

На правах рукописи

Тимченко Павел Евгеньевич

МЕТОДЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ОБРАТНОГО РАССЕЙЯНИЯ
И ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЯХ РАССЕЙВАЮЩИХ СРЕД И ПЛАЗМЫ

Специальность 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Самара - 2009

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» (СГАУ) на кафедре автоматических систем энергетических установок

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор Захаров Валерий Павлович

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук
Скиданов Роман Васильевич,
кандидат физико-математических наук
Майорова Александра Михайловна

Ведущая организация: государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарский государственный университет»

Защита состоится 18 декабря 2009 г. в 10.00 на заседании диссертационного совета Д212.215.01 при государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева», по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СГАУ.

Автореферат разослан 17 ноября 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
профессор

В.Г. Шахов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одним из бурно развивающихся направлений современной физики является исследование многократно рассеивающих сред, где актуально поглощения фотона предшествует множество актов его рассеяния. К таким средам относятся аэрозоли, биологические ткани, плотные газы и жидкости. Интерес к данному направлению обусловлен возможностью получения целостной информации и многофункциональной диагностики исследуемых объектов по их оптическим характеристикам.

Существующие оптические методы контроля многократно рассеивающих сред подразделяются на диагностические методы (абсорбционные методы [F.A.Duck, 1990], спектральный анализ биологических сред [G.Mueller, B.Chance, 1993; В.В.Тучин, 2007], бензина [Н.Е.Конюхов, Б.В.Скворцов, В.Н.Астапов, 2000]), и методы визуализации (спекл-интерферометрия [S. John, 1983]; метод оптической когерентной томографии [Д.А.Зимняков, В.В.Тучин, 2003]). Принцип работы методов визуализации базируется на выделении структурных неоднородностей среды, приводящей к пространственной модуляции ее оптических характеристик. Основная трудность реализации методов визуализации связана с размытием изображения за счет диффузного рассеяния оптического излучения, что существенным образом ограничивает глубину исследуемой среды, на которой удастся обеспечить приемлемое разрешение. Диагностические методы, как правило, используют спектральные различия химических компонент многократно рассеивающих сред и основаны на измерении абсолютных значений оптических характеристик исследуемых сред. Однако большая вариабельность химического состава исследуемых сред, перекрытия спектров поглощения различных веществ приводит к значительным трудностям в интерпретации абсолютных измерений.

Большинство практически интересных случаев (лазеротерапия, процессы компаундирования в нефтехимической промышленности и другие) характеризуется наличием внешнего воздействия на многократно рассеивающую среду, которое, в свою очередь, обуславливает наличие кинетических процессов, приводящих к изменению либо химического состава, либо плотности, либо пространственного распределения структурных компонент среды, что в конечном итоге приводит к нестационарности спектральной плотности интенсивности рассеянного излучения. Регистрация и локализация области изменения оптических характеристики среды, а также анализ их функциональных зависимостей от параметров внешнего воздействия дает возможность идентификации наиболее важных параметров исследуемой среды и протекающих в них процессов.

Возможно и качественное изменение спектрально состава регистрируемого излучения при наличии возбужденных молекул вещества. Последний случай реализуется в плазме газового разряда. Эмиссионное излучение может существенным образом менять оптические характеристики среды. Особый интерес представляет исследование плазмы поверхностных разрядов [П.Н. Дашук, 1978; Г.П. Кузьмин, Д.Ю. Зарослов, 1978; В.В. Иванов, В.Р. Леонов, 2007], применяемых в лазерной технике, генераторах озона, системах снижения аэродинамического трения и т.д. Учитывая нелинейный характер процесса формирования поверхностной газоразрядной плазмы, оптические параметры такой многократно рассеивающей среды будут существенным образом зависеть от пространственного распределения плотности электронов.

Целью диссертационной работы является экспериментальное исследование многократно рассеивающих сред при внешнем воздействии методами дифференциального обратного рассеяния и эмиссионной спектроскопии.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Создать экспериментальную установку, реализующую методы обратного рассеяния и эмиссионной спектроскопии для изучения рассеивающих сред и плазмы при внешних воздействиях;
- Экспериментально исследовать изменения оптических характеристик биологических объектов при внешнем оптическом воздействии;
- Экспериментально определить пространственное разрешение метода дифференциального обратного рассеяния;
- Экспериментально исследовать применимость метода обратного рассеяния для качественного и количественного анализа жидких многократно рассеивающих сред на примере легких фракций углеводородов;
- Исследовать кинетику плазмы и пространственное распределение плотности электронов незавершенного поверхностного разряда в воздухе.

Методы исследования:

Для решения поставленных задач были использованы методы обратного рассеяния и эмиссионной спектроскопии.

Научная новизна работы:

1. Предложен и апробирован метод контроля биообъектов, основанный на введении дифференциального коэффициента обратного рассеяния на длинах волн 650 нм и 810 нм, позволяющий определять изменения оптических характеристик обратного рассеяния биообъектов *in vivo* при внешнем воздействии с одновременным контролем степени оксигенации крови.
2. Показано, что при низкоинтенсивном лазерном воздействии на биообъект изменение дифференциального коэффициента обратного рассеяния имеет линейную и нелинейную стадии с последующим выходом на насыщение, время достижения которого является объективным критерием эффективности воздействия.
3. Показано, что метод обратного рассеяния, основанный на измерении интенсивности обратного рассеяния на длинах волн 470 нм и 860 нм, позволяет регистрировать октановое число смеси бензинов с точностью 0,3 октановой единицы.
4. Методом эмиссионной спектроскопии определено пространственное распределение электронной плотности и степени неравновесности плазмы незавершенного поверхностного разряда в воздухе при периодическом возбуждении импульсами знакопеременного напряжения. Показано, что колебательная температура уровня C^3P_u молекулы азота и пространственное распределение плазмы изменяется не более чем на 10% при изменении напряжения питания разряда в пределах от 2,5 до 6 кВ.

Практическая ценность работы:

1. Экспериментально установленные функциональные зависимости изменения коэффициента обратного рассеяния биологических объектов могут использоваться для мониторинга эффективности терапии.
2. Времена достижения максимума и выхода на насыщение коэффициента обратного рассеяния биологических объектов при воздействии низкоинтенсивным лазерным излучением могут служить объективными критериями для индивидуализации лазеротерапии.
3. Экспериментально установленные зависимости дифференциального коэффи-

циента обратного рассеяния от октанового числа могут быть использованы для контроля процессов компаундирования нефтепродуктов в реальном масштабе времени.

4. Развитый метод контроля пространственного распределения электронной плотности может использоваться для дистанционного мониторинга характеристик плазмы газовых разрядов.

5. Экспериментально измеренные колебательные и вращательные температуры возбужденных уровней молекул азота плазмы незавершенного поверхностного разряда могут быть использованы для определения нелинейной вязкости применительно к проблеме снижения аэродинамического трения.

На защиту выносятся:

1. Метод дифференциального обратного рассеяния, позволяющий выделить *in vivo* линейную и нелинейные стадии изменения оптических характеристик биоткани при низкоинтенсивном лазерном воздействии с одновременным контролем степени оксигенации крови.

