

На правах рукописи

**Милицин Владимир Олегович**

**СТРАТИФИЦИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ РАССЕЯНИЯ  
ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ДИСПЕРСНОЙ СРЕДЕ И  
ФИЛАМЕНТАЦИЯ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ИМПУЛЬСА В  
АТМОСФЕРНОМ АЭРОЗОЛЕ**

Специальность 01.04.21 – лазерная физика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2006

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 Алмаев Рафаиль Хамитович  
доктор технических наук,  
профессор Валуев Виктор Васильевич

Ведущая организация: Институт оптики атмосферы СО РАН

Защита состоится 15 февраля 2007 г. в 16<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д 501.001.31 при Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119992 ГСП-2, Москва, Ленинские горы, МГУ, Корпус нелинейной оптики, аудитория им. С.А. Ахманова.

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

Автореферат разослан “\_\_\_\_\_” 2007 года

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

Т.М. Ильинова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Исследования мощных фемтосекундных лазерных импульсов в условиях реальной атмосферы в настоящее время вызывают все больший интерес. Это связано с развитием фемтосекундной лазерной техники и перспективой ее использования в широком круге атмосферных приложений. Среди этих направлений значительное место занимают задачи лазерного зондирования атмосферы, обнаружения загрязняющих примесей в газовом составе и аэрозоле, управления пробоем в воздухе для стока атмосферного электричества и др.<sup>1</sup>.

Исследование распространения мощного фемтосекундного лазерного импульса в атмосфере, как существенно неоднородной многокомпонентной среде<sup>2</sup>, представляет собой обширную задачу, которая включает анализ излучения в атмосферном аэрозоле, в частности, в водном аэрозоле облаков и туманов, которые являются аэродисперсными средами.

Можно выделить два основных направления исследования мощных фемтосекундных лазерных импульсов в атмосферном аэрозоле. Первое из них состоит в развитии методов фемтосекундного лазерного зондирования атмосферы для обнаружения загрязняющих примесей в окружающей среде. Техника нелинейного аэрозольного лидара основывается на нелинейно-оптическом взаимодействии интенсивного лазерного излучения непосредственно с частицами аэрозоля. К этому направлению относятся работы по исследованию флуоресценции частиц при воздействии мощного фемтосекундного лазерного импульса<sup>3</sup> и эмиссионной спектроскопии аэрозоля в лазерной плазме фемтосекундного излучения<sup>4</sup>. Экспериментально наблюдалась генерация третьей<sup>5</sup> и второй гармоник<sup>6</sup> при воздействии мощных фемтосекундных лазерных импульсов на частицы воды. Также исследовалось использование вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна на «шепчущих» модах частиц, возбужденных фемтосекундными лазерными импульсами<sup>7</sup>.

Второе направление фемтосекундной нелинейной оптики аэрозольных сред охватывает исследования явления филаментации лазерного импульса, которое представляет собой пространственно-временную локализацию энергии<sup>8</sup>. Взаимодействие лазерного излучения с частицами аэрозоля может оказать существенное влияние на явление филаментации лазерного импульса и генерацию суперконтинуума, который в настоящий момент рассматривается как перспективный источник для широкополосного зондирования атмосферы фемтосекундными

---

<sup>1</sup> J. Kasparian et al., *Science*, **301**, 61 (2003)

<sup>2</sup> В.П. Кандидов и др., *Опт. атмос. и океана*, **13**, 429 (2000)

<sup>3</sup> G. Mejean et al., *Appl. Phys. B*, **78**, 535 (2004)

<sup>4</sup> C. Favre et al., *Phys. Rev.Lett.*, **89**, 35002 (2002)

<sup>5</sup> J. Kasparian et al., *Phys. Rev. Lett.*, **78**, 2952 (1997)

<sup>6</sup> V. Boutou et al., *Opt. Lett.*, **30**, 759 (2005)

<sup>7</sup> А.А. Землянов, Ю.Э. Гейнц *Опт. атмос. и океана*, **14**, 349 (2001)

<sup>8</sup> A. Braun et al., *Opt. Lett.*, **20**, 73 (1995)

лидерами белого света. В реальных условиях импульсы тераваттной мощности распадаются на случайное множество филаментов<sup>9</sup> вследствие модуляционной неустойчивости мощного светового поля<sup>10</sup>. Неустойчивость может развиваться как на начальных неоднородностях пучка, так и на возмущениях, вызванных флуктуацией показателя преломления в атмосфере, рассеянием и поглощением излучения на частицах атмосферного аэрозоля.

В лабораторных экспериментах показано<sup>11</sup>, что влияние водного аэрозоля высокой оптической плотности на филаментацию мощных лазерных импульсов подобно линейному ослаблению. Кроме ослабления, рассеяние мощного фемтосекундного лазерного импульса в аэродисперсной среде с параметрами типичными для атмосферных образований (облачность, туман, дождь) может привести к возникновению сильных возмущений светового поля, вызванных хаотически расположенными частицами аэрозоля. Возникающие в поперечном сечении импульса возмущения, могут стать центрами развития модуляционной неустойчивости излучения в среде с керровской нелинейностью и, следовательно, областями наиболее вероятного образования филаментов. Первые качественные результаты о филаментации лазерного импульса при распространении в мелком дожде, полученные в натурном эксперименте<sup>12</sup>, показали, что в поперечном сечении импульса наблюдалось формирование дифракционной картины, характерной для рассеяния на сферических частицах.

Таким образом, микрочастицы аэрозоля являются не только самостоятельным объектом исследования для задач мониторинга, но и существенным фактором, влияющим на процесс распространения лазерных импульсов в реальных атмосферных условиях. Поэтому взаимодействие мощных фемтосекундных лазерных импульсов с частицами аэрозоля представляет собой многогранную задачу, исследование которой является актуальным в настоящее время.

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

1. Построение простой физической модели для анализа светового поля в сферической водной частице и оценка на ее основе области плазмообразования, вызванного многофотонной и каскадной ионизацией, а также расчет индикатрисы сигнала эмиссионного излучения плазменного очага.
2. Разработка физической модели рассеяния мощного лазерного излучения на ансамбле частиц водного аэрозоля, ориентированной на задачи фемтосекундной нелинейной оптики. Её физическое и математическое обоснование, оценка физических границ применимости, создание вычислительного алгоритма и пакета программ.

---

<sup>9</sup> L. Berge et al., *Phys. Rev. Lett.*, **92**, 225002 (2004)

<sup>10</sup> В.И. Беспалов, В.И. Таланов *Письма в ЖЭТФ*, **3**, 471 (1966)

<sup>11</sup> Н.Н. Бочкарев и др., *Опт. атмос. и океана*, **17**, 971 (2004)

<sup>12</sup> G. Mechain et al., *Appl. Phys. B*, **80**, 785 (2005)

3. Исследование роли когерентного рассеяния на ансамбле частиц моно- и полидисперсного аэрозоля на зарождение и формирование филамента в мощном фемтосекундном лазерном импульсе. Оценка влияния различных параметров аэрозоля на процесс филаментации.
4. Анализ динамики развития множественной филаментации и формирования плазменных каналов в фемтосекундном лазерном импульсе при распространении в атмосферном аэрозоле.

