

На правах рукописи

СИЛАЕВА ЕЛЕНА ПЕТРОВНА

**ФИЛАМЕНТАЦИЯ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО
ИМПУЛЬСА В АТМОСФЕРЕ В УСЛОВИЯХ КОГЕРЕНТНОГО
РАССЕЯНИЯ В ВОДНОМ АЭРОЗОЛЕ**

Специальность 01.04.21 – лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2010

Работа выполнена на кафедре общей физики и волновых процессов физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Кандидов Валерий Петрович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Стрелков Герман Михайлович,
ИРЭ РАН, г. Фрязино Московской области
кандидат физико-математических наук
Суворов Алексей Анатольевич,
ГНЦ РФ - ФЭИ, г. Обнинск Калужской области

Ведущая организация: Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО
РАН, г. Томск

Защита состоится 21 октября 2010 г. в 16⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 501.001.31 при Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119991 ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ, дом 1, строение 62, Корпус нелинейной оптики, аудитория им. С.А. Ахманова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова

Автореферат разослан "___" _____ 2010 года

Ученый секретарь диссертационного совета Д 501.001.31,
кандидат физико-математических наук, доцент

Т.М. Ильинова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

При распространении в атмосферном воздухе фемтосекундного лазерного излучения гига- и тераваттной мощности возникает филаментация, при которой лазерная энергия локализуется в тонкие протяженные нити. Образование филаментов является результатом динамического баланса керровской самофокусировки лазерного излучения и дефокусировки его в наведенной лазерной плазме, возникающей вследствие фотоионизации газовых компонент воздушной среды. В воздухе при длине волны излучения 0.8 мкм согласно различным экспериментальным данным диаметр филамента составляет $d_{fil} \approx 100$ мкм, пиковое значение интенсивности – $I_{fil} \approx 10^{13} \div 10^{14}$ Вт/см², концентрация свободных электронов в плазменном канале – $N_e \approx 10^{14} \div 10^{16}$ см⁻³ и его диаметр – $d_{pl} \approx 50$ мкм. Одним из проявлений филаментации является генерация суперконтинуума, спектральная полоса которого в воздухе простирается от 0.5 до 4.5 мкм. Явление филаментации имеет важное прикладное значение в атмосферной оптике, позволяя зондировать состав атмосферы и обнаруживать загрязняющие примеси, получать плазму оптического пробоя и сигнал флюоресценции на мишенях, удаленных на километровые расстояния, управлять высоковольтным разрядом молнии и конденсацией водяного пара в атмосфере, создавать линии передачи СВЧ излучения¹.

В реальных условиях импульсы тераваттной мощности, которая в десятки и сотни раз выше критической мощности самофокусировки в воздухе ($P_{cr} = 2 \div 6$ ГВт), распадаются на хаотическое множество филаментов. Это является следствием модуляционной неустойчивости интенсивного светового поля в среде с керровской нелинейностью². Центрами зарождения филаментов в поперечном сечении импульса могут быть случайные возмущения светового поля, обусловленные качеством выходного пучка, флуктуациями показателя преломления в турбулентной атмосфере и рассеянием на частицах аэрозоля.

Важным фактором, определяющим процесс филаментации лазерного импульса, является наличие на атмосферной трассе облачности и осадков, что приводит к рассеянию и ослаблению излучения. Эксперименты по взаимодействию филамента с отдельными частицами, выполненные в натуральных³ и лабораторных⁴ условиях, а также теоретические исследования⁵ показывают, что капля, перекрывающая приосевую область лазерного импульса, фатально не препятствует существованию филамента.

¹ J. Kasparian et al. *Science*, **301**, 61 (2003); В.П. Кандидов и др. *Квант. эл.*, **39**, 205 (2009)

² В.И. Беспалов, В.И. Таланов. *Письма в ЖЭТФ*, **3**, 471 (1966)

³ F. Courvoisier et al. *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 213 (2003)

⁴ A. Dubietis et al. *Phys. Rev. Lett.*, **92**, 253903 (2004)

⁵ M. Kolesik, J.V. Moloney. *Opt. Lett.*, **29**, 590 (2004)

Излучение на периферии поперечного сечения импульса проходит мимо капли, и после нее энергия вследствие керровской самофокусировки перетекает к оси импульса, поддерживая тем самым восстановление филамента за каплей.

Если плотность аэрозоля достаточно велика, то энергия излучения сформировавшегося филамента убывает по закону Бугера, как и при распространении импульса малой мощности в рассеивающей среде^{3,6}. При множественной филаментации происходит уменьшение числа филаментов вследствие ослабления излучения в аэрозоле⁷.

В теоретических исследованиях филаментации в аэрозоле обычно используются модели, в которых частицы заменяются непрозрачными дисками, поглощающими излучение⁷, или рассеивающая среда заменяется сплошной ослабляющей средой⁸. В этих моделях вследствие ослабления энергии в аэрозоле, филамент образуется позже и сокращается его длина.

В настоящее время сформировалось новое научное направление – нелинейная фемтосекундная оптика атмосферы, которая охватывает широкий круг явлений, связанных с взаимодействием мощного фемтосекундного лазерного излучения с атмосферой, как многокомпонентной случайно-неоднородной средой⁹. В связи с возросшим интересом к использованию явления филаментации в приложениях атмосферной оптики, исследование влияния аэрозоля и атмосферной турбулентности на формирование филаментов при распространении фемтосекундных лазерных импульсов в атмосфере представляет собой актуальную задачу. Однако при исследовании распространения лазерного излучения в облаках и туманах обычно не учитывается вклад многократного когерентного рассеяния на частицах в формирование филаментов. Вместе с тем, для лазерного излучения на длине волны $\lambda = 0.8$ мкм, для которого поглощение в воде мало, определяющим в трансформации импульса и его энергетических характеристик является рассеяние на частицах аэрозоля. Процесс филаментации в турбулентной аэродисперсной среде мощного фемтосекундного лазерного импульса ранее не рассматривался ни теоретически, ни экспериментально.

Цели и задачи диссертационной работы

Целью работы является комплексное исследование методом численного эксперимента филаментации фемтосекундного лазерного импульса в турбулентной аэродисперсной среде при различных параметрах излучения и микрофизических

⁶ Н.Н. Бочкарев и др. *Опт. атмос. и океана*, **17**, 971 (2004)

⁷ G. Mejean et al. *Phys. Rev. E*, **72**, 026611 (2005)

⁸ A.A. Zemlyanov, Y.E. Geints. *Opt. Commun.*, **259**, 799 (2006)

⁹ В.П. Кандидов и др. *Опт. атмос. и океана*, **13**, 429 (2000); Ю.Э. Гейнц и др. *Нелинейная фемтосекундная оптика атмосферы*, Томск: Изд. Института опт. атмос. СО РАН. 212 с., 2010

характеристиках среды. Достижение этой цели включает следующие конкретные задачи:

1. Развитие стратифицированной модели филаментации мощного фемтосекундного лазерного импульса при многократном когерентном рассеянии на частицах аэрозоля в условиях атмосферной турбулентности.
2. Исследование влияния возмущений и ослабления светового поля, вызванных многократным когерентным рассеянием фемтосекундного лазерного импульса в аэрозоле, на его филаментацию.
3. Исследование распространения филамента мощного фемтосекундного импульса и переноса им энергии высокой плотности через слой водного аэрозоля.
4. Статистическое исследование филаментации фемтосекундного лазерного импульса в турбулентной атмосфере, замутненной аэрозолем.
5. Анализ возможности замены дисперсной среды аэрозоля ослабляющей непрерывной средой той же оптической толщи при исследовании явления филаментации.

Научная новизна работы

1. Оригинальной является модель многократного когерентного рассеяния лазерного излучения в аэрозоле в условиях турбулентности на основе стратифицированного представления распространения излучения в атмосфере.
2. Впервые исследована рефокусировка фемтосекундного лазерного импульса в присутствии слоя аэрозоля в атмосфере.
3. Впервые исследован вклад ионизации воздушной среды, дефокусировки в наведенной лазерной плазме и рассеяния на частицах аэрозоля в ослабление энергии высокой плотности, локализованной в филаменте.
4. Новыми являются результаты статистического анализа зарождения филаментов при распространении мощных фемтосекундных лазерных импульсов в дисперсной среде водного аэрозоля, на основе которого установлено, что возможны различные режимы филаментации в зависимости от параметров аэрозоля и лазерного импульса.
5. Впервые численно исследована стохастическая множественная филаментация мощного лазерного импульса в водном аэрозоле в условиях турбулентных флуктуаций показателя преломления в атмосфере. Получены динамические сценарии локализации энергии светового поля и формирования лазерной плазмы при филаментации импульса в аэродисперсной турбулентной атмосфере.