2. Метод контроля состава легких фракций углеводов, основанный на измерении дифференциального коэффициента обратного рассеяния на длинах волн 470 и 860 нм и позволяющий регистрировать октановое число с точностью 0,3 октановые единицы.

3. Результаты экспериментальных исследований кинетики плазмы незавершенного поверхностного разряда в воздухе атмосферного давления, позволившие определить пространственное распределение электронной плотности и степени неравновесности плазмы методом эмиссионной спектроскопии.

Достоверность полученных и представленных в диссертации результатов подтверждается использованием апробированных и обоснованных методов, теоретических представлений, тщательностью проведенных измерений, согласием экспериментальных результатов, полученных независимыми методами исследований, работоспособностью созданных установок и разработанных методик, а также общим согласием с результатами других исследователей.

Апробация работы:

Результаты работы докладывались на 15-ти международных, 2-х всероссийских и 2-х региональных конференциях: «Saratov Fall Meeting 2003» (г. Саратов, 2003 г.), I-я Троицкая конференция «Медицинская физика и инновации в медицине» (г. Троицк, 2004 г.), «Saratov Fall Meeting 2004» (г. Саратов 2004 г.); «Второй Самарский региональный конкурс-конференция научных работ студентов и молодых исследователей по оптике и лазерной физике» (Самара, 2004 г.); IV Международная научно-техническая конференция «Физика волновых процессов и радиотехнические системы» (г. Волгоград, 2005 г.); «Третий Самарский региональный конкурс - конференция научных работ студентов и молодых исследователей по оптике и лазерной физике» (Самара, 2005 г.); международная конференция «Лазеры, Измерения, Информация – 2006» (г. Санкт-Петербург, 2006 г.); «Saratov Fall Meeting 2006» (г. Саратов, 2006 г.); II Троицкая конференция «Медицинская физика и инновации в медицине» (г. Троицк, 2006 г.); X International Conference on Laser Applications in Life Sciences (LALS-2007) (г. Москва, 2007 г.); «15th International Conference on Advanced Laser Technologies» (Finland, Levi, 2007); 15-ая Международная конференция «Высокие технологии в медицине, биологии и геоэкологии – 2007» (г. Новороссийск, 2007 г.); VI Международная научно-техническая конференция «Физика волновых процессов и радиотехнические системы» (г. Казань, 2007); XVI Международная конференция «Высокие технологии в медицине, биологии и геоэкологии – 2008» (г. Новороссийск, 2008); «Topical Meeting on Optoinformatics

2008» (Санкт-Петербург, 2008г.); Международная конференция «Лазеры, Измерения, Информация – 2008» (г. Санкт-Петербург, 2008 г.); VII Международная научно-техническая конференция «Физика волновых процессов и радиотехнические системы» (г. Самара, 2008 г.); «International conference on advanced laser technologies» (ALT,08) (September 13-18, 2008 г., Hungary); VIII международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов» (Санкт-Петербург, 2008г.).

Публикации: Материалы, отражающие основное содержание диссертации, опубликованы в 20 научных работах, в том числе 4 работы в ведущих рецензируемых научных изданиях.

Структура и объем диссертации:

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения и изложена на 132 страницах. Работа содержит 9 таблиц и 69 рисунков, список цитируемой литературы включает 244 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, изложена цель и задачи исследований, дана общая характеристика работы, показана научная новизна полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе дан краткий исторический обзор и проанализированы основные физические принципы контроля многократно рассеивающих сред и кинетики процессов в плазме. Проанализированы спектральные методы (адсорбционные методы, спектрофотометрия, оптико-акустические методы, ИК-спектроскопия) и метод эмиссионной спектроскопии плазмы, основные характеристики газоразрядной плазмы и влияние возбуждающих полей на ее кинетику.

Показано, что среди диагностических методов измерения параметров сред наибольшее развитие в настоящее время получили методы обратного рассеяния и флуоресцентной спектроскопии. Успешность реализации метода дифференциального обратного рассеяния во многом связана с корректным выбором спектрального диапазона диагностики, обеспечивающего с одной стороны достаточную глубину проникновения излучения в исследуемую среду, а с другой – отсутствие перекрытия спектров поглощения исследуемой компоненты вещества со спектрами поглощения других компонент среды.

Отмечено, что в большинстве известных работ для корректного определения абсолютных параметров среды необходимо использовать интенсивности излучения, которые могут приводить к возмущению исследуемой среды. Следовательно, при изучении кинетики многократно рассеивающих сред при внешнем воздействии принципиальным является развитие метода обратного рассеяния, использующего диагностическое излучение малой интенсивности. Последнее возможно только при использовании дифференциальных методов.

Во второй главе экспериментально исследована методом дифференциального обратного рассеяния кинетика многократно рассеивающих сред при внешнем оптическом воздействии. Был разработан экспериментальный стенд, схема которого представлена на рисунке 1. Стенд включает в себя интегральный детектор и волоконный детектор, обеспечивающий измерения спектральной интенсивности обратного рассеяния I_{ex} в диапазоне 400..800 нм.

Каналы воздействия и регистрации были разделены, что обеспечивало возможность измерения интенсивности обратного рассеяния исследуемой среды до, во

время и после воздействия внешнего фактора. В качестве источников оптического воздействия использовались полупроводниковые лазерные диоды с длинами волн 650 нм, 780 нм, 830 нм и средней мощностью излучения, варьируемой в диапазоне от 2 до 50 мВт, гелий-неоновый лазер мощностью 5-10 мВт, светодиоды мощностью 35 мВт и длиной волны излучения 640-680 нм, тепловой источник излучения. В случае биологических объектов дополнительно использовались физиологические воздействующие факторы (вентиляция легких, физическая нагрузка, медикаментозная терапия).

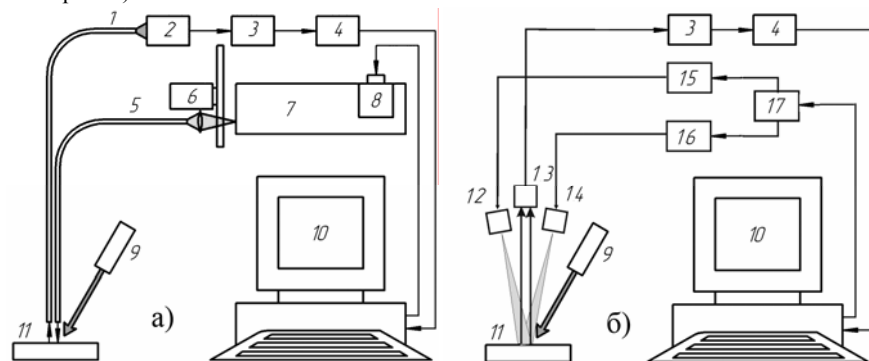


Рисунок 1 - Схема экспериментальной установки - (а) волоконный детектор и (б) интегральный детектор: 1 – приемное волокно, 2 – ФЭУ, 3 – детектор с демодулятором, 4 – аналого-цифровой преобразователь, 5 – подающее волокно, 6 – модулятор, 7 – перестраиваемый источник зондирующего излучения, 8 – шаговый двигатель, 9 – лазер воздействия, 10 – компьютер, 11 – объект, 12, 14 – источники диагностического излучения, 13 – фотоприемник, 15, 16 – модуляторы, 17 – генератор

Для выделения кинетических процессов в исследуемой среде использовался коэффициент обратного рассеяния

$$K(t, \vec{r}, \lambda) = \frac{I_{ex}(t, \vec{r}, \lambda) - I_{noise}(\lambda)}{I_{test}(\lambda) - I_{noise}(\lambda)}, \quad (1)$$

где I_{test} - интенсивность обратного рассеяния от тестового образца со стабильными и однородными характеристиками среды (например, матовая пластина из молочного стекла МС-20), а I_{noise} - уровень собственных шумов регистрирующей системы.