### **Научная новизна работы**

1. Впервые методом геометрической оптики с помощью лучевых траекторий определено световое поле в сферической водной частице с учетом преломления, отражения излучения на границах и интерференции отраженной и прямой волны внутри капли.
2. Оригинальной является модель многократного когерентного рассеяния лазерного излучения в аэрозоле на основе стратифицированного представления дисперсионной среды. Ключевой составляющей модели являются аэрозольные экраны, которые разработаны для воспроизведения когерентного рассеяния светового поля на ансамбле частиц в атмосферном аэрозоле.
3. Новыми являются результаты статистического анализа зарождения филаментов при распространении мощных фемтосекундных лазерных импульсов в дисперсной среде водного аэрозоля, на основе которого установлена возможность существования различных режимов филаментации и определена их зависимость от концентрации и размера частиц в аэрозоле. Получена картина формирования филаментов на каплях мелкого дождя, которая согласуется с данными натурального эксперимента.
4. Впервые численно исследована стохастическая многофиламентация мощного лазерного импульса в водном аэрозоле, получены динамические картины локализации энергии светового поля и формирования лазерной плазмы при многофотонной ионизации в воздухе.

### **Практическая ценность работы**

1. Разработанная простая модель расчета поля фемтосекундного лазерного импульса внутри водной сферической частицы позволяет оценить эффективность нелинейных процессов, которые могут использоваться в фемтосекундных нелинейных аэрозольных лидарах.
2. Развита в работе стратифицированная модель распространения мощного фемтосекундного лазерного излучения в атмосферном аэрозоле может быть использована для анализа режимов распространения лазерного излучения в дисперсных средах.

3. Показано, что распространение субтераваттного лазерного импульса в водном атмосферном аэрозоле сопровождается множественной филаментацией.
4. Построена диаграмма различных режимов филаментации для импульсов субтераваттной пиковой мощности в зависимости от концентрации частиц и их размера, позволяющая определить характер распространения фемтосекундных лазерных импульсов в атмосферном аэрозоле.

Полученные результаты могут найти применение при разработке фемтосекундных лидаров, а также систем транспортировки лазерной энергии в атмосфере.

### **Защищаемые положения**

1. При распространении фемтосекундного лазерного импульса в сферической частице водного аэрозоля происходит концентрация светового поля. При длительности импульса, сравнимой со временем пробега световой волны в частице, интенсивность излучения вследствие преломления, отражения от поверхностей капли и интерференции переднего и заднего фронтов импульса, увеличивается в десятки и более раз по сравнению с интенсивностью падающего поля.
2. Стратифицированная модель однонаправленного распространения лазерного излучения в атмосферном аэрозоле на основе плоских аэрозольных экранов, между которыми происходит дифракция и нелинейно-оптическое взаимодействие излучения с воздушной средой, воспроизводит многократное когерентное рассеяния в дисперсионной среде и процесс распада мощного фемтосекундного лазерного импульса на филаменты, инициируемые возмущениями светового поля при рассеянии на частицах.
3. В дисперсной среде водного аэрозоля возможны различные режимы филаментации фемтосекундного лазерного импульса, пиковая мощность которого в десятки раз превышает критическую мощность самофокусировки в воздухе. При малой концентрации крупных частиц ( $N \sim 100 \text{ см}^{-3}$ ,  $R \sim 15 \text{ мкм}$ ) преобладает когерентное рассеяние вперед, которое вызывает множественную филаментацию импульса. При большей концентрации и меньшем радиусе частиц доминирует ослабление излучения в среде, которое приводит к образованию одного филамента или отсутствию филаментации в мощном импульсе. Границы различных режимов филаментации мощного лазерного импульса не определяются оптической толщиной среды, а зависят от концентрации и размера частиц.
4. При распространении субтераваттного фемтосекундного лазерного импульса в атмосферном аэрозоле происходит стохастическая многофиламентация, то есть формируется случайное множество протяженных областей с высокой плотностью потока энергии излучения  $\sim 1.5 \text{ Дж/см}^2$ , что сопровождается образованием как протяженных плазменных каналов с концентрацией электронов  $\sim 1.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , так

и отдельных очагов плазмы, обусловленных локальной концентрацией интенсивности светового поля при многократном рассеянии в керровской среде.

### **Апробация результатов работы**

Основные результаты работы опубликованы в 8 научных статьях в журналах «Оптика атмосферы и океана», «Квантовая электроника», «Applied Physics B», «Оптический журнал», «Proceedings of SPIE» и докладывались автором на международных конференциях: “*International conference on high power beams (HPLB-2006)*” (Nizhny Novgorod - Yaroslavl, July 2006); International conference “*Optics & Photonics and 50th SPIE Annual Meeting 2005*” (San Diego, CA, USA, August 2005); “*International Conference on Lasers, Applications, and Technologies (ICONO/LAT 2005)*” (St. Petersburg, May 2005); International conference on Optics “*Photonics West 2005*” (San Jose, CA, USA, January 2005); Третья международная конференция “*Фундаментальные проблемы оптики ФПО–2004*” (Санкт-Петербург, октября 2004); “*First Russian – French Laser Physics Workshop for Young Scientists*” (St. Petersburg, July 2004); International conference on Optics “*Photonics West 04*” (San Jose, CA, USA, January 2004); “*XIth Conference on Laser Optics (LO'2003)*” (St.Petersburg, Russia, July 2003); Международная конференция студентов аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам “*Ломоносов-2003*”, секция “Физика” (Москва, апрель 2003); Вторая научная молодежная школа “*Оптика 2002*” (Санкт-Петербург, октябрь 2002), 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, шести глав, заключения, приложения и списка цитируемой литературы. Объем работы составляет 148 страниц, включая 66 рисунков и 110 формул. Список цитируемой литературы содержит 120 наименований, включая 8 авторских публикаций.

### **Личный вклад автора**

Все использованные в диссертации результаты получены автором лично или при его определяющем участии в разработке физической и математической моделей нелинейно-оптического взаимодействия мощного фемтосекундного лазерного импульса с аэрозольной средой.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

В **первой главе** “**Состояние исследований по распространению фемтосекундного лазерного импульса в аэрозоле**” дан краткий обзор состояния исследований по распространению мощного фемтосекундного лазерного импульса в атмосферных условиях. Приведены результаты ряда экспериментальных и теоретических работ, которые дают представление о физических процессах, определяющих филаментацию фемтосекундных импульсов. Рассматриваются результаты работ, посвященных взаимодействию мощного фемтосекундного лазерного импульса с отдельной аэрозольной частицей.

В **§1.1** выделены особенности фемтосекундной нелинейной оптики атмосферы, и дается представление о физике явления филаментации. Приведен обзор натуральных и модельных экспериментальных работ, посвященных исследованию филаментации и распространению фемтосекундных лазерных импульсов в атмосфере. Рассмотрены теоретические модели, объясняющие зарождение и динамику филаментов. Наибольшее внимание уделено динамической модели движущихся фокусов, описывающей филаментацию.