Практическая ценность работы

1. Вывод об иницировании множественной филаментации в аэрозоле при когерентном рассеянии на частицах может найти применение при разработке

систем атмосферной оптики, в частности, тракта вывода мощного лазерного импульса на атмосферную трассу.

2. Вывод о повышении эффективности переноса энергии высокой плотности филаментом фемтосекундного импульса в атмосфере при увеличении его длительности представляет интерес для дистанционной эмиссионной спектроскопии, индуцированной филаментацией.
3. Определение области параметров лазерного излучения и аэрозоля, в которой возможна замена дисперсной среды аэрозоля сплошной ослабляющей средой, является полезным при планировании экспериментов по филаментации фемтосекундных лазерных импульсов в атмосфере.
4. Стратифицированная модель и компьютерный код для исследования филаментации мощного фемтосекундного лазерного излучения при рассеянии в аэрозоле в условиях турбулентности может найти применение для планирования и анализа результатов натуральных экспериментов на атмосферных трассах.

Защищаемые положения

1. Многократное когерентное рассеяние мощного фемтосекундного лазерного импульса на частицах водного аэрозоля вызывает как инициирование множественной филаментации на возмущениях поля, возникающих при рассеянии, так и уменьшение числа филаментов, вплоть до их исчезновения, из-за ослабления мощности при рассеянии. При оптической толще аэродисперсной среды на расстоянии филаментации $\tau < 0.2$ определяющим является влияние возмущений на образование множества филаментов, при $\tau > 0.2$ доминирует ослабление мощности лазерного излучения.
2. Сформировавшийся филамент является пространственно устойчивой структурой и после прохождения через слой плотного аэрозоля, вызывающего возмущения в распределении интенсивности, происходит восстановление осесимметричной моды филамента – унимодальной для коллимированного импульса и кольцевой в условиях сильной фокусировки.
3. В дисперсной среде ослабление энергии высокой плотности, локализованной в сечении филамента, обусловлено рассеянием на частицах аэрозоля, дефокусировкой в лазерной плазме и фотоионизацией газовых компонент воздуха. При этом потери, связанные с фотоионизацией в несколько раз меньше, чем вызванные плазменной дефокусировкой.
4. В аэродисперсной турбулентной атмосфере рассеяние светового поля на частицах водного аэрозоля замедляет на трассе развитие множественной филаментации в мощном фемтосекундном лазерном импульсе.

5. Дисперсная среда атмосферного аэрозоля при филаментации фемтосекундного лазерного импульса эквивалентна сплошной ослабляющей среде только в условиях большой оптической толщи, при которой доминирует ослабление импульса при когерентном рассеянии.

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертации изложены в 20 научных публикациях, из них 7 статей в журналах, из списка ВАК России: "Applied Physics B: Lasers and Optics", "Journal of Russian Laser Research", "Вестник МГУ. Физика и астрономия", "Оптика атмосферы и океана", "Квантовая электроника", "Оптический журнал, и докладывались на международных конференциях: *3rd International Symposium on Filamentation* (Крит, Греция, июнь 2010), *International Advanced Research Workshop "Modern Problems in Optics and Photonics"* (Ереван, Армения, сентябрь 2009), *International conference "SPIE Optics and Photonics"* (Сан-Диего, США, август 2009), *XVI Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам "Ломоносов-2009"* (Москва, Россия, апрель 2009), *Third Russian-French Laser Physics Workshop for Young Scientists* (Санкт-Петербург, Россия, сентябрь 2008), *International conference "SPIE Optics and Photonics"*, (Сан-Диего, США, август 2008), *International Conference on High Power Laser Beams HPLB-2006* (Нижний Новгород – Ярославль, июль 2006), *XII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам "Ломоносов-2006"* (Москва, апрель 2006); *Международная конференция молодых ученых "Оптика-2005"*, (Санкт-Петербург, октябрь 2005); *ICONO/LAT* (Санкт-Петербург, май 2005), *XI Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам "Ломоносов-2005"* (Москва, апрель 2005), а также на семинарах кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета и МЛЦ МГУ им. М.В. Ломоносова.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, приложения и списка цитируемой литературы. Объем работы составляет 130 страниц, включая 57 рисунков и 1 таблицу. Список цитируемой литературы содержит 145 наименований, включая 9 авторских публикаций.

Личный вклад автора

Все использованные в диссертации результаты получены автором лично или при его определяющем участии.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цели и задачи, научная новизна, практическая значимость и защищаемые положения.

В **первой главе "Состояние исследований по филаментации мощного фемтосекундного лазерного импульса в атмосфере"** дан обзор исследований по распространению мощного фемтосекундного лазерного импульса в атмосферных условиях. Приведены результаты экспериментальных и теоретических работ, которые дают представление о физических процессах, определяющих филаментацию фемтосекундных импульсов в воздухе. Рассматриваются результаты работ, посвященных взаимодействию мощного фемтосекундного лазерного импульса с аэрозолем и турбулентностью в атмосфере.

В **§1** дано представление о физике явления филаментации в воздухе. Приведена краткая ретроспектива экспериментальных работ по регистрации самофокусировки и филаментации лазерных импульсов. Рассмотрены теоретические модели, объясняющие зарождение и динамику филаментов. Подробно описана динамическая модель движущихся фокусов.

В **§2** рассмотрены особенности филаментации мощного фемтосекундного лазерного импульса в атмосфере, связанные с тем, что атмосфера представляет собой неоднородную многокомпонентную среду, в которой флуктуации оптических параметров имеют широкий диапазон масштабов пространственного спектра. Дан обзор натуральных экспериментов по множественной филаментации в атмосфере. Описаны экспериментальные и теоретические исследования влияния атмосферной турбулентности на филаментацию мощного фемтосекундного лазерного импульса, которое может приводить к блужданию филамента на трассе, образованию хаотического множества филаментов, изменению расстояния до старта филаментации и подавлению филаментации в условиях сильной турбулентности.

В **§3** изложено состояние исследований по филаментации лазерного импульса в аэрозоле. Рассмотрены методы зондирования аэрозоля, основанные на нелинейно-оптическом взаимодействии интенсивного фемтосекундного лазерного излучения с частицами аэрозоля: флуоресцентная спектроскопия, индуцированная филаментацией (FIFS), и эмиссионная спектроскопия, индуцированная лазерным излучением (LIBS). Описаны экспериментальные и теоретические исследования по взаимодействию филамента с отдельно расположенными водными каплями размером несколько десятков микрометров, которые демонстрируют, что такие капли оказывают ничтожно малое влияние на дальнейший процесс филаментации. Дан обзор теоретических и экспериментальных работ, посвященных филаментации мощных лазерных импульсов в

условиях сильного ослабления в плотном аэрозоле при большой концентрации частиц ($\sim 10^5 \text{ см}^{-3}$). Сформулирована проблема влияния когерентного рассеяния на ансамбле частиц атмосферного аэрозоля на процесс филаментации мощного фемтосекундного лазерного импульса и определена мотивация данной диссертационной работы.

Во второй главе "Модель филаментации мощного фемтосекундного лазерного импульса в атмосфере" дано физическое обоснование и математическая формулировка стратифицированной модели когерентного рассеяния мощного лазерного излучения на ансамбле частиц водного аэрозоля в атмосфере. Определены физические границы применимости рассматриваемой модели. Проведен анализ стратифицированной модели когерентного рассеяния лазерного излучения на задаче линейного ослабления излучения при рассеянии в дисперсной среде.

В §4 описаны физические факторы, определяющие распространение мощного фемтосекундного лазерного импульса в атмосфере. Обоснована важность учета когерентных эффектов при рассеянии на ансамбле частиц в условиях нелинейного оптического взаимодействия излучения и дисперсной среды. Приведены параметры атмосферного аэрозоля: функция распределения частиц по размерам в облаках и туманах, коэффициент ослабления и оптическая толщина. Показано, что суммарный вклад электронов, генерируемых в частицах аэрозоля, не существенен для плазменных каналов филаментов. Приведены параметры и описана классическая модель атмосферной турбулентности.