В случае интегрального детектора интенсивность обратного рассеяния регистрировалась на фиксированных длинах волн, соответствующих спектральным экстремумам исследуемой компоненты среды.

При исследовании биологических объектов изменения коэффициента (1) при внешних воздействиях проявляются во всем видимом диапазоне спектра и объясняются несколькими факторами: (а) увеличением кровенаполнения верхних слоев биоткани (удельной концентрации крови), (б) увеличением поглощения в красной области спектра, характерном для цельной крови, (в) качественным изменением непосредственно характеристик крови за счет оксигенации. Следовательно, для выделения кинетики оптических характеристик целесообразно использовать спектральные особенности данной изменяющейся в процессе воздействия компоненты исследуемой среды, перейдя к дифференциальной форме коэффициента обратного рассеяния:

$$DK(t) = \frac{1}{2} \left(2,5 - \frac{K(t, \lambda_{max})}{K(t, \lambda_{min})} \right), \quad (2)$$

где $\lambda_{min}=810$ нм и $\lambda_{max}=660$ нм соответствуют равенству и максимальной разнице в молярных коэффициентах поглощения окси- и диокси-гемоглобинов, а коэффициенты выбраны из условия нормировки в состоянии нормы.

Кривые временной зависимости коэффициента (2) для разных мощностей источника воздействия представлены на рисунке 2, где пунктирными прямыми показано время начала и окончания воздействия.

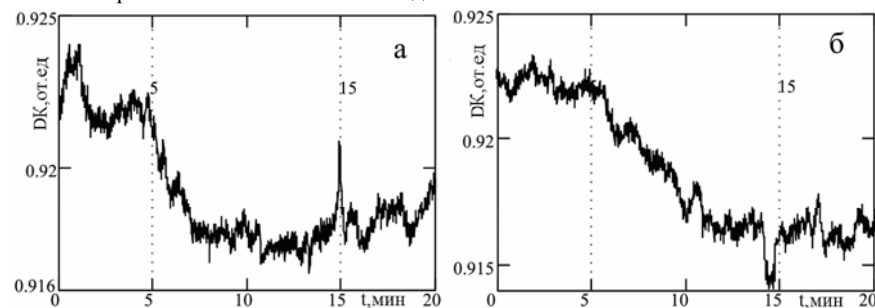


Рисунок 2 - Изменение дифференциального коэффициента обратного рассеяния DK при воздействии низкоинтенсивным излучением (а) светодиода ($\lambda=640-680$ нм, $P=25$ мВт) и (б) лазерного диода ($\lambda=650$ нм, $P=8,5$ мВт)

Видно, что включение лазерного источника воздействия приводит к изменению коэффициента обратного рассеяния с выходом его на насыщение, причем данное значение сохраняется и после снятия воздействия. Повышение мощности излучения не меняет характерный вид функциональной зависимости, приводя лишь к более быстрому насыщению.

Фактически кинетика дифференциального коэффициента обратного рассеяния отражает изменения соотношения окси- и диоксигемоглобина в кровенаполненных слоях ткани в процессе оптического воздействия. В этой связи интересно сравнить полученные результаты с поведением коэффициента обратного рассеяния в дыхательных тестах, когда воздействие на организм проводилось путем гипервентиляции легких (рисунок 3,а). Здесь начало воздействия также приводит к спаду коэффициента обратного рассеяния, которое связано с увеличением оксигенации крови, но после снятия воздействия значение коэффициента обратного рассеяния возвращается к исходному состоянию. Следовательно, физиологический механизм, приводящий к повышению оксигенации крови при оптическом воздействии, отличается и, по-видимому, связан со структурной перестройкой биоткани и адаптационными механизмами организма на внешнее воздействие.

На рисунке 3,б представлена зависимость дифференциального коэффициента обратного рассеяния от времени для условий эксперимента, тождественных рисунку 2,б, за исключением того, что лазерное излучение воздействия периодически прерывалось на короткое время. Видно, что в паузах имеется тенденция к восстановлению исходного состояния, однако данная тенденция становится все более слабо выраженной по мере приближения к насыщению, а после его достижения исчезает.

Следовательно, при оптическом воздействии процесс изменения оптических характеристик биоткани имеет две фазы – линейную (обратимую) и нелинейную

(насыщение). При этом контроль времени насыщения может использоваться как объективный критерий индивидуализации длительности сеанса лазеротерапии.

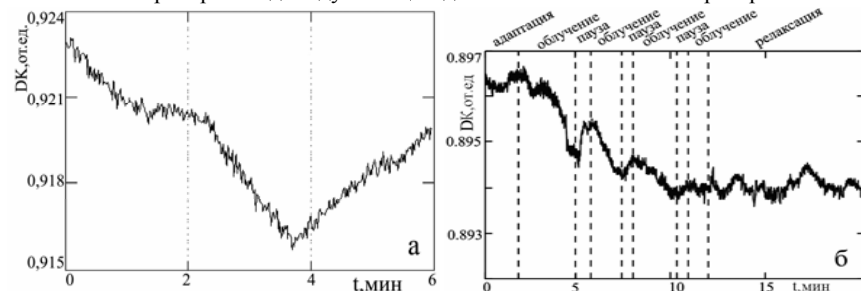


Рисунок 3 - Кинетика дифференциального коэффициента DK: а - дыхательный тест (0-2 мин. – привыкание к состоянию покоя, 2-4 – мин. интенсивное дыхание, 4-6 мин. - спокойное дыхание), б - частотное воздействие

Для выяснения области локализации нелинейного изменения оптических характеристик биоткани при оптическом воздействии были поставлены два типа экспериментов. В первом эксперименте (рисунок 4) проекция области печени последовательно облучалась в зонах А, В, С, расположенных в углах равнобедренного треугольника, охватывающего зону регистрации D. Каждая зона воздействия находилась на расстоянии 40 мм от центра зоны D. При облучении каждой из зон в области регистрации наблюдались пики в изменении дифференциального коэффициента обратного рассеяния, причем амплитуда пика при облучении зоны С (последняя облучаемая зона) значительно уменьшалась за счет достижения насыщения.

