

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Объект авторского права

УДК 535.233; 535.243; 535.36; 536.52; 536.521; 621.383; 681.5.08; 681.785

ФИРАГО

Владимир Александрович

**ОПТИЧЕСКАЯ И ТЕРМОГРАФИЧЕСКАЯ
ДИАГНОСТИКА РАССЕИВАЮЩИХ СРЕД В УСЛОВИЯХ
ИНФОРМАЦИОННОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.05 – Оптика

Минск – 2024

Научная работа выполнена в Белорусском государственном университете

Научный консультант **Кугейко Михаил Михайлович**,
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры квантовой радиофизики и оптоэлектроники Белорусского государственного университета

Официальные
оппоненты:

Шкадаревич Алексей Петрович,
академик НАН Беларуси, доктор физико-математических наук, профессор, директор Унитарного предприятия «НТЦ «ЛЭМТ» Беломо»

Самцов Михаил Петрович,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий лабораторией спектроскопии
Научно-исследовательского учреждения «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета

Ануфрик Славамир Степанович,
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры теоретической физики и
теплотехники УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы»

Оппонирующая
организация

ГНУ «Институт физики имени Б.И. Степанова
Национальной академии наук Беларуси»

Защита состоится 15 ноября 2024 г. в 14:00 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.01.17 при Белорусском государственном университете по адресу: 220030, г. Минск, ул. Ленинградская, д. 8, ауд. 407, тел. 209-51-21.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан «11» октября 2024 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
кандидат физ.-мат. наук, доцент



О.Г. Романов

ВВЕДЕНИЕ

Прогресс в области совершенствования оптических методов исследований и диагностики, используемых для решения широкого круга практических задач, обеспечивается в основном за счет разработки и применения новых методов регистрации и алгоритмов обработки световых потоков. Световые поля многомерные (координаты, время, длина волны, поляризация и т. д.), к тому же измеряемые потоки зависят от свойств исследуемого объекта, используемых источников оптического излучения, среды его распространения, характеристик фотоприемников и ряда других сложно контролируемых параметров. Эти свойства влияют на регистрируемые сигналы и их следует рассматривать как *сопутствующие факторы* проводимых оптических измерений, которые воздействуют на результаты интерпретации регистрируемых световых потоков.

Практически все оптико-физические измерения относятся к классу косвенных, поскольку определение искомого значения физической величины осуществляется путем корректной трактовки результатов прямых измерений других физических величин, функционально связанных с определяемой величиной. При создании методов, которые исследуют реакцию изучаемой среды как цельного объекта, интерпретация измерительной информации – наиболее сложный этап. Наличие шумов и погрешностей измерений делает задачу обращения еще и некорректной, что проявляется в неустойчивости получаемых решений, т. е. их сильной зависимости от погрешностей измерений и шумов аппаратуры. Решение этих задач требует привлечения априорной информации об объекте исследования, использования регуляризирующих алгоритмов и применения методов снижения влияния сопутствующих факторов, которые сложно контролировать в процессе измерений.

Поэтому, разработка методов описания процессов формирования и переноса излучения в излучающих (тепловые поля) и рассеивающих (аэродисперсные, биообъекты) средах, а также методов решения обратных задач их светорассеяния и разработка на этой основе измерительных и диагностических методов, способных обеспечивать расширение их функциональных возможностей, снижение влияния сопутствующих факторов и недостаточности априорной информации, является *актуальной и важной научной задачей*, которая имеет большое значение для повышения эффективности применения оптико-физических методов измерений и диагностики и стандартизации соответствующих устройств.

В диссертации рассматриваются следующие научные задачи, возникающие при проведении технологического контроля температур, диагностики газовых и аэродисперсных сред, биообъектов в условиях воздействия неконтролируемых сопутствующих факторов и недостаточности априорной информации:

1) развитие методов термографии и спектральных измерений, используемых устройствами для бесконтактного определения температуры T и визуализа-

ции распределения $T(x,y)$ в сложных условиях проведения измерений;

2) совершенствование методов диагностики сложных аэродисперсных сред методами лазерной и светодиодной спектроскопии с целью обеспечения требуемой пороговой чувствительности, точности измерений и устойчивости получаемых результатов к влиянию сопутствующих факторов;

3) разработка методов оперативного неинвазивного определения оптических характеристик поверхностных биотканей, их гидратации и основных параметров микроциркуляторного русла их сосудистой системы, а также усредненного значения диаметра внутреннего просвета пульсирующих малых артериальных сосудов (доступных и недоступных для непосредственного наблюдения) и коэффициента растяжения их стенок в кольцевом направлении.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Диссертационная работа соответствует научным направлениям, развиваемым на кафедре квантовой радиофизики и оптоэлектроники Белорусского государственного университета и выполнялась в рамках научно-исследовательских тем: «Разработать мультиспектральный термограф для измерений высоких температур в условиях неопределенности коэффициентов излучения для контроля качества в процессах изготовления и испытаний элементов конструкций космических аппаратов» (№ ГР 20164269, задание 1.2.4.1. комплексной научно-технической программы Союзного государства «Технология-СТ» 2016-2020 гг.); «Разработка контролируемых методов формирования и распознавания лазерно-модифицированных объемных областей с заданными анизотропными свойствами в оптически однородных конденсированных средах» (№ ГР 20212701, задание 1.1.16 ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций», подпрограмма «Фотоника и ее применения» 2021-2025 гг.); «Разработка методов объективного контроля и оптимизации режимов лазерной поверхностной обработки конденсированных сред» (№ ГР 20162094, ГПНИ «Фотоника» 2019-2020 гг.); «Разработка систем охлаждения и терморегулирования с улучшенными массогабаритными характеристиками для теплонагруженных элементов мощного светодиодного оборудования, радиоэлектронных СВЧ-модулей и вспомогательного теплотехнического оборудования» (№ ГР 20161422, задание 2.16 ГПНИ «Энергетические системы, процессы и технологии 2016-2018 гг.»); «Разработка высокоинформативных методов теплового неразрушающего контроля и критериев эффективности энергосберегающих теплоизоляционных материалов и покрытий» (№ ГР 20142741, задание 2.2.33 ГПНИ «Энергобезопасность, энергоэффективность и энергосбережение, атомная энергетика» подпрограмма «Энергоэффектив-

ность» 2014-2015 гг.); «Разработка критериев выбора термометрического оборудования, создание аппаратных средств и методик их применения для теплового неразрушающего контроля и технической диагностики производственных объектов и технологических процессов», (№ ГР 20114338, задание 5.4.12 ГПНИ «Механика, техническая диагностика, металлургия» 2011-2013 гг.); НИОКР «Разработка алгоритмов обнаружения и предварительной классификации объектов для пассивной поисково-обзорной системы» (шифр «Ель-АП»), выполняемой в 2005-2009 гг. по х/д НИР № 13780П; «Разработать оптический измеритель температуры на многоэлементном ПЗС приемнике для непрерывного контроля высокотемпературных технологических процессов» (№ ГР 20065162, задание 1.2.01 научно-технической подпрограммы «ОПТОТЕХ 1» ГНТП «ОПТОТЕХ» 2006-2012 гг.); «Разработка методик и оптоэлектронных средств оценки показателей функции сетчатки глаза для ранней диагностики патологий сосудов мозга» (№ ГР 20130351, задание 3.9.1 ГПНИ «Конвергенция» 2013-2015 гг.); «Развитие методов оценки функциональных сенсомоторных показателей зрительной системы для ранней диагностики заболеваний центральной нервной и зрительной систем» (№ ГР 20161646, задание 3.09.2 ГПНИ «Конвергенция-2020»); «Разработка оптических методов и средств тераностики с использованием излучения лазерных и светодиодных источников, лазерно-оптических приборов для биомедицинских применений» (№ ГР 20212021, задание 1.6.2 ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций», подпрограмма «Фотоника и ее применения» 2021-2025 гг.).

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Цель исследования – создание оптических методов оперативной диагностики и контроля технологических процессов и рассеивающих сред (газовых, аэродисперсных и биообъектов) в условиях воздействия трудно контролируемых сопутствующих факторов и недостаточности априорной информации.

Для достижения поставленной цели решались следующие *задачи*.

1) На основе анализа процессов, протекающих при проведении бесконтактных измерений температуры T в сложных условиях, развить методы регистрации тепловых потоков и корректной их интерпретации цифровыми термографами, использующими различные диапазоны спектра.

2) Проанализировать процессы обработки конструкционных материалов мощным сканирующим пучком лазерного излучения, выявить набор наиболее информативных параметров для организации непрерывного контроля проводимой обработки и создать метод их измерения, обеспечивающий минимизацию потока обрабатываемых данных и оперативное формирование сигналов управления лазерной установкой для поддержания процесса обработки в заданных технологических допусках.

3) Провести анализ условий непрерывного контроля параметров сложных агрессивных газовых и аэродисперсных сред (дымовые газы котлов, выбросы двигателей внутреннего сгорания) лазерной и светодиодной техникой и предложить методы измерений, обеспечивающие повышение пороговой чувствительности контроля и устойчивости получаемых результатов к влиянию неконтролируемых факторов среды и изменениям параметров аппаратуры.

4) Разработать методику регистрации цифровых изображений малых сосудов, доступных для непосредственного наблюдения, с пространственным разрешением не хуже 2 мкм и алгоритмы трассировки сосудистой сети и определения диаметра их внутреннего просвета D_{ve} , а также распределения площади их поперечного сечения $W(S_{ve})$, что позволит осуществлять слежение за реакцией этих сосудов на воздействие сосудодобных препаратов.

5) Рассмотреть практическую применимость существующих методов определения оптических характеристик биотканей и создать методику неинвазивной оценки основных параметров микроциркуляторного русла поверхностных тканей и их гидратации, пригодную для оперативного исследования их состояния.

6) Разработать метод определения усредненного диаметра внутреннего просвета малых артериальных сосудов и коэффициента растяжения их стенок в кольцевом направлении, основанный на получении и обработке спектрально-временных профилей локального диффузного отражения светового излучения пульсирующими тканями человека, что позволит оценивать тонус артериол и резерв расширения их внутреннего просвета при проведении дифференциальной диагностики причин гипертензии.

Объект исследования: поля теплового излучения макро- и микрообъектов (при температурном контроле технологических процессов и лазерной обработке материалов), газовые и аэродисперсные рассеивающие среды, биообъекты (поверхностные биоткани, сосуды микроциркуляторного русла).

Предмет исследования: физические процессы формирования оптического излучения, его рассеяния, поглощения, отражения и переноса; параметры и характеристики полей теплового излучения, спектральные характеристики и их пространственные и временные распределения; взаимосвязи спектральных свойств регистрируемых полей излучения с параметрами объектов.

Научная новизна

Научная новизна результатов диссертационной работы.

1) Учет процессов взаимного радиационного обмена тепловыми потоками между фотоприемниками термографа и контролируемым телом, позволяющий корректно учитывать значение коэффициента теплового излучения тела и вклад отраженного его поверхностью излучения окружающей среды в средней инфракрасной области спектра (8–14 мкм) за счет коррекции регистрируемых разностей этих потоков и смещении градуировочной зависимости на величину

вклада теплового излучения фотоприемников.

2) Разработан и апробирован мультиспектральный метод высокотемпературной ($T > 800$ °С) термографии в ближней ИК области, минимизирующий влияние на результаты измерений неопределенности коэффициента теплового излучения, неравномерности нагрева тел, нелинейности чувствительности и нестационарности шумов матрицы фотоприемников, что обеспечивает снижение погрешности измерений температуры с 8-12 % до 1-2 %.

3) В области воздействия мощного пучка лазерного излучения на поверхность обрабатываемого материала определены наиболее информативные (при проведении непрерывного контроля) параметры – эффективные значения температуры и площади нагрева, измерение которых разработанным спектральным методом обеспечивает минимальный объем (*на 2-3 порядка меньший по сравнению с термографической техникой*) регистрируемых данных, требуемых для оперативного управления параметрами сканирующего лазерного пучка при поддержании процесса обработки в заданных допусках.

4) Установлено, что применение комбинаций измерительных каналов (совокупных измерений) и модификация корреляционных методов лазерной и светодиодной спектроскопии позволяет уменьшить погрешность (*до единиц процентов*) непрерывного контроля параметров сложных аэродисперсных сред за счет снижения влияния на результаты измерений сопутствующих неконтролируемых факторов и изменений параметров аппаратуры.

5) Разработана и апробирована методика определения размерных параметров (диаметров внутреннего просвета и распределения площади поперечного сечения) сосудов бульбарной конъюнктивы глаза, основанная на регистрации цифровых изображений сосудистой сети с разрешением не хуже 2 мкм и их оперативной обработки на основе расширяющихся кольцевых структур, что дает возможность оперативно следить за реакцией сосудов на воздействие сосудодобивных препаратов.

6) В рамках диффузионного приближения переноса излучения развита теория решения обратных задач спектральной диагностики биотканей по их спектрально-пространственным или спектрально-временным профилям локального коэффициента диффузного отражения излучения, что позволяет исключить влияние на результаты диагностики индивидуальных особенностей показателя поглощения светового излучения обескровленной и обезвоженной ткани в точке исследования.

7) На основе полученных аналитических выражений, связывающих регистрируемые спектрально-временные профили диффузного отражения биотканей с параметрами местной гемодинамики и амплитудой колебаний усредненного диаметра внутреннего просвета пульсирующих артериальных сосудов микроциркуляторного русла, разработана методика определения коэффициента растяжения их стенок в кольцевом направлении, которая востребована при дифференциальной диагностике причин артериальной гипертензии.

Положения, выносимые на защиту

1. Учет потоков радиационного обмена между поверхностью контролируемого тела и фотоприемными элементами путем коррекции регистрируемых разностей этих потоков и смещения градуировочной зависимости на величину вклада теплового излучения фотоприемников, что позволяет корректно учитывать при определении температуры устройствами термографии среднего инфракрасного диапазоне спектра (на неохлаждаемых матрицах фотоприемников) как значение коэффициента теплового излучения тела, так и влияние отражаемого им излучения окружающей среды.

2. Метод бесконтактного измерения высоких температур ($T > 800$ °С), основанный на регистрации потоков теплового излучения в трех перекрывающихся участках ближнего инфракрасного диапазона спектра и интерпретации соответствующей им системы нелинейных уравнений, обеспечивающей корректное решение при минимуме требуемых априорных сведений (табличный коэффициент связи среднего значения коэффициента теплового излучения в используемом диапазоне спектра с наклоном его спектральной зависимости для чистой неокисленной поверхности тела), что снижает (с 8-12 % до 1-2 %) погрешность измерения за счет устранения влияния неопределенности коэффициента теплового излучения тела, возникающей при его нагреве, а также размеров его изображения, нелинейности чувствительности и нестационарности шумов фотоприемных элементов.

3. Установление наиболее информативных при контроле процессов воздействия мощного лазерного излучения на обрабатываемый материал параметров (эффективных значений температуры и площади нагрева), которые определяются с помощью разработанного спектрального метода, основанного на регистрации в диапазоне 650–930 нм интегрального (по расширенному до границ области сканирования поверхности лазерным пучком мгновенному полю зрения системы) спектра излучения, формирующегося в области воздействия, и его линеаризации, что обеспечивает минимальный объем (меньший на 2-3 порядка по сравнению с термографической техникой) регистрируемых данных, требуемых для оперативного управления параметрами сканирующего лазерного пучка при поддержании процесса обработки в заданных допусках.

4. Спектральные методы определения концентраций газовых и аэрозольных компонент аэродисперсных сред, основанные на использовании при базисных и локальных совокупных измерениях комбинаций измерительных (прямых и нефелометрических) каналов, а также корреляционных и других специальных (получение образов опорных и калибровочных сигналов) методов формирования, приема и обработки зондирующего излучения, что обеспечивает снижение погрешности измерений (до единиц процентов) за счет минимального использования априорной информации, повышения устойчивости результатов интерпретации измере-

ний к влиянию сопутствующих факторов и изменениям параметров используемой аппаратуры при проведении измерений в непрерывном режиме.

5. Методика определения размерных параметров (диаметра и площади внутреннего просвета) видимых сосудов бульбарной конъюнктивы глаза, основанная на регистрации их цифровых изображений с необходимым (не хуже 2 мкм) пространственно-временным разрешением, стабилизации изображения сосудистой сети, проведении усреднения по времени и использовании разработанных алгоритмов обработки результирующего изображения на основе кольцевых расширяющихся структур, что позволяет проводить трассировку сосудистой сети микроциркуляторного русла и определять распределения площади поперечного сечения и диаметра внутреннего просвета малых сосудов вплоть до капилляров, значения которых нужны при оперативной оценке их реакций на воздействия сосудодобивных препаратов.

6. Развитие теории решения обратных задач спектральной диагностики биологических объектов на основе диффузионного приближения с применением интерполяции спектрального показателя поглощения обезвоженной и обескровленной биоткани (в исследуемой точке тела) в диапазоне 490–1110 нм кусочно-полиномиальными функциями, степени которых зависят от морфологии ткани и возраста, что позволяет снизить влияние индивидуальных особенностей распределения хромофоров подкожных тканей с неизвестными спектральными характеристиками на определяемые параметры микроциркуляторного русла (объемные концентрации артериальной и венозной крови и ее сатурацию, средние диаметры внутреннего просвета артериальных и венозных сосудов), а также гидратацию ткани.

7. Методика определения гидратации биотканей и параметров их микроциркуляторного русла, основанная на регистрации спектрально-временного профиля диффузного отражения светового излучения пульсирующими тканями и применении при решении обратной задачи полученных аналитических выражений, связывающих местную гемодинамику с моделируемым профилем, что позволяет определять коэффициент растяжения стенок малых артериальных сосудов и усредненный диаметр их внутреннего просвета, которые необходимы при дифференциальной диагностике причин гипертонии (оценки тонуса артериол и резерва расширения площади их внутреннего просвета).

Личный вклад соискателя ученой степени в результаты диссертации

Результаты диссертационной работы, сформулированные в защищаемых положениях и выводах, определяющих ее научную, практическую и социальную значимость, получены автором лично. Научный консультант – доктор физ.-мат. наук Кугейко М.М. – участвовал в постановке задач и обсуждении полученных результатов. Доктор медицинских наук Кубарко А.И. участвовал в постановке задач, связанных с исследованием параметров микроциркуляторного русла кровеносной сис-

темы и измерения диаметра внутреннего просвета видимых сосудов. Доктор физ.-мат. наук Лысенко С.А., канд. мед. наук Кашицкий Э.С, и научн. сотрудник института физики Собчук А.Н. участвовали в совместных работах по спектральной диагностике кожных покровов, слизистых оболочек и сосудов глаза, результаты которых не используются в данной диссертационной работе. Канд. техн. наук Сеньков А.Г. участвовал в работах по совершенствованию методов пирометрии и соответствующей аппаратуры, полученные им результаты при подготовке диссертации под руководством Фираго В.А. не используются в данной работе. Канд. физ.-мат. наук Смунев Д.А. принимал участие в верификации метода определения диаметра внутреннего просвета видимых сосудов глаза. Профессор Люблинского технологического университета Комада П. (Республика Польша) участвовал в обсуждении методов контроля газового состава в дымовых газах котлов. Профессора этого же университета Вуйцик В. и Смоляж А., а также Джунибеков М., Шедреева И. и Ералиева Б. (Республика Казахстан) принимали участие в обсуждении и экспериментальной апробации методов визуализации температурных полей, формирующихся, в том числе, и при лазерной обработке металлов. Профессора Готра О. и Кисала П. (Республика Польша), принимали участие в экспериментальной верификации рассматриваемых в диссертации бесконтактных методов определения оптических свойств рассеивающих сред на спектральной аппаратуре Люблинского технического университета, а также в обсуждении способа градуировки портативных оптоволоконных спектрофотометров. Кандидат физ. мат. наук Старавойтов В.С. и сотрудники Института физики НАНБ участвовали в совместных работах по созданию экспериментальной установки газоанализатора на основе резонансной оптико-акустической ячейки и квантово-каскадного лазера и в обсуждении соответствующих патентов. Аспирант Шулико К.И. принимал участие в создании аппаратуры регистрации спектрально-пространственных профилей диффузного отражения рассеивающих сред и последующем проведении экспериментальных исследований оптических свойств различных сред. Аспирант Сакович И.А. принимал участие в создании программного обеспечения для спектральной техники под руководством Фираго В.А.

