. Координата максимума числа филаментов вдоль трассы распространения локализована в области геометрического фокуса пучка. При дефокусировке лазерного пучка длина области филаментации превосходит соответствующую длину для коллимированного пучка. Однако существует предельное значение модуля отношения радиуса пучка к дистанции дефокусировки, превышение которого срывает процесс филаментации. Для энергии 40 мДж упомянутое отношение равно  $5 \cdot 10^{-4}$ .

3. В режиме сильной оптической нелинейности керровского типа, что соответствует многократному превышению пиковой мощности импульса над критической мощностью самофокусировки, область филаментации лазерного импульса с гауссовым распределением интенсивности по поперечной координате в модельной среде приобретает вид полого конуса, направленного вершиной к источнику излучения. Распределение фи-

ламентов имеет унимодальный вид с максимумом локализованным вблизи начала дистанции.

### **Апробация результатов работы**

Результаты работы докладывались на следующих научных конференциях и симпозиумах: XI, XII Международной конференции "Импульсные лазеры на переходах атомов и молекул" (Томск 2013, 2015), XVIII, XX, XXI, XXII Международном симпозиуме "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы" (Иркутск 2012, Новосибирск 2014, Томск 2015, 2016), Международной молодежной научной школы «Актуальные проблемы радиофизики» (Томск 2014, 2016), 51 Международная научная конференция МНСК (Новосибирск 2013), X, XI Международная Школа молодых ученых «Физика окружающей среды» им. А.Г.Колесника (Томск 2012, 2013), 19 Всероссийская научная конференция студентов физиков и молодых ученых (Архангельск 2013), XV Международная молодежная конференция по люминесценции и лазерной физике (п. Аршан, Бурятия, 2016), XXIV, XXV Всероссийская Научная Конференция «Распространение радиоволн» (Иркутск 2014, Томск 2016), IV Всероссийской научной конференции «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике» (Муром 2013), VII Международном симпозиуме "Modern Problem of Laser Physics" (Новосибирск 2016).

### **Публикации**

Результаты исследований опубликованы в 15 статьях из Перечня ВАК (Оптика атмосферы и океана, Известия вузов. Физика, Прикладная физика, Plasma Physics Reports, Physics of Wave Phenomena, Квантовая электроника) 36 статьях индексируемых в WoS и Scopus, общее количество публикаций 75.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Полный объем диссертации составляет 106 страниц, 63 рисунка, 121 цитируемый источник.

### **Личный вклад автора**

Все представленные в диссертации результаты получены, обработаны и проанализированы при непосредственном участии автора. Эксперименты проводились на стендах ИОА СО РАН (г. Томск) и ИАПУ ДВО РАН (г. Владивосток).



## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** определены цели и задачи исследований, представлены основные результаты исследований, 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, способов управления положением ОМФ 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 экспериментов по исследованию пространственных характеристик области множественной филаментации гига и тераваттных импульсов Ti:Sapphire-лазера с длиной волны  $\lambda = 800$  нм на воздушных трассах 30 м, 100 м и 150 м для различных радиусов пучков  $r_0$ , мощностей импульсов  $P$ , начальных пространственных фокусировок  $F_z$ . Проводились измерения таких характеристик как: количество филаментов  $N_f$ , их распределение в продольном и поперечном сечении области филаментации; длина области филаментации  $L_{омф}$ , координаты ее начала  $Z_{омф}$  и конца  $Z_k$ , длина отдельных филаментов  $L_f$ , спектры лазерного излучения при филаментации, эмиссионные спектры свечения мишеней, помещенных в область филаментации на трассе.

Для пучка с начальным радиусом 0,35 мм, длительностью импульса  $\tau = 45$  фс, энергией в импульсе 5,2 мДж, частотой следования импульсов 1 кГц эксперименты проводились на трассе 30 м в ИАПУ ДВО РАН. Пространственная фокусировка лазерного пучка осуществлялась с помощью телескопа, состоящего из фокусирующей и дефокусирующей линз, изменением расстояния между линзами. Положение области филаментации регистрировалось по ожогам на фотобумаге. На рис.1 представлены зависимости начала, конца и длины области филаментации при фокусировке (рис. 1а) и дефокусировке (рис. 1б) лазерного пучка. Видно, что с увеличением остроты фокусировки длина филамента уменьшается, а его начало и конец смещаются в сторону источника излучения. При увеличении остроты дефокусировки длина филамента также сокращается, а начало области филаментации смещается в сторону от источника. При этом максимальная длина области филаментации достигается в случаях максимально мягкой фокусировки и дефокусировки пучка и составляет  $\sim 6-8$  м, как первом, так и во втором случаях.

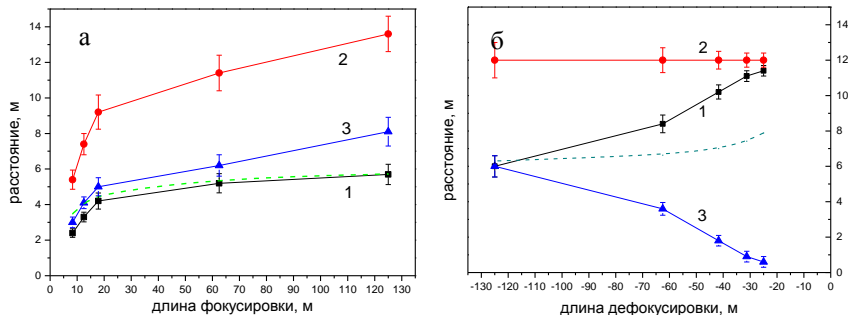


Рисунок 1 – Зависимость начала  $Z_{омф}$  (1), конца  $Z_k$  (2) и длины  $L_{омф}$  (3) области филаментации от длины фокусировки (а) и дефокусировки (б) лазерного пучка. Штриховые линии – расчет начала филаментации.