В §5 сформулирована концепция стратификации аэродисперсной турбулентной среды в задаче направленного распространения импульса, согласно которой среда представляется последовательностью слоев конечной толщины Δz (Рис. 1). Предполагается, что каждый слой Δz достаточно мал, и изменения поля E , вызванные

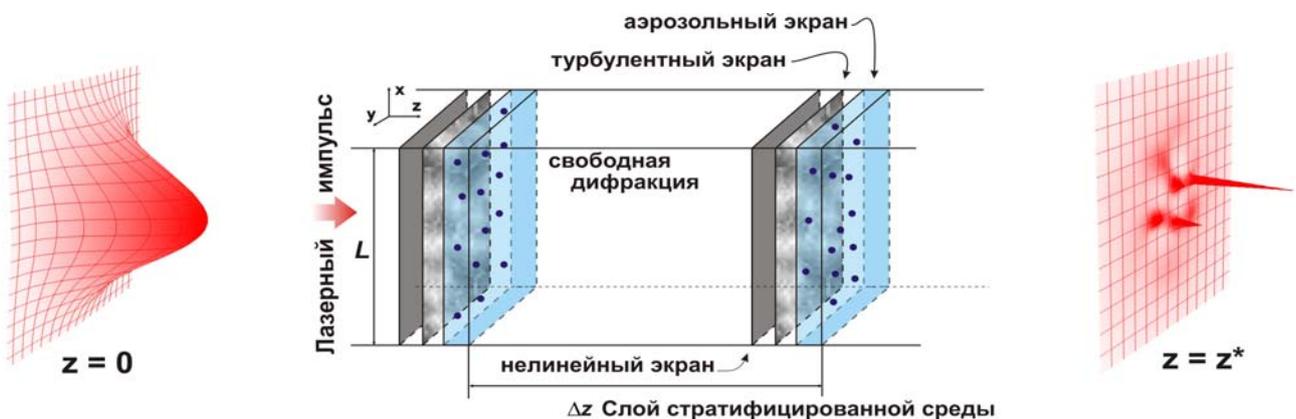


Рис. 1. Стратифицированная модель аэродисперсной турбулентной среды. Все частицы водного аэрозоля (схематически показаны точками) сосредоточены в "аэрозольных" экранах, в которых расположены случайно. L – поперечный размер рассматриваемой среды, Δz – расстояние между соседними аэрозольными экранами.

дифракционными, турбулентными, нелинейно-оптическими эффектами, рассеянием на частицах в слое, много меньше поля, падающего на слой:

$$\frac{\left|E(x, y, z + \Delta z) - E(x, y, z)\right|^2}{|E(x, y, z)|^2} \ll 1. \quad (1)$$

Вместе с тем, трансформация поля E на всей трассе, представленной последовательностью большого числа слоев, не является малой.

Стратифицированная модель филаментации лазерного импульса в аэрозоле и в условиях атмосферной турбулентности описывается стохастическим уравнением для комплексной амплитуды огибающей фемтосекундного импульса $\tilde{E}(x, y, z, t)$ в нелинейной случайно-неоднородной рассеивающей среде:

$$2ik \frac{\partial \tilde{E}(x, y, z, t)}{\partial z} = \frac{\partial^2 \tilde{E}(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tilde{E}(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{2k^2}{n_0} (\Delta n_{nl} + \Delta \tilde{n}) \tilde{E}(x, y, z, t) - ik\alpha_{ion} \tilde{E}(x, y, z, t) + \hat{D}_{aer} \tilde{E}(x, y, z, t), \quad (2)$$

где k – волновое число, n_0 – показатель преломления воздуха, \hat{D}_{aer} – оператор, описывающий преобразование поля вследствие когерентного рассеяния на частицах аэрозоля, $\Delta \tilde{n}(x, y, z)$ – изменение показателя преломления вследствие турбулентности, Δn_{nl} – приращение показателя преломления, определяемое суммой вкладов керровской нелинейности Δn_{kerr} и нелинейности наведенной лазерной плазмы Δn_{pl} . Согласно выполненным оценкам и результатам опубликованных экспериментов в атмосферном аэрозоле с типичными параметрами вклад ионизации, инициируемой лазерным излучением внутри капель, в концентрацию электронов плазменного канала филамента на два порядка меньше, чем вклад фотоионизации газовых компонент воздуха. Коэффициент α_{ion} описывает потери при многофотонной ионизации. При расчете Δn_{kerr} используется коэффициент кубической нелинейности сухого воздуха $n_2 = 2.4 \cdot 10^{-19}$ см²/Вт, поскольку объем воды частиц аэрозоля в атмосфере мал и их вкладом в n_2 можно пренебречь. В этом случае критическая мощность самофокусировки излучения на длине волны 0.8 мкм равна $P_{cr} = 4$ ГВт. Концентрация электронов $N_e(x, y, z, t)$, определяющая Δn_{pl} , вычисляется из кинетических уравнений для многофотонной ионизации молекул кислорода и азота, где вероятность ионизации задается в соответствии с моделью Переломова-Попова-Терентьева.

В каждом слое Δz стратифицированной модели уравнение (2) расщепляется на отдельные задачи: нелинейной рефракции, набега фазы, связанного с турбулентными флуктуациями, рассеяния на частицах аэрозоля, для решения которых используются модели нелинейного, турбулентного и аэрозольного экранов, и дифракции между экранами.

В §6 описан принцип построения аэрозольного экрана, моделирующего когерентное рассеяние на частицах слоя аэрозоля стратифицированной среды. Экран состоит из двух параллельных друг другу близко расположенных плоскостей. На первой плоскости задается ансамбль случайно расположенных аэрозольных частиц, на которых рассеивается поле; на второй – рассчитывается интерференция рассеянного излучения с невозмущенным полем. Для расчета рассеяния поля на отдельной частице используется простой алгоритм на основе приближения аномальной дифракции¹⁰. Получены условия для толщины слоя аэрозоля Δz_{aer} и расстояния между плоскостями аэрозольного экрана dz , при которых возможно использование описанной модели рассеяния:

$$\Delta z_{aer} < \frac{(2R)^2}{N\lambda^2 dz^2},$$

$$\frac{(2R)^2}{\lambda} < dz < \min \left\{ \sqrt[3]{\frac{1}{N} \left(\frac{2R}{\lambda} \right)^2}, \frac{2R}{\lambda} a_0 \right\},$$
(3)

где λ – длина волны излучения, a_0 – радиус пучка, R – радиус частиц аэрозоля, N – их концентрация.

В §7 приведены характерные масштабы задачи и параметры расчетной сетки по пространству и времени. Сформулированы условия, которые накладываются по координате z . Кроме условия на Δz_{aer} , к ним также относятся условия на расстояние между турбулентными экранами Δz_{turb} и нелинейный Δz_{nl} шаг:

$$\Delta z_{turb} \geq L_0,$$

$$\Delta z_{nl} = \frac{\pi k n_0}{30 \Delta n_{nl} (|E|^2)},$$
(4)

где L_0 – внешний масштаб атмосферной турбулентности. Выполнение этих условий необходимо, чтобы держаться в рамках концепции стратификации (1).

В §8 рассмотрена задача об ослаблении излучения в линейной аэродисперсной среде без турбулентности. Показано, что модель когерентного рассеяния в аэрозоле адекватно описывает ослабление лазерного излучения при его распространении в дисперсной среде облаков. Результаты статистического анализа методом Монте-Карло согласуются с хорошей точностью с законом Бугера.

В §9 произведен анализ корреляции флуктуаций интенсивности излучения в дисперсной среде при распространении лазерного пучка малой мощности. Показано, что с расстоянием пространственный размер возмущений интенсивности пучка, вызванных рассеянием на частицах аэрозоля, увеличивается. В присутствии

¹⁰ Г. Ван де Хюлст, *Рассеяние света малыми частицами*, Москва: Изд. ин. лит-ры. 536 с., 1961

нелинейности на этих возмущениях может развиваться модуляционная неустойчивость, приводящая к стохастическому распаду импульса на множество филаментов.

В §10 сформулированы основные выводы по второй главе.

В третьей главе "Распространение филамента фемтосекундного лазерного импульса через слой плотного аэрозоля" приведены результаты исследования стохастизации и восстановления сформировавшегося филамента мощного фемтосекундного импульса при прохождении через тонкий слой плотного водного аэрозоля. Рассмотрена возможность рефокусировки лазерного импульса после выхода из слоя аэрозоля. Исследовано влияние длительности фемтосекундного лазерного импульса на перенос филаментом энергии лазерного излучения высокой плотности в неблагоприятных условиях атмосферы, замутненной аэрозолем.