Результаты, полученные другими соавторами или с другими соавторами, не вошли в диссертацию.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ряде международных и республиканских научных конференциях: IV, V, VII, VIII, IX, X, XI, XII, XIII, XIV Международных научно-технических конференциях «Квантовая электроника» (Минск, 18-21 ноября 2002 г., 22-25 ноября 2004 г., 13-16 окт. 2008 г., 22-25 ноября 2010 г., 18-21 ноября 2013 г., 9-13 ноября 2015 г., 13-17 ноября 2017 г., 18-22 ноября 2019 г., 22-26 ноября 2021 г., 21-23 ноября 2023 г.), VIII Konferencji Naukowej “Czujniki

Optoelektroniczne i Elektroniczne” (Wroclaw, 27-30 czerwca 2004), III, XI, XIII Международных научно-технических конференциях «Медэлектроника-2004, 2018, 2022. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии» (Минск, 9-10 декабря 2004 г., 5-6 дек. 2018 г., 8-9 декабря 2022 г.), IV, VI, VII, VIII, IX, X International Conference «NEET’2005, 2009, 2011, 2013, 2015, 2017. New Electrical and Electronic Technologies and Their Industrial Implementation» (Zakopane, Poland, June 21-24, 2005, June 23-26 2009, June 28 – July 1 2011, June 18-21 2013, June 23-26 2015, June 27-30 2017), 7-ом, 8-ом Белорусско-Российских семинарах «Полупроводниковые лазеры и системы на их основе» (Минск, 1-5 июня 2009 г., 17-20 мая 2011 г.), III, IV, VI, VII Международных научно-практических конференциях «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния» (Минск, 28-29 апреля 2015 г., 11-12 мая 2017 г., 20-21 мая 2021 г., 18-19 мая 2023 г.), V конгрессе физиков Беларуси (Минск, 27-30 окт. 2015 г.), научно-практической конференции с международным участием «Достижения и инновации в современной морфологии» (Минск, 30 сент. 2016 г.), 18th Conf. on Optical Fibers and Their Applications (Naleczow, Poland, March 15 2019), V Международной научно-практической конференции «BIG DATA and Advanced Analytics = BIG DATA и анализ высокого уровня» (Минск, 13-14 марта 2019 г.), II Международной научно-практической конференции «Компьютерные технологии и анализ данных (СТДА’2020)» (Минск, 23-24 апр. 2020 г.), 15-й Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом» (Минск, 26-29 сент. 2023 г.), 8th International Conference on Tunable Diode Laser Spectroscopy (TDLS 2011) (Zermatt, Switzerland, July 11-15 2011), XIII International Scientific Conference “Optical Sensors and Electronic Sensors” (Lodz, Poland, June 22-25 2014), XV Минском международном форуме по тепло- и массообмену (Минск, 23-26 мая 2016 г.), 4th International Symposium of the Network-type Joint Usage/Research Center for Radiation Disaster Medical Science «How can we communicate possible health effects in radiological emergency?» (Hiroshima, Febr. 12 2020).

Разработанные для высокотемпературной термографии методы измерений и принципы функционирования термографов внедрены в мультиспектральный термограф ТМ-3, созданный под руководством соискателя, который прошел государственные испытания и внесен в Реестр средств измерений Республики Беларусь, что подтверждает Сертификат об утверждении типа средств измерений № 13980 от 16.03.2021 г., выданный Государственным комитетом по стандартизации Республики Беларусь.

Результаты диссертации используются при проведении научных исследований и в учебном процессе в университетах Республики Беларусь и Республики Польша (имеется 5 актов о внедрении [Приложение В]).

По результатам диссертации получено 12 патентов на изобретение (3 Евразийских патента, 9 патентов Республики Беларусь, в том числе 1 – и в Российской Федерации).

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 108 научных работах, из которых 1 монография, рекомендованная к изданию Ученым советом факультета радиофизики и электроники БГУ (17.6 а.л.), 1 единоличная монография (18.6 а.л.), изданная по решению редакционно-издательского совета БГУ, 16 статей (общим объемом 16.7 а.л.) в научных журналах, соответствующих пункту 19 Положения о присуждении ученых степеней и званий в Республике Беларусь, 20 статей в других научных изданиях, 70 статей и тезисов докладов в сборниках материалов научных конференций и симпозиумов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня терминов и определений, введения, общей характеристики работы, шести глав, заключения, библиографического списка и трех приложений. Полный объем диссертации составляет 309 страниц, в том числе 96 рисунков занимают 45 страниц, 4 таблицы на 2 страницах, три приложения занимают 28 страниц. Библиографический список содержит 335 наименований на 34 страницах, включая собственные публикации соискателя.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой обзорной главе рассмотрены проблемы оптической диагностики и интерпретации ее результатов (корректной постановки и решения соответствующих обратных задач). Проанализированы достигнутые успехи в создании портативной тепловизионной и термографической техники разных спектральных диапазонов. Показано, что использование в ней регистрации теплового излучения тел в одном участке спектра не позволяет при наличии сопутствующих факторов (излучение окружающей среды, нестабильность параметров фотоприемных элементов и т. д.) решить проблему корректного учета их коэффициента теплового излучения. Намечены пути развития методов термографии, снижающих влияние отмеченных факторов. Рассмотрена проблема организации непрерывного контроля высокотемпературных лазерных процессов обработки конструкционных материалов. Выделены наиболее существенные параметры этих процессов, требующие непрерывного контроля. Указывается на необходимость поиска простого решения с целью организации петли обратной связи для оперативного управления лазерной установкой.

Проанализирована задача обеспечения эксплуатационной устойчивости непрерывного контроля сложных и агрессивных аэродисперсных сред. Показано, что для ее успешного решения необходима модификация существующих методов лазерной и светодиодной абсорбционной спектроскопии.

Рассмотрены проблемы оперативной неинвазивной диагностики состояния сосудов микроциркуляторного русла сердечнососудистой системы. Указывается на перспективность использования спектроскопии диффузного отражения и необходимость дальнейшего развития методов оперативной интерпретации регистрируемых профилей коэффициента диффузного отражения светового излучения тканями, которые устойчивы к индивидуальным особенностям и неопределенности характеристик хромофоров подкожных тканей. Показана возможность упрощения алгоритмов при использовании диффузионного приближения переноса излучения.

Во **второй** главе рассмотрены методы регистрации и интерпретации полей теплового излучения в сложных условиях проведения измерений температуры T , которые обеспечивают снижение влияния на результаты измерений значения спектрального коэффициента теплового излучения ϵ и неравномерного нагрева тел, а также нелинейности чувствительности и нестационарности шумов светочувствительных элементов используемой матрицы фотоприемников.

Получены необходимые интегральные выражения и показано, что уменьшение относительной погрешности измерения температуры тел до нескольких процентов при неопределенности спектрального коэффициента теплового излучения $\epsilon(\lambda)$, равной 0.1, обеспечивается оптимальным выбором используемого участка спектра.

Для выявления возможностей дальнейшего снижения погрешности измерений T получены расчетные выражения, необходимые при моделировании процессов радиационного обмена тепловыми потоками между чувствительными элементами матрицы фотоприемников, контролируемым телом и внешней средой с учетом температуры внутренней полости устройства измерения температуры.

На основе численного анализа процессов теплообмена, происходящих при регистрации тепловых потоков излучения микроболометрическими матрицами, предложены методы коррекции сигналов, регистрируемых термографами среднего инфракрасного диапазона (8–14 мкм), которые позволяют осуществлять корректный учет коэффициента теплового излучения тел и влияния излучения окружающей среды. Примеры температурных зависимостей, получаемых при применении этих методов, представлены на рисунке 1. Линией 1 показана исходная температурная зависимость сигнала $\Delta U_{\Sigma}(T, \tau_{\text{int}})$, регистрируемого термографом, а линией 9 скорректированная зависимость $U_c(T, \tau_{\text{int}})$. Она используется для определения измеряемой температуры тела T_b^* сопоставлением $U_c(T_b, \tau_{\text{int}})$ с абсолютной (смещенной) градуировочной зависимостью $\bar{U}_{\text{ip}}(T_k, T_{\text{mb}}^{\text{ip}} + \Delta T_{\text{mb}}, \tau_{\text{int}})$ (линия 8), где T_k – набор значений температуры абсолютно черного тела (АЧТ), используемых при градуировке, $T_{\text{mb}}^{\text{ip}}$ – температура микроболометрических элементов матрицы при проведении градуировки, ΔT_{mb} – отклонение температуры полости микроболометрической матрицы при проведении измерений от $T_{\text{mb}}^{\text{ip}}$, τ_{int} – время экспозиции кадра. При температуре тела T_b регистрируется сигнал $\Delta U_{\Sigma m}$.

$\bar{U}_{\text{гр}}(T_k, T_{\text{mb}}^{\text{гр}} + \Delta T_{\text{mb}}, \tau_{\text{int}})$ (линия 8). Значение смещения $U_{\text{off}} = \bar{S}_{Ur}(\tau_{\text{int}})\Phi(T_{\text{mb}}^{\text{гр}} + \Delta T_{\text{mb}})$ определяется усредненной по элементам матрицы чувствительностью термографа $\bar{S}_{Ur}(\tau_{\text{int}})$, зависящей от времени интегрирования или экспозиции кадра τ_{int} , и величиной обратного потока $\Phi(T_{\text{mb}}^{\text{гр}} + \Delta T_{\text{mb}})$, который определяется по исходной градуировочной зависимости с учетом значения $T_{\text{mb}}^{\text{гр}}$.

Вклад теплового излучения окружающей среды, отражаемого поверхностью тела, определяется путем внесения в поле зрения термографа мелкозернистого рассеивателя с диффузно-зеркальным отражением. Это позволяет зарегистрировать сигнал от него $[1 - \varepsilon_b^{\text{эф}*}(T_b)] [\Delta \bar{U}_{\text{ср}}(T_{\text{ср}}) + U_{\text{off}}]$, который при определении U_m необходимо вычесть из $U_{\Sigma m}$.

Для иллюстрации влияния на результаты коррекции отклонения используемого значения $\varepsilon_b^{\text{эф}*}$ от истинного $\varepsilon_b^{\text{эф}}$, значение $\varepsilon_b^{\text{эф}*}$, применяемое при коррекции сигналов, показанных на рисунке 1, было увеличено на 10 %. Поэтому результат определения T_b^* оказался смещенным (меньшим) примерно на 3 °С.

На основе анализа процессов формирования **высокотемпературных тепловых полей** и их регистрации сформулированы основные принципы повышения достоверности измерения температуры термографической техникой высокотемпературного диапазона. Должны быть обеспечены:

- возможность измерения истинной температуры T и оценки эффективного коэффициента излучения $\varepsilon_{\text{эф}}$;
- минимизация неопределенности результатов измерения температуры, достигаемая за счет оптимального выбора спектральных участков регистрации теплового излучения и исключения влияния отклонения градуировочных кривых от расчетных зависимостей;
- определение максимальной температуры тела T_{max} и ее зависимости от времени, а также возможность видеозаписи температурного поля и его последующего покадрового просмотра, что необходимо при контроле сложных теплотехнических процессов;
- независимость результатов определения максимальной температуры T_{max} от изменений размеров изображения контролируемых тел и зависимости шумов матрицы фотоприемников от величины потока теплового излучения.

Показано, что устойчивость получаемых результатов измерения T к неконтролируемым изменениям значения спектрального коэффициента теплового излучения $\varepsilon(\lambda)$ тела при его нагреве можно обеспечить регистрацией наблюдаемых полей теплового излучения в трех участках спектра. Получены необходимые расчетные выражения, которые при наложении на спектральный коэффициент теплового излучения $\varepsilon(\lambda)$ дополнительного условия, например линейности $\varepsilon(\lambda) = a + b\lambda$ с очевидным ограничением $0 < \varepsilon(\lambda) < 1$, позволяют составить систему из трех нелинейных уравнений и при ее решении находить T .

Для упрощения структуры мультиспектральных высокотемпературных термографов предложен метод формирования трех перекрывающихся участков спектра, сдвинутых в ближний инфракрасный диапазон, который основан на использовании внешнего полосового светофильтра и комбинации спектральных характеристик RGB матриц фотоприемников. Получены основные расчетные выражения, позволяющие описать процесс расчета температурного поля $T(x,y)$ при регистрации теплового излучения в трех перекрывающихся участках спектра. Формируемая при обработке зарегистрированных потоков система нелинейных уравнений имеет вид

$$\begin{cases} V_{\text{RF-GF}}(T) = \varepsilon_2 F_{\text{RF-GF}}(T) + bq_{\text{RF-GF}}(T) = [\varepsilon_2 + b\mu_{\text{RF-GF}}(T)] F_{\text{RF-GF}}(T), \\ V_{\text{RF}}(T) = \varepsilon_2 F_{\text{RF}}(T) + bq_{\text{RF}}(T) = [\varepsilon_2 + b\mu_{\text{RF}}(T)] F_{\text{RF}}(T), \\ V_{\text{BF}}(T) = \varepsilon_2 F_{\text{BF}}(T) + bq_{\text{BF}}(T) = [\varepsilon_2 + b\mu_{\text{BF}}(T)] F_{\text{BF}}(T), \end{cases} \quad (1)$$

где $F_{\text{RF-GF}}(T)$, $F_{\text{RF}}(T)$, $F_{\text{BF}}(T)$ – градуировочные зависимости термографа, которые определяют экспериментально с использованием модели АЧТ, $q_{\text{RF-GF}}(T)$, $q_{\text{RF}}(T)$, $q_{\text{BF}}(T)$ – интегралы, полученные расчетным путем и определяющие зависимости этих интегралов от температуры при единичном значении коэффициента наклона b используемой зависимости $\varepsilon(\lambda)$ в виде $\varepsilon(\lambda) = \varepsilon_2 \cdot \exp(-b \cdot \Delta\lambda)$, где $\varepsilon_2 = \varepsilon(\lambda_2)$, а $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_2$ для соответствующего спектрального участка, а зависимости $\mu_{\text{RF-GF}}(T)$, $\mu_{\text{RF}}(T)$, $\mu_{\text{BF}}(T)$ представляют собой интегралы $q_{\text{RF-GF}}(T)$, $q_{\text{RF}}(T)$, $q_{\text{BF}}(T)$, нормированные на соответствующие градуировочные зависимости.

Для повышения устойчивости получаемых решений (1) к воздействию шумов предлагается использовать априорные сведения о коэффициенте наклона b зависимости $\varepsilon(\lambda)$ в используемом диапазоне спектра в виде полинома

$$b = \gamma \left(-\frac{80}{361} \varepsilon_2^2 + \frac{8}{361} \varepsilon_2 + \frac{72}{361} \right), \quad (2)$$

который описывает плавное снижение абсолютного значения $|b|$ при увеличении ε_2 в процессе окисления поверхности атмосферным кислородом. Так как спектральные зависимости коэффициентов теплового излучения большинства конструкционных материалов известны, по величине b и ε_2 чистого неокисленного материала заранее рассчитывают значение γ , что обеспечивает адекватный расчет b при изменении значения ε_2 в процессе окисления атмосферным кислородом. Для вольфрама значение γ составляет $\gamma = -1.07$, а для черных металлов $\gamma \approx -0.5$.

В алгоритмах расчетов удобнее перейти от цифровых отсчетов D_{ij} к фототокам, которые пропорциональны значениям $V_{ij} = D_{ij}/\tau_e$, где τ_e – время экспозиции кадра, что существенно упрощает (1) и поиск численного решения T при варьировании его значением T^*

$$\frac{\bar{V}_{\text{RF}}}{F_{\text{RF}}(T^*)} \left\{ \frac{\bar{V}_{\text{RF-GF}}}{F_{\text{RF-GF}}(T^*)} - \frac{\bar{V}_{\text{BF}}}{F_{\text{BF}}(T^*)} + b(T^*) [\mu_{\text{BF}}(T^*) - \mu_{\text{RF-GF}}(T^*)] \right\} = 0. \quad (3)$$

Для обеспечения широкого диапазона температур, измеряемых термографом, предложен метод коррекции нелинейности световых характеристик используемой матрицы фотоприемников. Разработан способ обеспечения устойчивости результатов измерения T к размерам получаемого изображения и нестационарности шумов матрицы. Эффективность описанных методов подтверждена их внедрением в алгоритмы функционирования высокотемпературных термографов. Разработан мультиспектральный термограф ТМ-3, который внесен в Государственный реестр средств измерений Республики Беларусь.

В **третьей главе** исследуются методы контроля высокотемпературных процессов лазерной обработки конструкционных материалов. Показано, что следует контролировать размеры (площадь) пятна контакта лазерного пучка с обрабатываемой поверхностью и усредненную \bar{T} или эффективную T_e температуру в области контакта. Приведены примеры определения термографом ТМ-3 распределения температуры стали в области воздействия мощного пучка лазерного излучения. Сделан вывод, что применение термографической техники эффективно лишь на этапе наладки рассматриваемых лазерных процессов, а для непрерывного контроля более перспективно применение малогабаритной спектральной техники.

Рассмотрена задача спектрофотометрического определения температуры T и коэффициента теплового излучения $\varepsilon(\lambda)$ обрабатываемой поверхности. Создана 4-параметрическая регрессионная модель, основанная на использовании переменной $\chi = c_2/\lambda$, где c_2 – вторая постоянная излучения, линейаризации измеряемой спектральной плотности светимости $M(\lambda, T)$, т. е. $\zeta = -\ln[(\lambda^5/c_1)M(\lambda, T)]$, и степенной гиперболической аппроксимации зависимости $\ln[\varepsilon(\chi)]$. На примерах обработки измеренных спектров излучения, формирующегося в области воздействия пучка излучения СО₂-лазера на пластину стали, показано, что применение этой модели позволяет повысить точность определения температуры в зоне воздействия лазерного пучка по сравнению со *спектральной пирометрией* (линейаризация измеряемых спектров и их интерполяция линейной зависимостью $\zeta(\chi) = a + b_\zeta\chi$, где значение $b_\zeta = 1/T$) за счет возможности определения зависимости $\varepsilon(\lambda)$.

Проанализированы особенности проведения контроля при использовании мощных оптоволоконных лазеров и быстрого периодического сканирования обрабатываемой поверхности лазерным пучком. Для них предложен метод непрерывного контроля, основанный на расширении мгновенного поля зрения Ψ используемого спектрофотометра до границ области сканирования и использовании линейаризации измеряемых спектральных зависимостей. Расширение Ψ и проведение пространственного интегрирования составляющих спектра $s(\lambda, x, y)$ с помощью

оптоволоконной техники позволяет обеспечить одинаковый вклад в результирующий спектр $\bar{s}_\psi(\lambda)$ излучения каждой точки светового поля, формирующегося в области воздействия сканирующего лазерного пучка.