Для пучков, имеющих начальную геометрическую (положительную или отрицательную) фокусировку  $F_z$ , для дистанции от источника до начала области филаментации можно записать:  $Z_{fil} = F_z (1 + F_z/F_N)^{-1}$ . Длина геометрической фокусировки (фокусное расстояние телескопа) рассчитывалось, как  $F_z = (f_1 + f_2)(f_1 + f_2 - b)^{-1}$ , где  $b$  – база телескопа (расстояние между линзами). Для расчета длины нелинейной фокусировки  $F_N$  (начала филаментации) использовалась формула Марбюргера (Marburger J.H.) [13] для нелинейного фокуса  $F_N = 0,734 L_R [(\eta^{1/2} - 0,852)^2 - 0,0219]^{-1/2}$ , где  $L_R = \pi r_0^2/\lambda$  длина Релея,  $\eta = P_0/P_{cr}$  – безразмерная мощность импульса,  $P_0$  – мощность импульса,  $\lambda$  – длина волны лазерного излучения,  $r_0$  – начальный радиус пучка  $P_{cr} = 3,77\lambda^2/(8\pi n_0 n_2)$  – критическая мощность самофокусировки (для воздуха при  $\lambda = 800$  нм,  $P_{cr} = 3,2$  ГВт), где  $n_0$  – показатель преломления среды,  $n_2$  – коэффициент в нелинейной добавке к показателю преломления. Сравнение экспериментальных данных с расчетными значениями для дистанции начала образования филамента указывает на их хорошее согласие только для случая фокусированного пучка. Для дефокусированного пучка расхождение между расчетными и экспериментальными данными возрастает с увеличением остроты дефокусировки, что, возможно, связано с отличием профиля пучка от идеально гауссова распределения.

Эксперименты по управлению положением области филаментации тераваттных импульсов первой гармоники Ti:Sapphire-лазера длительностью импульсов  $\tau = 50$  фс, энергией в импульсе до 82 мДж, диаметрами пучка  $d_0 = 5, 2,5$  и 1.25 см (по уровню  $e^{-2}$ ), частотой следования импульсов 10 Гц проводились на трассе длиной 150 м на стенде ИОА СО РАН. На рис. 2 представлено положение области филаментации на трассе и распределение в ней количества филаментов при различной начальной фокусировке и дефокусировке пучков различного диаметра при телескопировании пучка

(рис. 2 а,в). В случае нетелескопированного коллимированного пучка (рис. 2 б) единственным способом смещение области филаментации от источника излучения является уменьшение начальной энергии (мощности) импульса, однако, как видно из сравнения кривых на графике, уменьшение энергии более чем в два раза приводит к незначительному (несколько метров) удалению начала филаментации, но сопровождается существенной потерей в количестве филаментов. С уменьшением фокусного расстояния (рис. 2 а) начало и конец области филаментации сдвигаются в сторону источника излучения. Дефокусировка приводит к смещению области филаментации от источника. Для всех случаев регистрируется унимодальное распределение филаментов вдоль области филаментации.

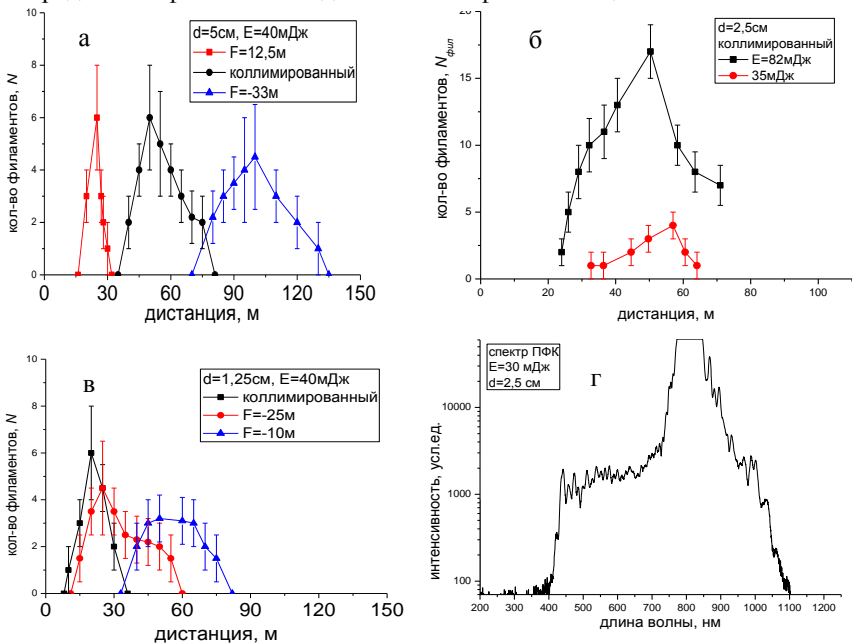


Рисунок 2 – Распределение филаментов вдоль области филаментации при различной фокусировке (дефокусировке) пучка с  $r_0$ : а) 2,5 см, б) 1,25см, в) 0,625 см, г) спектр излучения после филаментации.