В **§1.2** приведен обзор литературы, посвященной исследованиям взаимодействия мощного фемтосекундного лазерного импульса с отдельной аэрозольной частицей. Дан краткий обзор некоторых теоретических методов исследования нестационарного внутреннего поля аэрозольных частиц. Рассмотрены методики зондирования аэрозоля, основанные на нелинейно-оптическом взаимодействии интенсивного фемтосекундного лазерного излучения с частицами аэрозоля. Выделено несколько основных методов: флуоресцентная спектроскопия, индуцированная филаментацией (FIFS); эмиссионная спектроскопия, индуцированная лазерным излучением (LIBS), и нелинейный аэрозольный лидар, который основывается на нелинейно-оптическом взаимодействии непосредственно с частицами аэрозоля. Описаны экспериментальные и теоретические исследования по взаимодействию филамента с отдельно расположенными водными каплями размером несколько десятков микрометров, которые демонстрируют, что такие капли оказывает ничтожно малое влияние на дальнейший процесс филаментации.

В **§1.3** изложено состояние исследований распространения мощных фемтосекундных лазерных импульсов в аэрозольных средах. Приведен обзор теоретических и экспериментальных работ, посвященных филаментации мощных лазерных импульсов в условиях сильного ослабления в плотном аэрозоле при концентрации частиц  $\sim 10^4 \text{ см}^{-3}$ , что на 2 порядка больше типичных значений для атмосферной облачности. Отдельно выделены результаты, единственного известного по публикациям натурального эксперимента по филаментации в мелком дожде. Сформулирована проблема влияния когерентного рассеяния на ансамбле частицах

атмосферного аэрозоля на процесс филаментации мощного фемтосекундного лазерного импульса.

Во второй главе “Геометрооптический анализ поля внутри частицы” дано физическое обоснование и математическая формулировка модели нелинейно-оптического взаимодействия мощных фемтосекундных лазерных импульсов с отдельной частицей водного аэрозоля. В рамках геометрической оптики, применимой для импульсов, протяженность которых не превышает диаметра сферической частицы, рассматривается пространственное распределение интенсивности фемтосекундного лазерного импульса в частице водного аэрозоля, оценивается максимальная величина внутреннего светового поля, определяются параметры ионизации среды в сферической капле, оценивается диаграмма направленности излучения флуоресценции вследствие рекомбинации плазмы. Для расчета интенсивности излучения в капле используется модель лучевых трубок.

В §2.1 анализируется формирование светового поля внутри сферической водной частицы при прохождении через нее лазерного импульса. Рассматривается физическая модель, описывающая основные процессы, определяющие световое поле фемтосекундного лазерного импульса в капле.

В §2.2 описан метод лучевых траекторий и численная схема для расчета внутреннего поля сферической частицы в приближении геометрической оптики. Приведены результаты распределения интенсивности для случая распространения лазерного излучения в микрокапле в приближении однократного отражения от затененной поверхности (Рис. 1). Для капли радиусом 30 мкм показано, что максимальное увеличение интенсивности, приблизительно в 200 раз по сравнению с падающей волной, достигается на оси капли в цилиндрической области протяженностью порядка 10 мкм и поперечным сечением – 3 мкм. В кольцевой области с радиусом  $\sim 12$  мкм вблизи границы геометрической тени около задней поверхности капли (Рис. 1) интенсивность излучения возрастает в  $\sim 20$  раз.

В §2.3 в рамках используемой модели получено изменение интенсивности во времени при распространении фемтосекундного лазерного импульса внутри капли.

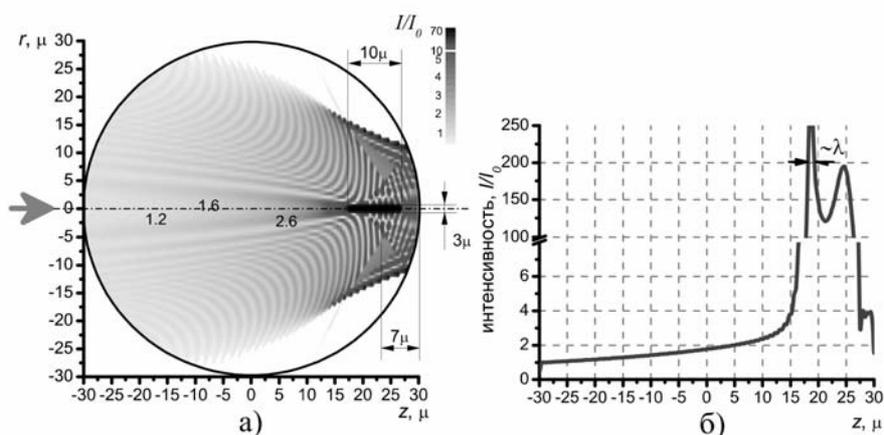


Рис. 1. Распределение интенсивности внутри капли воды с учетом однократного отражения от затененной поверхности. а) в объеме, б) на оси ( $r = 0$ ).

Представлены распределения интенсивности в капле для излучения гауссова импульса длительностью  $\tau_p = 45$  фс для ряда характерных моментов времени. Получены численные оценки, которые справедливы, если длительность импульса меньше времени пробега световой волны по сферической частице. На основании приведенных результатов сделан вывод, что для таких импульсов имеются две области сильного увеличения интенсивности, в которых следует ожидать существенного усиления нелинейных оптических эффектов: это кольцевая область интерференции у теневой поверхности капли и область фокусировки отраженного от задней границы излучения.

В §2.4 рассматривается генерация электронной лазерной плазмы во время прохождения фемтосекундного импульса внутри капли воды. Для описания формирования плазмы используется модель, учитывающая многофотонную и каскадную ионизацию, а также рекомбинацию плазмы. Получена динамическая картина распределения концентрации электронов в объеме капли. Показано, что при пиковой интенсивности входного импульса  $I_0 = 3 \cdot 10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup> в области максимальной фокусировки излучения концентрации электронов лазерной плазмы достигает порядка 1% от равновесной концентрации молекул воды, а в кольцевой области интерференции поля у теневой поверхности капли – 0.1%.

В §2.5 на основании полученных результатов проведена оценка диаграммы направленности эмиссионного излучения вследствие рекомбинации плазмы и излучения флуоресценции при многократном возбуждении примесей в воде.

В §2.6 сформулированы основные выводы по второй главе.

В третьей главе **“Стратифицированная модель рассеяния лазерного излучения”** дано физическое обоснование и математическая формулировка стратифицированной модели когерентного рассеяния мощного лазерного излучения на ансамбле частиц водного аэрозоля, ориентированной на задачи фемтосекундной нелинейной оптики. Определены физические границы применимости рассматриваемой модели.

Параграф §3.1 посвящен физическому обоснованию стратифицированной модели и предварительному анализу пространственных масштабов задачи филаментации мощного фемтосекундного лазерного импульса в аэрозоле.