В §11 исследовано восстановление моды филамента после рассеяния в слое дисперсной среды аэрозоля высокой плотности. Был рассмотрен лазерный импульс с длиной волны $\lambda = 0.8$ мкм, длительностью (по уровню e^{-1}) $2\tau_0 = 280$ фс, радиусом начального пучка $a_0 = 1.5$ мм, энергией $W_0 = 10$ мДж, пиковыми величинами поверхностной плотности энергии $F_0 = 0.14$ Дж/см² и интенсивности $I_0 = 5 \cdot 10^{11}$ Вт/см², что соответствует пиковой мощности $P_0 = 40$ ГВт. При критической мощности самофокусировки в воздухе $P_{cr} = 4$ ГВт пиковая мощность импульса составляет $P_0 = 10P_{cr}$, что соответствует образованию только одного филамента в отсутствие начальных возмущений в сечении пучка. Показано, что сформировавшийся филамент характеризуется высокой устойчивостью модовой структуры. Это обусловлено пространственной фильтрацией при керровской и плазменной нелинейностях в воздушной среде. Внутри аэрозольного слоя (толщина слоя $L_{aer} = 10$ см, радиус частиц $R = 10$ мкм, их концентрация $N = 8 \cdot 10^3$ см⁻³) возникают возмущения светового поля и, как следствие этого, возмущения в распределении плотности энергии в филаменте и концентрации электронов в плазменном канале. После выхода из слоя в результате пространственной фильтрации светового поля филамента происходит восстановление основной моды в распределении плотности энергии (Рис. 2) и осесимметричного распределения концентрации электронов в плазменном канале. В коллимированном импульсе восстанавливается мода Таунса унимодального вида, в сфокусированном – характерная кольцевая мода распределения плотности энергии в поперечном сечении импульса.

В §12 показано, что филамент способен переносить высоколокализованную энергию на большие расстояния даже в неблагоприятных условиях атмосферы, замутненной аэрозолем. Энергия в филаменте с расстоянием падает из-за рассеяния на водных частицах в слое дисперсной среды аэрозоля, но продолжает уменьшаться и

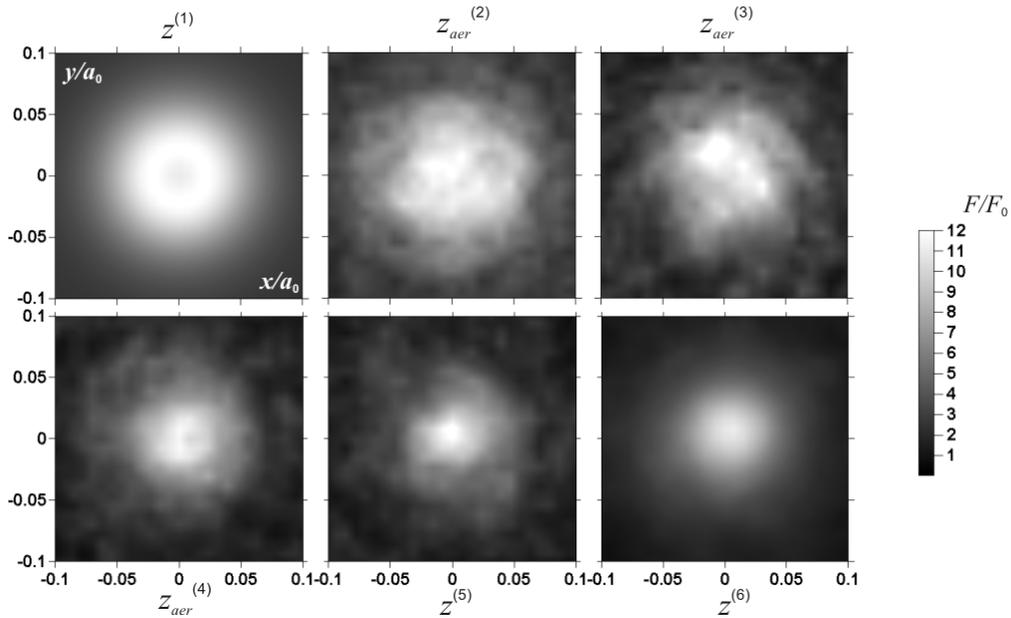


Рис. 2. Тоновые картины стохастического распределения плотности энергии $\tilde{F}(x/a_0, y/a_0)$ в поперечном сечении лазерного импульса мощностью $P_0 = 10 P_{cr}$ при распространении через аэрозольный слой толщиной 10 см с частицами радиусом $R = 10$ мкм и концентрацией $N = 8 \cdot 10^3$ см $^{-3}$, приведенные для разных расстояний z (до слоя $z^{(1)}$, через 1 см после входа в слой $z^{(2)_{aer}}$, в середине слоя $z^{(3)_{aer}}$, в конце слоя $z^{(4)_{aer}}$, сразу после выхода $z^{(5)}$, через 6 см после выхода $z^{(6)}$). Параметры импульса: $\lambda = 0.8$ мкм, $\tau_0 = 140$ фс, $a_0 = 1.5$ мм, $W_0 = 10$ мДж, $I_0 = 5 \cdot 10^{11}$ Вт/см 2 , $F_0 = 0.14$ Дж/см 2 .

после слоя из-за внесенных аэрозольным рассеянием амплитудно-фазовых возмущений в поперечном сечении импульса.

В §13 исследована рефокусировка мощного фемтосекундного лазерного импульса после филаментации в слое аэрозоля. Показано, что наличие на атмосферной трассе облака аэрозольных частиц приводит к уменьшению энергии филамента, и рефокусировка импульса за слоем приобретает стохастический характер, связанный с конкуренцией влияния возмущений, вызванных рассеянием на частицах аэрозоля, и фильтрации пространственных мод излучения.

В §14 рассмотрены потери энергии высокой плотности, которую переносит филамент, связанные с отдельными физическими процессами, определяющими его распространение в атмосфере через слой аэрозоля: фотоионизацией, плазменной дефокусировкой и рассеянием на частицах. Статистические испытания методом Монте-Карло со слоями разной толщины и одинаковой оптической толщины аэрозоля показали, что потери на ионизацию воздушной среды значительно меньше потерь, обусловленных другими процессами при филаментации фемтосекундного лазерного импульса в атмосферном аэрозоле.

Так, для коллимированного фемтосекундного лазерного импульса гауссовой формы с параметрами: $\lambda = 0.8$ мкм, $\tau_0 = 140$ фс, $a_0 = 1.5$ мм, $W_0 = 10$ мДж, $I_0 = 5 \cdot 10^{11}$

Вт/см², $P_0 = 40$ ГВт при его распространении через плотный слой аэрозоля толщиной $L_{aer} = 10$ см, радиусом частиц $R = 10$ мкм и концентрацией $N = 8 \cdot 10^3$ см⁻³ полные потери энергии, локализованной в филаменте, составляют $\Delta W_{\Sigma} = 0.26$ мДж. Потери энергии филамента, вызванные только рассеянием на частицах, составляют $\Delta W_{scatt} = 0.20$ мДж; потери, обусловленные нелинейно-оптическим взаимодействием излучения со средой, на длине слоя значительно меньше и составляют $\Delta W_{ion+defocus} = 0.044$ мДж. При этом потери только на фотоионизацию $\Delta W_{ion} = 0.01$ мДж в несколько раз меньше, чем потери энергии в филаменте, обусловленные ее выносом вследствие плазменной дефокусировки.

При этом сумма потерь, связанных с дефокусировкой в плазме и с фотоионизацией $\Delta W_{ion+defocus}$, и потерь, связанных с рассеянием на каплях аэрозоля ΔW_{scatt} , не равна полным потерям энергии филамента в слое аэрозоля ΔW_{Σ} :

$$\Delta W_{\Sigma} \neq \Delta W_{scatt} + \Delta W_{ion+defocus}. \quad (5)$$

При этом в зависимости от толщины слоя аэрозоля, а, значит, и длины нелинейного взаимодействия, полные потери могут быть как больше, так и меньше суммы потерь, связанных с отдельными процессами.

В §15 сформулированы основные выводы по третьей главе.

В **четвертой главе "Множественная филаментация мощного фемтосекундного лазерного импульса в аэрозоле"** дан анализ влияния когерентного рассеяния на частицах аэрозоля на формирование множества филаментов и плазменных каналов в импульсе, мощность которого во много раз превышает критическую мощность самофокусировки в воздухе. Методом Монте-Карло исследована нелинейная задача о зарождении филаментации фемтосекундных лазерных импульсов в плотном и разреженном аэрозоле. Проведен статистический анализ конкуренции двух факторов, связанных с рассеянием в аэрозоле, при множественной филаментации лазерного импульса в атмосфере: генерации возмущений светового поля и ослабления мощности излучения. Определены критерии подобия задачи о филаментации мощного фемтосекундного лазерного импульса в аэрозоле. Рассмотрена возможность замены дисперсной нелинейной среды эквивалентной сплошной средой с коэффициентом ослабления, соответствующим параметрам аэрозоля.

В §16 представлена физическая картина филаментации лазерного импульса в плотном и разреженном аэрозоле. Рассмотрен сценарий формирования множественной филаментации фемтосекундного импульса при когерентном рассеянии на частицах аэродисперсной среды. В дисперсной среде происходит интерференция возмущений, возникающих при когерентном рассеянии на большом числе случайно расположенных частиц. При большой мощности импульса наведенные максимумы поля в приосевой области импульса нарастают вследствие модуляционной неустойчивости мощного

светового поля в среде с кубической нелинейностью и формирование филаментов является существенно стохастическим.