При этом уменьшение расстояния геометрической дефокусировки приводит к удалению области филаментации от источника лишь до определенных ее значений, превышение которых приводит к резкому сокращению длины области филаментации и затем к полному ее исчезновению. На рисунке 3а представлена зависимость длины области филаментации от зна-

чения числовой апертуры ( $NA = r_0/F_0$ ) для различных энергий импульса и начальных радиусов лазерного пучка.

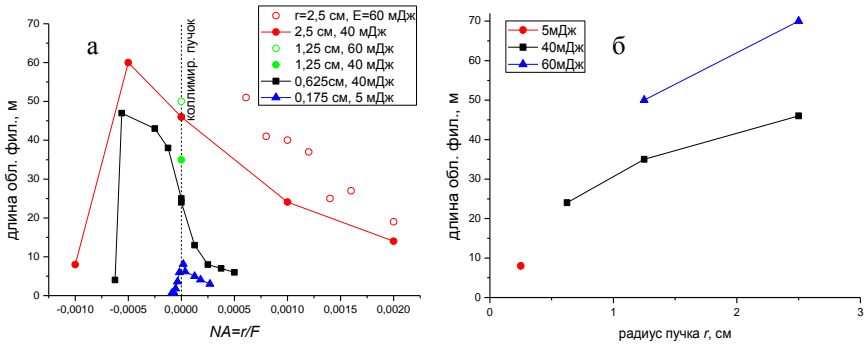


Рисунок 3 – а) Длина области филаментации от значения числовой апертуры для различных энергий импульса и начального радиуса пучка. б) Длина области филаментации от начального радиуса коллимированного пучка для различных энергий импульса.

Видно, что уменьшение числовой апертуры приводит к увеличению протяженности на трассе области, заполненной филаментами, но лишь до определенных ее значений, зависящих от начального радиуса пучка и энергии (мощности) импульса.

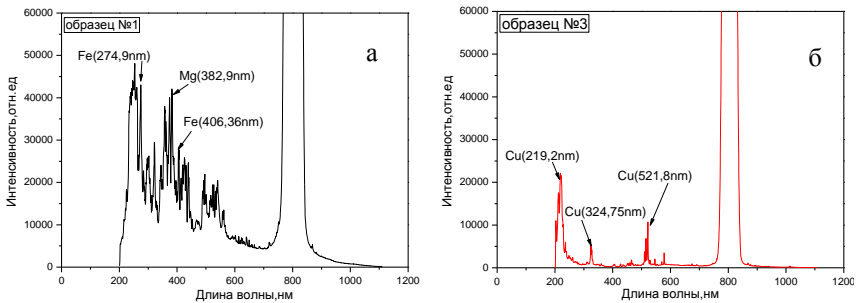


Рисунок 4 - Спектры свечения различных образцов металлов (а - железо, б – медь) в области филаментации на расстоянии 50 м от источника излучения.

Были проведены эксперименты по дистанционному индуцированию плазмы на мишенях, помещенных в область филаментации пучка и идентификации их элементного состава по эмиссионным спектрам свечения. Примеры зарегистрированных спектров свечения образцов металлов (Fe, Cu), представлены на рис.4.

В Главе 3 представлены результаты экспериментальных исследований пространственных характеристик множественной филаментации тераваттных фемтосекундных импульсов Ti:Sa-лазера с начальным радиусом 0,35 мм в воде. Данная среда была выбрана для исследования филаментации поскольку, во-первых, имеет на три порядка большую нелинейность, чем в воздухе, что позволяет моделировать филаментацию субпетаваттных импульсов в воздухе, во-вторых, позволяет решать задачи оптики океана. Представлена методика и результаты экспериментов филаментации в воде импульсов гигаваттной мощности. Лазерный импульс от источника направлялся в кювету с водой для которой  $n_2=2\cdot 10^{-16}$  см<sup>2</sup>/Вт, критическая мощность самофокусировки  $P_{кр}=6,5\cdot 10^6$  Вт. С помощью CCD – камеры проводилась регистрация поперечной структуры пучка на экране, который располагался внутри кюветы. Экран параллельно с CCD-камерой с помощью позиционера перемещался от освещенной грани кюветы к задней ее грани с шагом в 1 мм. На рис. 5 представлены снимки поперечной структуры области филаментации на различном удалении от начала кюветы.

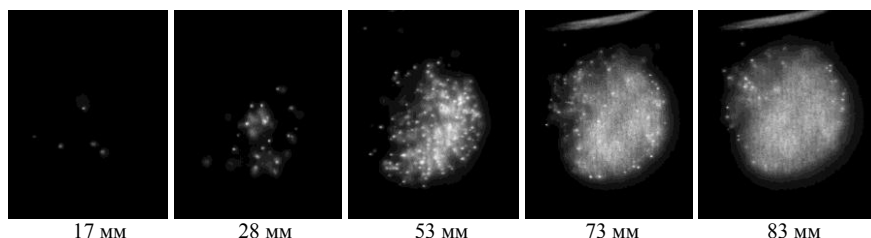


Рисунок 5 - Поперечная структура области филаментации на различном удалении от источника при энергии импульса 4,4 мДж.