В §3.2 на основе представлений о рассеянии и поглощении излучения на отдельной частице формулируется концепция стратифицированной модели рассеяния лазерного излучения в дисперсной среде. Рассматривается использование метода Монте-Карло на основе рассматриваемой модели для определения статистических характеристик светового поля при многократном рассеянии в дисперсной среде.

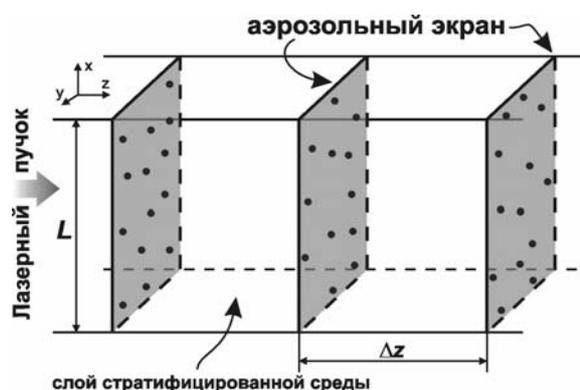


Рис. 2. Стратифицированная модель аэрозольной среды. Все частицы водного аэрозоля (схематически показаны точками) сосредоточены в т.н. “аэрозольных” экранах, в которых расположены случайно.  $L$  – поперечный размер рассматриваемой среды,  $\Delta z$  – расстояние между соседними аэрозольными экранами.

В §3.3 представлена стратифицированная модель, которая заключается в том, для исследования направленного распространения лазерного излучения дисперсная среда представляется в виде последовательности слоев шириной  $\Delta z$ , и все частицы, которые находятся этом слое, сосредоточены в плоских “аэрозольных” экранах (Рис. 2). Между экранами происходит дифракция и нелинейно-оптическое взаимодействие излучения, испытавшего рассеяние, с газовыми компонентами воздуха. Показано, что стратифицированную модель можно рассматривать как физический аналог метода расщепления, используемого для решения уравнения распространения излучения в приближении метода медленно меняющихся амплитуд. Если рассмотрение происходящих между экранами процессов ограничить только свободной дифракцией, то распространение излучения в аэрозоле будет соответствовать решению параболического волнового уравнения

$$2ik \frac{\partial E(t; x, y, z)}{\partial z} = \Delta_{\perp} E(t; x, y, z) + \hat{D}_{aer} E(t; x, y, z), \quad (1)$$

где  $k$  – волновое число,  $\Delta_{\perp}$  - оператор Лапласа по переменным  $x, y$ ,  $\hat{D}_{aer}$  – оператор, описывающий стохастическое преобразование поля вследствие когерентного рассеяния на частицах,  $E(t; x, y, z)$  – комплексная огибающая поля квазимонохроматического лазерного импульса.

В §3.4 описаны принципы и методы построения аэрозольного экрана в аэродисперсной среде, который можно представить как амплитудно-фазовую модуляцию, накладываемую на исходное поле, чтобы реализовать преобразование вследствие когерентного рассеяния на частицах (оператор  $\hat{D}_{aer}$  в уравнении (1)). Для расчета поля, рассеянного частицей, используется приближение аномальной дифракции. Показано, что для водных капель микронного радиуса индикатрисы рассеяния излучения, полученные методами аномальной дифракции и Лоренца-Ми, близки. Представлены методика и численные алгоритмы для расчета интерференционной картины прошедшего и рассеянного на частицах экрана полей с учетом фазовых соотношений. Диапазон параметров стратифицированной модели определяется следующей системой неравенств, которые следуют из условий расчета

рассеяния в дальней зоне, воспроизводимости интерференционной картины на экране, ограничения на размер области интерференции и отсутствия перекрытия полей, рассеянных отдельными частицами:

$$\max\left\{\frac{D^2}{\lambda}, \frac{D}{\lambda}h\right\} < dz < \min\left\{\sqrt[3]{\frac{1}{N}\left(\frac{D}{\lambda}\right)^2}, \frac{D}{\lambda}a\right\} \quad (2)$$

$$dz < \Delta z < \frac{D^2}{N\lambda^2 dz^2}$$

где  $\lambda$  – длина волны излучения,  $N$  – концентрация частиц в среде,  $D$  – диаметр частиц,  $h$  – шаг расчетной сетки в поперечном сечении,  $a$  – радиус пучка,  $dz$  – параметр аэрозольного экрана, равный расстоянию от капли до плоскости, на которой рассчитывается рассеянное поле,  $\Delta z$  – шаг стратификации.

В §3.5 рассмотрены и оценены факторы, ограничивающие применимость рассматриваемой стратифицированной модели когерентного рассеяния в аэродисперсной среде для задач фемтосекундной нелинейной оптики.

В §3.6 приведена схема численного моделирования линейного распространения лазерного излучения в аэрозоле, в которой используются метод расщепления по физическим факторам. Решение задачи дифракции в свободном пространстве реализуется спектральным методом, а рассеяние на частицах среды осуществляется посредством расчета рассеяния на аэрозольных экранах.

В §3.7 представлены тестовые результаты когерентного рассеяния коллимированного лазерного пучка гауссового профиля на аэрозольном экране.

В §3.8 сформулированы основные выводы по третьей главе.

В четвертой главе “Анализ и апробация стратифицированной модели” приведены результаты исследования систематической погрешности стратифицированной модели когерентного рассеяния лазерного излучения на примере задачи о линейном распространения лазерных пучков в аэродисперсных средах. Выполнен сравнительный анализ метода Монте-Карло (ММК) на основе используемой «волновой» модели рассеяния с «корпускулярным» подходом, широко применяемым для решения задач распространения излучения малой интенсивности в случайно неоднородных средах, в частности, в биологических тканях. Проведен анализ сходимости ММК на основе стратифицированной модели при различных параметрах модели.

В §4.1 рассматривается тестовая задача ослабления лазерного пучка при рассеянии в монодисперсной среде. Проводиться сравнение результатов, получаемых в численном эксперименте, с зависимостями, определяемыми законом Бугера, который в однократном приближении описывает ослабление в дисперсной среде. В теоретических оценках также учитывается дифракционная расходимость ограниченного лазерного пучка. Рассмотренные примеры подтверждают, что построенная модель воспроизводит с точностью не менее 1% ослабление лазерного

пучка при распространении в аэродисперсной среде с радиусом частиц от единиц до десятков микрометров.

В §4.2 приведен сравнительный анализ двух подходов к проведению статистического моделирования процесса распространения лазерного излучения в случайно-неоднородных дисперсных средах методом Монте-Карло (Рис. 3). Первый – «корпускулярный», основывается на представлении о распространении излучения, как потоке фотонов, второй – «волновой» – на представлении о распространении волн в развитой стратифицированной модели. Дано краткое описание «корпускулярного» подхода и рассмотрены тестовые задачи для различных параметров монодисперсного водного аэрозоля и лазерного пучка. Проведена оценка влияния размеров частиц и различных представлений функций рассеяния.