Для импульса с параметрами $\tau_0 = 140$ фс, $a_0 = 2.5$ мм, $P_0 = 50P_{\text{cr}}$ получены распределения плотности энергии и концентрации электронов в пространстве в результате распространения в аэрозоле с радиусом частиц $R = 15$ мкм и их концентрацией $N = 100 \text{ см}^{-3}$. При множественной филаментации происходит формирование хаотически расположенных протяженных филаментов и отдельных областей с высокой концентрацией энергии, образуются плазменные каналы неправильной формы и отдельные очаги плазмы (Рис. 3). Видно, что на расстоянии $z = 2.5 \div 3$ м в поперечном сечении импульса возникают два независимых случайно расположенных филамента, зарожждение которых было инициировано возмущениями светового поля, возникающих при когерентном рассеянии на частицах. При $z = 3.5 \div 4$ м

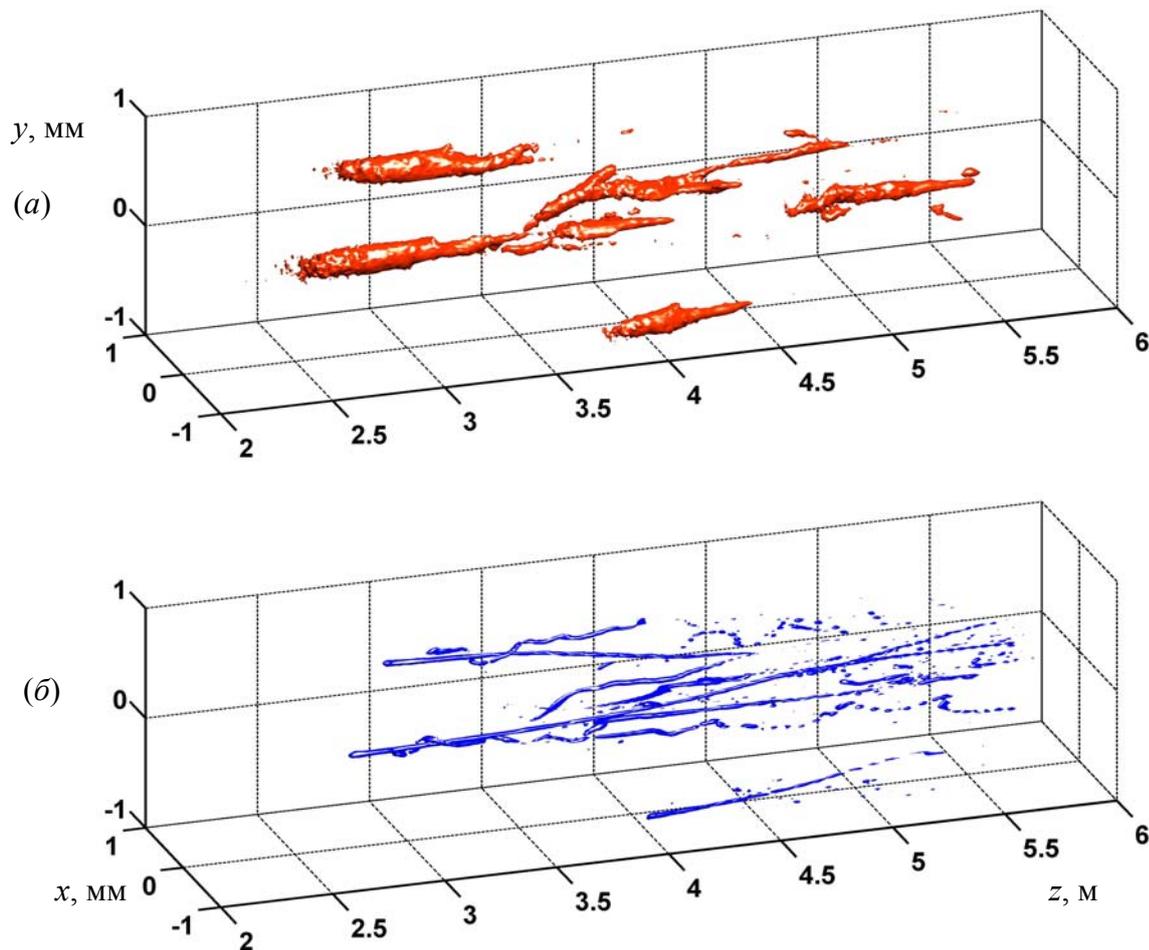


Рис. 3 Распределение поверхностной плотности энергии $F(x, y, z)$ (а) и концентрации электронов $N_e(x, y, z)$ (б) при множественной филаментации лазерного импульса в аэрозоле с $R = 15$ мкм, $N = 100 \text{ см}^{-3}$. На графики выведены поверхности $F = 2F_0$ (а) и $N_e = 5 \cdot 10^{-4} N_0$ (б). Заметим, что шкала по осям x, y , с одной стороны, и по оси z , с другой, отличается на три порядка. Параметры импульса: длительность $\tau_0 = 140$ фс, радиус пучка $a_0 = 2.5$ мм, пиковая мощность $P_0 = 200$ ГВт, т.е. $P_0 = 50P_{\text{cr}}$. Пиковое значение поверхностной плотности энергии $F_0 = 0.25 \text{ Дж/см}^2$.

интерференция возмущений, возникающих при дефокусировке в наведенной лазерной плазме, и возмущений, вызванных рассеянием на частицах, породила новые центры случайного зарождения вторичных филаментов. В дальнейшем при $z > 4.5$ м развивается стохастизация множественной филаментации, при которой образуется случайное множество областей с высокой плотностью энергии.

Полученный результат качественно согласуется с данными натурального эксперимента¹¹, в котором было зарегистрировано образование множества плазменных каналов при распространении импульса на протяженных атмосферных трассах.

В §17 приведены результаты статистического анализа режимов филаментации при различных параметрах аэрозольной среды и импульса. Анализ проводился в стационарном приближении, в котором не учитывается нелинейность лазерной плазмы на начальной стадии филаментации. Показано, что множественная филаментация мощного фемтосекундного импульса определяется конкуренцией двух факторов, связанных с многократным рассеянием на частицах аэрозоля: генерации возмущений светового поля и ослабления мощности излучения. При малой концентрации частиц доминирует влияние возмущений, вызванных когерентным рассеянием, и развивается множественная филаментация на расстоянии меньшем, чем гипотетическое образование одного филамента в мощном импульсе в прозрачной среде. С увеличением концентрации частиц возрастает роль ослабления энергии импульса, вызванного рассеянием, и расстояние до старта филаментов z_{fil} возрастает, их число уменьшается. Дальнейшее увеличение концентрации приводит к режиму одного филамента и, наконец, подавлению филаментации импульса (Рис. 4).

В §18 сформулированы критерии подобия задачи о филаментации мощного фемтосекундного лазерного импульса в аэрозоле. Представлены результаты численных экспериментов, в которых варьировалась пиковая мощность пучка, его радиус, концентрация и радиус частиц аэрозоля в широком диапазоне значений, характерном для исследования множественной филаментации в атмосфере.

Для обобщения полученных результатов в случаях разной мощности импульса, его радиуса, радиуса частиц аэрозоля были введены следующие безразмерные координаты:

- расстояние до старта филаментации $\zeta_{fil} = z_{fil}/kl_{cr}^2$, отнесенное к дифракционной длине неоднородности, содержащей критическую мощность самофокусировки $l_{cr} \sim (P_{cr}/\pi I_0)^{1/2}$, т.к. именно такая неоднородность приводит к зарождению филаментов;
- оптическая толщина среды на расстоянии филаментации $\tau = 2\pi R^2 N z_{fil}^*$, где z_{fil}^* – минимальное расстояние до старта филаментации в зависимости от концентрации

¹¹ G. Mechain et al. *Opt. Commun.*, **247**, 171, (2005)