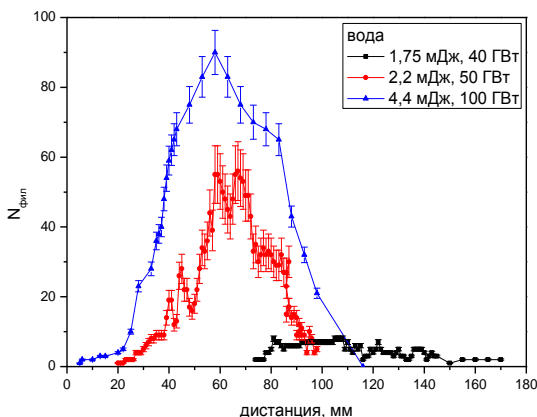


Рисунок 6 - Зависимость количества филаментов в поперечном сечении плазменного канала на различных дистанциях от лазерного источника.

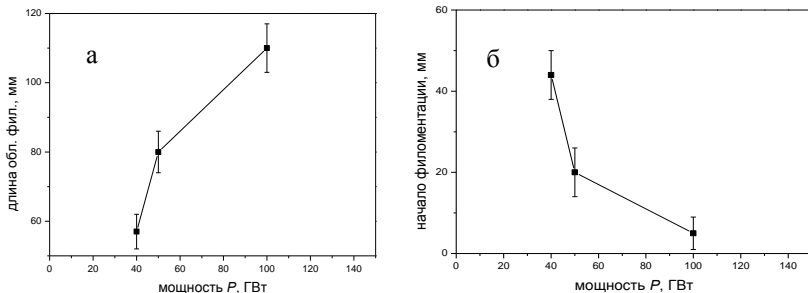


Рисунок 7 а - зависимость длины области филаментации от мощности лазерного излучения; б – зависимость начала области филаментации от мощности лазерного излучения

Показано, что с увеличением начальной мощности лазерных импульсов увеличивается количество филаментов, происходит увеличение длины области филаментации и сокращение длины филаментов. Распределение филаментов в продольном направлении области множественной филаментации, также как для воздуха имеет максимум, в поперечном сечении происходит смещение филаментов от центра пучка к его периферии к концу области филаментации. При достижении мощности импульса  $2 \cdot 10^4 P_{кр}$  область множественной филаментации формируется в виде полого конуса, направленного вершиной к источнику излучения.

В Главе 4 представлены результаты экспериментов по множественной филаментации в стекле. Лазерный импульс от источника направлялся на образец стекла К8, для которого коэффициент кубичной нелинейности  $n_2 = 3,5 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2/\text{Вт}$ , критическая мощность самофокусировки  $P_{кр} = 2 \text{ МВт}$ , испытывал в нем самофокусировку, и при достижении энергии импульса  $\sim 2 \text{ мДж}$  (44 ГВт), область филаментации формировалась внутри образца. Уменьшение диаметра пучка с 7 мм до 3,5 мм достигалось телескопированием пучка с использованием фокусирующего и дефокусирующего зеркал в коллиматоре. Регистрация области филаментации в стекле проводилась с помощью фотоаппарата и CCD-камеры. CCD камера, установленная на позиционер, позволяла проводить последовательную съемку (размер каждого кадра составлял  $20 \times 25 \text{ мм}$ ) всей области филаментации путем перемещения позиционера вдоль образца с шагом 10 мм. Примеры полученных изображений для стекла представлены на рис. 8. Область филаментации наблюдается в виде светящихся в сине-зеленой области спектра треков (полоса 350-700 нм, максимум – 520 нм), каждый из которых соответствует отдельному филаменту. Количество треков в ОМФ возрастает с увеличением энергии (мощности) и принимает форму полого конуса или параболоида, зеркально повторяющего распределение интенсивности в

поперечном сечении пучка (рис.8а). При энергии импульса  $>40$  мДж внутри конуса начинает формироваться внутренняя область множественной филаментации (рис.8б), которая при энергии  $>45$  мДж также приобретает коническую форму. Практически на всех снимках в начале области филаментации наблюдаются «пульсирующие» треки (рис.8в), которые могут также являться результатом повторных фокусировок (рефокусировок) первичных филаментов, которые ранее наблюдались при филаментации в воздухе, например в [14]. В этом случае, из анализа полученных снимков (1516 шт.), можно констатировать следующее: рефокусировки появляются при мощности импульса  $> 300$  ГВт (для диаметра пучка 11 мм), количество рефокусировок первичного филамента возрастает с увеличением мощности и для максимальной в эксперименте мощности 0,9 ТВт достигает 5. Рефокусировка реализуется на пространственном масштабе сравнимым с длиной филамента  $\sim 0,2$  мм.

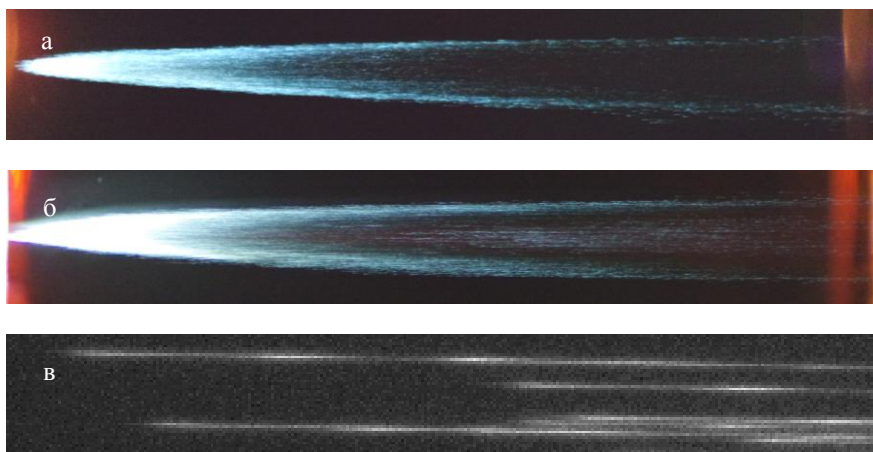


Рисунок 8 - Фотографии области филаментации лазерного пучка диаметром 11 мм, ограниченного вертикальной щелью шириной 2 мм, расположенной по центру пучка для энергии 40 мДж (а) и 45 мДж (б). в) - треки в начале области филаментации, энергия импульса 40 мДж.