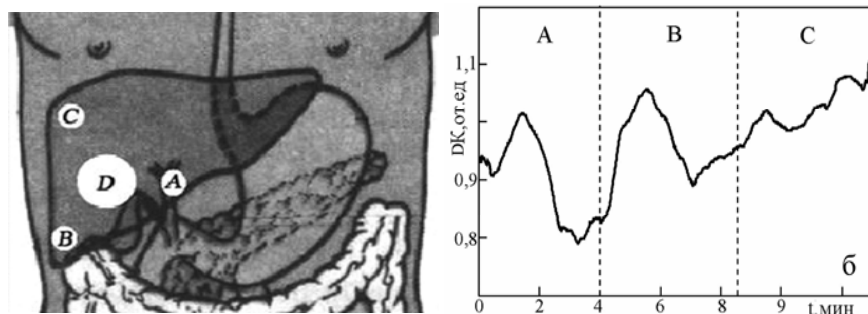


Рисунок 4 - Изменение дифференциального коэффициента обратного рассеяния в зоне D при последовательном облучении зон А, В, С соответственно

Во второй серии экспериментов зона облучения фиксировалась и составляла 20 мм в диаметре, а измерения интенсивности обратного рассеяния проводились вокруг зоны облучения на различных дистанциях. Четкая реакция на воздействие наблюдалась вплоть до расстояний в 150 мм.

На рисунке 5 представлены изменения интенсивности обратного рассеяния в центре облучения (сплошная кривая) и на расстоянии 100 мм (пунктир) для двух спектральных диапазонов (550 нм и 633 нм). Ясно видно, что изменения интенсивности имеют одинаковый характер вне и внутри зоны облучения, различаясь лишь амплитудой, а процесс насыщения вне зоны облучения начинается с некоторым за-

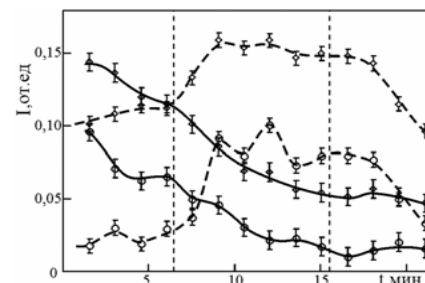


Рисунок 5 - Изменение интенсивности обратного рассеяния в центре (сплошные кривые) и на расстоянии 100 мм (пунктир) от зоны облучения: кружки – $\lambda=550$ нм, ромбы – $\lambda=633$ нм

паздыванием относительно аналогичного процесса в зоне облучения.

В третьей главе рассмотрена применимость метода дифференциального обратного рассеяния для пространственного разрешения неоднородностей многократно рассеивающих сред. Был проведен цикл тестовых экспериментов, в которых в качестве модельной среды использовались срезы свиной кожи с подкожной жировой клетчаткой. Поглощающие неоднородности моделировались введением под кожу красителя, а рассеивающие – введением кусочков оптического волокна.

В качестве анализируемого параметра использовался дифференциальный коэффициент обратного рассеяния в форме:

$$K_{\lambda_1/\lambda_2} = \frac{K(\vec{r}, \lambda_1)}{K(\vec{r}, \lambda_2)}, \quad (3)$$

где одна длина волны выбиралась в области максимума поглощения красителя ($\lambda_1 = 550$ нм), а вторая ($\lambda_2 = 650$ нм) соответствовала области прозрачности как красителя, так и модельной среды.

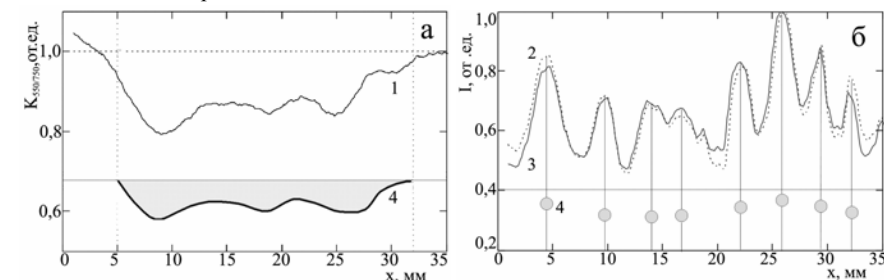


Рисунок 6 - Зависимость от координаты дифференциального коэффициента (1) и интенсивности (2 – 550 нм, 3- 650 нм) обратного рассеяния для поглощающих (а) и рассеивающих (б) неоднородностей. 4 – схема пространственного распределения неоднородностей

На рисунке 6 приведена зависимость коэффициента обратного рассеяния (3) от координаты для модельной среды с большим пятном красителя в центре (рисунок 7а) и относительных интенсивностей для рассеивающих неоднородностей (рисунок 7б). Видно, что распределение коэффициента обратного рассеяния полностью повторяет распределение красителя в области от 5 до 29 мм. Причем, увеличение амплитуды провала (соответствует падению амплитуды сигнала на 18%) вблизи координаты $x = 9$ мм свидетельствует как о повышенной концентрации красителя, так и более поверхностном его залегании. Для моделирования неоднородностей рассеяния использовались оптические волокна, которые при введении внутрь образца на глубину 1.5 мм (рисунок 7,б) формируют цилиндрические микрорассеиватели диаметром 0.3 мм. Это приводило к изменению пространственного распределения

обратного рассеяния во всем исследованном диапазоне спектра.

Оценка применимости метода для диагностики и локализации оптических неоднородностей поглощения и рассеяния показывает, что глубина локализации не превышает 5 мм при их диаметре до 0.5 мм.

В четвёртой главе экспериментально исследована применимость метода дифференциального обратного рассеяния для анализа жидких многократно рассеивающих сред на примере легких фракций углеводородов. Особое внимание уделено развитию метода применительно к контролю октанового числа бензинов.

Экспериментально показано, что в случае сохранения условия многократности рассеяния отсутствуют принципиальные ограничения на применимость метода дифференциального обратного рассеяния за счет саморегуляции глубины приповерхностного слоя, с которой снимается информация. В качестве контролируемого параметра использовался дифференциальный коэффициент обратного рассеяния в форме (1), где в качестве тестового объекта использовалась эталонная смесь.

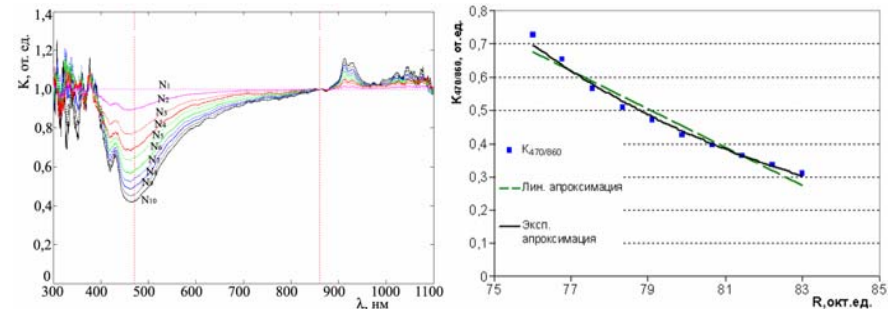


Рисунок 7 - Зависимость коэффициента обратного рассеяния бензиновых смесей с различным октановым числом от длины волны

Рисунок 8 - Зависимость коэффициента обратного рассеяния $K_{470/860}$ от октанового числа и его линейная и экспоненциальная аппроксимации

На рисунке 7 представлены зависимости коэффициента обратного рассеяния бензиновых смесей с различным октановым числом от длины волны. Из анализа данных зависимостей следует, что коэффициент обратного рассеяния имеет выраженные экстремумы в области 470 нм, 912 нм, 930 нм, 925 нм. При этом для длин волн 860 нм и 980 нм значение коэффициента равно 1 для всех исследуемых смесей. Следовательно, для идентификации октанового числа можно предложить несколько дифференциальных коэффициентов в форме (3), где используются следующие комбинации длин волн λ_1/λ_2 : 470/860, 912/860, 930/860, 912/980, 925/980.