Показано, что, несмотря на различные физические представления о рассеянии излучения на частицах, оба метода дают эквивалентные результаты при анализе интенсивности ограниченного пучка в дисперсной среде. Однако имеются и различия. «Корпускулярный» ММК не воспроизводит дифракционную расходимость ограниченного пучка, что может быть учтено введением дифракционного фактора. «Волновой» ММК не описывает рассеяние назад, что не вносит значительных ошибок при рассмотрении направленного лазерного излучения, что соответствует приближению метода медленно меняющихся амплитуд.

Параграф §4.3 посвящен анализу сходимости метода Монте-Карло, основывающегося на стратифицированной модели когерентного рассеяния. Рассмотрено, как в случае монодисперсного аэрозоля значения концентрации  $N$  и радиуса частиц  $R$  влияют на дисперсию флуктуаций интенсивности в лазерном пучке, воспроизводимую разработанной моделью. При различных параметрах численной схемы рассмотрен ряд тестовых задач, исследовано их влияние на сходимость ММК. Наиболее характерным параметром рассматриваемой модели является шаг стратификации  $\Delta z$ . Полученные данные подтверждают справедливость использования стратифицированной модели рассеяния лазерного излучения в аэродисперсных средах и демонстрируют сходимость результатов метода Монте-Карло к физически обоснованному результату при выборе параметров расчетной схемы в соответствии с условиями (2). Например, при рассматриваемых параметрах излучения (радиус

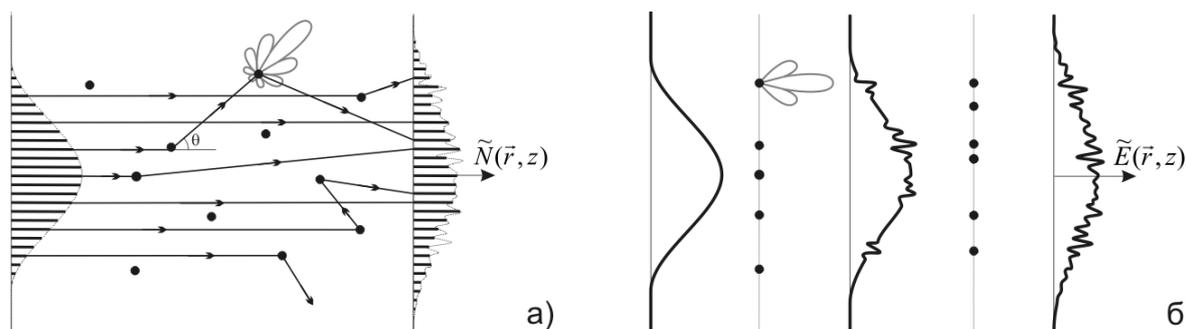


Рис. 3. Схематическая иллюстрация ММК в задаче распространения ограниченного пучка в дисперсной среде: а) корпускулярный метод, б) волновой метод. Функция рассеяния  $\sigma(\theta)$  изображена схематически в полярной системе координат в виде многолепестковой индикатрисы.

коллимированного гауссового пучка  $a_0 = 2.5$  мм) и аэродисперсной среды (монодисперсный аэрозоль с радиусом частиц  $R = 15$  мкм и концентрацией  $N = 10$  см<sup>-3</sup>) для расстояний  $z < 6.0$  м допустимым будет использование шага  $\Delta z \leq 50$  см.

В §4.4 исследуется когерентное рассеяние в полидисперсном аэрозоле, распределение частиц по размерам в котором соответствует кучевым и слоистообразным облакам, а также туманам. Рассматривается распространение лазерного пучка на трассе длиной до  $z = 50$  м. Полученные результаты демонстрируют хорошее соответствие между численными расчетами и известными экспериментальными данными.

В §4.5 сформулированы основные выводы по четвертой главе.

В пятой главе “Зарождение филаментов в атмосферном аэрозоле” дан анализ влияния когерентного рассеяния на водных каплях на зарождение филаментов при рассмотрении начальной стадии явления до генерации лазерной плазмы. На основе стратифицированной модели когерентного рассеяния излучения в дисперсной среде методом Монте-Карло исследована нелинейная задача о зарождении филаментации фемтосекундных лазерных импульсов в моно- и полидисперсном аэрозоле. Исследовано влияние когерентного рассеяния на каплях дождя на зарождение множества филаментов в импульсе субваттной мощности.

В §5.1 представлена модель нелинейно-оптического взаимодействия фемтосекундного импульса с аэродисперсной средой. При анализе множественной филаментации основное внимание сконцентрировано непосредственно на влиянии частиц аэрозоля. При этом не учитываются дисперсия групповой скорости в воздушной среде и изменение крутизны временных фронтов импульса, которые существенны для полномасштабного описания филаментации ультракоротких лазерных импульсов.

Представленная ранее стратифицированная модель (§3.2, §3.3) расширяется таким образом, чтобы учесть нелинейные эффекты при описании распространения испытывающего рассеяние излучения между аэрозольными экранами. Распространение в аэрозоле будет соответствовать решению уравнения для комплексной амплитуды поля:

$$2ik \frac{\partial E(t; x, y, z)}{\partial z} = \Delta_{\perp} E(t; x, y, z) + \hat{D}_{aer} E(t; x, y, z) + \frac{2k^2}{n_0} \Delta n E(t; x, y, z) - ik\alpha_{ион} E(t; x, y, z), \quad (3)$$

где обозначения соответствуют уравнению (1) и  $n_0$  – показатель преломления воздуха,  $\Delta n$  – добавка к показателю преломления, определяемая суммой керровской нелинейности  $\Delta n_{кер}$  и вкладом наведенной лазерной плазмы  $\Delta n_{пл}$ . Коэффициент  $\alpha_{ион}$  описывает потери при многофотонной ионизации. При расчете  $\Delta n_{кер}$  влияние запаздывания нелинейного отклика воздушной среды учитывается введением эффективного коэффициента нелинейности  $n_{2eff}$ . Для нахождения  $\Delta n_{пл}$  концентрация электронов  $N_e(x, y, z, t)$ , возникающих вследствие ионизации молекул основных

газовых компонент воздуха (кислорода и азота), определяется согласно кинетическому уравнению для многофотонной ионизации, где вероятность ионизации задаётся в соответствии с моделью Переломова-Попова-Терентьева.

На одном шаге стратификации модели для решения уравнения (3), как и уравнения (1), используется метод расщепления по физическим факторам: нелинейности и дифракции. В соответствии с этим уравнение (3) представляется в виде цепочки уравнений, каждое из которых решается на  $j$ -ом шаге стратификации вдоль координаты распространения  $z$ . Таким образом, нелинейность среды имитируется нелинейным экраном, изменяющим фазу волны, распространяющейся в слое  $\Delta z$  среды.

В §5.2. приводится схема модифицированной стратифицированной модели нелинейной аэрозольной среды, в которой расположение нелинейных экранов неравномерно, и адаптивно изменяется при решении задачи распространения излучения.