Измеренное распределение филаментов вдоль области филаментации (см. рис. 9), также как для воздуха и воды, имеет максимум, величина которого зависит от мощности импульса – с увеличением мощности значение максимума возрастает. Измеренные зависимости начала области филаментации и длины области филаментации от мощности импульса представлены на рис. 10. Средняя длина отдельных филаментов в ОМФ и диаметр ОМФ представлены на рис. 11. Видно, продольный размер филаментов существ-

венно уменьшается, при этом их диаметр остается практически неизменным. Диаметр ОМФ с увеличением энергии (мощности) импульса стремится к диаметру лазерного пучка на входе в среду и не превышает его. Все характеристики ОМФ при филаментации в стекле импульсно-периодического излучения формируются при воздействии уже первого импульса и не зависят от времени воздействия излучением. Кроме того, отметим, что все филаменты параллельны друг другу и оси лазерного пучка.

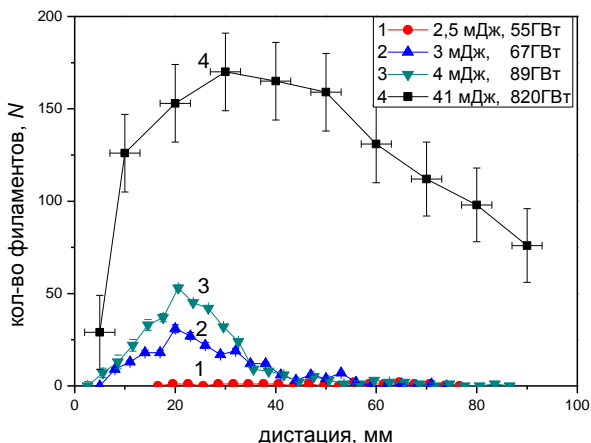


Рисунок 9 - Распределение филаментов вдоль области филаментации в стекле. Кривая 4 на рисунке (а) – диаметр пучка 11 мм, остальные кривые – диаметр пучка 7 мм.

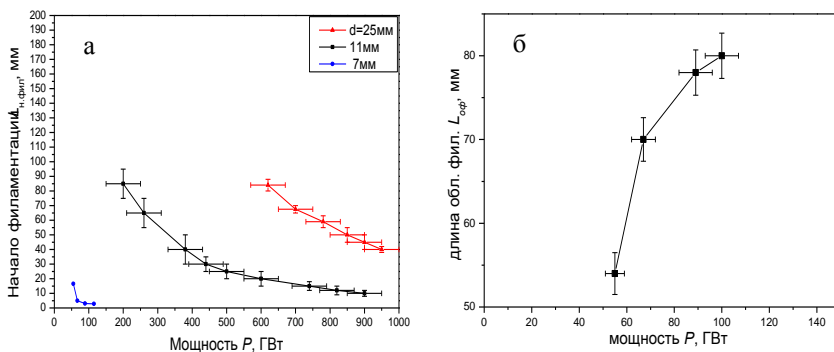


Рисунок 10 – а) Зависимости положения начала области филаментации  $L_{нач}$  для пучков различного диаметра в стекле. б) Зависимость длины области филаментации от мощности лазерного излучения в стекле.



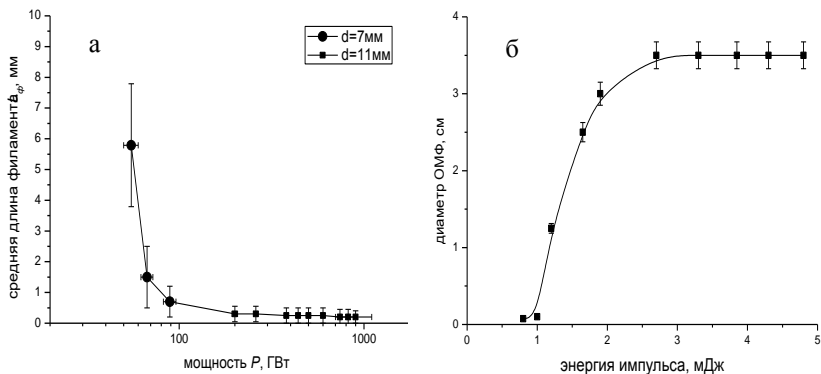


Рисунок 11 а) Зависимость средней длины филаментов в области множественной филаментации в стекле от мощности лазерного импульса. б) Зависимость диаметра области филаментации от энергии импульса (начальный диаметр пучка 3,5 мм).