Проведено моделирование спектров $\bar{s}_\psi(\lambda)$, формирующихся при воздействии лазерных пучков с гауссовым и супергауссовым распределением $E(x,y)$ при разных значениях смещения Δz плоскости фокусировки от плоскости перетяжки пучка, показавшее примерное соответствие $\bar{s}_\psi(\lambda)$ в ближней инфракрасной области спектра приближению Вина. Поэтому использование линейной интерполяции $\zeta(\chi) = a + b_\zeta\chi$ при линейризации зависимости $\bar{s}_\psi(\lambda)$ позволяет кроме определения эффективной температуры $T_s = 1/b_\zeta$, вычислять и эффективную площадь $S_s \approx S_\psi/(e^a \cdot \varepsilon)$ пятна нагрева обрабатываемой поверхности лазерным пучком, где $a = \zeta(\chi = 0) = \ln[S_\psi/(S_s \cdot \varepsilon)]$. Результаты экспериментальной апробации метода представлены на рисунках 2 и 3.

В спектральном участке 650–930 нм отклонения получаемых зависимостей $\zeta(\chi)$ от линейного закона незначительные, что позволяет определять текущие значения T_s (рисунок 2, б), которые примерно на 100–150 °С меньше максимальных значений температуры в центре пятна контакта. Представленные зависимости демонстрируют эффект экранировки обрабатываемой поверхности плазменным факелом, размеры которого существенно увеличиваются при увеличении мощности лазерного пучка с 0.5 до 1 кВт. При этом возрастает как поглощение, так и рассеяние плазмой факела части мощности лазерного пучка, что вызывает увеличение площади нагрева S_s поверхности стали и снижение эффективной температуры T_s поверхности образцов 2 и 3 по сравнению с T_{s1} .

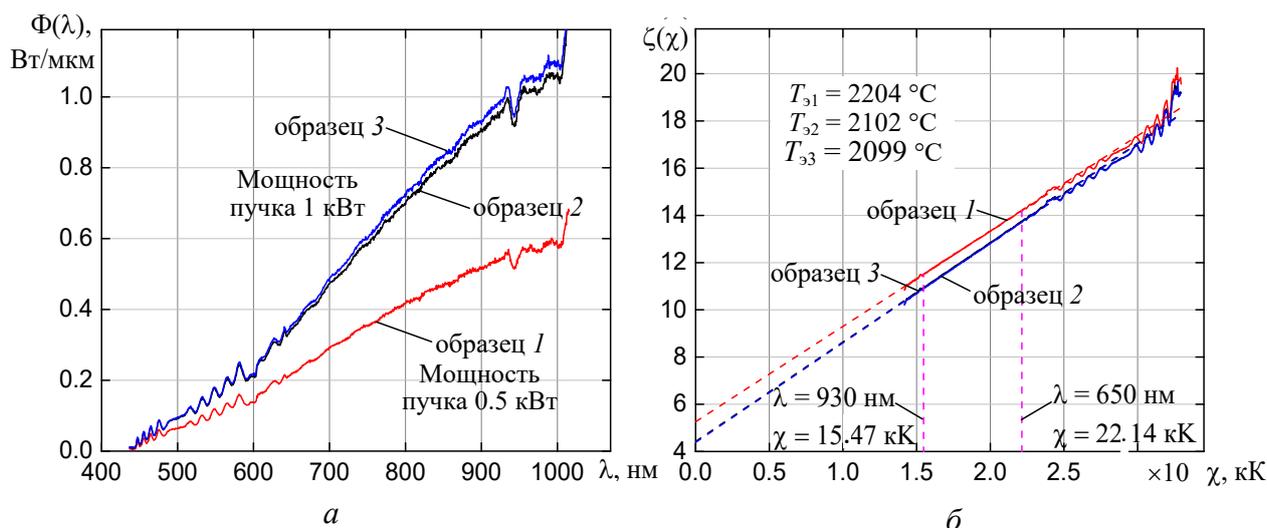


Рисунок 2 – Полученные плотности спектральных потоков излучения $\Phi(\lambda)$ поверхности трех образцов стали в полусфере, которые формируются при воздействии лазерного пучка волоконного лазера (а), и их линейризованные зависимости $\zeta(\chi)$ (б)

Текущие значения определяемых параметров $T_3(t)$ и $a(t)$ могут использоваться для управления лазерной установкой. Применение $T_3(t)$ и смещения $a(t)$ позволяет создавать наглядные технологические карты проводимых лазерных процессов, примеры которых для двух значений мощности пучка лазерного излучения, двух скоростей линейного движения пучка и двух значений параметра Δz его фокусировки приведены на рисунке 3. При точной фокусировке пучка лазерного излучения ($\Delta z = 0$) эффективные значения температуры нагрева выше, поэтому в плоскости усредненных значений \bar{T}_3, \bar{a} участки, соответствующие разным режимам используемой мощности пучка и скорости его перемещения сдвигаются вправо по сравнению с расфокусированным пучком ($\Delta z = -2$ мм). Увеличение скорости перемещения пучка также приводит к росту T_3 , поскольку плазменный факел в фронтальной зоне движущегося пучка имеет меньшие размеры по сравнению с тыловой зоной, т. е. экранирующее влияние плазменного факела на эффективную температуру при больших скоростях движения пучка меньше. Таким образом, задавая границы диапазона изменений значений $T_3(t)$ и смещения $a(t)$ можно поддерживать проводимый процесс в заданных пределах, что будет гарантировать его повторяемость.

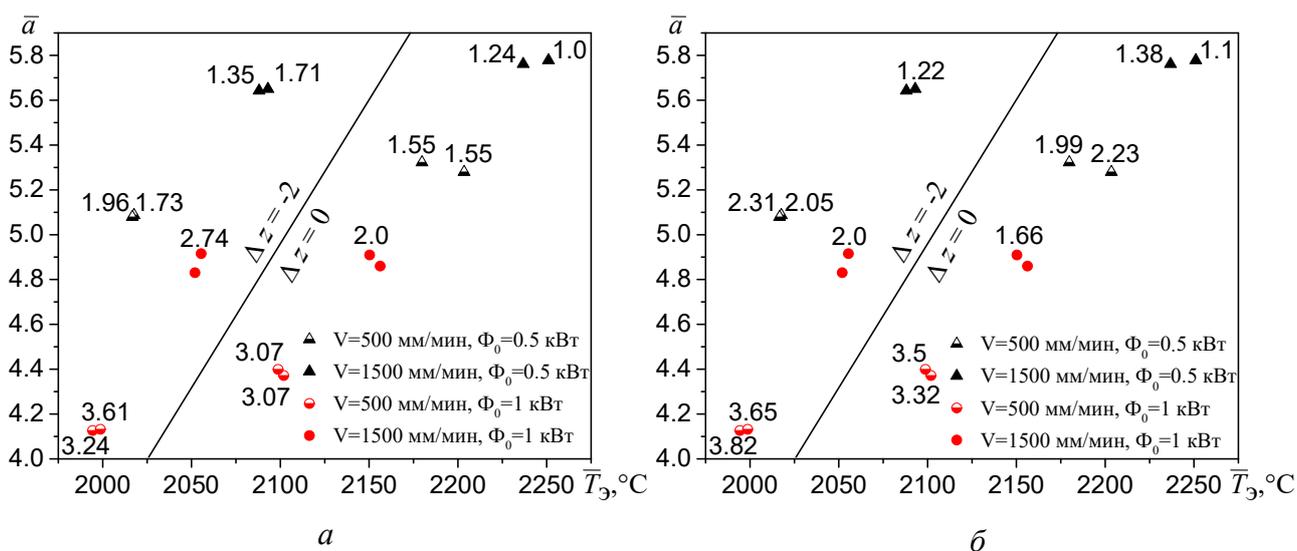


Рисунок 3 – Технологические карты средней глубины d провара шва (а) и ширины w шва (б) в мм, представленные на плоскости \bar{T}_3, \bar{a} для образцов пластин стали марки 45 при двух значениях мощности лазерного пучка Φ_0 , двух скоростях его сканирования и двух значениях параметра Δz (0 и -2 мм) его фокусировки

В четвертой главе описаны разработанные методы непрерывного контроля параметров сложных аэродисперсных сред при использовании лазерных и светодиодных полупроводниковых излучателей. Сложность этих сред (нестабильность состава и температуры контролируемой среды, воздействие на оптические поверхности агрессивных компонент, недостаточность априорных сведений об оптических характеристиках присутствующих аэрозолей и т. д.) требует от устройств непрерывного контроля устойчивости к влиянию неконтролируемых сопутствующих факторов и деградации аппаратуры.

Показано, что применение корреляционных и других специальных (получение образов опорных и калибровочных сигналов) методов формирования, приема и обработки зондирующего излучения позволяет обеспечить:

- слабую чувствительность к изменениям параметров приемно-излучающих и регистрирующих блоков;
- снижение зависимости результатов измерений от состояния контролируемой аэродисперсной среды;
- определение концентрации контролируемого компонента в широком диапазоне ее изменений при минимальном количестве точек градуировки аппаратуры.

Исследована задача применения лазерной диодной спектроскопии в устройствах непрерывного контроля содержания O_2 и CO в дымовых газах котлов, обеспечивающих оптимальные режимы горения топлива. Проведенный анализ спектров поглощения O_2 и CO в ближней инфракрасной области спектра показал, что для их контроля целесообразно использовать одну и ту же трассу. Для контроля O_2 можно использовать наиболее интенсивные линии в участке спектра 0.760–0.768 мкм, а для контроля CO – использовать линию поглощения с длиной волны 1.5636 мкм (6395.43 см^{-1}), которая имеет минимальное перекрытие с линиями поглощения CO_2 и паров воды.

Слабое поглощение O_2 (в максимуме $\approx 1.6 \%$) и CO ($\approx 3.2 \%$) при величине их парциальных давлений 0.01 атм, температуре среды 596 К для трассы длиной 20 м требует модификации корреляционного способа выделения их контуров поглощения для снижения влияния флуктуаций пропускания излучения дымовым потоком. Применение образов калибровочного и измерительного сигналов, максимально снижает влияние диссипативных потерь и деградации перестроечной зависимости частоты излучения используемых диодных лазеров. Зависимости смоделированных принимаемых потоков зондирующего лазерного излучения от времени при двух периодах перестройки длин волн используемых диодных лазеров приведены на рисунках 4, а и 4, б. Смоделированные образы калибровочного $y(\Delta\Theta)$ и измерительного $x(\Delta\Theta)$ сигналов для CO и O_2 при температуре дымовых газов $T = 596 \text{ К}$ и атмосферном давлении $p = 1 \text{ атм}$ представлены на рисунке 4, в и 4, г, соответственно. При моделировании полагалось: длина трассы $L/2 = 10 \text{ м}$, длина калибровочных кювет равна $L_k/2 = 50 \text{ см}$, парциальное давление газа в них $p_k = 0.98 \text{ атм}$, парциальное давление p_a O_2 и CO в дымовых газах $p_a = 0.01 \text{ атм}$. Полученные образы не содержат неизвестных коэффициентов диссипативных потерь и линейно зависят от парциального давления.

С целью исключения влияния сдвига η параметра перестройки Θ длины волны лазера на p_a находится максимум нормированной взаимно корреляционной функции

$$A = \int_{0+\eta}^{\Theta_k-\eta} x(\Delta\Theta, \eta)y(\Delta\Theta)d(\Delta\Theta) / \int_{0+\eta}^{\Theta_k-\eta} y^2(\Delta\Theta)d(\Delta\Theta)$$

комое парциальное давление $p_a = p_k L_k (1 - A) / L$. В расчетных калибровочных выражениях учитываются изменения интенсивности и полуширины используемых линий поглощения O_2 и CO от температуры и давления дымовых газов. При отношении сигнал/шум 200 пороговая чувствительность контроля концентрации O_2 составляет примерно $8.6 \cdot 10^{-4}$ атм, а CO – $4 \cdot 10^{-4}$ атм, что достаточно для практического применения.

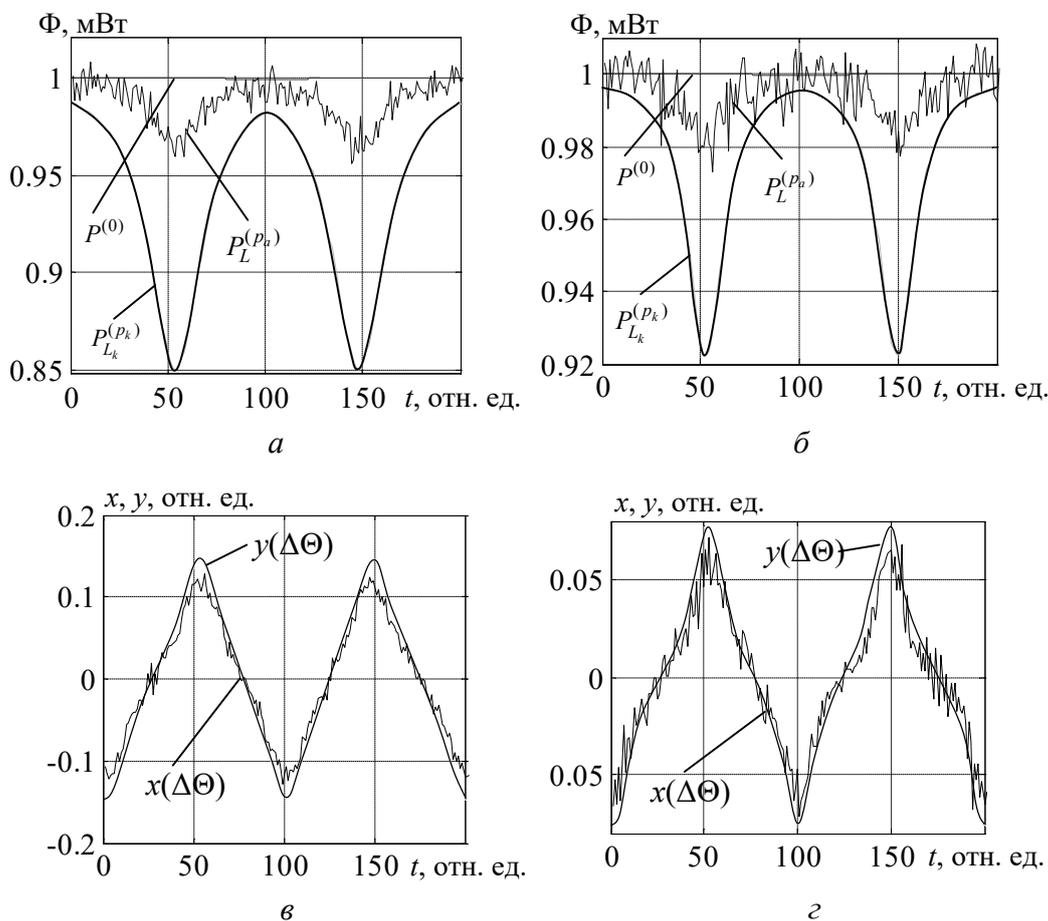


Рисунок 4 – Зависимость принимаемых фотоприемником потоков от времени за один период перестройки длины волны зондирующего лазерного излучения при измерении концентрации CO (а) и O_2 (б) и соответствующие смоделированные образы калибровочного $y(\Delta\Theta)$ и измерительного $x(\Delta\Theta)$ сигналов (в) и (г) при $S/N = 200$

Рассмотрено применение светодиодов в *недисперсионных корреляционных устройствах контроля концентрации газовых компонент* в агрессивных аэрозольных средах. Показано, что при сложных условиях измерений успешное использование светодиодов, которые по сравнению с лазерами имеют широкий спектр излучения, возможно при применении недисперсионных корреляционных методов контроля, основанных на уникальности полос поглощения каждой компоненты. Получено выражение для оценки зависимости получаемых значений парциального давления контролируемого газа p_a в аэродисперсной среде от неконтролируемых параметров процесса измерений, которое демонстрирует слабую зависимость рассчитываемых значений p_a от коэффициента пропускания аэродисперсной среды $\tau_{cp}(\lambda)$,

поскольку этот коэффициент содержится во всех членах числителя и знаменателя.

Разработан *нефелометрический метод измерения дымности* двигателей внутреннего сгорания, который в отличие от традиционных решений использует малый объем (несколько кубических сантиметров) контролируемой области потока выбросов, что позволяет отслеживать динамические изменения дымности. Он основан на использовании двух измерительных каналов, расположенных под углом 90° друг к другу в плоскости перпендикулярной потоку выбросов. Такая схема измерений позволяет регистрировать как рассеиваемое под углом 90° , так и прошедшее через струю выхлопных газов зондирующее излучение светодиодов. Получены необходимые расчетные выражения и формула для определения массовой концентрации аэрозольных частиц в выбросе

$$C_m = \rho_{sp} \sqrt{\frac{\Phi_{D1}(R_1, r_2) \Phi_{D2}(R_2, r_1)}{\Phi_{T1}(R_1, r_1) \Phi_{T2}(R_2, r_2)}} / \beta_{\pi/2} = \frac{\rho_{sp} \sigma(\pi/2)}{\beta_{\pi/2}}, \quad (4)$$

где ρ_{sp} и $\beta_{\pi/2}$ – соответственно удельный вес и сечение рассеяния под углом $\pi/2$ аэрозольных частиц (сажевых); R_1, R_2 и r_1, r_2 – точки расположения двух светодиодов, излучение которых просвечивает поток выбросов, и двух фотоприемников; Φ_{T1}, Φ_{T2} и Φ_{D1}, Φ_{D2} – регистрируемые фотоприемниками потоки излучения светодиодов, прошедшие через исследуемый объем и рассеянные под углом 90° , $\sigma(\pi/2)$ – измеряемый коэффициент рассеяния под углом $\pi/2$. Значение $\beta_{\pi/2}$ определяют при градуировке измерителя дымности, а ρ_{sp} берут из соответствующих таблиц.

Численное моделирование показывает, что при использовании мощности импульсного излучения светодиодов 5-10 мВт относительная погрешность измерений дымности в диапазоне от 0.01 до 1 г/м³ не превышает 1 % при десятикратном варьировании мощностью потоков, излучаемых светодиодами.