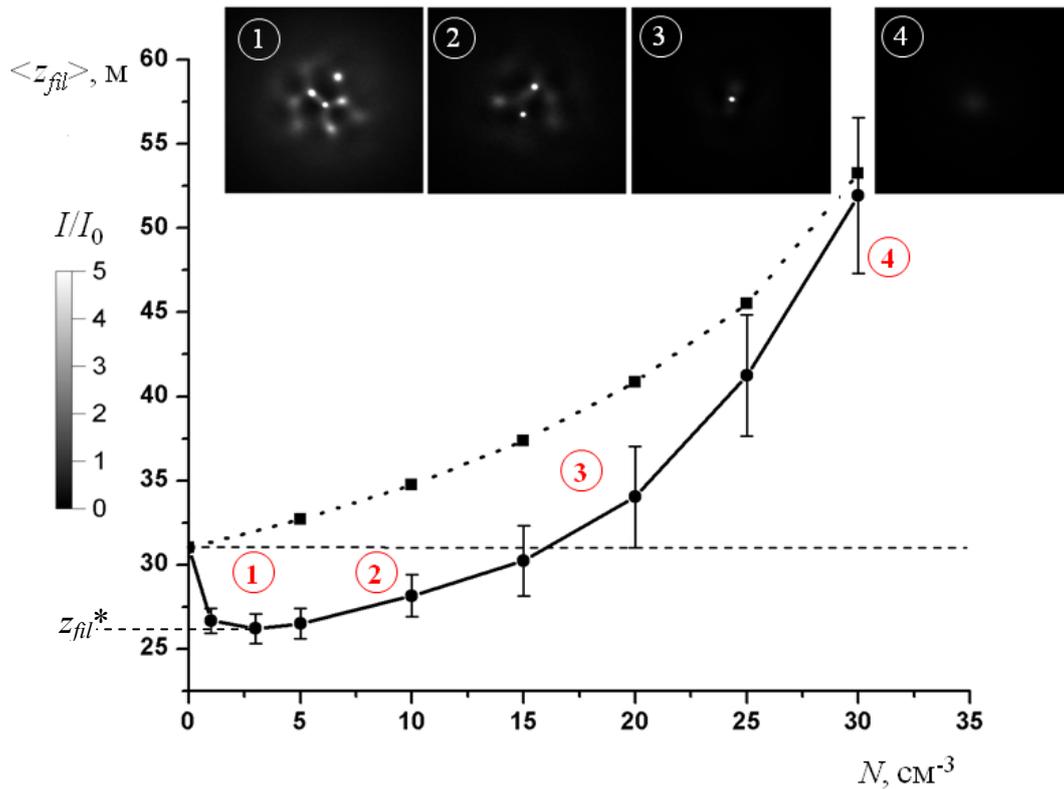


Рис. 4. Зависимость расстояния филаментации z_{fil} от концентрации частиц аэрозоля N радиусом $R = 15$ мкм при распространении пучка с начальными параметрами: $a_0 = 10$ мм, $I_0 = 1.3 \cdot 10^{11}$ Вт/см², $P_0 = 400$ ГВт в дисперсной среде (сплошная кривая) и сплошной ослабляющей среде с коэффициентом ослабления $\alpha_0 = 2\pi R^2 N$ (пунктирная кривая). Штриховой прямой обозначено расстояние до старта филаментации в чистой атмосфере. Цифрами в кружках пронумерованы диапазоны характерных концентраций аэрозольных частиц.

частиц, т.е. расстояние, на котором начинает проявляться ослабление при рассеянии. В случае, представленном на Рис. 4 это расстояние $z_{fil}^* = 27$ м.

Во введенных безразмерных координатах зависимости расстояния до старта филаментации от концентрации частиц аэрозоля близки и могут быть представлены одной обобщенной кривой (Рис. 5). При малой концентрации частиц, когда на расстоянии филаментации оптическая толщина дисперсной среды $\tau < 0.2$, определяющим является влияние возмущений светового поля, вызванных когерентным многократным рассеянием в дисперсной среде, на инициирование множественной филаментации, которая начинается на расстоянии меньшем, чем в режиме одного филамента. При большой концентрации частиц, когда $\tau > 0.2$, определяющим является ослабление излучения, вызванное рассеянием.

В §19 дана оценка возможности замены аэрозоля с рассеивающими частицами эквивалентной сплошной ослабляющей средой в исследовании филаментации

лазерного импульса. Распространение импульса в сплошной ослабляющей среде описывается уравнением (2), в котором положено, что оператор, описывающий рассеяние на частицах, $\hat{D}_{aer} = 0$ и дополнительно введено слагаемое $-ik\alpha_0 E$ в его правой части, отражающее линейное ослабление:

$$2ik \frac{\partial \tilde{E}(x, y, z, t)}{\partial z} = \frac{\partial^2 \tilde{E}(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tilde{E}(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{2k^2}{n_0} (\Delta n_{nl} + \Delta \tilde{n}) \tilde{E}(x, y, z, t) - ik\alpha_{ion} \tilde{E}(x, y, z, t) - ik\alpha_0 \tilde{E}(x, y, z, t) \quad (6)$$

Коэффициент ослабления α_0 в сплошной эквивалентной среде равен коэффициенту ослабления в рассеивающей стохастической среде.

Показано, что замена дисперсной среды сплошной с тем же коэффициентом ослабления применима только в условиях, при которых в процессе филаментации доминирует ослабление энергии при рассеянии на частицах и в импульсе формируется один филамент или филаментация отсутствует (пунктирная кривая на Рис. 4). Этот вывод качественно согласуется с результатами экспериментальных работ, в которых аэрозоль большой оптической толщи рассматривается как линейный ослабитель в процессе филаментации лазерных импульсов¹².

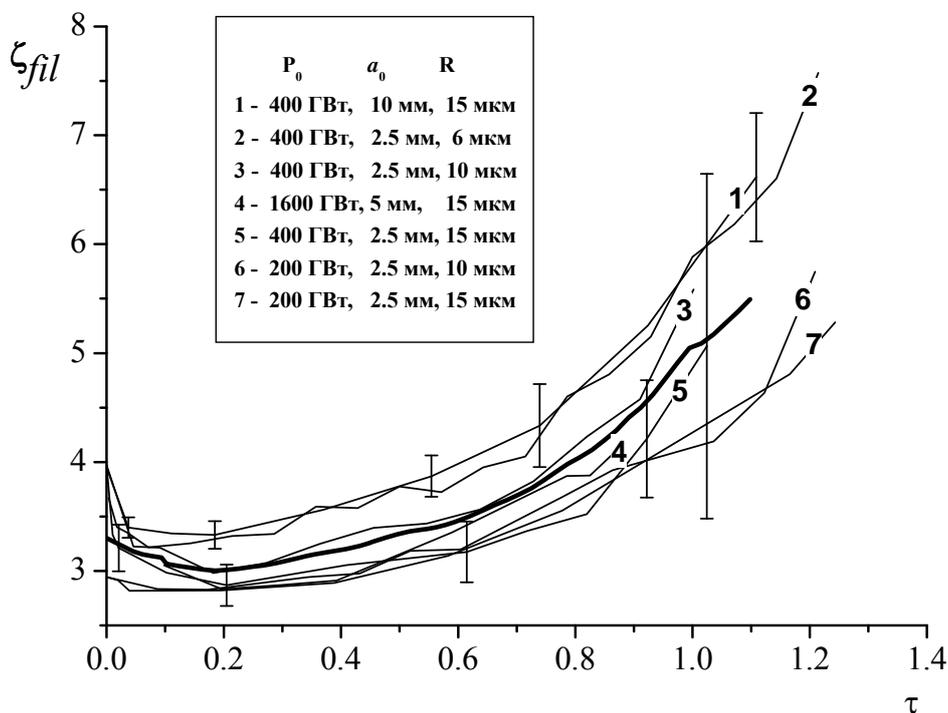


Рис. 5. Зависимость расстояния филаментации от оптической толщи аэрозоля для разных импульсов, выраженная через безразмерные координаты: $\zeta_{fil} = z_{fil}/kl_{cr}^2$ и $\tau = 2\pi R^2 N z_{fil}^*$. Жирная кривая – обобщение приведенных результатов.

¹² А.М. Кабанов. *Оптика мощных лазерных импульсов в газовой-аэрозольных средах*. Диссертация: Томск, 2010.

В §20 сформулированы основные выводы по четвертой главе.

В пятой главе "**Множественная филаментация в турбулентной среде атмосферного аэрозоля**" представлена динамика развития филаментации в фемтосекундном лазерном импульсе при распространении в турбулентной атмосфере с аэрозолем. Методом Монте-Карло определено расстояние в среднем до старта множественной филаментации при различных условиях на трассе.

В §21 рассмотрена качественная картина развития множественной филаментации при флуктуациях светового поля, инициированных турбулентностью и рассеянием в аэрозоле. Показано, что оба стохастических фактора в атмосфере, аэрозоль и турбулентность, приводят к возникновению неоднородностей светового поля в поперечном сечении импульса, которые могут вызывать множественную филаментацию. Однако это разные по своей природе неоднородности светового поля: амплитудные возмущения при интерференции рассеянной и прошедшей компонент поля в аэрозоле и фазовые возмущения поля в турбулентности формируют существенно разные распределения плотности энергии $F(x, y)$ на одних и тех же расстояниях (Рис. 6, а, б).