Как было отмечено, при достижении средней интенсивности в импульсе значений  $\sim 8,1 \cdot 10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup> в стекле наблюдается появление вторичной области множественной филаментации (ОМФ-2), расположенной внутри первичного конуса ОМФ (см. рис. 8б) при энергии импульса 40 мДж для пучка диаметром  $r_0 = 0,625$  см. Были проведены специальные эксперименты по исследованию динамики ОМФ-2 с узким пучком  $r_0 = 0,35$  см, энергией импульса до 5 мДж. Средняя по сечению пучка пороговая (для появления вторичной ОМФ) интенсивность импульса и в том и другом случае составляет  $\sim 7-9 \cdot 10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup>. На рис.12 представлены примеры первичной ОМФ и ОМФ-2, зарегистрированные при различных интервалах воздействия импульсно-периодическим излучением с частотой следования импульсов 1кГц. Видно, что с увеличением времени воздействия характеристики ОМФ-2 изменяются. Во-первых, координата ее начала  $L_{n2}$  приближается к источнику излучения, во-вторых, увеличивается ее диаметр  $d_2$ . Количественные изменения  $L_{n2}$  от времени координаты начала и конца для для первичной ОМФ представлены на рис. 13. Видно, что в отличие от первичной ОМФ характеристики ОМФ-2 существенно зависят от времени воздействия. Также отметим, что в отличие от экспериментов с более широкими пучками при той же энергии и длительности импульсов (т.е. большей интенсивности в пучке см. рис.10б) зависимость длины первичной области филаментации от энергии импульса имеет неоднозначный характер (рис.13б). При достижении порогового значения энергии импульса  $L_{омф}$  начинает сокращаться за счет приближения конца ОМФ к источнику, при

том, что ее начало уже практически вплотную приближается к освещенной грани стекла.

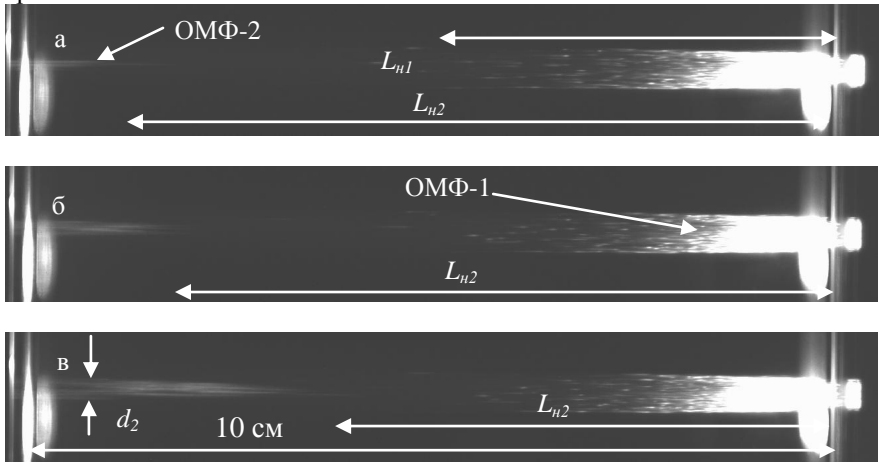


Рисунок 12 - Снимки первичной ОМФ и ОМФ-2 при различной продолжительности воздействия импульсами с энергией 5 мДж с частотой следования импульсов 1 кГц. а) – 1; б) – 61; в) – 294 с.

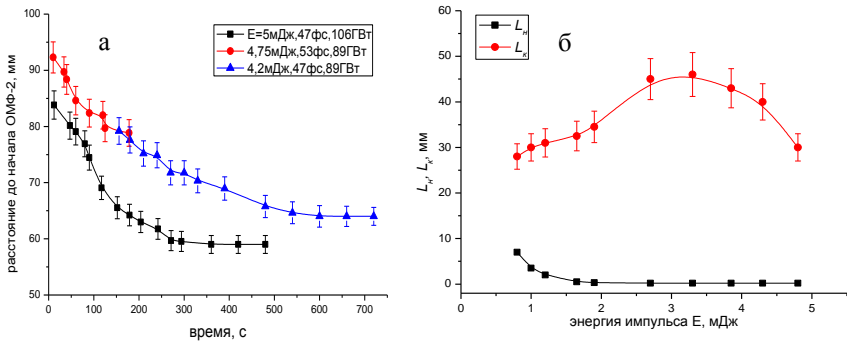


Рисунок 13 – а) Зависимости изменения расстояния от освещенной грани стекла до начала вторичной области множественной филаментации  $L_{н2}$  со временем при различных энергиях и мощностях лазерных импульсов. б) Зависимости расстояний от освещенной грани стекла до начала  $L_n$  и конца  $L_k$  области филаментации от энергии импульса (начальный диаметр пучка 3,5 мм).

Таким образом, в экспериментах по множественной филаментации в стекле показано, что структура области филаментации, при достижении пороговых значений средней интенсивности в пучке приобретает форму полого

конуса, зеркально повторяющего распределение плотности энергии в пучке. При этом наблюдается смена хода зависимости длины ОМФ и отдельных филаментов в ней от мощности импульса. Полученные результаты указывают, что при больших превышениях над критической мощностью самофокусировки ( $> 10^5 P_{cr}$ ) не наблюдается самофокусировки пучка как целого, а фокусируются отдельные его элементы.

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

Дефокусировка пучка, как инструмент удаления области множественной филаментации от источника на воздушной трассе, имеет предельные уровни, зависящие от диаметра пучка и его мощности, при превышении которых филаментация пучка прекращается.

Распределение филаментов в продольном направлении ОМФ является унимодальным, в поперечном сечении ОМФ происходит смещение филаментов от центра пучка в начале ОМФ к его периферии к концу области филаментации.