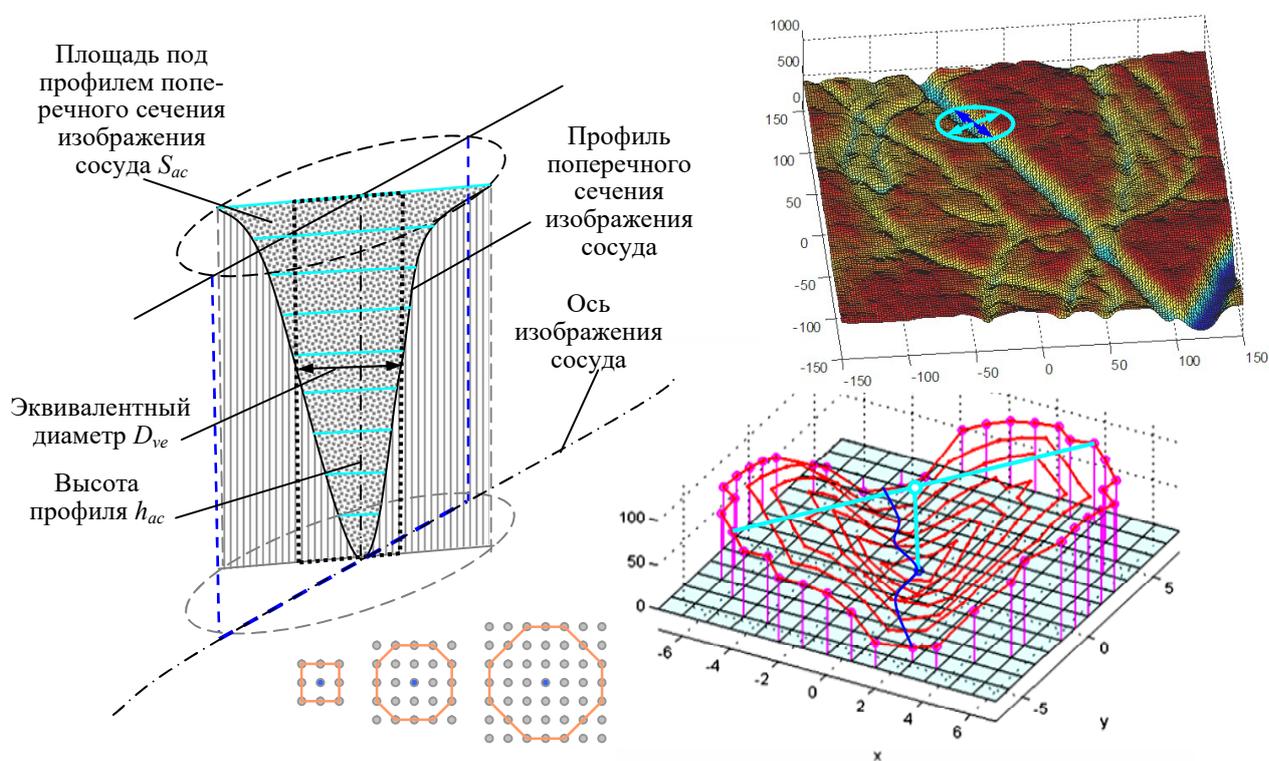
Описаны разработанные методы *повышения пороговой чувствительности портативных устройств локального газового анализа*. Показано, что сочетание высокой чувствительности резонаторных оптико-акустические ячеек с их малыми размерами и экономичностью импульсных квантово-каскадных лазеров позволяет создавать компактные лазерные сенсоры, способные обеспечить определение скорости выделения или утечек химических соединений с чрезвычайно низкой интенсивностью эмиссии менее 10^{-9} см³/с. Получены необходимые выражения и сформулированы принципы повышения их пороговой чувствительности. Эффективность их применения продемонстрирована на примерах разработки и оценки параметров экспериментальных образцов оптико-акустических газоанализаторов. Показано, что применение многократного прохода (за счет организации рециркуляции лазерных импульсов или применения схемы с внешним селективным резонатором) лазерного излучения через оптико-акустическую ячейку позволяет в десятки и сотни раз повышать пороговую чув-

ствительность этих оптико-акустических газовых сенсоров.

В пятой главе представлена разработанная методика оценки размерных параметров (диаметра D_{ve} и площади S_{ve} внутреннего просвета) малых сосудов, доступных для непосредственного наблюдения.

Она основана на применении импульсной светодиодной подсветки и регистрации монохромных видеозаписей бульбарной конъюнктивы глаза с пространственным разрешением 2 мкм, стабилизации изображения сосудистой сети и проведении усреднения во времени. Стенки малых сосудов прозрачные, поэтому диаметр их внутреннего просвета можно определять по контуру поглощения излучения эритроцитами крови, находящейся в сосудах. Созданное устройство на базе платформы щелевой лампы и видеокамеры с монохромной матрицей фотоприемников ICX285AL и методика видеорегистрации и обработки позволяет после усреднения формировать изображение малых сосудов, практически без разрывов, за счет усреднения поглощения подсвечивающего излучениядвигающимися эритроцитами.

Трассировка скелета сосудистой сети и последующее определение D_{ve} осуществляется разработанным алгоритмом, который основан на использовании расширяющихся кольцевых структур, как показано на рисунке 5. При просмотре элементов результирующего изображения вначале используются скользящая маска из 3×3 элементов. При обнаружении локального минимума яркости изображения в центре маски (с координатами i, j) формируется первая кольцевая структура или рецептивное поле с радиусом $R_c = 2$ и определяется зависимость суммы противоположных точек окружности от угла поворота.



Далее находится максимум разностей этой зависимости для *перпендикулярных направлений* (высот берегов и дна русла) и сравнивается с величиной порога, зависящего от яркости изображения в локальной окрестности точки ij . При превышении порога принимается решение, что эта точка может принадлежать оси сосуда и значение R_c увеличивается, что позволяет пошагово определить контур поперечного сечения яркости изображения сосуда с высотой h_{ac} и площадью S_{ac} . Нарастание R_c прекращается при падении крутизны нарастания этих разностей, после чего рассчитывается эквивалентный диаметр сосуда $D_{ve} = S_{ac}/h_{ac}$.

Разработанный алгоритм позволяет за один проход двумерной матрицы изображения проанализировать каждый пиксель изображения и найти оси всех сосудов, что проиллюстрировано на рисунке 6, *а* для небольшого фрагмента монохромного изображения бульбарной конъюнктивы где цветовой палитрой показаны полученный скелет сосудистой сети и рассчитанные значения D_{ve} в мкм. Получаемая результирующая гистограмма, пример которой приведены на рисунке 6, *б*, имеет несколько мод, которые соответствуют сосудам разного калибра.

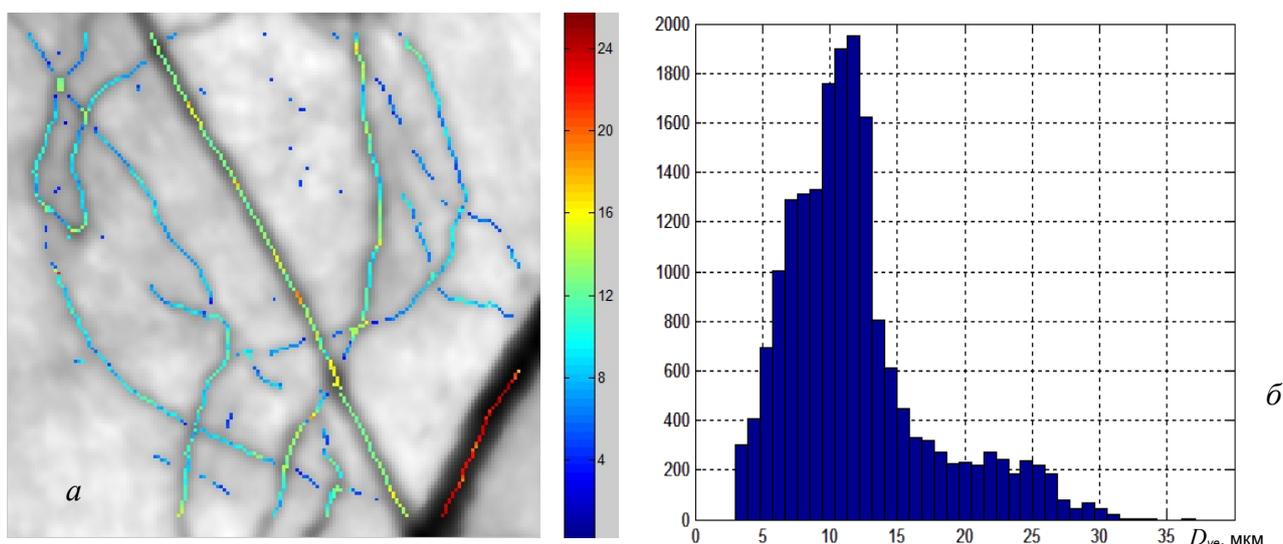


Рисунок 6 – Результат трассировки и определения диаметров (в мкм) внутреннего просвета сосудов фрагмента усредненного изображения бульбарной конъюнктивы с размерами 160×160 пикселей (*а*) и разрешением 2 мкм, и гистограмма распределения эквивалентного диаметра (*б*), полученные при обработке изображения участка конъюнктивы с размерами 2.16×1.7 мм²

Достоверность определения D_{ve} подтверждена результатами моделирования транспорта фотонов в тканях бульбарной конъюнктивы 3D методом Монте-Карло.

В **шестой главе** рассматривается актуальная проблема неинвазивного определения гидратации поверхностных биотканей и параметров сосудов (скрытых кожными покровами) в их микроциркуляторном русле, которые востребованы при диагностике различных сосудистых патологий и оценке состояния тканей человека.

Показана применимость для решения этой задачи спектроскопии диффузного отражения. При вводе узкого пучка светового излучения в живую ткань формиру-

ется распределение ее яркости $L(\lambda, t, \rho)$ или профиль локального коэффициента диффузного отражения $R(\lambda, t, \rho)$, где ρ – расстояние между точкой ввода излучения в ткань и точкой регистрации выходящего излучения, которые зависят от спектральных показателей приведенного рассеяния $\mu'_s(\lambda)$ и поглощения $\mu_a(\lambda)$ ткани.

При формировании расчетной модели переноса излучения в ткани используется различие в поведении $\mu'_s(\lambda)$ и $\mu_a(\lambda)$. Поглощение светового излучения в основном происходит в резонансных полосах поглощения хромофоров биоткани. Рассеяние же определяется неоднородностью показателя преломления составляющих ткани и зависит от ее морфологии. Показатель $\mu'_s(\lambda)$ биотканей плавно и монотонно уменьшается с ростом значения λ , что согласуется с выводами теории Ми. Поэтому $\mu'_s(\lambda)$ аппроксимируется степенной гиперболической $\mu'_s(\lambda) = \mu'_s(\lambda_0)(\lambda_0/\lambda)^{m_\lambda}$ или экспоненциально-степенной $\mu'_s(\lambda) = \mu'_s(\lambda_0)\exp\left[1 - (\lambda/\lambda_0)^{m_\lambda}\right]$ функциями с двумя параметрами: показателем степени m_λ и значением $\mu'_s(\lambda_0)$ при длине волны λ_0 , выбираемой в минимуме спектрального показателя поглощения $\mu_a(\lambda)$ биоткани.

Сосудистая сеть в микроциркуляторном русле описывается усредненными значениями объемной концентрации крови $C_V^{bl\Sigma}$, диаметра внутреннего просвета малых артериальных \bar{D}_a и венозных \bar{D}_v сосудов и, соответственно, их суммарной длиной \bar{L}_a и \bar{L}_v в единичном объеме ткани. Также учитывается сатурация кислородом гемоглобина, содержащегося в эритроцитах, и спектральные показатели поглощения светового излучения кожей и подкожными тканями, которые индивидуальны для каждого человека. Поэтому определение $C_V^{bl\Sigma}$ и диаметров \bar{D}_a и \bar{D}_v проводится при неизвестных значениях сатурации венозной крови SvO_2 (сатурация для артериальной крови SaO_2 измеряется пульсоксиметрическим способом) и спектрального показателя поглощения излучения обезвоженной и обескровленной тканью $\mu_a^{iH\Sigma}(\lambda)$.

Использование диффузионного приближения позволяет по задаваемой зависимости $\mu'^*_s(\lambda)$ и измеренному профилю $R_m(\lambda, \rho_k)$ рассчитать варьируемую спектральную зависимость $\mu^*_a(\lambda)$. Для этого заранее рассчитывается семейство двумерных поверхностей $R(\mu'_s, \mu_a, \rho_k)$ при значениях ρ_k , используемых при измерениях. Далее изменяя форму $\mu'^*_s(\lambda)$ путем варьирования двумя параметрами аппроксимации, определяется (с помощью двумерной интерполяции на неравномерной сетке отсчетов F_2) семейство зависимостей $\mu^*_a(\lambda_i, \rho_k) = F_2[R(\mu'_s, \mu_a, \rho_k), R_m(\lambda_i, \rho_k), \mu'^*_s(\lambda_i)]$ и на первом этапе решения обратной задачи используется функция невязки в виде

$$f_{res1}[\mu'^*_s(\lambda_0), m_\lambda^*] = \sum_i \sum_k \left[\frac{R[\mu'^*_s(\lambda_i), \bar{\mu}_a^*(\lambda_i), \rho_k]}{R_m(\lambda_i, \rho_k)} - 1 \right]^2, \quad (5)$$

которая минимизируется методом Левенберга-Марквардта без ограничения параметров. Такой подход позволяет по зарегистрированным профилям $R_m(\lambda, \rho_k)$ найти оценки искомых спектральных зависимостей $\mu'_{s^*}(\lambda)$ и $\mu^*_a(\lambda)$ и эффективного показателя ослабления $\mu^*_{\text{eff}}(\lambda) = \sqrt{3\mu^*_a(\lambda) [\mu'_{s^*}(\lambda) + \mu^*_a(\lambda)]}$. На рисунке 7, а и 7, б приведены примеры регистрируемых (при смещении приемного зонда влево и вправо относительно излучающего зонда) профилей $R_{mL}(\lambda, \rho_k)$ и $R_{mR}(\lambda, \rho_k)$ и рассчитанных спектральных зависимостей для дистальной фаланги пальца руки.

На втором этапе решения обратной задачи моделируется суммарный спектральный показатель поглощения светового излучения тканью $\mu_a^{t\Sigma}(\lambda)$. Задаются объемные концентрации основных ее хромофоров (крови $C_V^{\text{bl}\Sigma}$ и воды $C_V^{\text{H}_2\text{O}}$) и усредненные параметры микроциркуляторного русла (средний диаметр малых сосудов \bar{D}_a и \bar{D}_v , отношение концентраций крови в венозном и артериальном бассейнах $k_{va} = C_V^{\text{bl}v} / C_V^{\text{bl}a}$ и отношение сатурации венозной S_v к сатурации артериальной S_a крови, т. е. $k_{Sva} = S_v / S_a$), которые участвуют в формировании спектрального показателя суммарного поглощения крови $\mu_a^{\text{bl}\Sigma}(\lambda)$. Сатурация S_a определялась хорошо зарекомендовавшим себя пульсоксиметрическим способом. Поэтому при минимизации отклонения получаемых зависимостей $\bar{\mu}_a(\lambda)$ от моделируемых $\mu_a^{t\Sigma}(\lambda)$ применяется варьирование пятью параметрами $C_V^{\text{bl}\Sigma}$, \bar{D}_a , k_{va} , k_{Sva} , $C_V^{\text{H}_2\text{O}}$ и аппроксимация разности $\mu_a^{\text{tH}\Sigma}(\lambda) = \mu_a^{t\Sigma}(\lambda) - \mu_a^{t2}(\lambda) = \mu_a^{t\Sigma}(\lambda) - [\mu_a^{\text{bl}\Sigma}(\lambda) + C_V^{\text{H}_2\text{O}} \mu_a^{\text{H}_2\text{O}}(\lambda)]$, кусочно-полиномиальными функциями. Необходимость ее применения обусловлена индивидуальными особенностями тканей и недостаточной изученностью показателей поглощения их хромофоров. Положение трех спектральных участков $\Delta\lambda_n$, используемых при аппроксимации этой разности, показано на рисунках 7, в и 7, г соответствующими отрезками линий под зависимостью утроенной невязки $3f_{\text{res}2}(\lambda)$. Показатели степеней $m_{\Delta\lambda_n}$ соответствующих полиномов в этих участках спектра устанавливались на основе анализа закономерностей (с учетом возраста) поведения $\mu_a^{\text{tH}\Sigma}(\lambda)$ в типичных точках тела человека, а также особенностей поведения спектров поглощения крови и воды. В районе 930 нм наблюдается заметная невязка, вызываемая отсутствием учета спектрального показателя поглощения липидов.

На вставках на рисунках 7, в и 7, г приведены используемые при расчетах значения содержания гемоглобина в крови C_t^{Hb} , гематокрита H , а также рассчитанные при решении обратной задачи параметры микроциркуляторного русла, объемной концентрации воды $C_V^{\text{H}_2\text{O}}$ и значения степеней полиномов $m_{\Delta\lambda_n}$, аппроксимирующих $\mu_a^{\text{tH}\Sigma}(\lambda)$, в каждом из трех используемых участков спектра.

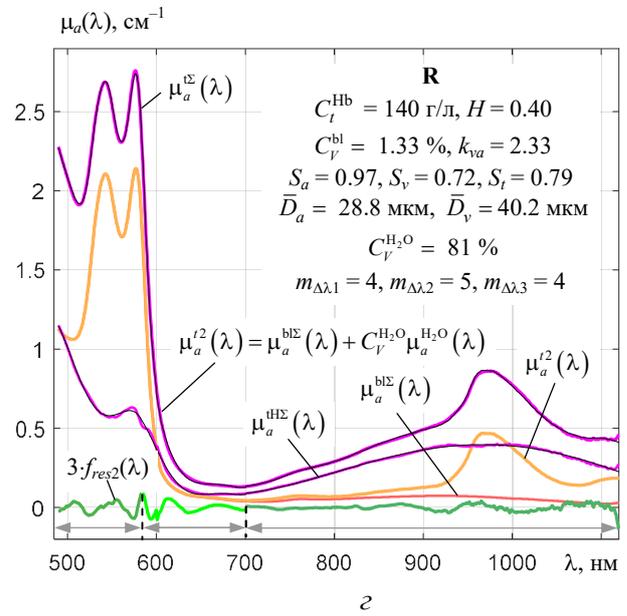
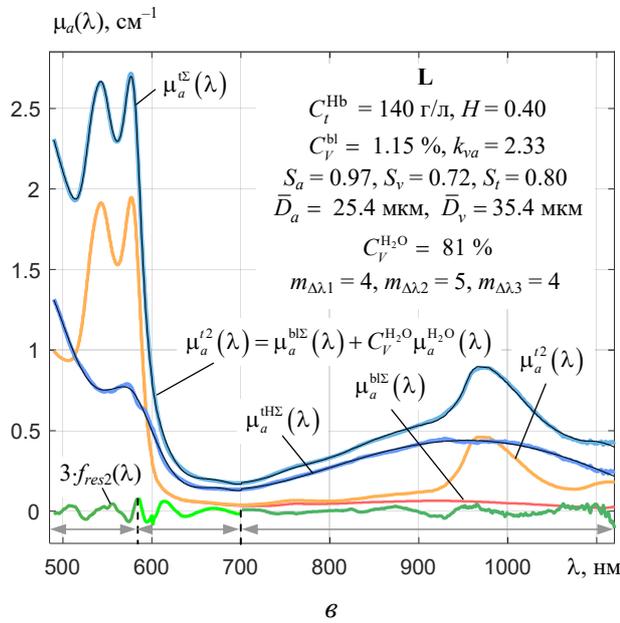
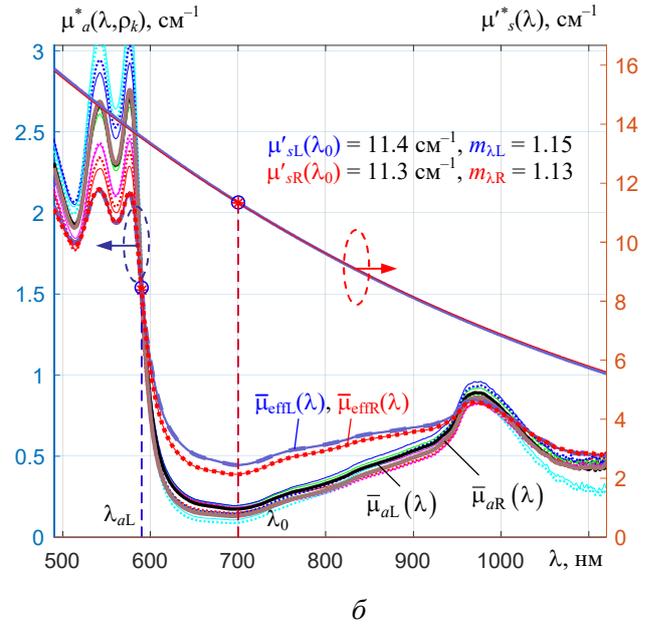
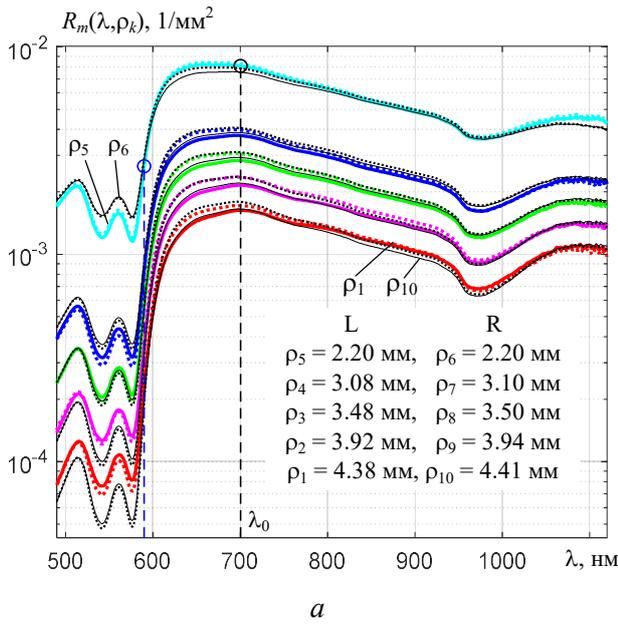


Рисунок 7 – Зарегистрированные спектрально-пространственные профили (а) локального диффузного отражения при положении зонда слева $R_{mL}(\lambda, \rho_k)$ (жирные сплошные цветные линии) и справа $R_{mR}(\lambda, \rho_k)$ (тонкие сплошные черные линии) и полученные их оценки $R_L(\lambda, \rho_k)$, $R_R(\lambda, \rho_k)$ (соответствующие точечные линии), рассчитанные усредненные спектральные показатели эффективного ослабления излучения $\bar{\mu}_{efL}(\lambda)$ и $\bar{\mu}_{efR}(\lambda)$, приведенного рассеяния $\mu'_{sL}(\lambda)$, $\mu'_{sR}(\lambda)$ и поглощения $\bar{\mu}_{aL}(\lambda)$ и $\bar{\mu}_{aR}(\lambda)$ (б) и спектральные зависимости и параметры микроциркуляторного русла, полученные на втором этапе обработки зарегистрированных профилей при соответствующих положениях подвижного зонда (в) и (г)

Во второй части шестой главы рассматривается методика оценки жесткости стенок малых артериальных сосудов, которая важна при оценке резерва расширения усредненного диаметра внутреннего просвета артериол \bar{D}_{ao} , поскольку их тонус непосредственно влияет на диастолическое давление крови P_d . Поэтому разработана

соответствующая методика, основанная на регистрации спектрально-временных профилей $R_m(\lambda, t, \rho_0)$ диффузного отражения светового излучения поверхностными тканями и использовании расширенной расчетной модели поглощения излучения тканью и кровью, которая учитывает пульсовые колебания малых артериальных сосудов, а также параллельно определяемые пульсоксиметрическим методом сатурацию S_a артериальной крови и форму нормированной фотоплетизмограммы $f_{PPG}(t)$.

