

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 004.942, 535.36, 612.15

АБРАМОВИЧ
Николай Дмитриевич

**СИСТЕМА ОЦЕНКИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ КРОВОТОКА
В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ КОЖНЫХ ПОКРОВОВ
ПО СПЕКЛ-СТРУКТУРЕ МНОГОКРАТНО РАССЕЯННОГО
ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.11.17 – Приборы, системы и изделия
медицинского назначения

Минск 2020

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель **Дик Сергей Константинович**, кандидат физико-математических наук, доцент, депутат Палаты Представителей Национального собрания Республики Беларусь VII созыва

Официальные оппоненты: **Мухуров Николай Иванович**, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией микро- и наносенсорики Государственного научно-производственного объединения «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»

Боброва Наталья Леонидовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Микропроцессорных систем и сетей» Института информационных технологий учреждения образования «Белорусский государственный университета информатики и радиоэлектроники».

Оппонирующая организация учреждение образования «Белорусский государственный университет»

Защита состоится 19 ноября 2020 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.06 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, e-mail: dissovet@bsuir.by, тел. 293-89-89.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан « 14 » октября 2020 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций
кандидат технических наук, доцент



О. В. Бойправ

ВВЕДЕНИЕ

Нормальное функционирование органов и организма в целом определяется состоянием поверхностного кровотока в коже человека. Оценка параметров микроциркуляции поверхностных биотканей является важнейшей задачей современной медицины в части диагностики целого ряда заболеваний сердечно-сосудистой и дыхательной систем, болезней кожи и т.д.

В настоящее время установлены некоторые особенности микроциркуляции в кожных покровах, которые можно контролировать с помощью когерентного оптического излучения. На основе изучения закономерностей, связанных с взаимодействием когерентного оптического излучения с кожными покровами, в зависимости от изменения контраста спекл-пятен от биофизических параметров кожи, можно значительно повысить точность оценки состояния и выявить нарушения микроциркуляции в кожных покровах при патологии различных органов человека (заболевания нервной системы, транзиторная ишемическая атака, кожные заболевания и т.д.). Для оценки микроциркуляции существует ряд средств медицинского назначения, которые позволяют оценить параметры функционального состояния кровотока (аппарат спектрофотометрии «Спектротест», лазерные доплеровские флоуметры, лазерный анализатор микроциркуляций крови «ЛАКК», капилляроскопы и т.д.), однако погрешность контроля при этом составляет от 30 до 50 %, что обусловлено неточностью установки положения осветительного датчика, отсутствием контроля давления осветительного датчика на кожу, упрощенной физико-математической моделью процесса распространения оптического излучения в коже. При этом результат измерения интерпретируется человеком, что приводит к субъективности в оценке функционального состояния кровотока.

В связи с этим разработка усовершенствованной системы оценки функционального состояния микроциркуляции кровотока на основе расширенной математической модели распространения оптического излучения в коже является актуальной научно-практической задачей, решение которой важно при создании диагностических систем нового поколения для лечебно-профилактических учреждений Республики Беларусь, прежде всего для клиницистов-практиков.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Тема диссертационной работы утверждена приказом ректора учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» № 536-о от 06.12.2013 г. и соответствует разделу 2 «Биологические, медицинские, фармацевтические и химические технологии и производства», пункту «Медицинское оборудование», а также разделу 4

«Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы», пункту «Микро-, опто- и СВЧ электроника, фотоника, микросенсорика» перечня приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности Республики Беларусь на 2021 – 2025 годы, утвержденного Указом Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 г. № 156; приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь: пункту 4.2 «Диагностика и терапия заболеваний» государственной программы научных исследований «Фундаментальные и прикладные науки – медицине» и пункту 6.1 «Фотоника» государственной программы научных исследований «Фотоника, опто- и микроэлектроника», а также пункту 4 «Медицина и фармация» и пункту 6 «Электроника и фотоника» перечня приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2016 – 2020 годы, утвержденного Постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 190 от 12.03.2015 г.