Установлена количественная связь между начальной мощностью лазерных импульсов с количеством филаментов в ОМФ и длиной области филаментации.

Для пучка с гауссовым распределением плотности энергии в поперечном сечении пучка при достижении в нем средней интенсивности лазерного импульса значений  $> 7 \cdot 10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup> в средах с сильной керровской нелинейностью (вода, стекло) ОМФ приобретает форму полого конуса вершиной направленной к источнику излучения. При дальнейшем увеличении средней интенсивности (энергии, мощности) импульса конус становится усеченным со стороны вершины.

Длина ОМФ с увеличением мощности импульса сначала возрастает, затем убывает.

Диаметр ОМФ увеличивается с ростом мощности (энергии) импульса и, при достижении определенных пороговых значений мощности, рост диаметра насыщается и становится равным диаметру пучка на входе в среду с кубичной нелинейностью.

При филаментации в стекле в начале области филаментации обнаружены «пульсирующие» треки, связанные (возможно) с повторными фокусировками (рефокусировками) первичных филаментов, которые появляются при мощности импульса  $> 0,3$  ГВт (для диаметра пучка 11 мм), количество рефокусировок первичного филамента возрастает с ростом мощности и для максимальной в эксперименте мощности 0,9 ТВт достигает 5. Рефокусировка реализуется на пространственном масштабе сравнимым с длиной отдельного филамента, т.е.  $\sim 0,2$  мм.

В экспериментах по филаментации в стекле импульсно-периодического излучения установлено, что характеристики ОМФ форми-

руются при воздействии первого импульса и не зависят от времени воздействия.

При достижении средней интенсивности лазерного импульса порогового значения ( $8,1 \cdot 10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup>) в стекле формируется вторичная ОМФ, также имеющая вид полого конуса. Распределение филаментов в продольном направлении становится бимодальным. При этом характеристики вторичной ОМФ (длина, координата начала, диаметр) существенно зависят от времени воздействия импульсно-периодическим излучением.

Для одинакового диапазона мощностей импульса длина отдельных филаментов в воздухе увеличивается с увеличением мощности лазерного импульса, а в стекле уменьшается, что свидетельствует о том, что зависимость длины филамента от мощности имеет максимум.

Измеренные спектры свечения при филаментации в стекле показывают, что свечение плазменных треков имеет вид полосы 350–700 нм с максимумом 520 нм с характерным временем свечения  $\sim 10^{-6}$  с.

Все филаменты в ОМФ параллельны оси пучка, что указывает на отсутствие т.н. «дочерних» филаментов, которые появляются вследствие взаимодействия «первичных» филаментов и (как правило) отклоняются от их направления.

На основе полученных результатов по филаментации в воде и стекле импульсов гигаваттной и тераваттной мощности, сделан вывод о том, что происходит не самофокусировка пучка как целого, а его отдельных элементов, каждый из которых самофокусируется на дистанции, соответствующей содержащейся в нем мощности.

### Цитируемая литература

1. Аскарьян Г.А. «Воздействие градиента поля интенсивного электромагнитного луча на электроны и атомы», Журнал экспериментальной и теоретической физики **42**, 1567 (1962).
2. Пилипецкий Н.Ф., Рустамов А.Р. «Наблюдение самофокусировки света в жидкостях», Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики **2**, 88 (1965).
3. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г. Нелинейная фемтосекундная оптика атмосферы / Под общей ред. д.ф.-м.н., профессора А.А. Землянова. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН. 2010. 212 с.
4. С. В. Чекалин, В. П. Кандидов, «От самофокусировки световых пучков — к филаментации лазерных импульсов», УФН, 2013. Т. 183: № 2. С. 133–152.
5. Chin S.L. Femtosecond Laser Filamentation / Springer Series on atomic, optical, and plasma physics. 2010. 125 p.

6. Кандидов В.П., Шлёнов С.А., Косарева О.Г. «Филаментация мощного фемтосекундного лазерного излучения» Квантовая электроника 39, 205 (2009).
7. Таланов В.И. «Самофокусировка электромагнитных волн в нелинейных средах», Известия ВУЗов, серия радиофизика 7, 564 (1964).
8. Ахманов С.А., Сухоруков А.П., Хохлов Р.В. «Самофокусировка и дифракция света в нелинейной среде», Успехи физических наук 91, 19 (1967).
9. 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.
10. Ионин А.А., Кудряшов С.И., Макаров С. В., Селезнев Л. В., Синицын Д. В. Множественная филаментация мощных фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе // Письма в ЖЭТФ. 2009. Т. 90, №. 6, с. 467-472.
11. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А. Характеристики филаментов при распространении мощного фемтосекундного лазерного излучения в воздухе и в воде: I. Качественный анализ // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23. № 9. С. 749-756.
12. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А. Характеристики филаментов при распространении мощного фемтосекундного лазерного излучения в воздухе и в воде: II. Численное моделирование // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23. № 9. С. 757-760.
13. Marburger J.H. Self-focusing: Theory // Prog. Quant. Electr. 1975. V. 4. Part 1. P. 35–110.
14. Brodeur A., Chien C.Y., Pkov F.A., Chin S.L., Kosareva O.G., Kandidov V.P. Moving focus in the propagation of ultrashort laser pulses in air // Optics Letters. 1997. V. 22. №5 P.304.