На основе анализа строения микроциркуляторного русла сосудистой системы получены приближенные аналитические выражения, описывающие местную гемодинамику в артериальном бассейне микроциркуляторного русла единичного элементарного объема ткани V_1 и связь между систолическим P_s и диастолическим P_d давлением крови, усредненным диаметром \bar{D}_{ao} пульсирующих сосудов этого бассейна и усредненной амплитудой пульсаций $\Delta\bar{D}_{ao}$, которые формируют фотоплетизмограмму. При использовании относительных сопротивлений кровотоку различных сегментов сосудистого русла человека r_m , приближенные значения которых установлены физиологами, получено приближенное выражение для определения усредненного коэффициента растяжения стенок малых артериальных сосудов микроциркуляторного русла (в основном артериол) в кольцевом направлении

$$\bar{k}_e = \frac{1}{(r_{ao}/2 + r_c + r_{v\Sigma})k_{\text{Hg-mN}}} \cdot \frac{4\pi \cdot \Delta\bar{D}_{ao}}{(P_s + P_d)\Delta\bar{D}_{ao} + (P_s - P_d)\bar{D}_{ao}}, \quad (6)$$

где, r_{ao} , r_c и $r_{v\Sigma}$ – относительные сопротивления кровотоку артериол, капилляров и венозного русла сосудистой системы, соответственно. Для получения размерности \bar{k}_e в мкм/(мН/см) при использовании привычных единиц давления в мм рт. ст. в (6) используется коэффициент пересчета $k_{\text{Hg-mN}} = 1.33 \cdot 10^{-3}$ [мН/(см·мкм)]/(мм рт. ст.).

Получено выражение для описания временной зависимости усредненного диаметра внутреннего просвета артериол $D_{ao}(t)$

$$D_{ao}(t) \approx \bar{D}_{ao}(\bar{P}_{ao}) \left\{ 1 + \frac{(P_s - P_d)}{4\pi} \cdot \frac{P_{ao}(t) - \bar{P}_{ao}}{\bar{k}_e (r_{ao}/2 + r_c + r_{v\Sigma})k_{\text{Hg-mN}} - (P_s + P_d) (P_{ao}^{\max} - P_{ao}^{\min})/2} \right\}, \quad (7)$$

где $P_{ao}(t)$ – временная зависимость внутрипросветного давления в середине усредненных артериол со средней длиной \bar{l}_1 , а \bar{P}_{ao} , P_{ao}^{\max} и P_{ao}^{\min} – среднее, максимальное и минимальное значения $P_{ao}(t)$. Показано, что при определении временной зависимости $P_{ao}(t)$ можно использовать нормированную фотоплетизмограмму $f_{PPG}(t)$. Это позволило создать расчетную модель формирования спек-

трально-временного профиля $R(\lambda, t, \rho_0)$ локального диффузного отражения светового излучения живой пульсирующей тканью. На первом этапе решения этой обратной задачи используется варьирование 8-ю параметрами расчетной модели и рассчитываются оценки искомых параметров. Примеры спектральных зависимостей, используемых при моделировании, приведены на рисунке 8, а.

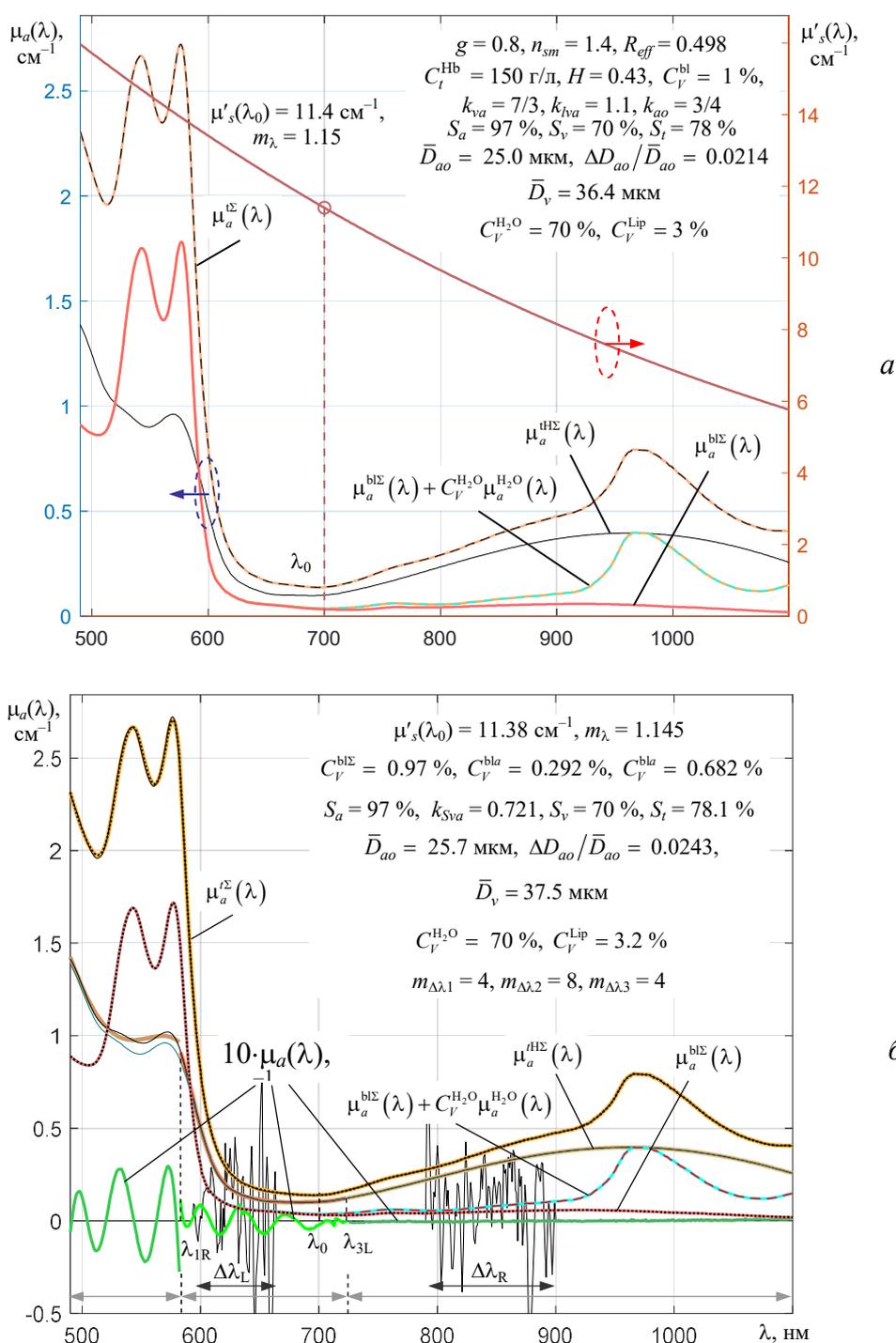


Рисунок 8 – Задаваемые при моделировании $R_m(\lambda, t, \rho_0)$ усредненные спектральные зависимости и параметры ткани дистальной фаланги пальца руки (а) и результаты (б), полученные на втором этапе минимизации отклонения моделируемого профиля $R(\lambda_i, t_m, \rho_0)$ от задаваемого $R_m(\lambda_i, t_m, \rho_0)$, при $\rho_0 = 4.5 \text{ мм}$, $\sigma_n = 0.002$, $\bar{k}_e = 8 \text{ мкм/(мН/см)}$

Приближенный характер выражений для расчета спектральных коэффициентов коррекции на упаковку гемоглобина в видимой области спектра и применение кусочно-полиномиальной аппроксимации суммарного показателя поглощения подкожных тканей вызывают небольшое смещение получаемых на первом этапе значений \bar{D}_{ao} и $\Delta\bar{D}_{ao}$ в сторону меньших значений. Поэтому на втором уточняющем этапе проводится варьирование только значениями этих двух параметров \bar{D}_{ao} и $\Delta\bar{D}_{ao}$ с использованием расширенной функции невязки f_{res2} , содержащей еще и оценки амплитуд пульсовых колебаний $A_{\Delta Rm}(\lambda_i, \rho_0)$ и $A_{\Delta R}(\lambda_i, \rho_0)$. Причем, как видно из рисунка 8, б, минимизация f_{res2} проводится только в двух зонах спектра $\Delta\lambda_L$ и $\Delta\lambda_R$, где влияние отмеченных выше искажений минимально.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

Получено дальнейшее развитие теории оптической диагностики рассеивающих сред, в том числе и определения температуры T и ее пространственного распределения $T(x,y)$, в сложных условиях проведения измерений (влияние трудно контролируемых сопутствующих факторов и недостаточность необходимой априорной информации).

1. Показано, что для повышения достоверности интерпретации регистрируемых полей теплового излучения при определении пространственного распределения температуры $T(x,y)$ термографами среднего инфракрасного диапазона спектра (8–14 мкм) на неохлаждаемых микроболометрических матрицах необходимо учитывать взаимный радиационный теплообмен через объектив между контролируемым телом и чувствительными элементами матрицы, что позволяет оптимизировать алгоритмы выбора времени интегрирования τ_{int} регистрируемых потоков и напряжения смещения U_{bus} , подаваемого на встроенные в матрицу интеграторы [38]. На основе численного анализа процессов теплообмена предложены методы коррекции регистрируемых разностей тепловых потоков и смещения градуировочной зависимости на величину вклада теплового излучения фотоприемников, обеспечивающие нечувствительность результатов определения $T(x,y)$ к изменению температуры микроболометрической матрицы и возможность корректного учета значения коэффициента теплового излучения тела и вклада теплового излучения окружающей среды, отражаемого его поверхностью [11].

2. Установлено, что при заданном диапазоне измеряемых термографом температур снижение погрешности измерения $T(x,y)$ тел с неизвестным спектральным коэффициентом теплового излучения $\varepsilon(\lambda)$ можно частично обеспечить оптимальным выбором используемого термографом участка спектра [2, с. 112; 6; 10; 12]. Дальнейшее снижение погрешности (с 8-12 % до 1-2%) обеспечивается применением реги-

страции теплового излучения в трех участках спектра и наложением ограничений на возможную форму зависимости $\varepsilon(\lambda)$, что позволяет обеспечить корректное решение соответствующей системы из трех нелинейных уравнений, содержащих неизвестные значения T , ε_2 и наклона b зависимости $\varepsilon(\lambda)$. Для высокотемпературной термографии предложен метод формирования трех перекрывающихся участков спектра в ближней инфракрасной области спектра при использовании матриц RGB фотоприемников [2, с. 226; 12; 32; 33; 48].

3. Экспериментально показано, что для обеспечения широкого диапазона температур, измеряемых высокотемпературными термографами на матрицах RGB фотоприемников, необходимо учитывать нелинейность их световых характеристик и зависимость дисперсии суммарного шума от интенсивности регистрируемых тепловых потоков, пользуясь предложенными методами коррекции градуировочных зависимостей и регистрируемых сигналов [2, с. 228; 12]. Показана целесообразность введения в алгоритмы расчета опции определения максимальной по полю зрения температуры T_{\max} и предложен метод расчета, обеспечивающий устойчивость T_{\max} к размерам изображения контролируемых тел и дисперсии флуктуаций регистрируемых тепловых потоков [12]. Выработаны принципы снижения неопределенности результатов измерений высокотемпературными термографами [12; 32; 33; 52; 53], которые внедрены в алгоритмы функционирования отечественного мультиспектрального термографа ТМ-3, внесенного в Реестр средств измерений Республики Беларусь.

4. На основе анализа процессов формирования светового излучения в области воздействия мощного пучка лазерного излучения на поверхность обрабатываемого материала, выявлены два наиболее информативных параметра – эффективные значения температуры T_s и площади нагрева S_s , которые целесообразно использовать в петле обратной связи управления лазерной установкой для поддержания процесса обработки в заданных технологических допусках [13; 119]. Показано, что применение линейризации спектров $S(\lambda)$, формирующихся в области воздействия лазерного пучка, и четырех-параметрической регрессионной модели их образования позволяет при составлении соответствующей системы уравнений и ее решении определять температуру T нагреваемой поверхности и спектральную зависимость ее коэффициента теплового излучения $\varepsilon(\lambda)$ [2, с. 203-206, 214-216; 9].

5. Для организации непрерывного контроля процессов лазерной обработки конструкционных материалов предложено использовать спектрофотометрическую технику с расширенным (до границ области быстрого сканирования обрабатываемой поверхности лазерным пучком) мгновенным полем зрения и пространственным интегрированием спектров, что позволяет при их линейризации оперативно определять два информативных для петли обратной связи параметра T_s и смещение линейризованной зависимости $a \sim \ln(1/S_s)$ при примерно на

2-3 порядка сниженном объеме обрабатываемых потоков данных по сравнению с термографической техникой [13 - 15; 119]. Экспериментально подтверждена эффективность использования этих параметров при формировании технологических карт проводимых процессов лазерной обработки [13].

6. На основе анализа проблем синтеза надежных методов непрерывного контроля агрессивных газовых и аэродисперсных сред (выбросы предприятий, двигателей внутреннего сгорания и т. д.) лазерными и светодиодными устройствами разработаны методы снижения влияния на результаты измерений сопутствующих неконтролируемых факторов и изменений параметров используемой аппаратуры [1, с. 9-10; 3-5; 23; 24; 39]. Моделирование процессов контроля содержания CO и O₂ в дымовых газах показала необходимость учета температуры контролируемой среды и давления в ней, а также целесообразность модификации корреляционных методов лазерной и светодиодной спектроскопии [1, с. 231-235; 23; 24], что позволяет снизить влияние неконтролируемых диссипативных потерь [21; 23]. С целью обеспечения оперативности контроля динамических изменений дымности выбросов двигателей внутреннего сгорания разработан нефелометрический метод определения дымности с минимальным контролируемым объемом в потоке выбросов порядка нескольких кубических сантиметров [22; 42; 109]. Для портативных локальных лазерных газоаналитических устройств на основе квантово-каскадных лазеров, работающих в импульсном режиме, и миниатюрных оптико-акустических ячеек выработаны принципы улучшения их пороговой чувствительности и достоверности измерений [44; 91; 92; 110; 112].

7. Создана и апробирована методика определения размерных параметров (диаметра внутреннего просвета D_{ve} и площади поперечного сечения S_{ve}) видимых сосудов бульбарной конъюнктивы глаза, основанная на импульсной подсветке исследуемого участка, регистрации его цифровых изображений с необходимым (не хуже 2 мкм) пространственно-временным разрешением, стабилизации изображения сосудистой сети и проведении усреднения получаемых изображений во времени, что позволяет устранить разрывы в изображениях артериол и капилляров, вызываемых участками прозрачной плазмы крови [8; 34; 35]. Применение кольцевых расширяющихся структур и оригинального численного метода определения диаметра D_{ve} при обработке результирующего изображения позволяет осуществлять трассировку сосудистого рисунка и определять значения D_{ve} и S_{ve} в каждой точке осей сосудистой сети [8; 35; 51; 65], что в свою очередь дает возможность формирования распределений $W(D_{ve})$ и $W(S_{ve})$, которые обеспечивают возможность оперативного слежения за воздействием сосудодобивных препаратов в наблюдаемом участке. Достоверность предлагаемой методики определения D_{ve} подтверждена моделированием транспорта фотонов в тканях бульбарной конъюнктивы 3D методом Монте-Карло [8].

8. Предложена и апробирована двухэтапная методика определения оптических характеристик поверхностных тканей, их гидратации и основных параметров

их микроциркуляторного русла кровеносной системы [18]. Она основана на регистрации спектрально-пространственного профиля локального диффузного отражения излучения тканью $R_m(\lambda, \rho)$ в исследуемой точке тела и применении расчетной модели его формирования $R(\lambda, \rho)$, использующей диффузионное приближение описания процессов переноса светового излучения в биоткани и физические параметры ее микроциркуляторного русла [16; 18]. Предложено решение обратной задачи по определению искомых параметров и зависимостей, включающее формирование функции невязки в виде, обеспечивающим одинаковый вклад в суммарную невязку всех спектральных составляющих измеренного $R_m(\lambda, \rho_k)$ и моделируемого $R(\lambda, \rho_k)$ профилей [18; 78; 80; 81]. Показано, что кроме неоднородности ткани существенный вклад в разброс результатов определения параметров микроциркуляторного русла вносит недостаток используемой расчетной модели, обусловленный плохой изученностью спектральных показателей поглощения основных хромофоров обескровленной и обезвоженной подкожной ткани. Предложен приближенный метод оценки их суммарного показателя поглощения $\mu_a^{\text{tH}\Sigma}(\lambda)$, основанный на кусочно-полиномиальной его аппроксимации (разбиении используемого диапазона спектра на три участка и аппроксимации в них зависимости $\mu_a^{\text{tH}\Sigma}(\lambda)$ полиномами разных степеней [18]) с учетом морфологии ткани в точках исследования и возраста. Совокупность предлагаемых решений позволяет снизить влияние индивидуальных особенностей распределения хромофоров подкожных тканей на получаемые результаты [18; 80].