В §5.3 формулируется стационарная модель зарождения филаментов, согласно которой начальная стадия их формирования определяется стационарной задачей о самофокусировке центрального слоя импульса в аэрозоле в отсутствие плазменной нелинейности. В соответствии с данной моделью для анализа влияния аэрозоля на зарождение филаментов рассматривается несколько модельных задач о стационарной самофокусировке пучка в керровской аэродисперсной среде. Это рассеяние на отдельной капле, которая расположена на его оси, распространение мощного лазерного импульса в монодисперсных аэрозолях, отличающихся размером частиц и зарождения филаментации в полидисперсном аэрозоле.

Результатом рассмотрения этих задач является вывод, что при распространении в среде с крупными частицами ( $R = 15$  мкм) в поперечном сечении импульса

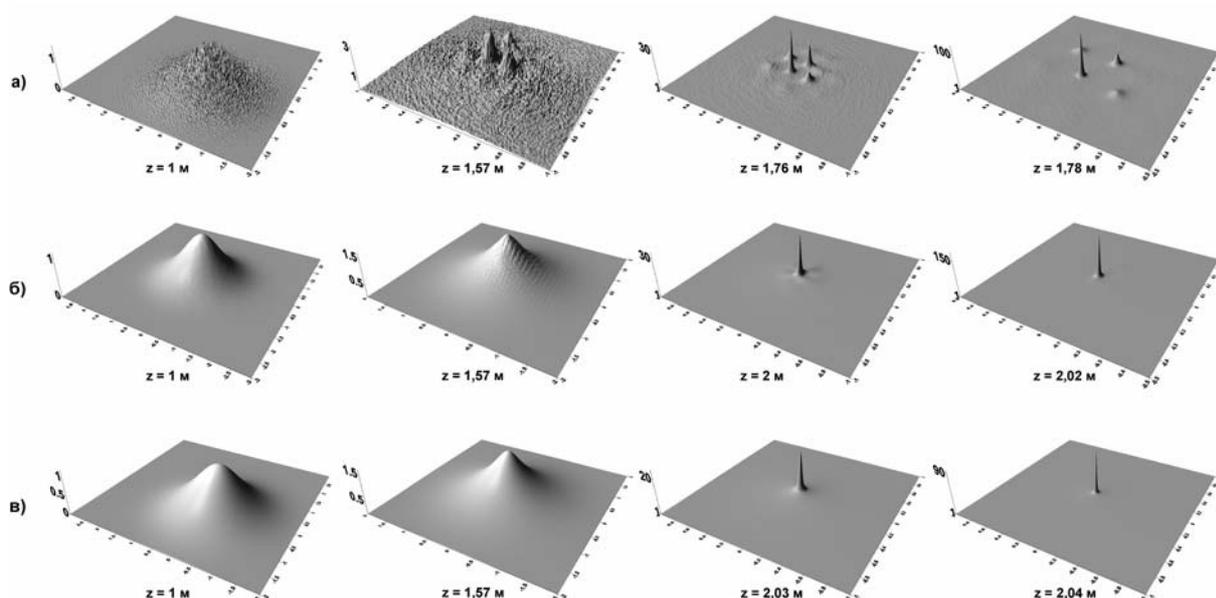


Рис. 4. Распределение интенсивности  $I(x,y)$  в центральном сечении импульса на разных расстояниях  $z$  для монодисперсного аэрозоля с частицами радиусом  $R = 15$  мкм (а), 2 мкм (б) и в отсутствие частиц (в). Радиус пучка  $a_0 = 2.5$  мм, его мощность превышала в 100 раз критическую мощность самофокусировки в воздухе.

возникают заметные возмущения интенсивности (Рис. 4а). Это приводит к нарастанию наведенных максимумов в приосевой области импульса вследствие модуляционной неустойчивости мощного светового поля в среде с кубической нелинейностью, в результате, зарождение филаментов происходит раньше, чем в среде без частиц. Мелкие же частицы (2 мкм) практически не влияют на процесс филаментации (Рис. 4б).

В §5.4 для исследования влияния размеров частиц на зарождение филаментов рассматривалось распространение лазерного излучения монодисперсных аэрозолях с различными радиусами частиц  $R$  и концентрациями  $N$ . Радиус начального пучка  $a_0 = 2.5$  мм, а пиковая мощность составляла  $P_0 = 50 \cdot P_{cr}$  и  $100 \cdot P_{cr}$ , где  $P_{cr} = 6 \cdot 10^9$  Вт – критическая мощность самофокусировки в воздухе. Статистический анализ проводился методом Монте-Карло при  $M = 10$  статистически независимых цепочках аэрозольных экранов со случайно расположенными частицами для каждой пары значений  $R$  и  $N$ .

Характер влияния размеров рассеивающих частиц на зарождение филаментов зависит от пиковой мощности импульса. Полученные результаты физически объясняется тем, что в импульсе с пиковой мощностью  $P_0 = 100 \cdot P_{cr}$  при рассеянии на частицах радиусом  $R = 15$  мкм появляются неоднородности, приводящие к пространственной неустойчивости в пучке, инициированию нелинейной фокусировки и, следовательно, зарождению филамента. С уменьшением пиковой мощности импульса до  $P_0 = 30 \cdot P_{cr}$  или с уменьшением радиуса  $R$  рассеивающей частицы мощность, приходящаяся на возникающие возмущения, падает ниже  $P_{cr}$  и мелкомасштабной самофокусировки не происходит.

Также при росте концентрации частиц ослабление мощности вследствие рассеяния становится более существенным фактором по сравнению с модуляционной неустойчивостью светового поля в керровской среде. В результате снижается количество горячих точек и, следовательно, уменьшается число зарождающихся филаментов. При дальнейшем увеличении плотности аэрозоля интенсивность в центральном сечении импульса не достигает порога фотоионизации, и филаментации не происходит.

В §5.5 на основании статистических данных для распределений интенсивности в центральном слое мощного лазерного импульса, полученных для монодисперсных аэрозолей с различными радиусами рассеивающих частиц  $R = 6, 10$  и  $15$  мкм, выделяются различные режимы формирования филаментов. На Рис. 5 на плоскостях “концентрация  $N$  – радиус частиц  $R$ ” и “коэффициент ослабления  $\alpha_0$  - радиус частиц  $R$ ” пунктирной и штрих-пунктирной линиями нанесены границы трех различных режимов: режим множественной филаментации, когда формируются несколько филаментов, режим одного филамента и, наконец, режим отсутствия филаментации. Анализ результатов показывает, что границы различных режимов филаментации импульса в атмосферном аэрозоле не определяются величиной коэффициента