При распространении импульса в турбулентной атмосфере с аэрозолем мелкомасштабные пространственные возмущения, связанные с рассеянием на частицах аэрозоля, накладываются на крупные пространственные искажения, вызванные турбулентными возмущениями фазы, что приводит к перераспределению филаментов в пространстве и более значительному ослаблению импульса по сравнению со случаем прозрачной турбулентной атмосферы (Рис. 6, в). Показано, что длины экстинкции излучения, определяемые для дисперсной среды и турбулентной атмосферы, не являются параметрами подобия в задаче о филаментации лазерного импульса в турбулентной атмосфере с аэрозолем.

В §22 представлены результаты статистического анализа влияния рассеяния в аэрозоле на расстояние до старта множественной филаментации в турбулентной атмосфере с использованием стационарного приближения. Были рассмотрены импульсы с разными начальными параметрами и при различных микрофизических характеристиках среды (Табл. 1). Показано, что наличие аэрозоля в турбулентной атмосфере увеличивает расстояние до старта филаментации мощного фемтосекундного импульса в атмосфере.

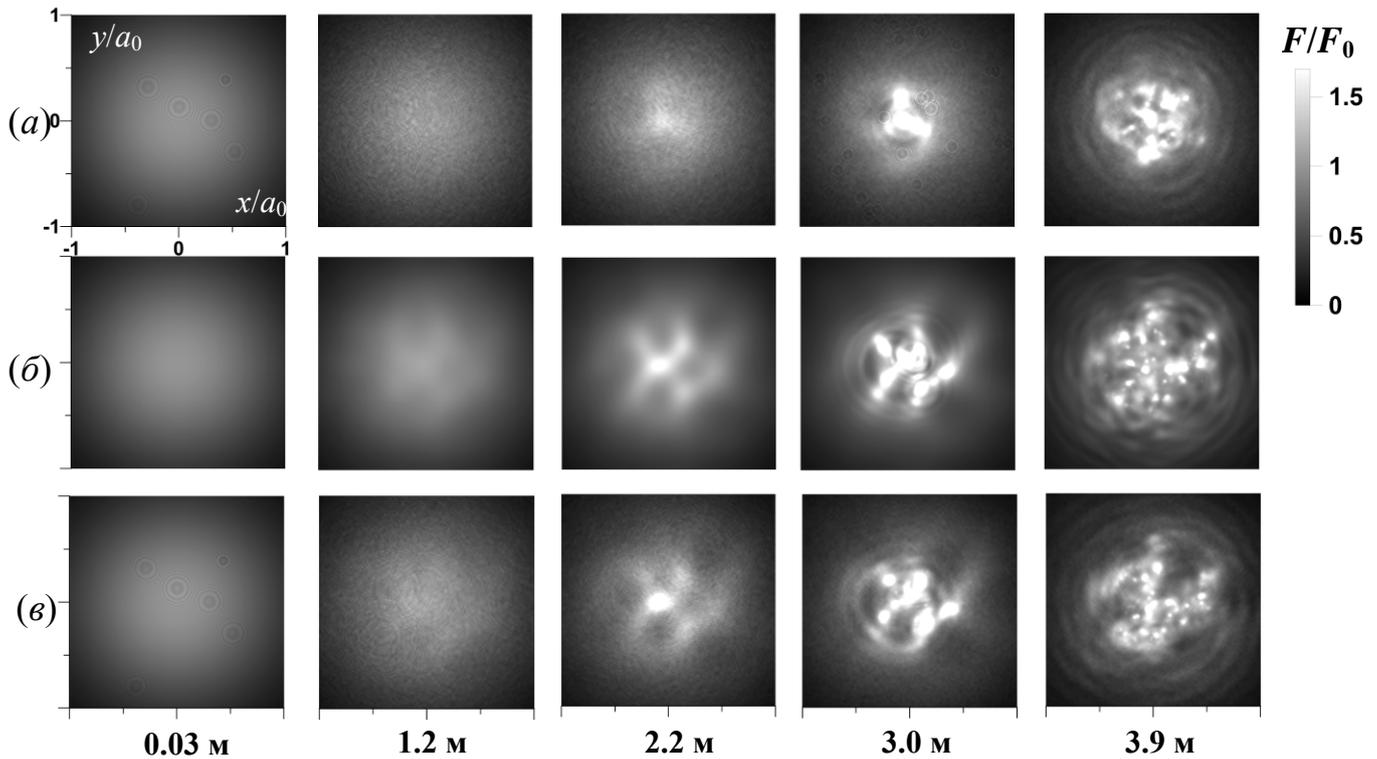


Рис. 6. Распределение плотности энергии $F(x, y)$ импульса на разных расстояниях z при распространении (а) в аэрозоле с концентрацией $N = 10 \text{ см}^{-3}$ и радиусом частиц $R = 15 \text{ мкм}$, (б) в турбулентности с параметрами: структурная постоянная $C_n^2 = 10^{-13} \text{ см}^{-2/3}$, внутренний масштаб $l_0 = 1 \text{ мм}$, внешний масштаб $L_0 = 1 \text{ м}$, (в) в турбулентной атмосфере с аэрозолем, параметры среды те же, что в (а) и (б). Параметры импульса: $\tau_0 = 140 \text{ фс}$, $a_0 = 2.5 \text{ мм}$, $I_0 = 10^{12} \text{ Вт/см}^2$, $P_0 = 200 \text{ ГВт}$, $F_0 = 0.25 \text{ Дж/см}^2$.

Таблица 1. Расстояние до старта филаментации, м.

Импульс	$P = 400 \text{ ГВт}$, $a_0 = 1 \text{ см}$	$P = 400 \text{ ГВт}$, $a_0 = 1 \text{ см}$	$P = 400 \text{ ГВт}$, $a_0 = 2 \text{ см}$
Структурная постоянная $L_0 = 1 \text{ м}$, $l_0 = 1 \text{ мм}$	$C_n^2 = 10^{-16} \text{ см}^{-2/3}$	$C_n^2 = 10^{-16} \text{ см}^{-2/3}$	$C_n^2 = 10^{-17} \text{ см}^{-2/3}$
Параметры аэрозоля	$R = 15 \text{ мкм}$, $N = 10 \text{ см}^{-3}$	$R = 15 \text{ мкм}$, $N = 25 \text{ см}^{-3}$	$R = 5 \text{ мкм}$, $N = 10 \text{ см}^{-3}$
Турбулентная прозрачная среда \tilde{z}_{turb}	24.6	24.6	97.4
Аэрозоль без турбулентности $\langle z_{aer} \rangle$	28.0 ± 1.4	41.2 ± 3.6	104.3 ± 6.1
Турбулентная среда с аэрозолем $\langle z_{turb+aer} \rangle$	27.2 ± 1.1	41.1 ± 3.9	100.1 ± 5.0
Турбулентная среда с линейным ослаблением	29.4	44.5	104.2

В §23 сформулированы основные выводы по шестой главе.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

В **приложении** дано расширенное описание модели многофотонной ионизации Переломова-Попова-Терентьева, используемое для расчета зависимости скорости ионизации кислорода и азота в настоящей работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Развита стратифицированная модель когерентного рассеяния мощного лазерного излучения на ансамбле частиц водного аэрозоля в атмосфере со случайными флуктуациями показателя преломления. Модель основывается на представлении аэродисперсной турбулентной среды в виде последовательности слоев конечной толщины. Каждый слой моделируется экранами: нелинейным, аэрозольным и турбулентным. Между экранами происходит свободная дифракция. На примере линейной среды показано, что модель когерентного рассеяния адекватно описывает ослабление лазерного излучения при его распространении в дисперсной среде облаков.
2. Исследована конкуренция двух факторов, связанных с когерентным рассеянием на частицах аэрозоля: генерации возмущений светового поля и ослабления мощности излучения. При малой концентрации частиц доминирует влияние возмущений, вызванных когерентным рассеянием, и развивается множественная филаментация мощного фемтосекундного лазерного импульса. С увеличением концентрации проявляется ослабление энергии импульса, расстояние до старта филаментов возрастает, их число уменьшается. Дальнейшее увеличение концентрации приводит к режиму одного филамента и, наконец, подавлению филаментации. Безразмерными параметрами подобия задачи о множественной филаментации лазерного импульса в аэрозоле являются расстояние до старта филаментации, отнесенное к дифракционной длине для масштаба, содержащего критическую мощность самофокусировки, и оптическая толщина среды τ на длине, равной минимальному расстоянию до множественной филаментации. При оптической толщине аэродисперсной среды на расстоянии филаментации $\tau < 0.2$ определяющим является влияние возмущений на образование множества филаментов, при $\tau > 0.2$ доминирует ослабление мощности.
3. Исследованы стохастизация и восстановление филамента фемтосекундного лазерного импульса при прохождении через тонкий слой плотного водного аэрозоля. Показано, что сформировавшийся филамент характеризуется высокой устойчивостью к возмущениям, возникающим при рассеянии в слое плотного аэрозоля, что обусловлено фильтрацией пространственных мод излучения в филаменте. После прохождения через слой плотного аэрозоля, вызывающего возмущения в распределении интенсивности в результате рассеяния на частицах,

происходит восстановление осесимметричной моды филамента – унимодальной для коллимированного импульса и кольцевой в условиях сильной фокусировки.