#### **Основные публикации по теме диссертации**

1. Апексимов Д.В., Букин О.А., Быкова Е.Е., Гейнц Ю.Э., Голик С.С., Землянов А.А., Ильин А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., **Петров А.В.**, Соколова Е.Б. Филаментация сфокусированных фемтосекундных импульсов Ti:Sa-лазера на первой и второй гармониках в воздухе // Прикладная физика. 2012. № 6. С. 14-22.
2. Д.В. Апексимов, О.А. Букин, Е.Е. Быкова, С.С. Голик, А.А. Землянов, А.М. Кабанов, Г.Г. Матвиенко, **А.В. Петров** Свечение морского аэрозоля под действием ультракоротких лазерных импульсов Ti:Sapphire-лазера на первой и второй гармониках // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т.26. №.11. С.974-977.
3. Д.В. Апексимов, О.А. Букин, Е.Е. Быкова, С.С. Голик, А.А. Землянов, А.А. Ильин, А.М. Кабанов, Г.Г. Матвиенко, В.К. Ошлаков, **А.В. Пет-**

- ров**, Е.Б. Соколова Филаментация фемтосекундных импульсов Ti:Sapphire-лазера на первой и второй гармониках в жидких средах // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т.26. №12. С.1029-1033.
4. D.V. Apeximov, E.E. Bykova, Yu.E. Geints, A.A. Zemlyanov, A.M. Kabanov, G.G. Matvienko, V.K. Oshlakov, **A.V. Petrov**, O.A. Bukin, A.A. Piyin, E.B. Sokolova, S.S. Golik Filamentation of a focused Ti:Sapphire-laser pulse at two harmonics in air // Plasma Physics Reports, 2013. V.39, №13. P.1074-1081.
  5. Д.В. Апексимов, О.А. Букин, Е.Е. Быкова, С.С. Голик, А.А. Землянов, А.М. Кабанов, О.И. Кучинская, Г.Г. Матвиенко, В.К. Ошлаков, **А.В. Петров**, Е.Б. Соколова Пространственные характеристики области филаментации гигаваттных лазерных импульсов при их различной фокусировке на атмосферной трассе // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т.27. №12, С.1042-1046.
  6. Д.В. Апексимов, О.А. Букин, С.С. Голик, А.А. Землянов, А.М. Кабанов, О.И. Кучинская, А.В. Майор, Г.Г. Матвиенко, В.К. Ошлаков, **А.В. Петров**, Е.Б. Соколова, Е.Е. Хорошаева Множественная филаментация коллимированных пучков Ti:Sapphire-лазера в воде // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т.27. №11, С. 957-960.
  7. D.V. Apeximov, 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, and E.E. Khoroshaeva Interaction of Femtosecond Pulses of a Two-Harmonic Ti:Sapphire Laser with Liquid Media // Physics of Wave Phenomena. 2014. V.22. №.3. P159-168.
  8. Д.В. Апексимов, О.А. Букин, С.С. Голик, А.А. Землянов, А.М. Кабанова, О.И. Кучинская, Г.Г. Матвиенко, В.К. Ошлаков, **А.В. Петров**, Е.Б. Соколова, Е.Е. Хорошаева Филаментация сфокусированных и коллимированных лазерных пучков в жидкостях // Известия вузов. Физика. 2015. Т. 58. № 1. С.105-111. (D.V. Apeximov, 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. Filamentation of Focused and Collimated Laser Beams in Liquids // Russian Physics Journal. 2015. V.58. Issue 1. P. 117-124).
  9. Апексимов Д.В., Землянов А.А., Иглакова А.Н., Кабанов А.М., Кучинская О.И., Матвиенко Г.Г., **Петров А.В.**, Ошлаков В.К. Филаментация тераваттных лазерных импульсов на стометровой атмосферной трассе // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т.28. № 3. С. 274-277.
  10. 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** Множественная филаментация коллимированного лазерного излучения в воде и стекле // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 11. С.972-977.

11. Д.В. Апе́ксимов, 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 Множественная филаментация лазерных импульсов в стекле // Известия вузов. Физика. 2015. Т. 58. № 11. С.89-94.
12. Д.В. Апе́ксимов, А.А. Землянов, А.Н. Иглакова, А.М. Кабанов, О.И. Кучинская, Г.Г. Матвиенко, В.К. Ошлаков, **А.В. Петров** Множественная филаментация лазерных пучков различного радиуса в воздухе на стопятидесятиметровой трассе // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т.29. № 1. С.51-55.
13. Ю.Э. Гейнц, С.С. Голик, А.А. Землянов, А.М. Кабанов, **А.В. Петров** Микроструктура области множественной филаментации фемтосекундного лазерного излучения в твердом диэлектрике // Квантовая электроника. 2016. Т.46. №2, С.133-141.
14. Д.В. Апе́ксимов, С.С. Голик, А.А. Землянов, А.М. Кабанов, А.В. Майор, **А.В. Петров** Динамика структуры области множественной филаментации лазерных импульсов в стекле // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т.29. №12. (в печати).
15. Д.В. Апе́ксимов, А.А. Землянов, А.Н. Иглакова, А.М. Кабанов, О.И. Кучинская, Г.Г. Матвиенко, В.К. Ошлаков, **А.В. Петров** Постфиламентационные каналы при распространении субтераваттных импульсов Ti:Sapphire-лазера на стопятидесяти метровой трассе // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т.30. (в печати).

Печ. л. 1.  
Тираж 100 экз. Заказ № .

---

Тираж отпечатан в типографии ИОА СО РАН