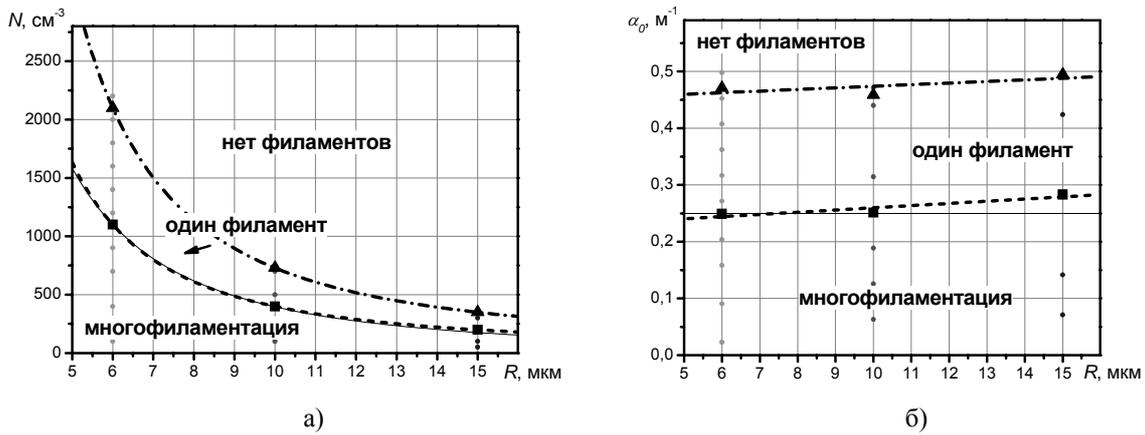


Рис. 5. Границы режимов зарождения филаментов на плоскостях «концентрация-радиус частиц» (а) и «коэффициент ослабления -радиус частиц» (б) при пиковой мощности импульса  $P_0 = 50 \cdot P_{cr}$ . Тонкая сплошная кривая соответствует постоянному значению коэффициента ослабления  $\alpha_0 \approx 0.25 \text{ м}^{-1}$ . Мелкие точки – параметры, при которых проводился численный эксперимент.

ослабления (уровнями  $\alpha_0 = \text{const}$ ). При увеличении радиуса частиц в аэрозоле неизменной оптической толщи диаграмма рассеяния сужается, вклад многократного рассеяния возрастает, модуляционная неустойчивость светового поля становится значимой, и вероятность многофиламентации возрастает.

В §5.6 представлены результаты моделирования зарождение филаментации в мелком дожде. В численном исследовании использовались параметры, близкие к первому натурному эксперименту по филаментации лазерного импульса в мелком дожде<sup>12</sup>. Рассматривалось излучение на длине волны 800 нм и пиковой мощностью  $P_0 = 100 \cdot P_{cr}$ , где критическая мощность самофокусировки в воздухе взята равной  $P_{cr} \sim 3 \text{ ГВт}$ . Начальный пучок имел гауссов профиль с радиусом  $a_0 = 1.5 \text{ см}$ , при этом соответствующая заданной мощности начальная пиковая интенсивность имеет значения  $I_0 \approx 4.2 \times 10^8 \text{ Вт/см}^2$ . Рассматривался монодисперсный аэрозоль с концентрацией  $N \sim 1.7 \times 10^4 \text{ м}^{-3}$  и радиусом частиц  $R = 150 \text{ мкм}$ . В поперечном сечении импульса наблюдалось формирование дифракционной картины, характерной для рассеяния на сферических частицах. Продемонстрировано, что распределения интенсивности, полученные численно, качественно согласуются с зарегистрированными в натурном эксперименте. Также численные исследования показали, что дифракционные возмущения интенсивности, вызванные рассеянием на каплях дождя инициируют стохастическое зарождение филаментов в мощном фемтосекундном импульсе.

По результатам спектрального анализа распределения интенсивности в пучке исследовано влияние концентрации аэрозоля и мощности излучения на размеры областей формирования филаментов и режим их возникновения. Показано, что на начальной стадии филаментации происходит трансформация пространственного спектра интенсивности в пучке. Спектр становится двухмасштабным, что отражает развитие возмущений вследствие модуляционной неустойчивости мощного пучка с искажениями, вызванными когерентным рассеянием на каплях дождя. В спектре формируется локальный максимум, положение которого на оси пространственных

частот определяется возмущением с наибольшим инкрементом нарастания и не зависит от концентрации аэрозоля, а определяется только мощностью пучка. Показано, что независимо от интенсивности излучения, размера частиц и их концентрации мощность, приходящаяся на возникающие пространственные возмущения, приблизительно в два раза превышает критическую мощность самофокусировки в воздухе  $P_{cr}$ .

В §5.7 сформулированы основные выводы по пятой главе.

В шестой главе “Филаментация в атмосферном аэрозоле” представлена динамика развития филаментации и формирования плазменных каналов в фемтосекундном лазерном импульсе при распространении в аэрозоле. Задача рассматривается в (3D+1)-пространстве переменных.

В §6.1 формулируется метод решения полной динамической задачи, описываемой уравнением (3) и кинетическим уравнением для концентрации электронной лазерной плазмы. По аналогии с керровским экраном вводится нелинейный плазменный экран. Рассматриваются особенности интегрирования кинетических уравнений для концентрации электронов на неравномерной временной сетке.

В §6.2 исследуется формирование плазменных каналов в аэрозоле. Рассматривался импульс длительностью  $\tau_0 = 140$  фс и пиковой мощностью  $P_0 = 50 \cdot P_{cr}$ , что при размере пучка  $a_0 = 2.5$  мм соответствует начальной пиковой интенсивности  $I_0 = 1.5 \cdot 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>. Приведены численные оценки для расстояния, на котором начинается образование плазменного канала, которые демонстрируют, что в монодисперсном аэрозоле с радиусом капель  $R = 15$  мкм и их концентрацией  $N = 100$  см<sup>-3</sup> плазма начинает формироваться в среднем на меньшем расстоянии, чем в незамутненной атмосфере. Приведены типичные результаты расчета распределения концентрации электронов, которые демонстрируют, что когерентное многократное рассеяние на стохастическом ансамбле частиц приводит к образованию нескольких плазменных каналов, случайно расположенных в сечении импульса. Концентрация электронов в них превышает уровень 0.1% от концентрации нейтральных молекул. Проводится сравнение с идеализированным случаем распространения импульса при отсутствии случайных возмущений профиля пучка.

Параграф §6.3 посвящен исследованию процесса перераспределения энергии лазерного импульса в поперечном сечении пучка посредством анализа плотности потока энергии излучения. На основании полученных посредством численного моделирования распределений плотности потока энергии рассматриваются различные этапы развития филаментации, анализируются условия формирования и распада плазменных каналов. На примере типичной картины пространственного распределения концентрации электронов и плотности потока энергии (Рис. 6) делаются выводы о характерных особенностях распространения субтераваттного фемтосекундного лазерного импульса в аэрозоле. В частности, Рис. 6 иллюстрирует

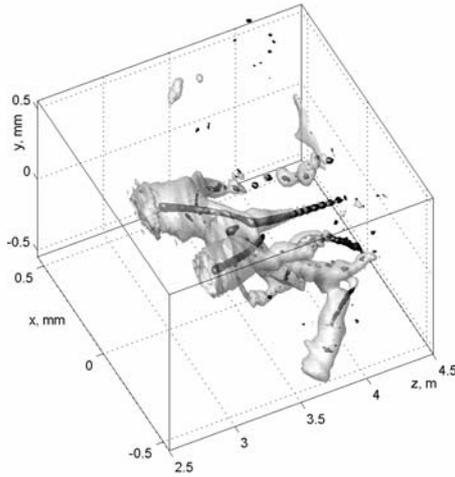


Рис. 6. Поверхности соответствующие одинаковому уровню концентрации плазмы  $10^{-3} \cdot N^{air}$  (узкие темные каналы) и плотности потока энергии по уровню  $4 \cdot F_0$  (широкие более светлые поверхности) для типичной реализации распространения импульса пиковой мощностью  $P_0 = 50 \cdot P_{cr}$  в монодисперсном аэрозоле с концентрацией частиц  $N = 100 \text{ см}^{-3}$  радиуса  $R = 15 \text{ мкм}$ .  $F_0 \approx 0.37 \text{ Дж/см}^2$ ;  $N^{air} = 2.68 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ .

первоначальное развития нескольких плазменных каналов независимо друг от друга, и формирование отдельных всплесков концентрации плазмы. Обе эти черты есть следствие стохастической природы образования возмущений поля.

В §6.4 сформулированы основные выводы по шестой главе.

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

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

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. На основе метода лучевых траекторий развит подход к численному исследованию распределения светового поля внутри капли водного аэрозоля при падении фемтосекундного лазерного импульса. Метод применим для капель, радиус которых удовлетворяет условию  $R \gg 2\lambda$ . При этом длительность импульса  $\tau_p$  ограничена сверху временем пробега световой волны на расстояние, равное диаметру капли. Метод учитывает эффект фокусировки излучения на освещенной поверхности капли, интерференцию поля на прямом проходе импульса через каплю и при отражении от неосвещенной её поверхности.
2. Установлено, что при пиковой интенсивности падающего импульса титан-сапфирового лазера  $I_0 = 3 \cdot 10^{11} \text{ Вт/см}^2$  в капле водного аэрозоля с радиусом несколько десятков микрометров ( $R = 30 \text{ мкм}$ ) возникает область, где интенсивность возрастает на два порядка и происходит образование плазмы, вызванное многофотонной и каскадной ионизацией. Максимальная концентрация

электронов в плазменном очаге достигает порядка  $\rho_{max} = 3 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ , что хорошо согласуется с экспериментальными данными

3. Создана стратифицированная модель когерентного рассеяния мощного лазерного излучения на ансамбле частиц водного аэрозоля. Модель основывается на представлении дисперсной среды в виде последовательности слоев, в которых частицы сосредоточены в тонких аэрозольных экранах, воспроизводящих когерентное рассеяние на частицах. Между аэрозольными экранами происходит дифракция и нелинейно-оптическое взаимодействие излучения со средой. Рассеяние на отдельных частицах дисперсной среды рассматривается в приближении аномальной дифракции. Проведен анализ границ применимости построенной модели и получены условия для параметров, при которых возможно описание рассеяния направленного излучения в аэрозоле.
4. На примере задачи о распространении лазерного пучка в монодисперсном аэрозоле исследована систематическая погрешность стратифицированной модели и сходимость метода Монте-Карло на её основе. Показано, что модель не вносит значительных ошибок при рассмотрении направленного излучения и соответствует приближению метода медленно меняющихся амплитуд. В результате анализа тестовых задач распространения лазерного пучка в моно- и полидисперсном аэрозоле установлено, что предложенная модель адекватно теоретическим и экспериментальным оценкам воспроизводит рассеяние на ансамбле частиц с радиусами от 2 до десятков микрометров и концентрациями от нескольких единиц на пути распространения пучка до нескольких тысяч в  $1 \text{ см}^{-3}$ .
5. Исследовано зарождение множества филаментов в мощном фемтосекундном лазерном импульсе при распространении в водном аэрозоле. Показано, что многократное когерентное рассеяние лазерного излучения на частицах приводит к формированию возмущений светового поля импульса, на которых зарождается стохастическая множественная филаментация. Получена картина дифракции субтераваттного лазерного излучения на каплях мелкого дождя, которая согласуется с данными натурального эксперимента.
6. Методом Монте-Карло определено существование различных режимов филаментации в аэрозольной среде. В случае малой концентрации частиц ( $N < 200 \text{ см}^{-3}$ ), при которой доминирует когерентное рассеяние, имеет место режим стохастической многофиламентации в импульсах пиковой мощностью  $P_0 > 50 \cdot P_{cr}$ . В аэрозоле с большей концентрацией частиц и, следовательно, большим ослаблением лазерного импульса, осуществляется режим одного филамента. Граница различных режимов филаментации для импульсов субтераваттной пиковой мощности зависят от концентрации частиц и их размера, но не определяется оптической толщиной аэрозоля.
7. Установлено, что в режимах одного филамента или отсутствия филаментации, решение детерминированной задачи о самовоздействии мощного импульса в

условиях линейного ослабления эквивалентно статистическому анализу филаментации при сильном когерентном рассеянии в плотном аэрозоле.

8. Численным анализом динамической филаментации субтераваттного фемтосекундного лазерного импульса показано, что в аэродисперсной среде с микронными размерами рассеивающих водных капель формируется стохастическое множество протяженных областей с высокой плотностью потока энергии излучения  $\sim 1.5$  Дж/см<sup>2</sup>, а также протяженных плазменных каналов и локальных образований с высокой концентрацией электронов  $\sim 1.5 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ

1. В.О. Милицин, Е.П. Качан, В.П. Кандидов “Многokратное рассеяние, модуляционная неустойчивость и филаментация фемтосекундного лазерного импульса в дисперсной среде”. *Квантовая Электроника*, **36**(11), 1032-1038 (2006).
2. В.П. Кандидов, В.О. Милицин, А.В. Быков, А.В. Приезжев “Корпускулярный” и “волновой” методы Монте-Карло в оптике дисперсных сред”. *Квантовая Электроника*, **36**(11), 1003-1008 (2006).
3. В.П. Кандидов, В.О. Милицин “Формирование множества филаментов в мощном фемтосекундном лазерном импульсе в условиях дождя”. *Оптика Атмосферы и Океана*, **19**(11), 765-772 (2006).
4. Е.П. Качан, В.О. Милицин “Влияние частиц атмосферного аэрозоля на зарождение филаментов в лазерном пучке”. *Оптический журнал*, **73**(11), 38-44 (2006).
5. V.P. Kandidov, V.O. Militsin “Computer simulation of laser pulse filament generation in rain”. *Applied Physics B*, **83**(2), 171-174 (2006).
6. В.О. Милицин, Л.С. Кузьминский, В.П. Кандидов “Стратифицированная модель распространения мощного фемтосекундного лазерного излучения в атмосферном аэрозоле”. *Оптика Атмосферы и Океана*, **18**(10), 880-886 (2005).
7. В.П. Кандидов, В.О. Милицин “Интенсивность светового поля и концентрация электронов лазерной плазмы в капле водного аэрозоля при воздействии фемтосекундного импульса. Геометрооптический анализ”. *Оптика Атмосферы и Океана*, **17**(1), 54-62 (2004).
8. V.O. Militsin, L.S. Kouzminskii, V.P. Kandidov “Beam breakup and filament initiation induced by femtosecond pulse transmission through water aerosol”. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, **5708**, 277-287 (2005).