9. Показано, что решение актуальной проблемы дифференциальной диагностики гипертензии – оценки тонуса малых артериальных сосудов и резерва расширения площади внутреннего просвета артериол, непосредственно определяющих диастолическое давление крови P_d , возможно на основе регистрации и обработки спектрально-временных профилей $R_m(\lambda, \rho_0, t)$ диффузного отражения светового излучения пульсирующими тканями. Проанализированы особенности строения микроциркуляторного русла сосудистой системы и получены приближенные аналитические выражения, описывающие местную гемодинамику в артериальном бассейне микроциркуляторного русла и связь между систолическим P_s и диастолическим P_d давлением крови, коэффициентом растяжения стенок малых артериальных сосудов k_e , усредненным диаметром \bar{D}_{ao} пульсирующих сосудов этого бассейна и амплитудой пульсаций их диаметра $\Delta\bar{D}_{ao}$ в исследуемой точке тела [7; 17]. На основе моделирования процесса их определения разработана двухэтапная методика решения рассматриваемой обратной задачи [17; 80; 81]. На первом этапе при минимизация суммарной невязки между измеренным $R_m(\lambda, \rho_0, t)$ и смоделированным $R(\lambda, \rho_0, t)$ профилями используется варьирование 8-ю параметрами расчетной модели [17]. На втором уточняю-

шем этапе минимизируется смещение оценок \bar{D}_{ao} и $\Delta\bar{D}_{ao}$, возникающее за счет неточности используемых аналитических выражений в видимой области спектра [17].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Созданные методы повышения достоверности определения температурных полей $T(x,y)$ и автоматического выбора параметров их регистрации [11; 38], которые учитывают взаимный радиационный теплообмен и излучение окружающей среды, перспективны при их внедрении в алгоритмы функционирования термографов на матрицах микроболометрических приемников для осуществления эффективной коррекции регистрируемых тепловизионных сигналов. Предлагаемые для высокотемпературных термографов на основе RGB матриц фотоприемников методы регистрации и обработки [27; 30; 32; 33; 37; 111; 113; 114; 116; 118; Приложение Б] внедрены в отечественный мультиспектральный термограф ТМ-3, созданный Белорусским государственным университетом совместно с Институтом тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАНБ, который прошел государственные испытания и внесен в Реестр средств измерений Республики Беларусь 24.02.2021 г., регистрационный номер РБ 03 10 7861 21 [Приложение А].

Разработанный спектральный метод непрерывного оперативного контроля эффективной температуры и площади нагрева обрабатываемого материала в области воздействия мощного сканирующего пучка лазерного излучения апробирован в ОНИЛ плазменных и лазерных технологий Белорусского национального технического университета и может внедряться в дорогостоящие технологические лазерные установки закалки, наплавки, сварки и т.д. [9; 10; 13]. Эффективность его применения (акты о практическом использовании от 29.05.2024 г. и от 23.05.2024 г. [Приложение В]) подтверждена экспериментальными результатами [9; 13], а сам метод защищен Евразийским патентом [119].

Методы повышения эксплуатационной надежности портативных средств лазерного и светодиодного контроля газовых и агрессивных аэродисперсных сред [3-5; 19-24; 26; 109], а также методы улучшения пороговой чувствительности компактных устройств локального высокочувствительного газового анализ [110; 112] могут внедряться в конструкцию и алгоритмы функционирования соответствующей светодиодной (акт о практическом использовании от 23.05.2024 г., акт об использовании НИР от 22.11.2005 г. [Приложение В]) и лазерной контролирующей аппаратуры [10] нового поколения.

Разработанные алгоритмы определения диаметра внутреннего просвета видимых сосудов бульбарной конъюнктивы и распределения их по диаметру, которые основаны на применении расширяющихся кольцевых структур, могут

использоваться в диагностических аппаратах для исследования влияния на состояние сосудов микроциркуляторного русла различных лекарственных препаратов и факторов риска, и прошли практическую апробацию на кафедре нормальной физиологии Белорусского государственного медицинского университета (акты о внедрении результатов научных исследований в научную и образовательную деятельность от 30.05.2024 г. [Приложение В]).

Созданная методика определения оптических характеристик поверхностных тканей, их гидратации и основных параметров сосудов их микроциркуляторного русла, может использоваться физиологами при проведении исследований ответа человеческого организма на различные стимулирующие воздействия, например холодовые пробы, и апробирована при проведении совместных исследований с Белорусским государственным медицинским университетом и Люблинским техническим университетом (акты о внедрении результатов в научную и образовательную деятельность от 30.05.2024 г. и акт о практическом использовании от 23.05.2024 г. [Приложение В]).

Методика определения усредненного диаметра внутреннего просвета пульсирующих малых артериальных сосудов и резерва расширения площади их поперечного сечения [17], основанная на одновременной регистрации спектрально-временных профилей локального диффузного отражения светового излучения, фотоплетизмограммы, а также сатурации гемоглобина артериальной крови кислородом пульсоксиметром, может найти широкое применение в диагностической аппаратуре для оценки состояния малых сосудов артериального бассейна микроциркуляторного русла сердечнососудистой системы при дифференциальной диагностике гипертензии, поскольку их тонус напрямую определяет диастолическое давление крови. Дополнение этой аппаратуры датчиками для определения скорости пульсовой волны в магистральных и местных артериях, позволит получить дополнительные признаки, перспективные для внедрения в клиническую практику при массовом скрининге населения [7; 17; 36].

Список публикаций соискателя ученой степени

Монографии

1. Фираго, В.А. Контроль газового состава сред методами лазерной диодной и светодиодной абсорбционной спектроскопии / В.А. Фираго, И.С. Манак, В. Вуйчик. – Минск : Академия управления при Президенте Республики Беларусь, 2006. – 303 с.

2. Фираго, В.А. Цифровая термография / В.А. Фираго. – Минск : БГУ, 2019. – 319 с.

Статьи в научных рецензируемых изданиях, включенных в перечень изданий, и в иностранных научных изданиях

3. Кугейко, М.М. Лазерные методы контроля компонентного состава аэродисперсных сред / М.М. Кугейко, В.А. Фираго // Журнал прикладной спектроскопии. – 2001. – Т. 68, № 4. – С. 520-525.

4. Drozd, S.N. Method for measuring the smokiness of exhaust gases and a device for accomplishing it / S.N. Drozd, M.M. Kugeiko, V.A. Firago // Measurement Techniques. – 2004. – Vol. 47, № 7. – P. 729-733.

5. Лазерный контроль концентрации CO и O₂ в дымовых газах котлов // В.А. Фираго, В.В. Крот, И.С. Манак, С.Н. Дрозд // Датчики и системы. – 2006. – № 3. – С. 30-34.

6. Лысенко, С.А. Оптическая модель атмосферы для коррекции ИК-измерений спутниковых и наземных систем дистанционного зондирования / С.А. Лысенко, М.М. Кугейко, В.А. Фираго // Журнал прикладной спектроскопии. – 2011. – Т. 78, № 2. – С. 267-276.

7. Kubarko, A. Determination of Colour-Contrast Sensitivity of the Retina / A. Kubarko, V. Firago, O. Hotra // Acta Physica Polonica A. – 2014. – Vol. 125, № 6. – P. 1367-1370.

8. Фираго, В.А. Методика определения диаметра и площади внутреннего просвета видимых сосудов глаза / В.А. Фираго, А.И. Кубарко // Приборы и методы измерений. – 2019. – Т. 10, № 2. – С. 185-197.

9. Firago, V.A. Monitoring of the Metal Surface Temperature during Laser Processing / V.A. Firago, W. Wojcik, M.Sh. Dzhunisbekov // Russian Metallurgy (Metally). – 2019. – Vol. 2019, № 11. – P. 1224-1230.

10. Методы и системы оптико-физических измерений (в условиях априорной неопределенности) / М.М. Кугейко, В.Л. Козлов, В.А. Фираго, Н.Л. Згировская // Фотоника. – 2020. – Т. 14, № 7. – С. 626-637.

11. Фираго, В.А. Коррекция сигналов микроболометрической матрицы, обеспечивающая повышение достоверности изменения температуры объектов. Часть 2 / В.А. Фираго // Инженерно-физический журнал. – 2022. – Т. 95, № 2. – С. 323-334.

(Firago, V.A. Correction of Signals in a Microbolometric array raising the validity of measuring objects' temperature. Part 2 / V.A. Firago // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2022. – Vol. 95, № 2. – P. 316-326.)

12. Multispectral High Temperature Thermography / W. Wójcik, V. Firago, A. Smolarz, I. Shedreyevs, B. Yeraliyeva // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – P. 742 (1-27).

13. Контроль процессов лазерной обработки конструкционных материалов с помощью тепловизионной и спектральной техники // В.А. Фираго, О.Г. Девойно, А.С. Лапковский, А.Н. Собчук // Журнал прикладной спектроскопии. – 2022. – Т. 89, № 4. – С. 568-579.

(Monitoring of laser processing of structural materials using thermal imaging and spectral technology / V.A. Firago, O.G. Devoino, A.S. Lapkovsky, A.N. Sobchuk // Journal of Applied Spectroscopy. – 2022. – Vol. 89, № 4. –P. 731-741.)

14. Investigation of the Possibility of Using Microspectrometers Based on CMOS Photodiode Arrays in Small-Sized Devices for Optical Diagnostics / O. Hotra, V. Firago, N. Levkovich, K. Shuliko // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – P. 4195 (1-22).

15. Firago, V.A. Diffuse Reflectance Spectrophotometers Based on C12880MA and C11708MA Mini-Spectrometers Hamamatsu / V.A. Firago, N.V. Levkovich, K.I. Shuliko // Приборы и методы измерений. – 2022. – Т. 13, № 2. – С. 93-104.

16. Possibilities of Diffuse Reflectance Spectroscopy in Determining and Operational Control of the Optical Properties of Finely Dispersed Scattering Media / O. Hotra, V. Firago, K. Shuliko, P. Kisała // Electronics. – 2023. – Vol. 12. – P. 2893 (1-25).

17. Фираго, В.А. Оценка жесткости малых артериальных сосудов поверхностных биотканей по их спектрально-временным профилям диффузного отражения светового излучения / В.А. Фираго // Журнал прикладной спектроскопии. – 2024. – Т. 91, № 1. – С. 107-123.

(Firago, V.A. Assessment of the Stiffness of small arterial vessels of superficial biotissues and their spectral-temporal diffuse light reflection profiles / V.A. Firago // Journal of Applied Spectroscopy. – 2024. – Vol. 91, № 1. –P. 94-109.)

18. Фираго, В.А. Возможности диффузионной спектроскопии с пространственным разрешением при определении гидратации и параметров микроциркуляторного русла биотканей / В.А. Фираго // Журнал прикладной спектроскопии. – 2024. – Т. 91, № 3. – С. 378-393.

Статьи в других научных изданиях

19. Лазерный контроль влажности сушильного агента в камерах газопаровой сушки древесины / В.А. Фираго, М.В. Ходинский, А.И. Зайцев, К.В. Курносков // Лазерная и оптико-электронная техника : сб. науч. ст. – Минск, 2001. – Вып. 6. – С. 103-115.

20. Фираго, В.А. Лазерный диодный влагомер / В.А. Фираго, М.В. Ходинский, И.С. Манак // Лазерная и оптико-электронная техника : сб. науч. ст. – Минск, 2002. – Вып. 7. – С. 150-154.

21. Фираго, В.А. Эксплуатационно надежные методы светодиодной и лазерной спектроскопии для газоаналитических средств непрерывного контроля сложных аэродисперсных сред / В.А. Фираго, М.М. Кугейко // Лазерная и оптико-электронная техника : сб. науч. ст. – Минск, 2003. – Вып. 8. – С. 198-223.

22. Дрозд, С.Н. Способ измерения дымности отработавших газов и устройство для его осуществления / С.Н. Дрозд, М.М. Кугейко, В.А. Фираго // Лазерная и оптико-электронная техника : сб. науч. ст. – Минск, 2005. – Вып. 9. – С. 47-53.

23. Светодиодные и лазерные газоанализаторы для повышения эффективности сжигания топлива в теплоэнергетике / В.А. Фираго, С.Н. Дрозд, В. Вуйцик, М.М. Кугейко, И.С. Манак // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2005. – № 2. – С. 55-62.

24. Методы лазерной спектроскопии в средствах непрерывного контроля содержания O_2 и CO в дымовых газах котлов / В.А. Фираго, В. Вуйцик, И.С. Манак, П. Комада, В.В. Крот // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2006. – № 1. – С. 43-57.

25. Firago, V.A. Calibration of the spectral ratio pyrometers on VGA-matrices of photo detectors [Electronic resource] / V.A. Firago, A.G. Sencov, W. Wójcik // Przegląd Elektrotechniczny. – Warszaws, 2008. – Vol. 84, № 3. – S. 164-167. – Mode of access : <https://pub.pollub.pl/publication/20031/>. – Date of access : 08.08.2024.

26. Pomiar stężenia CO z wykorzystaniem metod TDLAS w bliskiej podczerwieni [Electronic resource] / W. Wójcik, P. Komada, V.A. Firago, I. Manak // Przegląd Elektrotechniczny. – Warszaws, 2008. – Vol. 84, № 3. – S. 238-240. – Mode of access : <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BPOK-0022-0012>. – Date of access : 08.08.2024.

27. Сеньков, А.Г. Трехспектральный метод пирометрического определения температуры горячих металлов / А.Г. Сеньков, В.А. Фираго // Электроника-инфо. – 2009. – № 5. – С. 50-54.

28. Программный пакет для расчета прозрачности атмосферы на приземных трассах в средней ИК-области спектра / А.М. Агзамов, М.М. Кугейко, С.А. Лысенко, В.Ю. Новиченков, В.А. Фираго // Электроника-инфо. – 2010. – № 5. – С. 72-75.

29. Firago, V.A. Pyrometry of hot metals with changing and nonuniform emissivity [Electronic resource] / V.A. Firago, A.G. Senkov, W. Wójcik // Przegląd Elektrotechniczny. – Warszaws, 2010. – Vol. 86, № 7. – S. 104-108. – Mode of access : https://www.researchgate.net/publication/295842635_Pyrometry_of_hot_metals_with_changing_and_nonuniform_emissivity. – Date of access : 08.08.2024.

30. Пирометрический контроль температуры нагреваемых металлов на предприятиях машиностроения / В.А. Фираго, А.Г. Сеньков, Е.Н. Савкова, Т.В. Голуб // Контроль. Диагностика. – 2011. – № 5. – С. 17-25.

31. Oculographic means for human retina functional state integral estimation [Electronic resource] / A. Skobliakov, A. Kubarko, V. Firago, I. Gourski, O. Hotra // Przegląd Elektrotechniczny. – Warszaws, 2013. – Vol. 89, № 3. – S. 306-308. – Mode of access : <http://pe.org.pl/articles/2013/3b/84.pdf>. – Date of access : 08.08.2024.

32. Firago, V. High-temperature three-colour thermal imager [Electronic resource] / V. Firago, W. Wojcik // Przegląd Elektrotechniczny. – Warszaws, 2015. – Vol. 91, № 2. – S. 208-214. – Mode of access : https://www.academia.edu/99879635/High_temperature_three_colour_thermal_imager. – Date of access : 08.08.2024.

33. Firago, V. The principles of reducing temperature measurement uncertainty of modern thermal imaging system [Electronic resource] / V. Firago, W. Wójcik, I. Volkova // Przegląd Elektrotechniczny. – Warszaws, 2016. – Vol. 92, № 8. – S. 117-120. – Mode of access : <http://pe.org.pl/articles/2016/8/32.pdf>. – Date of access : 08.08.2024.

34. Determination of blood flow velocity in vessels of the bulbar conjunctiva [Electronic resource] / V. Firago, A. Kubarko, O. Hotra, I. Volkova, A. Kozbakova, N. Musabekov // Przegląd Elektrotechniczny. – Warszaws, 2016. – Vol. 92, № 8. – S. 208-214. – Mode of access : <http://pe.org.pl/articles/2016/8/29.pdf>. – Date of access : 08.08.2024.

35. Фираго, В.А. Получение и обработка цифровых изображений сосудов склеры глаза / В.А. Фираго, А.А. Анисимов, И.И. Волкова // Доклады БГУИР. – 2016. – № 7 (101). – С. 209-213.

36. Кубарко, А.И. Физиологическая оценка результатов спектрометрии содержания оксигемоглобина и реакции микрососудов на изменение гемодинамики / А.И. Кубарко, В.А. Фираго // Неотложная кардиология и кардиоваскулярные риски. – 2018. – Т. 2, № 2. – С. 358-363.

37. Formation of hard and wear-resistant niobium carbide coatings on hard-alloy tools by a vacuum–arc method [Electronic resource] / A.K. Kuleshov, V.V. Uglov, M.V. Anishchik, V.A. Firago, D.P. Rusalsky, A.A. Malashevich, I.A. Sakovich // High Temperature Material Processes. – 2019. – № 23 (2). – P. 97-105. – Mode of access : <https://www.dl.begellhouse.com/journals/57d172397126f956,373c784119be1ad6,0ee46b3005f874ce.html>. – Date of access : 08.08.2024.

38. Фираго, В.А. Коррекция сигналов микроболометрической матрицы, обеспечивающая повышение достоверности измерения температуры объектов. Часть 1 / В.А. Фираго // Инженерно-физический журнал. – 2021. – Т. 94, № 2. – С. 286-300.

(Firago, V.A. Correction of Signals in a Microbolometric Array Raising the Validity of the Measuring Object's Temperature. Part 1 / V.A. Firago // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2021. – Vol. 94, № 2. – P. 272-285.)

39. Корреляционные газоаналитические средства непрерывного контроля на основе полупроводниковых источников излучения / В. Вуйцик, В.А. Фираго, М.М. Кугейко, И.С. Манак // Квантовая электроника : материалы IV Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 18-21 ноября 2002 г. / Мин. обр. Респ. Бел., БГУ, НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ, Ин-т физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, БРФФИ, Бел. респ. координац. центр науч.-исслед. работы студентов, Laser and Electro-Optic Society (IEEE LEOS); редкол.: А.А. Афоненко [и др.]. – Минск, 2002. – С. 157-161.

40. Firago, V.A. Modified Correlation Method of Concentration Measurement of Gas Medium Component Composition / V.A. Firago, M.M. Kugeiko, S.N. Drozd // VIII Konferencja Naukowa "Czujniki Optoelektroniczne i Elektroniczne", Wrocław, 27-30 czerwca 2004. – Wrocław, 2004. – С. 120-123.

41. Фираго, В.А. Погрешности непрерывного лазерного контроля концентрации СО в дымовых газах котлов / В.А. Фираго, В. Вуйцик, П. Комада // Квантовая электроника : материалы V Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 22-25 ноября 2004 г. / Мин. обр. Респ. Бел., БГУ, НИИ ПФП имени А.Н. Севченко БГУ, Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, БРФФИ, Бел. респ. координац. центр науч.-исслед. работы студентов; редкол.: И.С. Манак (отв. ред.) [и др.]. – С. 161-165.

42. Дрозд, С.Н. Система экологического контроля дымности выбросов транспортных средств / С.Н. Дрозд, М.М. Кугейко, В.А. Фираго // Медэлектроника-2004. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии : материалы III Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 9-10 декабря 2004 г. / Бел. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2004. – С. 400-403.

43. Методы лазерной спектроскопии в средствах контроля непрерывного содержания O_2 и СО в дымовых газах котлов / В. Фираго, В. Вуйцик, П. Комада, И. Манак // IV International Conference "NEET'2005". New Electrical and Electronic Technologies and Their Industrial Implementation, Zakopane, Poland, June 21-24, 2005 / Lublin University of Technology, Belarussian State University, Belarussian National Technical University, Belarussian State Pedagogical University, Precarpathian University, Vytautas Magnus University. – Lublin, 2005. – С. 37-40.

44. Миниатюризированные камеры для детектирования газов с помощью диодно-лазерной оптико-акустической спектроскопии / А.В. Горелик, А.Л. Уласевич, В.А. Фираго, В.С. Старовойтов // Полупроводниковые лазеры и системы на их основе : сб. ст. 7-го Белорусско-Российского семинара, Минск, 1-5 июня 2009 г. / НАН Беларуси, БРФФИ, Ин-т физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, БНТУ. – Минск, 2009. – С. 88-91.