Зависимость коэффициента $K_{470/860}$ от октанового числа представлена на рисунке 8. Здесь же приведена его линейная и экспоненциальная аппроксимации. Данный коэффициент наиболее чувствителен к изменению октанового числа и позволяет регистрировать отклонения октанового числа с точностью до 0,3 октановой единицы.

Пятая глава посвящена экспериментальному исследованию плазмы незавершенного поверхностного разряда в воздухе атмосферного давления методом эмиссионной спектроскопии. Для исследования кинетики плазмы была проведена модернизация экспериментального стенда, в который была интегрирована система возбуждения незавершенного поверхностного разряда (рисунок 9).

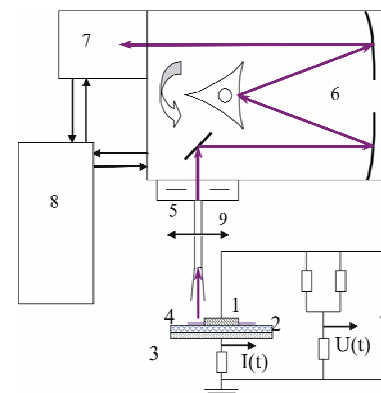


Рисунок 9 - Экспериментальный стенд для исследования плазмы
1 – электрод,
2 – пластина из монокристаллического сапфира,
3 – заземлённый экран,
4 – плазма незавершённого поверхностного разряда,
5 – приёмное волокно,
6 – спектрограф Shamrock sr-303i,
7 – цифровая камера ANDOR DV-420A-OE,
8 – компьютер.
9 – транспортёр с шаговым двигателем, перемещающий приёмное волокно

Спектральные характеристики плазмы разряда контролировались как в области острого края, так и середины наибольшей стороны электрода. На рисунке 10 представлен спектр эмиссионного излучения плазмы незавершённого поверхностного разряда в воздухе атмосферного давления при напряжении разряда 5 кВ. Наиболее интенсивные линии соответствуют переходам 0-0 (337,1 нм) и 0-1 (357,55 нм), 0-2 (380,39 нм), 1-2 (353,62 нм), 1-3 (375,51 нм), 0-3 (405,84 нм), 1-0 (315,84 нм), 1-4 (399,84 нм), 1-5 (427,02 нм) 2^+ -системы молекулы азота. В более длинноволновой части располагаются переходы 2-0 (773,15 нм), 3-1 (760,47 нм), 4-2 (748,22 нм), 1-0 (888,32 нм), 2-1 (869,48 нм), 5-3 (736,38 нм) 1^+ системы молекулы азота, переходы 1^- системы иона молекулы азота и система полос Мейнела. Наблюдаются также линии атомарного кислорода (844,62; 844,64; 844,68; 725,42; 725,44; 725,45; 700,22 нм), аргона (811,5; 810,3; 801,5; 912,3; 842,4; 794,8; 826,4; 922,4 нм), атомарного азота (939,28; 938,68 нм), ионов кислорода O^+ (926,28; 926,6; 777,19; 777,42; 777,54; 615,82 нм) и азота N^+ (868,04; 868,34; 821,63 нм).

Основное внимание было уделено анализу переходов 2^+ и 1^+ систем молекулы азота. В общей сложности анализировались переходы с первых 8 электронно-колебательных уровней.

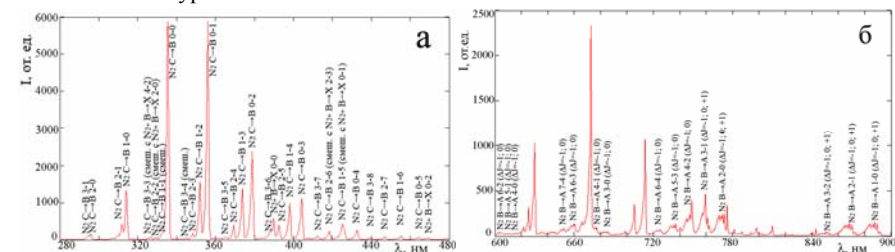


Рисунок 10 - Эмиссионный спектр плазмы незавершенного разряда в воздухе в диапазоне 280-480 нм (а) и 600-900 нм (б)

Разрешение стенда (0,05 нм) позволяет уверенно регистрировать контур колебательно-вращательных переходов (рисунок 11). За счет быстрой RT-релаксации на вращательных подуровнях устанавливается бальцовское распределение, и вращательная температура может быть определена в области отсутствия перекрытия P-, Q- R-ветвей колебательно-вращательных переходов. Так, для канта 0-0 2^+ системы

азота это соответствует R-ветви для квантовых чисел $J \sim 15..27$ (спадающая часть кривой на рисунке 11б), а величина вращательной температуры электронного уровня $C^3\Pi_u$ составила $T_{rc} = 376 \pm 55 K$. Тогда, в силу детального равновесия вращательная температура основного состояния $X^1\Sigma_g^+$, равная поступательной температуре, составляет $T_{rx} = 417 \pm 60 K$.

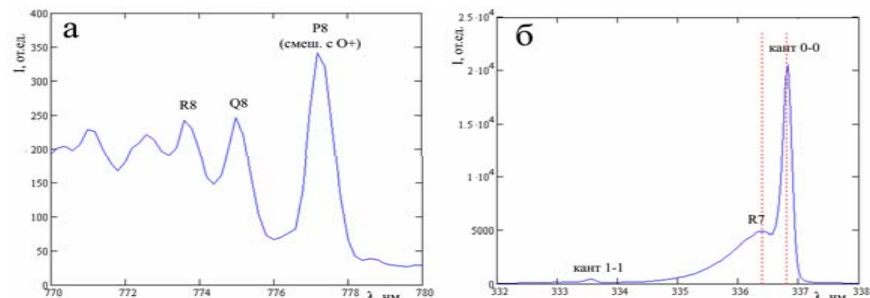


Рисунок 11 - Эмиссионный спектр канта 3-1 перехода $B^3\Pi_g \rightarrow A^3\Sigma_u^+$ (а) и канта 0-0 перехода $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$ (б)