4. В дисперсной среде потери энергии высокой плотности, локализованной в сечении филамента, обусловлены совокупностью факторов: рассеянием на частицах аэрозоля, дефокусировкой в лазерной плазме и фотоионизацией газовых компонент воздуха. В филаменте потери на фотоионизацию в несколько раз меньше, чем потери, обусловленные выносом энергии вследствие плазменной дефокусировки. С увеличением длительности импульса при постоянной энергии потери высокоплотной энергии в филаменте, вызванные дефокусировкой, уменьшаются и эффективность ее переноса повышается. В слое аэрозоля высокой плотности с $\tau = 0.5$ потери, связанные с рассеянием на частицах, значительно превышают потери, вызванные нелинейно-оптическим взаимодействием излучения со средой. Статистические испытания методом Монте-Карло показали, что потери, связанные с дефокусировкой в плазме и с фотоионизацией, и потери, связанные с рассеянием на каплях аэрозоля, не аддитивны.
5. Исследована рефокусировка фемтосекундного лазерного импульса после распространения через слой дисперсной среды. При малой оптической толщине слоя доминирует замедление перетекания энергии к оси импульса при рефокусировке из-за возмущений интенсивности на периферии поперечного сечения импульса, наведенных в слое. При большой оптической толщине слоя рефокусировка импульса становится стохастической вследствие конкурирующего характера влияния наведенных возмущений, которые могут как инициировать восстановление моды Таунса, так и замедлять ее формирование в сечении импульса.
6. Впервые исследована филаментация мощного фемтосекундного лазерного импульса в условиях совместного влияния турбулентности и рассеяния в аэрозоле. Установлено, что когерентное рассеяние на частицах аэрозоля приводит к перераспределению филаментов в пространстве и увеличивает расстояние до старта филаментации мощного фемтосекундного импульса в турбулентной атмосфере. При этом в турбулентной атмосфере рассеяние на аэрозоле, с одной стороны, замедляет множественную филаментацию вследствие ослабления энергии импульса, а с другой, способствует зарождению филаментов на неоднородностях поля, возникающих при когерентном рассеянии.
7. Влияние на филаментацию фемтосекундного лазерного импульса аэрозольного рассеяния эквивалентно сплошной ослабляющей среде в условиях большой оптической толщины аэрозоля, при которой в процессе филаментации доминирует ослабление энергии при рассеянии на частицах и в импульсе формируется один филамент или филаментация отсутствует.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты диссертации отражены в следующих статьях:

1. **Е.П. Силаева**, В.П. Кандидов "Рефокусировка мощного фемтосекундного лазерного импульса за слоем атмосферного аэрозоля". *Вестник МГУ. Физика и астрономия*, №4, 57-62 (2009).
2. **Е.П. Силаева**, В.П. Кандидов "Перенос филамента мощного фемтосекундного импульса в слое аэрозоля". *Оптика атмосферы и океана*, **22**(2), 132-140 (2009).
3. V.P. Kandidov, **Е.П. Silaeva** "Self-focusing and multiple filamentation of laser light in disperse media". *Journal of Russian Laser research*, **30**(4), 305-320 (2009).
4. Е.П. Качан (**Силаева**), В.О. Милицин "Влияние частиц атмосферного аэрозоля на зарождение филаментов в лазерном пучке". *Оптический журнал*, **73**(11), 38-44 (2006).
5. В.О. Милицин, Е.П. Качан (**Силаева**), В.П. Кандидов "Множественное рассеяние, модуляционная неустойчивость и филаментация фемтосекундного лазерного импульса в дисперсной среде". *Квантовая электроника*, **36**(11), 1032-1038 (2006).
6. **Е.П. Silaeva**, S.A. Shlenov, V.P. Kandidov "Multifilamentation of high-power femtosecond laser pulse in turbulent atmosphere with aerosol", *Applied Physics B: Lasers and Optics*, DOI: 10.1007/s00340-010-4081-z (2010).
7. В.П. Кандидов, С.А. Шленов, **Е.П. Силаева**, А.А. Дергачев. "Филаментация мощного фемтосекундного лазерного излучения в воздухе и ее приложения в атмосферной оптике". *Оптика атмосферы и океана*, **23**(10), (2010).
8. **Е.П. Silaeva**, V.P. Kandidov "Femtosecond laser pulse filament robustness in aerosol layer". *Proceedings SPIE 7090*, 70900D (2008).
9. **Е.П. Silaeva**, O.V. Tverskoy, V.P. Kandidov. "Femtosecond pulse duration as a tool for controlling high fluence of laser filament in air". *Proceedings SPIE*, 74300X (2009).

и докладывались на международных конференциях:

1. **Е.П. Silaeva**, S.A. Shlenov, V.P. Kandidov. *Multifilamentation of high-power femtosecond laser pulse in aerodisperse turbulent atmosphere*. Book of abstracts, 3rd International Symposium on Filamentation (Crete, Greece, 31 May-05 June 2010), p. 121.
2. **Е.П. Silaeva**, V.P. Kandidov. *High-power femtosecond laser pulse filamentation in atmospheric aerosol*. Book of Abstracts, International Advanced Research Workshop on Modern Problems in Optics and Photonics (Yerevan, Armenia, 27 August – 2 September, 2009), p. 49.

3. **Е.Р. Силаева**, O.V. Tverskoy, V.P. Kandidov. *Femtosecond pulse duration as a tool for controlling high fluence of laser filament in air*. International conference "SPIE Optics and Photonics" (Сан-Диего, США, 2-6 августа 2008).
4. О.В. Тверской, **Е.П. Силаева**. *Влияние длительности импульса на перенос лазерной энергии в филаменте*. XVI Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам "Ломоносов" (Москва, 13-18 апреля, 2009).
5. **Е.Р. Силаева**, V.P. Kandidov. *Influence of water aerosol layer on filament and plasma channel of femtosecond laser pulse*. Technical Digest, Third Russian-French Laser Physics Workshop for Young Scientists (Saint-Petersburg, Russia, 22–27 September, 2008), p. 2.
6. **Е.Р. Силаева**, V.P. Kandidov. *Femtosecond laser pulse filament robustness in aerosol layer*. International conference "SPIE Optics and Photonics" (Сан-Диего, США, 10-14 августа 2008).
7. V.O. Militsin, E.P. Качан (**Силаева**), V.P. Kandidov. *Filamentation of Femtosecond Laser Pulse in Atmospheric Aerosol*. Technical Summaries, International Conference "High Power Laser Beams" (HLPB-2006), (N.Novgorod, Russia, 1 - 8 July, 2006), p. 74.
8. Е.П. Качан (**Силаева**), В.О. Милицин. *Влияние оптической толщи водного аэрозоля на процесс формирования филаментов в лазерном пучке*. Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам "Ломоносов-2006", Секция "Физика", Сборник тезисов, (Москва, Россия, 12-15 апреля, 2006), с. 183.
9. Е. П. Качан (**Силаева**), В.О. Милицин, *Влияние частиц атмосферного аэрозоля на зарождение филаментов в лазерном пучке*. Труды четвертой международной конференции молодых ученых и специалистов "Оптика-2005", (Санкт-Петербург, Россия, 17-21 октября, 2005), с.5.
10. L.S. Kouzminsky, V.O. Militsin, E.P. Качан (**Силаева**), V.P. Kandidov, *Filaments initiation in atmospheric polydisperse aerosol*. Conference Program, International Conference on Coherent and Nonlinear Optics / International Conference on Lasers, Applications, and Technologies (ICONO/LAT 2005), (St. Petersburg, Russia, 11-15 May, 2005), p. 74, JThR1.
11. Е.П. Качан (**Силаева**), Л.С. Кузьминский. *Влияние частиц атмосферного аэрозоля на зарождение филаментов в лазерном пучке*. XI Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам "Ломоносов-2005", Секция "Геофизика", Сборник тезисов, (Москва, Россия, 13 апреля, 2005).