45. Лысенко, С.А. Мультиспектральный метод оценки оксигенации гемоглобина в микроциркуляторной сети сетчатки / С.А. Лысенко, М.М. Кугейко,

В.А. Фираго // Полупроводниковые лазеры и системы на их основе : сб. ст. 8-й Белорусско-Российского семинара, Минск, 17-20 мая 2011 г. / НАН Беларуси, БРФФИ, Ин-т физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН. – Минск, 2011. – С. 172-175.

46. Фираго, В.А. Высокотемпературный тепловизор на КМОП матрице фотоприемников MT9V034STC / В.А. Фираго // Квантовая электроника : материалы IX Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 18-21 ноября 2013 г. / Мин. обр. Респ. Бел., БГУ, НИИ ПФП им. А.Н. Севченко БГУ, БРФФИ, Ин-т физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси; редкол.: М.М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2013. – С. 231-233.

47. Фираго, В.А. Определение контрастно-цветовой чувствительности сетчатки / В.А. Фираго, А.И. Кубарко // Квантовая электроника : материалы IX Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 18-21 ноября 2013 г. / Мин. обр. Респ. Бел., БГУ, НИИ ПФП им. А.Н. Севченко БГУ, БРФФИ, Ин-т физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси; редкол.: М.М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2013. – С. 260-262.

48. Фираго, В.А. Принципы снижения неопределенности измерения максимальной температуры раскаленных тел трехзональным термографом ИТЗ-СМ / В.А. Фираго // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния : материалы третьей Междунар. науч.-практич. конф., Минск, 28-29 апреля 2015 г. / Мин. обр. Респ. Бел., НИУ «Ин-т прикладных физич. проблем им. А.Н. Севченко» БГУ; редкол.: В.И. Попечиц (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2015. – С. 115-120.

49. Фираго, В.А. Цифровой фотометр на основе монохромной видеокамеры / В.А. Фираго, А.И. Кубарко, О. Хотра // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния : материалы третьей Междунар. науч.-практич. конф., Минск, 28-29 апреля 2015 г. / Мин. обр. Респ. Бел., НИУ «Ин-т прикладных физич. проблем им. А.Н. Севченко» БГУ; редкол.: В.И. Попечиц (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2015. – С. 121-123.

50. Определение биомедицинских параметров бульбарной конъюнктивы по бесконтактным измерениям спектра ее обратного рассеяния / С.А. Лысенко, В.А. Фираго, М.М. Кугейко, А.И. Кубарко, О. Хотра, А.Н. Собчук // V конгресс физиков Беларуси (посвященный Международному году света) : сб. науч. тр., Минск, 27-30 окт. 2015 г. / НАН Беларуси, Мин. обр. Респ. Бел., Ин-т физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, БГУ, ОО «Бел. физич. о-во», БРФФИ; редкол.: С.Я. Килин (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2015. – С. 129-130.

51. Фираго, В.А. Оценка гемодинамики бульбарной конъюнктивы глаза / В.А. Фираго, А.И. Кубарко, И.А. Волкова // V конгресс физиков Беларуси (посвященный Международному году света) : сб. науч. тр., Минск, 27-30 окт. 2015 г. / НАН Беларуси, Мин. обр. Респ. Бел., Ин-т физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, БГУ, ОО «Бел. физич. о-во», БРФФИ; редкол.: С.Я. Килин

(гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2015. – С. 167-168.

52. Фираго, В.А. Принципы снижения неопределенности измерения температуры тепловизионной техники / В.А. Фираго // V конгресс физиков Беларуси (посвященный Международному году света) : сб. науч. тр., Минск, 27-30 окт. 2015 г. / НАН Беларуси, Мин. обр. Респ. Бел., Ин-т физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, БГУ, ОО «Бел. физич. о-во», БРФФИ; редкол.: С.Я. Килин (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2015. – С. 197-198.

53. Фираго, В.А. Принципы снижения неопределенности измерения температуры в трехзональной термографии металлов / В.А. Фираго // Квантовая электроника : материалы X Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 9-13 ноября 2015 г. / Мин. обр. Респ. Бел., БГУ, НИИ ПФП им. А.Н. Севченко БГУ, БРФФИ, Ин-т физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси; редкол.: М.М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2015. – С. 199-202.

54. Фираго, В.А. Принципы бесконтактного контроля параметров протекания процессов лазерной обработки конструкционных материалов / В.А. Фираго // Квантовая электроника : материалы X Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 9-13 ноября 2015 г. / Мин. обр. Респ. Бел., БГУ, НИИ ПФП им. А.Н. Севченко БГУ, БРФФИ, Ин-т физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси; редкол.: М.М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2015. – С. 203-206.

55. Фираго, В.А. Функциональные особенности трехзонального высокотемпературного термографа ИТ-3СМ / В.А. Фираго // Квантовая электроника : материалы X Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 9-13 ноября 2015 г. / Мин. обр. Респ. Бел., БГУ, НИИ ПФП им. А.Н. Севченко БГУ, БРФФИ, Ин-т физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси; редкол.: М.М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2015. – С. 207-210.

56. Определение скорости кровотока в сосудах бульбарной конъюнктивы глаза / В.А. Фираго, А.И. Кубарко, И.А. Волкова, О. Хотра // Квантовая электроника : материалы X Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 9-13 ноября 2015 г. / Мин. обр. Респ. Бел., БГУ, НИИ ПФП им. А.Н. Севченко БГУ, БРФФИ, Ин-т физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси; редкол.: М.М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2015. – С. 244-247.

57. Комплекс для регистрации изображений бульбарной конъюнктивы глаза и спектров ее диффузного рассеяния / В.А. Фираго, А.И. Кубарко, С.А. Лысенко, И.А. Волкова, А.Н. Собчук // Квантовая электроника : материалы X Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 9-13 ноября 2015 г. / Мин. обр. Респ. Бел., БГУ, НИИ ПФП им. А.Н. Севченко БГУ, БРФФИ, Ин-т физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси; редкол.: М.М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2015. – С. 248-251.

58. Кубарко, А.И. Оценка морфометрических и гемодинамических параметров глазных сосудов / А.И. Кубарко, В.А. Фираго, А.А. Анисимов // Достижения и инновации в современной морфологии : сб. тр. науч.-практич. конф. с междунар. участием, посвящ. 115-летию со дня рождения академика

Давида Моисеевича Голуба, Минск, 30 сент. 2016 г. В 2 т. / Мин. здрав. Респ. Бел., Бел. науч. о-во морфологов, Бел. гос. мед. ун-т; редкол.: М.И. Богданова [и др.]. – Минск, 2016. – Т. 1. – С. 233-236.

59. Малогабаритный спектрометр для исследования показателей микроциркуляторного русла / И.А. Сакович, В.А. Фираго, Д.Г. Терешко, М.А. Суровцев // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния, Минск, 11-12 мая 2017 г. / Мин. обр. Респ. Бел., Ин-т прикладных физич. проблем им. А.Н. Севченко БГУ; редкол.: В.И. Попечиц (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2017. – С. 130-132.

60. Фираго, В.А. Оптоволоконный спектрофотометр для регистрации спектров теплового излучения нагреваемых тел / И.А. Сакович, И.А. Сакович, А.Н. Сабчук // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния, Минск, 11-12 мая 2017 г. / Мин. обр. Респ. Бел., Ин-т прикладных физич. проблем им. А.Н. Севченко БГУ; редкол.: В.И. Попечиц (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2017. – С. 148-150.

61. Фираго, В.А. Спектрофотометр для определения спектра оптического излучения, формирующегося в области воздействия мощного лазерного излучения / В.А. Фираго, И.А. Сакович, А.Н. Собчук // Квантовая электроника: материалы XI Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 13-17 ноября 2017 г. / Мин. обр. Респ. Бел., БГУ, НИИ ПФП им. А.Н. Севченко БГУ, БРФФИ, Ин-т физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Научно-технич. ассоциация «Оптика и лазеры»; редкол.: М.М. Кугейко (председ.) [и др.]. – Минск, 2017. – С. 177-179.

62. Фираго, В.А. Определение температуры поверхности металлов в области воздействий мощного лазерного излучения / В.А. Фираго // Квантовая электроника: материалы XI Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 13-17 ноября 2017 г. / Мин. обр. Респ. Бел., БГУ, НИИ ПФП им. А.Н. Севченко БГУ, БРФФИ, Ин-т физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Научно-технич. ассоциация «Оптика и лазеры»; редкол.: М.М. Кугейко (председ.) [и др.]. – Минск, 2017. – С. 180-183.

63. Регистрация спектров диффузного рассеяния биологических тканей / В.А. Фираго, А.И. Кубарко, И.А. Сакович, М.А. Суровцев // Квантовая электроника: материалы XI Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 13-17 ноября 2017 г. / Мин. обр. Респ. Бел., БГУ, НИИ ПФП им. А.Н. Севченко БГУ, БРФФИ, Ин-т физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Научно-технич. ассоциация «Оптика и лазеры»; редкол.: М.М. Кугейко (председ.) [и др.]. – Минск, 2017. – С. 311-313.

64. Фираго, В.А. Определение внутреннего диаметра сосудов бульбарной конъюнктивы глаза / В.А. Фираго, Д.А. Смунев, А.И. Кубарко // Квантовая электроника: материалы XI Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 13-17 ноября 2017 г. / Мин. обр. Респ. Бел., БГУ, НИИ ПФП им. А.Н. Севченко БГУ, БРФФИ, Ин-т физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Научно-технич.

ассоциация «Оптика и лазеры»; редкол.: М.М. Кугейко (председ.) [и др.]. – Минск, 2017. – С. 314-317.

65. Фираго, В.А. Определение диаметра видимых сосудов бульбарной конъюнктивы глаза / В.А. Фираго, А.И. Кубарко // Медэлектроника-2018. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии: сб. науч. ст. XI Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 5-6 дек. 2018 г. / Мин. обр. Респ. Бел., Мин. здрав. Респ. Бел., БГУИР, БелМАПО. – Минск, 2018. – С. 98-102.

66. Firago, V. Radiometric calibration of fiber optic spectrophotometers / V. Firago, O. Hotra, I. Sakovich // Proc. of SPIE. – 2019. – Vol. 11045: 18th Conf. on Optical Fibers and Their Applications, Naleczow, Poland, 15 March 2019. – P. 1104516-1-6.

67. Оптические методы исследования кровеносных сосудов и газового состава гемоглобина / С.А. Лысенко, В.А. Фираго, А.И. Кубарко, Э.С. Кашицкий // BIG DATA and Advanced Analytics = BIG DATA и анализ высокого уровня : сб. материалов V Междунар. науч.-практич. конф., Минск, 13-14 марта 2019 г. В 2 ч. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; редкол. : В.А. Богущ [и др.]. – Минск, 2019. – Ч. 2. – С. 276-283.

68. Фираго, В.А. Определение спектрального коэффициента теплового излучения материалов при воздействии мощного лазерного излучения / В.А. Фираго, И.А. Сакович // Квантовая электроника: материалы XII Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 18-22 ноября 2019 г. / Мин. обр. Респ. Бел., БГУ, НИИ ПФП им. А.Н. Севченко БГУ, БРФФИ, Ин-т физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Научно-технич. ассоциация «Оптика и лазеры»; редкол.: М.М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2019. – С. 201-203.

69. Теория, методы, системы оптико-физических измерений в условиях априорной неопределенности / М.М. Кугейко, В.Л. Козлов, С.А. Лысенко, В.А. Фираго, Д.А. Смунёв // Квантовая электроника: материалы XII Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 18-22 ноября 2019 г. / Мин. обр. Респ. Бел., БГУ, НИИ ПФП им. А.Н. Севченко БГУ, БРФФИ, Ин-т физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Научно-технич. ассоциация «Оптика и лазеры»; редкол.: М.М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2019. – С. 205-210.

70. Сакович, И.А. Моделирование распределения температуры в зоне контакта пучка лазерного излучения с поверхностью металла / И.А. Сакович, В.А. Фираго // Квантовая электроника: материалы XII Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 18-22 ноября 2019 г. / Мин. обр. Респ. Бел., БГУ, НИИ ПФП им. А.Н. Севченко БГУ, БРФФИ, Ин-т физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Научно-технич. ассоциация «Оптика и лазеры»; редкол.: М.М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2019. – С. 223-225.

71. Сакович, И.А. Моделирование распределения температуры в объеме материала при воздействии лазерного излучения с высокой плотностью мощности / И.А. Сакович, В.А. Фираго // Компьютерные технологии и анализ данных

(СТДА'2020) : материалы II Междунар. науч.-практич. конф., Минск, 23-24 апр. 2020 г. / Бел. гос. ун-т, Иностран. производств. унитар. предпр-е «Иссофт Солюшен»; редкол.: В.В. Скакун (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2020. – С. 92-96.

72. Фираго, В.А. Экспериментальное исследование спектрально-пространственных свойств сильно рассеивающих сред / В.А. Фираго, К.И. Шулико // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния : материалы шестой Междунар. науч.-практич. конф., Минск, 20-21 мая 2021 г. / Мин. обр. Респ. Бел., НИИ ПФП им. А.Н. Севченко БГУ; редкол.: В.И. Попечиц (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2021. – С. 93-94.

73. Фираго, В.А. Повышение спектрального разрешения микроспектрометров на основе фотодиодных линеек фотоприемников / В.А. Фираго, Н.В. Левкович, К.И. Шулико // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния : материалы шестой Междунар. науч.-практич. конф., Минск, 20-21 мая 2021 г. / Мин. обр. Респ. Бел., НИИ ПФП им. А.Н. Севченко БГУ; редкол.: В.И. Попечиц (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2021. – С. 95-97.

74. Фираго, В.А. Портативная спектрофотометрическая техника / В.А. Фираго, К.И. Шулико, Н.В. Левкович // Квантовая электроника : материалы XIII Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 22-26 ноября 2021 г. / Мин. обр. Респ. Бел., БГУ, НИИ ПФП имени А.Н. Севченко БГУ, Ин-т физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси, БРФФИ; редкол.: М.М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2021. – С. 317-319.

75. Фираго, В.А. Применение диффузионного приближения при исследовании оптических свойств конденсированных мелкодисперсных сред / В.А. Фираго, К.И. Шулико // Квантовая электроника : материалы XIII Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 22-26 ноября 2021 г. / Мин. обр. Респ. Бел., БГУ, НИИ ПФП имени А.Н. Севченко БГУ, Ин-т физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси, БРФФИ; редкол.: М.М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2021. – С. 329-332.

76. Фираго, В.А. Высокотемпературная цифровая термографическая техника / В.А. Фираго // Квантовая электроника : материалы XIII Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 22-26 ноября 2021 г. / Мин. обр. Респ. Бел., БГУ, НИИ ПФП имени А.Н. Севченко БГУ, Ин-т физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси, БРФФИ; редкол.: М.М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2021. – С. 343-345.

77. Лысенко, С.А. Сравнительный анализ методов спектроскопии диффузного отражения биоткани / С.А. Лысенко, М.М. Кугейко, В.А. Фираго // Медэлектроника-2022. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии : сб. науч. ст. XIII Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 8-9 декабря 2022 г. / Мин. обр. Респ. Бел., Мин. здрав. Респ. Бел., БГУИР, БелМАПО. – Минск, 2022. – С. 29-32.

78. Фираго, В.А. Определение гидратации поверхностных тканей человека и параметров их микроциркуляторного русла системы кровообращения / В.А. Фираго, В.С. Радчикова // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния : материалы седьмой Международ. науч.-практич. конф., Минск, 18-19 мая 2023 г. / Мин. обр. Респ. Бел., НИИ ПФП им. А.Н. Севченко БГУ; редкол.: Ю.И. Дудчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2023. – С. 103-104.

79. Фираго, В.А. Градуировка мультиспектрального устройства для неинвазивной оценки сатурации артериальной крови коры головного мозга [Электронный ресурс] / В.А. Фираго, А.В. Лебедевский // Квантовая электроника : материалы XIV Международ. науч.-технич. конф., Минск, 21-23 ноября 2023 г. / БГУ, НИИ ПФП им. А.Н. Севченко БГУ, Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, БРФФИ; редкол.: М.М. Кугейко (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2023. – С. 516-519. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

80. Фираго, В.А. Особенности применения спектроскопии диффузного отражения в задачах определения оптических свойств поверхностных биотканей [Электронный ресурс] / В.А. Фираго // Квантовая электроника : материалы XIV Международ. науч.-технич. конф., Минск, 21-23 ноября 2023 г. / БГУ, НИИ ПФП им. А.Н. Севченко БГУ, Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, БРФФИ; редкол.: М.М. Кугейко (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2023. – С. 526-529. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

81. Фираго, В.А. Потенциальные возможности спектроскопии при оценке состояния артериальных сосудов микроциркуляторного русла [Электронный ресурс] / В.А. Фираго // Квантовая электроника : материалы XIV Международ. науч.-технич. конф., Минск, 21-23 ноября 2023 г. / БГУ, НИИ ПФП им. А.Н. Севченко БГУ, Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, БРФФИ; редкол.: М.М. Кугейко (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2023. – С. 530-532. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

82. Лебедевский, А.В. Устройство регистрации светового излучения, рассеиваемого корой головного мозга, в нескольких участках спектра [Электронный ресурс] / А.В. Лебедевский, В.А. Фираго // Квантовая электроника : материалы XIV Международ. науч.-технич. конф., Минск, 21-23 ноября 2023 г. / БГУ, НИИ ПФП им. А.Н. Севченко БГУ, Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, БРФФИ; редкол.: М.М. Кугейко (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2023. – С. 533-535. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

83. Фираго, В.А. Моделирование механизмов сосудистой ауторегуляции [Электронный ресурс] / В.А. Фираго, В.С. Радчикова // Квантовая электроника : материалы XIV Международ. науч.-технич. конф., Минск, 21-23 ноября 2023 г. / БГУ, НИИ ПФП им. А.Н. Севченко БГУ, Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, БРФФИ; редкол.: М.М. Кугейко (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2023. – С. 536-540. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

84. Непрерывный спектральный контроль лазерных процессов модификации прозрачных материалов / В.А. Фираго, Н.В. Левкович, О.Р. Людчик, С.Г. Славинский // Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 15-й Международ. конф., Минск, 26-29 сент. 2023 г. / Мин. обр. Респ. Бел., БГУ, НАН Беларуси, БРФФИ; редкол.: В.В. Углов (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2023. – С. 118-120.

Тезисы

85. Фираго, В.А. Лазерный измеритель влажности агрессивных аэродисперсных сред / В.А. Фираго, М.Н. Ходинский, И.С. Манак // Квантовая электроника : материалы IV Международ. науч.-технич. конф., Минск, 18-21 ноября 2002 г. / Мин. обр. Респ. Бел., БГУ, НИИ ПФП им. А.Н. Севченко БГУ, Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, БРФФИ, Бел. респ. координац. центр науч.-исслед. работы студентов, Laser and Electro-Optic Society (IEEE LEOS); редкол.: А.А. Афоненко [и др.]. – Минск, 2002. – С. 162.

86. Особенности применения импульсных квантово-каскадных лазеров в задачах определения концентрации газов / В.А. Фираго, В.М. Стецик, В.С. Старовойтов, Е.П. Кроликов, А.Н. Оберган // Квантовая электроника : материалы VII Международ. науч.-технич. конф., Минск, 13-16 окт. 2008 г. / Мин. обр. Респ. Бел., БГУ, НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ, БРФФИ, Ин-т физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси; редкол.: И.С. Манак (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2008. – С. 90.