Полная экспериментально определяемая интенсивность излучения I_{ex} электроно-колебательного перехода может быть определена выражением:

$$I_{ex} = \frac{64\pi^4 \nu_{\nu\nu'}^4}{3c^3} \cdot N_{n\nu'} \cdot |R_{m\nu'}|^2 q_{\nu\nu'} \cdot \beta \cdot \alpha \cdot G_{\nu\nu'}, \quad (4)$$

где β - коэффициент ослабления оптической системы установки, $\alpha(\lambda)$ - коэффициент, отвечающий за пропускание плазмы разряда, $|R_{m\nu'}|^2$ - квадрат матричного элемента перехода, $q_{\nu\nu'}$ - факторы Франка-Кондона, $\nu_{\nu\nu'}$ - частота перехода, $N_{n\nu'}$ - населенность уровня, $G_{\nu\nu'}$ - контур линии. Используя экспериментально зарегистрированные интенсивности эмиссионного излучения и разрешая (4) относительно $N_{n\nu'}$, получаем зависимость населенности от энергии уровня, представленную на рисунке 12. Видно, что зависимость $\ln N(\nu)$ имеет линейный характер, что свидетельствует об установлении локального колебательного равновесия на электронном уровне $C^3\Pi_u$. Тогда угол наклона данных прямых определяет колебательную температуру, расчетные значения которой приведены в таблице 1. Для наиболее интенсивных переходов ($\Delta v = 0; -1, -2$) колебательная температура $T_{vc} = 2250_{-75}^{+45} K$.

Для полосы $B^3\Pi_g \rightarrow A^3\Sigma_u^+$ (1^+ система) аналогичная зависимость не носит линейного характера, что свидетельствует о существенной неравновесности состояния $B^3\Pi_g$. Линейная зависимость наблюдается только для больших колебательных чисел (смотри рисунок 12б), и можно говорить лишь о частичном равновесии с колебательной температурой $T_{vb} = 2350_{-150}^{+150} K$. Для колебательных же чисел $V = 0; 1; 2; 3$ равновесие не устанавливается. Действительно, время жизни состояния $B^3\Pi_g$ составляет ~ 7 мкс, а уровень $A^3\Sigma_u^+$ является метастабильным и при частоте

следования импульсов накачки 8 кГц не успевает рассеяться.

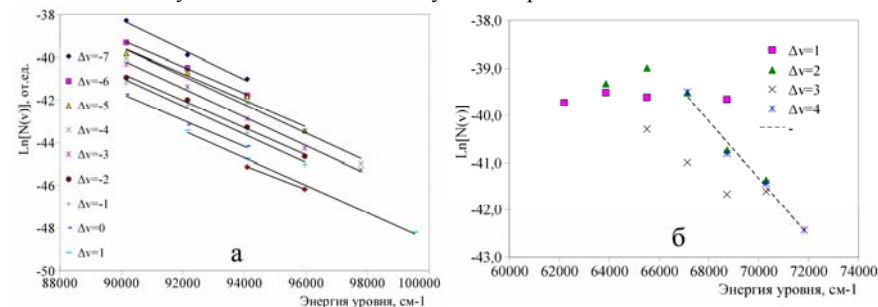


Рисунок 12 - Населённости колебательно-возбуждённых уровней электронного состояния $C^3\Pi_u$ (а) и $B^3\Pi_g$ (б) в зависимости от энергии уровня

Таблица 1 – Колебательная температура $C^3\Pi_u$.

Δv	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2
T_{vc}, K	2055	2273	2308	2146	2169	2281	2175	2294	2159	2104

В предположении равновесного распределения населенностей колебательных уровней основного электронного состояния N_{v_x} , найдено решение кинетических уравнений для усредненных по периоду возбуждающего поля населенностей возбужденных электроно-колебательных уровней азота:

$$\langle N_{v_c} \rangle_t = \frac{|R_{XC}|^2 Q_{v_c}}{\sum_{v_B} A_{v_c v_B}} \langle N_e \gamma_{XC} \rangle_t, \quad \langle N_{v_B} \rangle_t = a_{v_B} \frac{|R_{XB}|^2 Q_{v_B}}{\sum_{v_A} A_{v_B v_A}} \langle N_e \gamma_{XB} \rangle_t, \quad (5)$$

где $\langle \dots \rangle_t$ - усреднение по периоду возбуждающего поля, $Q_{v_y} = \sum_{v_x} N_{v_x} q_{v_x v_y} \cdot A_{v_c v_B}$ -

коэффициент Эйнштейна для спонтанных переходов, N_e - плотность электронов, γ_{XY} - скорость возбуждения уровня Y прямым электронным ударом, а коэффициент a_{v_B} фактически определяет неравновесность состояния $B^3\Pi_g$. Населенность же уровня $A^3\Sigma_u^+$ определяется балансом между медленной релаксацией в основное состояние и его каскадным заселением $N_{v_x} + e \rightarrow N_{v_c} \rightarrow N_{v_B} + h\nu_C \rightarrow N_{v_A} + h\nu_B$.

Учитывая, что для незавершенного поверхностного разряда напряженность поля преимущественно меняется в направлении нормали r_{\parallel} к электроду вдоль его поверхности, то среднюю плотность электронов можно представить в виде $\bar{N}_e = \bar{N}_{e0}(r_{\parallel}) + \delta\bar{N}_e(r_{\perp})$, где первое слагаемое определяет изменения концентрации электронов вдоль поля, а второе слагаемое связано с поперечными (r_{\perp}) флуктуациями поля. Тогда в соответствии с (5), пространственное распределение интенсивности переходов 2^+ системы азота может быть использовано для определения распределения электронной плотности, а интенсивность эмиссионного излучения 1^+ системы азота будет содержать в себе информацию о пространственном распределении степени неравновесности уровня $B^3\Pi_g$.

С целью экспериментального определения данных распределений волоконно-оптическая сборка 5 (см. рисунок 9) перемещалась в горизонтальной плоскости с помощью транспортёра 9 с шаговым двигателем. Наблюдалась симметрия интенсивности эмиссионного свечения относительно оси электрода 1. На рисунке 13а представлено распределение относительной интенсивности эмиссионного свечения для перехода 0-0 (337.1 нм) 2^+ -полосы азота вдоль разряда, снятое при $U_a=5 \text{ кВ}$. Координаты электрода $9 \leq X \leq 15$. Видно, что область катодного падения составляет величину $\sim 0.5 \text{ мм}$, а ширина полосы разряда - около 5 мм . В отличие от квазиравномерного распределения интенсивности завершённого скользящего разряда, незавершённая стадия разряда характеризуется экспоненциальным спадом интенсивности, связанным с падением плотности электронов. Максимум интенсивности наблюдается на расстоянии 1 мм от кромки электрода. Изменение зарядного напряжения в пределах $2-6 \text{ кВ}$ не приводило к существенному изменению характера распределения, приводя лишь к изменению ширины плазмы разряда в пределах $\pm 1 \text{ мм}$. Расчёт колебательной температуры уровня показывает, что она остаётся постоянной для всей полосы разряда с небольшим ($\sim 10\%$) повышением на дальнем от электрода крае. Интенсивность 1^+ системы азота (рисунок 13б) характеризуется более широким распределением с размытыми краями и сглаженным пиком по сравнению с распределением интенсивности для 2^+ системы. Последнее связано с неравновесностью состояния $B^3\Pi_g$, которое описывается

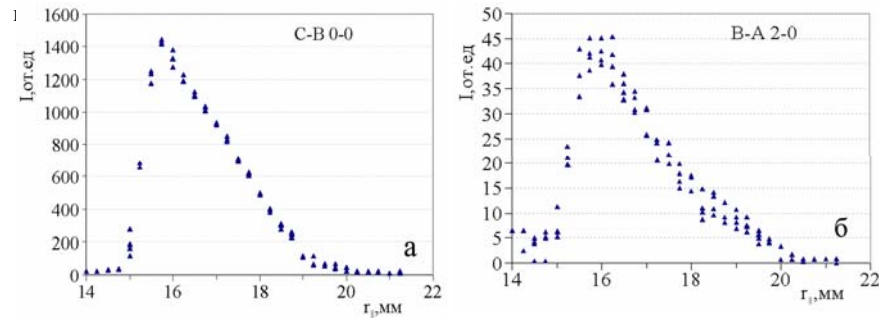


Рисунок 13 - Относительная интенсивность эмиссионного свечения плазмы при сканировании поперёк электрода (координаты электрода $9 \leq X \leq 15$): а - кант 0-0 перехода $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$, б - кант 2-0 перехода $B^3\Pi_g \rightarrow A^3\Sigma_u^+$

Поперечное сканирование разряда выявило наличие микрочаналов, которые отчетливо визуализировались вблизи кромки электрода с последующим их диффузным размытием по мере удаления от электрода. Характерный диаметр микрочаналов составлял величину порядка $0,4 \text{ мм}$ при средней плотности $10-15$ каналов на 1 см кромки электрода. Отмечена небольшая нестабильность положения микрочаналов - центр интенсивности микрочанала флуктуировал в пределах его диаметра.

На рисунке 14 представлена зависимость интенсивности эмиссионного свечения плазмы от зарядного напряжения. Видно, что вблизи порога зажигания разряда ($U \sim 2 \text{ кВ}$) зависимость интенсивности от напряжения носит экспоненциальный характер, который сменяется линейной зависимостью в области напряжений $3-6 \text{ кВ}$.

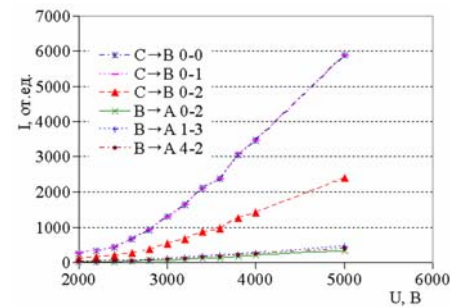


Рисунок 14 – Зависимость интенсивности эмиссионного излучения плазмы от напряжения на электродах

В режиме устойчивого горения разряда (напряжения $2,5 - 6 \text{ кВ}$) зависимости колебательной температуры электронного состояния $C^3\Pi_u$ от уровня напряжения не обнаружено. Последнее связано с увеличением ширины плазмы незавершённого разряда с ростом напряжения, а также кинетикой процессов радиационного рассеяния уровней. Действительно, характерный период изменения напряжения $\sim 125 \text{ мкс}$, в то время как время жизни уровня $C^3\Pi_u \sim 37 \text{ нс}$. Следовательно,

при линейном возрастании общего числа возбужденных молекул с ростом плотности электронов они успевают расселиться за период импульса накачки. В результате, колебательная температура слабо зависит от напряжения.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Разработан экспериментальный стенд, реализующий метод дифференциального обратного рассеяния для изучения многократно рассеивающих сред при внешних воздействиях и обеспечивающий измерения локальной и интегральной спектральной интенсивности обратного рассеяния с погрешностью $< 1\%$.

2. Введен дифференциальный коэффициент обратного рассеяния, использующий длины волн 650 нм и 810 нм , и позволяющий определять изменения характеристик обратного рассеяния биоткани *in vivo* с одновременным определением степени оксигенации крови. Установлено, что при низкоинтенсивном лазерном воздействии наблюдаются линейная и нелинейная стадии изменения коэффициента обратного рассеяния с последующим выходом его на насыщение. Показано, что кинетические процессы в биоткани при низкоинтенсивном лазерном воздействии связаны с изменением микроциркуляции крови и адаптационными реакциями организма на воздействие. Изменения интенсивности обратного рассеяния имеют одинаковый характер как внутри, так и вне зоны воздействия, различаясь лишь амплитудой, а процесс насыщения вне зоны облучения начинается с некоторым запаздыванием относительно аналогичного процесса в зоне облучения.

3. В результате экспериментальных исследований на модельных образцах многократно рассеивающих сред показано, что пространственное разрешение метода дифференциального обратного рассеяния ограничено $0,5 \text{ мм}$ при глубине залегания неоднородностей не превышающем 5 мм .

4. Экспериментально показано, что при сохранении условия многократности рассеяния происходит саморегуляция глубины приповерхностного слоя, с которой снимается информация методом дифференциального обратного рассеяния. Показана возможность использования метода для измерения октанового числа смеси бензинов с точностью до $0,3$ октановой единицы.

5. Экспериментально исследована кинетика плазмы незавершённого поверхностного разряда в воздухе атмосферного давления при частоте возбуждения 8 кГц : идентифицированы полосы 2^+ , 1^+ и 1^- систем молекулы азота для первых 9 колебательных состояний, а также переходы ионов азота, аргона, атомов кислорода и азота. Показано, что плазма разряда характеризуется локальным равновесием коле-

бательных состояний уровня $C^3\Pi_u$ с температурой $T_{vc} = 2250_{-75}^{+45} K$, вращательная температура при этом составляет $T_{rc} = 376 \pm 55 K$, а состояния, соответствующие 1^+ системе азота, являются термодинамически неравновесными.

6. Методом эмиссионной спектроскопии определено поперечное распределение электронной плотности и степени неравновесности плазмы незавершенного поверхностного разряда в воздухе атмосферного давления. Показано, что при изменении напряжения в пределах 2-6 кВ продольное распределение имеет максимум на расстоянии 1 мм от кромки электрода с его последующим экспоненциальным спадом на расстоянии 4.5 мм, а поперечная структура разряда представляет собой систему микроканалов с диффузным перекрытием: плотность каналов $10-15 \text{ см}^{-1}$, диаметр $\sim 0,4 \text{ мм}$.

Основные публикации по теме диссертации:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Захаров, В.П. Сравнительный спектральный анализ обратного рассеяния излучения растительной и живой тканью [Текст] / В.П. Захаров, П.Е. Тимченко, Р.В. Козлов, С.П. Котова, Е.В. Воробьева, В.В. Якуткин // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. -2005. - Т.8. - №3. – С.69-74.

2. Захаров, В.П. Применение метода обратного дифференциального рассеяния для исследования биообъектов [Текст] / В.П. Захаров, П.Е. Тимченко, Р.В. Козлов, С.П. Котова, Е.В. Тимченко, В.В. Якуткин // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. - 2008. - Т.13. - №4. - С.89-97.