87. Фираго, В.А. Контроль состава аэродисперсных сред средствами лазерной и светодиодной абсорбционной спектроскопии / В.А. Фираго, И.С. Манак, В. Вуйцик // Квантовая электроника : материалы VII Международ. науч.-технич. конф., Минск, 13-16 окт. 2008 г. / Мин. обр. Респ. Бел., БГУ, НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ, БРФФИ, Ин-т физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси; редкол.: И.С. Манак (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2008. – С. 124.

88. Сеньков, А.Г. Возможности трехспектральной пирометрии при контроле температуры металлов в производственных условиях / А.Г. Сеньков, В.А. Фираго // Квантовая электроника : материалы VII Международ. науч.-технич. конф., Минск, 13-16 окт. 2008 г. / Мин. обр. Респ. Бел., БГУ, НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ, БРФФИ, Ин-т физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси; редкол.: И.С. Манак (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2008. – С. 128.

89. Small-sized laser-based sensors of gas leaks / V.A. Firago, A.V. Gorelik, A.L. Ulasevich, W. Wojcik, V.S. Starovoitov // 6th Internat. Conf. “New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation (NEET’2009)”, Zakopane, Poland, June 23-26 2009 / Lublin University of Technology. – Lublin, 2009. – P. 43.

90. Firago, V.A. Pyrometry of hot metals with nonuniform and changing emissivity / V.A. Firago, A.G. Sencov, W. Wojcik // 6th Internat. Conf. “New

Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation (NEET'2009)", Zakopane, Poland, June 23-26 2009 / Lublin University of Technology. – Lublin, 2009. – P. 64.

91. Фотоакустическое детектирование газа с использованием импульсно-периодического квантово-каскадного лазера, генерирующего в области длин волн 5,3 мкм / А.В. Горелик, А.Л. Уласевич, М.О. Скробов, В.А. Фираго, В.С. Старовойтов // Квантовая электроника : материалы VIII Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 22-25 ноября 2010 г. / Мин. обр. Респ. Бел., БГУ, НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ, БРФФИ, Ин-т физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси; редкол.: М.М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2010. – С. 138.

92. Пути повышения чувствительности лазерных оптико-акустических сенсоров состава слабых газовых потоков / В.А. Фираго, В.С. Старовойтов, В. Вуйцик, М.О. Скробов // Квантовая электроника : материалы VIII Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 22-25 ноября 2010 г. / Мин. обр. Респ. Бел., БГУ, НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ, БРФФИ, Ин-т физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси; редкол.: М.М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2010. – С. 140.

93. Снижение неопределенности измерения температуры металлов в производственных условиях / В.А. Фираго, А.Г. Сеньков, Ю.В. Чорба, Цзян Цяньцань // Квантовая электроника : материалы VIII Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 22-25 ноября 2010 г. / Мин. обр. Респ. Бел., БГУ, НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ, БРФФИ, Ин-т физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси; редкол.: М.М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2010. – С. 164.

94. Methods and optoelectronic means for human eye retina metabolism estimation / A.I. Kubarko, S.A. Lisenko, A.A. Skobliakov, V.A. Firago, M.M. Kugeiko, O. Hotra // 7th Internat. Conf. "New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation (NEET'2011)", Zakopane, Poland, June 28 – July 1 2011 / Lublin University of Technology; ed. by T.N. Kołtunowicz. – Lublin, 2011. – P. 111.

95. Oculographic means for human eye retina functional state estimation / A.A. Skobiakov, A.I. Kubarko, V.A. Firago, I.S. Gurski, O. Hotra // 7th Internat. Conf. "New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation (NEET'2011)", Zakopane, Poland, June 28 – July 1 2011 / Lublin University of Technology; ed. by T.N. Kołtunowicz. – Lublin, 2011. – P. 112.

96. Pyrometric methods of measuring the true temperature of heated metals / V.A. Firago, A.G. Sencov, W. Wojcik, Y.V. Chorba // 7th Internat. Conf. "New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation (NEET'2011)", Zakopane, Poland, June 28 – July 1 2011 / Lublin University of Technology; ed. by T.N. Kołtunowicz. – Lublin, 2011. – P. 116.

97. Application of a current-modulated laser diode in combination with miniaturized resonant photoacoustic cells for spectroscopic measurements in gases [Electronic resource] / A.L. Ulasevich, A.V. Gorelik, A.A. Kouzmouk,

V.A. Firago, V.S. Starovoitov // 8th International Conference on Tunable Diode Laser Spectroscopy (TDLS 2011), Zermatt, Switzerland, July 11-15, 2011 / European Office of Aerospace Research and Development, Air Force Office of Scientific Research Laboratory. – P. 87. – Mode of access : http://tdls.gpi.ru/abstracts/TDLS2011_AbsBook.pdf. – Date of access : 08.08.2024.

98. Firago, V. Pyrometric methods of the true temperature determination at the thermal radiation registration in three spectral regions / V. Firago, I. Volkova // 8th International Conference “NEET’2013”. New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation, Zakopane, Poland, June 18-21, 2013 / Lublin University of Technology; ed. by T.N. Kołtunowicz. – Lublin, 2013. – P. 139.

99. Processing algorithms of resting biopotential records for tracking eye movements / V. Firago, A. Kubarko, O. Hotra, I. Volkova // 8th International Conference “NEET’2013”. New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation, Zakopane, Poland, June 18-21, 2013 / Lublin University of Technology; ed. by T.N. Kołtunowicz. – Lublin, 2013. – P. 140.

100. Firago, V. High temperature thermal imager based on digital video camera mvBlueFOX 200wc / V. Firago, W. Wojcik, M. Dzhunisbekov // 8th International Conference “NEET’2013”. New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation, Zakopane, Poland, June 18-21, 2013 / Lublin University of Technology; ed. by T.N. Kołtunowicz. – Lublin, 2013. – P. 141.

101. Kubarko, A. Determination of light and colour-contrast sensitivity of the retina / A. Kubarko, V. Firago, O. Hotra // 8th International Conference “NEET’2013”. New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation, Zakopane, Poland, June 18-21, 2013 / Lublin University of Technology; ed. by T.N. Kołtunowicz. – Lublin, 2013. – P. 142.

102. Firago, V. High-temperature three-coloured thermal imager / V. Firago, W. Wójcik // XIII Internat. Scientific Conf. “Optical Sensors and Electronic Sensors”, Lodz, Poland, June 22-25 2014 / Department of Semiconductor and Optoelectronics Devices, Lodz University of Technology, Poland. – Lodz, Poland, 2014. – P. 26.

103. Determination of Blood Flow Velocity in Sclera Vessels / V. Firago, A. Kubarko, O. Hotra, I. Volkova // 9th International Conference “NEET’2015”. New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation, Zakopane, Poland, June 23-26, 2015 / Lublin University of Technology; ed. by T.N. Kołtunowicz. – Lublin, 2015. – P. 110.

104. Firago, V. Decrease of the temperature measurement uncertainty in tricoloured thermography / V. Firago, W. Wójcik, I. Volkova // 9th International Conference “NEET’2015”. New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation, Zakopane, Poland, June 23-26, 2015 / Lublin University of Technology; ed. by T.N. Kołtunowicz. – Lublin, 2015. – P. 117.

105. Фираго, В.А. Функциональные возможности высокотемпературного термографа ИТ-3СМ / В.А. Фираго, В.Ф. Шевцов // Тезисы докладов и сообще-

ний XV Минского междунар. форума по тепло- и массообмену, Минск, 23-26 мая 2016 г. / Ин-т тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси; редкол.: О.Г. Пенязьков [и др.]. – Минск, 2016. – Т. 3. – С. 60-62.

106. Determination of the Cross-Sectional Area Distribution of Visible Vessels of the Bulbar Conjunctiva / V. Firago, O. Hotra, A. Kubarko, I. Volkova // 10th Internat. Conf. “NEET 2017. New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation”, Zakopane, Poland, June 27-30 2017. - P. 87.

107. Фираго, В.А. Оптические методы исследования параметров микроциркуляторного русла сосудистой системы коры головного мозга / В.А. Фираго, К.И. Шулико // Квантовая электроника: материалы XII Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 18-22 ноября 2019 г. / Мин. обр. Респ. Бел., БГУ, НИИ ПФП им. А.Н. Севченко БГУ, БРФФИ, Ин-т физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Научно-технич. ассоциация «Оптика и лазеры»; редкол.: М.М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2019. – С. 293-294. – Режим доступа : <https://elib.bsu.by/handle/123456789/235935>. – Дата доступа : 08.08.2024.

108. The impact of venous outflow on the reaction of tissue small vessels in the conditions of local hemodynamic disturbances [Electronic resource] / E. Bur, A. Kubarko, N. Hayashida, J. Takahachi, V. Firago, I. Stetsko, I. Sakovich // How can we communicate possible health effects in radiological emergency? : abstracts of the 4th Internat. Symp. of the Network-type Joint Usage/Research Center for Radiation Disaster Medical Science, Hiroshima, Febr. 12 2020 / Hiroshima University. – Mode of access : <http://home.hiroshima-u.ac.jp/housai/>. – Date of access : 08.08.2024.

Патенты

109. Способ измерения дымности выхлопных газов и устройство для его осуществления : пат. ВУ 7721 С1 / М.М. Кугейко, В.А. Фираго, С.Н. Дрозд. – Оpubл. 28.02.2006.

110. Оптико-акустический сенсор : пат. ВУ 12411 С1 / В.А. Фираго, В.М. Стецик, А.Л. Полонецкий, В.С. Старовойтов. – Оpubл. 30.10.2009.

111. Пирометрический способ определения термодинамической температуры металла и устройство для его осуществления : пат. ВУ 12538 С1 / В.А. Фираго, А.Г. Сеньков, В.К. Кононенко, Ф. Христал. – Оpubл. 30.10.2009.

: пат. RU 2 381 463 С1 / В.Ф. Фираго, А.Г. Сеньков, В.К. Кононенко, Ф. Христал. – Оpubл. 10.02.2010.

112. Оптико-акустический газоанализатор : пат. ВУ 13951 / В.С. Старовойтов, А.В. Горелик, В.А. Фираго, Ф.Н. Никонович, Н.С. Казак, В.М. Стецик. – Оpubл. 30.12.2010.

113. Способ пирометрического определения температурного поля поверхности нагретого тела и устройство для его осуществления : пат. ВУ 13990 С1 / В.А. Фираго, А.Г. Сеньков. – Оpubл. 28.02.2011.

114. Способ определения максимальной температуры неравномерно нагретой поверхности металла : пат. ВУ 13991 С1 / В.А. Фираго, А.Г. Сеньков. – Оpubл. 28.02.2011.

115. Пирометрический способ определения термодинамической температуры тела : пат. ВУ 14292 С1 / В.А. Фираго, А.Г. Сеньков. – Оpubл. 30.04.2011.

116. Пирометрический способ определения термодинамической температуры тела : пат. ВУ 14293 С1 / В.А. Фираго, А.Г. Сеньков. – Оpubл. 30.04.2011.

117. Способ определения концентраций хромофоров биологической ткани : пат. RU 2 506 567 С1 / С.А. Лысенко, М.М. Кугейко, В.А. Фираго, А.И. Кубарко. – Оpubл. 10.02.2014.

118. Способ определения температурного поля поверхности нагретого тела с неизвестным коэффициентом теплового излучения : пат. Евразийское патентное ведомство 202100055 А1 / В.А. Фираго. – Оpubл. 14.12.2020.

119. Способ непрерывного контроля воздействия мощного лазерного поля на обрабатываемый материал и устройство для его осуществления : пат. Евразийское патентное ведомство 042697 В1 / В.А. Фираго, А.Н. Собчук, О.Г. Девойно, А.С. Лапковский, В. Вуйцик, А. Смолярж. – Оpubл. 15.03.2023.

120. Способ определения спектральных показателей приведенного рассеяния и поглощения светового излучения мелкодисперсными материалами и устройство для его осуществления : пат. Евразийское патентное ведомство 202292115 А1 / В.А. Фираго, К.И. Шулико. – Оpubл. 25.05.2023.

РЕЗЮМЕ

Фираго Владимир Александрович

Оптическая и термографическая диагностика рассеивающих сред в условиях информационной неопределенности

Ключевые слова: методы оптической диагностики, поля теплового излучения, спектроскопия рассеивающих сред, обратные задачи, диффузное отражение биотканей, параметры микроциркуляторного русла.

Объекты исследования: поля теплового излучения микро- и макрообъектов (при температурном контроле технологических процессов и лазерной обработке материалов), газовые и аэродисперсные рассеивающие среды, биообъекты (поверхностные биоткани, сосуды микроциркуляторного русла).

Предмет исследования: процессы излучения, рассеяния, поглощения, отражения и переноса излучения в указанных объектах и средах; параметры и характеристики полей излучения, формируемых при протекании рассматриваемых процессов и регистрируемых в виде спектров и их пространственных и временных распределений; взаимосвязи регистрируемых характеристик полей излучения с параметрами объектов.

Цель исследования: создание оптических методов оперативной диагностики и контроля технологических процессов и рассеивающих сред (газовых, аэродисперсных и биообъектов) в условиях воздействия сложно контролируемых сопутствующих факторов и недостаточности априорной информации.

Методы исследования: методы теории формирования и регистрации теплового излучения, переноса излучения в рассеивающих средах, спектроскопии диффузного отражения, численные методы решения обратных задач и оптимизации.

Полученные результаты и их новизна состоят в развитии методов оптической диагностики сложных объектов и сред в условиях влияния трудно контролируемых сопутствующих факторов и недостаточности необходимой априорной информации, *которые позволяют повысить* точность и эксплуатационную надежность устройств термографии разного спектрального диапазона и контроля высокотемпературных лазерных процессов, лазерной и светодиодной техники непрерывного контроля сложных агрессивных газовых и аэродисперсных сред, а также определения параметров микроциркуляторного русла биотканей.

Область применения и рекомендации по использованию. Полученные результаты могут использоваться при создании: цифровой термографической и спектральной аппаратуры, предназначенной для определения температуры тел в сложных условиях измерений; лазерных и светодиодных приборов трассового и локального контроля аэродисперсных сред; медицинских диагностических систем для оперативной неинвазивной оценки гидратации и основных параметров микроциркуляторного русла кровеносной системы тканей человека.

РЭЗІЮМЭ

Фірага Уладзімір Аляксандравіч

Аптычная і тэрмаграфічная дыягностыка расейваючых асяроддзяў ва ўмовах інфармацыйнай нявызначанасці

Ключавыя словы: метады аптычнай дыягностыкі, палі цеплавога выпраменьвання, спектраскапія расейваючых асяроддзяў, зваротныя задачы, дыфузнае адлюстраванне біятканіны, параметры мікрацыркулятарнага рэчышча.

Аб'екты даследавання: палі цеплавога выпраменьвання мікра- і макрааб'ектаў (пры тэмпературным кантролі тэхналагічных працэсаў і лазернай апрацоўцы матэрыялаў), газавыя і аэрадысперсныя расейваючыя асяроддзі, біяаб'екты (павярхоўныя біятканіны, параметры сасудаў мікрацыркулятарнага рэчышча).

Прадмет даследавання: працэсы выпраменьвання, расейвання, паглынання, адлюстравання і пераносу выпраменьвання ў адзначаных аб'ектах і асяроддзях; параметры і характарыстыкі палёў выпраменьвання, якія ўзнікаюць пры праходжанні разглядаемых працэсаў, якія рэгіструюцца ў выглядзе спектраў і іх прасторавых і часавых размеркаванняў; ўзаемасувязі атрымоўваных характарыстык палёў выпраменьвання з параметрамі аб'ектаў.

Мэта даследавання: стварэнне аптычных метадаў аператыўнай дыягностыкі і кантролю тэхналагічных працэсаў і расейваючых асяроддзяў (газавых, аэрадысперсных і біяаб'ектаў) ва ўмовах уздзеяння складана кантраляваных спадарожных фактараў і недастатковасці апрыёрнай інфармацыі.

Метады даследавання: метады тэорыі фармавання і рэгістрацыі цеплавога выпраменьвання, пераносу выпраменьвання ў расейвалых асяроддзях, спектраскапіі дыфузнага адлюстравання, лікавыя метады рашэння зваротных задач і аптымізацыі.

Атрыманя вынікі і іх навізна складаюцца ў развіцці метадаў аптычнай дыягностыкі складаных аб'ектаў і асяроддзяў ва ўмовах уплыву цяжка кантраляваных спадарожных фактараў і недастатковасці неабходнай апрыёрнай інфармацыі, якія дазваляюць палепшыць дакладнасць і эксплуатацыйную надзейнасць прылад тэрмаграфіі рознага спектральнага дыяпазону і кантролю высокатэмпературных лазерных працэсаў, лазерных і святлодыёдных прылад бесперапыннага кантролю складаных агрэсіўных газавых і аэрадысперсных асяроддзяў, а таксама вызначэння параметраў мікрацыркулятарнага рэчышча біятканіны.

Вобласць ужывання і рэкамендацыі па выкарыстанні. Атрыманя рэзультаты могуць выкарыстоўвацца пры стварэнні: лічбавай тэрмаграфічнай і спектральнай апаратуры, прызначанай для вызначэння тэмпературы цел у складаных умовах вымярэнняў; лазерных і святлодыёдных прыбораў трасавага і лакальнага кантролю аэрадысперсных асяроддзяў; медыцынскіх дыягнастычных сістэм для аператыўнай неінвазіўнай ацэнкі гідратацыі і асноўных параметраў мікрацыркулятарнага рэчышча крывяноснай сістэмы тканін чалавека.

SUMMARY

Firago Vladimir Alexandrovich

Optical and thermographic diagnostics of scattering media under conditions of information uncertainty

Keywords: methods of optical diagnostics, thermal radiation fields, spectroscopy of scattering media, inverse problems, diffuse reflection of biotissues, microcirculation parameters.

Objects of research: thermal radiation fields of micro- and macroobjects (at temperature control of technological processes and laser processing of materials), gas and aerodisperse scattering media, bioobjects (surface biotissues, parameters of microcirculatory vessels).

Subject of the study: processes of radiation, scattering, absorption, reflection and transfer of radiation in these objects and media; parameters and characteristics of radiation fields formed during the processes under consideration and registered in the form of spectra and their spatial and temporal distributions; interrelations of the registered characteristics of radiation fields with the parameters of objects.

Research objective: creation of optical methods for on-line diagnostics and control of technological processes and scattering media (gas, aerodisperse and bio-objects) under the influence of complexly controlled accompanying factors and insufficient a priori information.

Research methods: methods of the theory of formation and registration of thermal radiation, radiation transfer in scattering media, diffuse reflection spectroscopy, numerical methods for solving inverse problems and optimization.

The obtained results and their novelty consist in the development of methods of optical diagnostics of complex objects and environments under the influence of difficult to control related factors and insufficiency of necessary a priori information, which allow to increase the accuracy and operational reliability of thermography devices of different spectral range and control of high-temperature laser processes, laser and LED technology of continuous control of complex aggressive gas and aerodisperse environments, as well as determination of microcirculation parameters of living tissues.

Scope of application and recommendations for use. The obtained results can be used in creation of: digital thermographic and spectral equipment intended for determination of body temperature in complicated conditions of measurements; laser and LED devices for trace and local control of aerodisperse media; medical diagnostic systems for operative non-invasive estimation of hydration and basic parameters of microcirculation of human tissues.



Подписано в печать 07.10.2024. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.
Цифровая печать. Усл. печ. л. 3,02. Уч.-изд. л. 3,25.
Тираж 75 экз. Заказ 228.

Отпечатано с оригинала-макета заказчика
в республиканском унитарном предприятии
«Издательский центр Белорусского государственного университета».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 2/63 от 19.03.2014.
Ул. Красноармейская, 6, 220030, Минск.