3. Ивченко, В.А. Исследование пространственных характеристик незавершённого поверхностного разряда в воздухе атмосферного давления [Текст] / В.А. Ивченко, В.П.Захаров, П.Е.Тимченко // Краткие сообщения по физике. -2009. – №.11 - С.18-24.

4. Ивченко, В.А. Определение характеристик незавершённого поверхностного разряда в воздухе на основе анализа эмиссионных спектров [Текст] / В.А. Ивченко, В.П.Захаров, П.Е.Тимченко // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. - 2009. - №4. – С.101-108.

Публикации в других изданиях:

5. Zakharov, V.P. Experimental investigation of laser radiation backscattering anisotropy of superficial tissue [Текст] / V.P. Zakharov, P.E. Timchenko, E.V. Vorobjeva, S.P. Kotova, R.V. Kozlov, V.V. Yakutkin // International School for Young Scientists and Students on Optics, Laser Physics and Biophysics - Saratov Fall Meeting 2002 (October 1-4, 2002, Saratov, Russia).- 2002.

6. Zakharov, V.P. Effects of low level laser radiation on alteration of human body spectral backscattering properties [Текст] / V.P. Zakharov, P.E. Timchenko, E.V. Vorobjeva, S.N. Mityagin, A.V. Afanasieva, I.A. Chernikova, S.P. Kotova, R.V. Kozlov, V.V. Yakutkin // SPIE – 2003. - №5068. - P.446-449.

7. Timchenko, P.E. Human body optical properties kinetics in laser field [Текст] / P.E. Timchenko, S.P. Kotova, S.N. Mityagin, V.V. Yakutkin, V.P. Zakharov // The International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL'2003), (September 16-20, 2003, Alushta, Crimea, Ukraine). -2003. - P.19.

8. Zakharov, V.P. Optical Monitoring Of The Human Skin Microcirculation System [Текст] / V.P. Zakharov, S.P. Kotova, V.V. Yakutkin, S.N. Mityagin, P.E. Timchenko // тезисы 4-ой международной конференции "Photonics and Imaging in Biology and Medicine" (3-6 сентября 2005, Тяньцзинь, Китай). -2005.

9. Zakharov, V.P. Experimental investigation of kinetics spectral characteristics [Текст] / V.P. Zakharov, P.E. Timchenko, S.P. Kotova, E.V. Vorobjeva // 15th International Conference on Advanced Laser Technologies (September 3 – 7, 2007, Levi, Finland). – 2007. - P.120.

10. Захаров, В.П. Применение метода обратного дифференциального рассеяния для исследования биообъектов [Текст] / В.П.Захаров, П.Е. Тимченко, Р.В.Козлов, С.П.Котова, Е.В. Тимченко, В.В. Якуткин // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2008. – Т.13. - №4. – С.89-97.

11. Afanasieva, A.V. Human body optical response on low level laser irradiation [Текст] / A.V. Afanasieva, P.E. Timchenko, V.P. Zakharov, S.P. Kotova, V.V. Yakutkin // 12th International Laser Physics Workshop (August 25-29, Hamburg). – 2003. - P.56.

12. Захаров, В.П. Диагностика биообъектов методом дифференциального обратного рассеяния [Текст] / В.П. Захаров, П.Е. Тимченко, Р.В. Козлов, С.П. Котова, Е.В. Воробьева, В.В. Якуткин // Приложение к журналу «Физика волновых процессов и радиотехнические системы», тезисы докладов и сообщений, IV Международная научно-техническая конференция (3-9 октября г. Нижний-Новгород, 2005). -2005. - С.280-281.

13. Zakharov, V.P. Tissue optical properties kinetics in vivo investigations [Текст] / V.P. Zakharov, P.E. Timchenko, S.P. Kotova, R.V. Kozlov, E.V. Vorobjeva, V.V. Yakutkin, A.R. Sindjaeva, S.V. Jakovleva // 12th Conference on Laser Optics (LOYS) (June 26-30, St. Petersburg, 2006). – 2006. - P. 17.

14. Захаров, В.П. Сравнительный спектральный анализ растительной и животной тканей [Текст] / В.П.Захаров, П.Е. Тимченко, Р.В.Козлов, С.П.Котова, Е.В.Воробьева, В.В. Якуткин // Сборник трудов "Третий Самарский региональный конкурс - конференции научных работ студентов и молодых исследователей по оптике и лазерной физике, тезисы докладов и сообщений" (24-25 октября г. Москва, 2005). – 2005. - С.172-179.

15. Захаров, В.П. Многофункциональный экспериментальный стенд для дистанционной диагностики многократно рассеивающих сред [Текст] / В.П.Захаров, П.Е.Тимченко, Р.В.Козлов, Е.В.Воробьева, А.Р. Синдяева, С.В. Яковлева. // Международная конференция «Лазеры, Измерения, Информация – 2006», тезисы докладов и сообщений (7-9 июня, г. Санкт- Петербург). – 2006. – С.85-86.

16. Воробьева, Е.В. Экспериментальные исследования многократно рассеивающих сред с использованием спектрометра [Текст]/ Е.В. Воробьева, П.Е. Тимченко, В.П. Захаров, Р.В. Козлов // 15-ая Международная Конференция Высокие Технологии В Медицине, Биологии и Геоэкологии – 2007 (10 - 14 сентября 2007 г., п. Абрау-Дюрсо, г. Новороссийск, Краснодарский край, Россия). – 2007. – С.34.

17. Захаров, В.П. Исследование многократно рассеивающих сред методом дифференциального обратного рассеяния [Текст] / В.П. Захаров, П.Е.Тимченко, Р.В.Козлов, Е.В. Воробьева // Приложение к журналу «Физика волновых процессов и радиотехнические системы», тез. докладов и сообщений, VI Международная научно-техническая конференция (17-23 сентября, г. Казань, 2007). – 2007- С.457-458.

18. Zakharov, V.P. Research of spatial and spectral optical characteristics of plasma of the incomplete gas discharge [Текст] / V.P.Zakharov, P.E. Timchenko A.V. Ivchenko, E.V. Timchenko, S.P. Kotova, R.V. Kozlov // V International Optical Congress "Optics – XXI Century" (15-18 September, 2008 Saint-Petersburg, Russia). – 2008.

19. Захаров, В.П. Исследование пространственных и спектральных оптических характеристик плазмы незавершённого газового разряда [Текст] / В.П.Захаров, А.В. Ивченко, Е.В. Тимченко, С.П. Котова, П.Е.Тимченко // Международная конферен-

ция «Лазеры, Измерения, Информация – 2008», тезисы докладов и сообщений (3-5 июня, г. Санкт- Петербург, 2008). – 2008.

20. Захаров, В.П. Исследование спектральных и пространственных оптических характеристик плазмы незавершённого газового разряда [Текст] / В.П.Захаров, П.Е.Тимченко, А.В. Ивченко // Приложение к журналу «Физика волновых процессов и радиотехнические системы», тез. докладов и сообщений, VI Международная научно-техническая конференция (15-21 сентября, г. Самара, 2008). – 2008.