Основные результаты, представленные в диссертационной работе, получены в рамках НИР «Разработка методов управляемого воздействия света на биологические ткани применительно к задачам фототерапии» по договору с БРФФИ № Ф13МЛД018 от 16 апреля 2013 г., НИР «Разработка методики определения биофизических параметров ткани по характеристикам многократно рассеянного света» по гранту Министерства образования Республики Беларусь 2015 г. для докторантов, аспирантов, соискателей и студентов, ГБЦ № 15-3080.

Цель и задачи исследования

Целью настоящей диссертационной работы является установление закономерностей изменения контраста спекл-пятен на поверхности кожи, формируемого в процессе рассеяния оптического излучения кожей, от биофизических параметров кожных покровов (степени оксигенации и объемной концентрации кровеносных сосудов в слое дермы, объемной концентрации меланина в эпидермисе) и структурных параметров кожи (толщины эпидермиса, дермы), а также разработка расширенной математической модели распространения оптического излучения в поверхностных слоях кожных покровов человека (при движении кровотока) в диапазоне длин волн от 400 до 850 нм, позволяющей проводить оценку функционального состояния кровотока в поверхностных слоях кожных покровов.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе требовалось решить следующие задачи:

1. Установить взаимосвязи между биофизическими параметрами кожных покровов (объемной концентрацией меланина в эпидермисе, степенью оксигенации и объемной концентрацией кровеносных сосудов в слое дермы) и параметрами спекл-структуры (контрастом и размерами спекл-пятен) многократно рассеянного оптического излучения.

2. Разработать методики определения биофизических параметров кожи (степени оксигенации и объемной концентрации кровеносных сосудов в слое

дермы) по контрасту интерференционной картины кожи.

3. Разработать математическую модель распространения когерентного излучения в поверхностных слоях кожных покровов в широком диапазоне длин волн (от 400 до 850 нм).

4. Установить параметры оценки функционального состояния кровотока в поверхностных слоях кожи (на тыльной стороне ладони, на лице) для оценки состояния и выявления нарушения микроциркуляции в кожных покровах в норме и при патологии нервной системы.

5. Разработать систему оценки функционального состояния кровотока в поверхностных слоях кожных покровов (на тыльной стороне ладони, на лице), на основе расширенной математической модели распространения когерентного излучения в поверхностных слоях кожных покровов в диапазоне длин волн от 400 до 850 нм.

Научная новизна

1. Установлена новая обратно пропорциональная зависимость контраста спекл-пятен (от 0,15 до 0,25) от степени оксигенации крови (от 50 % до 97 %), с использованием которой разработана новая методика измерения степени оксигенации крови (патент № 2622997 Российской Федерации) при регистрации интенсивности когерентного излучения (для длин волн от 600 до 640 нм), пропущенного слоем дермы толщиной от 1 до 5 мм, при величине объемной концентрации кровеносных сосудов 4 и 8 %, позволяющая уменьшить ошибку измерения степени оксигенации крови в 2 раза при диагностике заболеваний кожи.

2. Установлена новая прямо пропорциональная зависимость контраста спекл-пятен (от 0,15 до 0,03) от объемной концентрации капилляров (от 2 % до 10 %) при концентрации меланина в эпидермисе 4 %, с использованием которой разработана новая методика измерения объемной концентрации капилляров в слое дермы, при регистрации интенсивности когерентного излучения (для длин волн 500 и 530 нм), пропущенного слоем дермы толщиной от 1 до 5 мм, в изобестической точке, обеспечивающая снижение ошибки измерения объемной концентрации капилляров в слое дермы в 2 раза, что позволяет проводить более точную оценку состояния микроциркуляции в кожных покровах в норме и при патологии нервной системы.

3. Установлены новые обратно пропорциональные зависимости (построенные в полулогарифмическом масштабе) временной автокорреляционной функции флуктуаций интенсивности спекл-поля при отраженном излучении от времени между двумя рассеивателями в условиях различной динамики кровотока в эксперименте при компрессии плечевой артерии для диаметров кровеносных сосудов 100 и 200 мкм и длине волны когерентного излучения 628 нм. Установлено, что увеличение объемной скорости кровотока в сосудах приводит к увеличению наклона графика временной автокорреляционной функции флуктуаций интенсивности спекл-поля, что позволяет проводить оценку тонуса кровеносных сосудов.

Положения, выносимые на защиту

1. Математическая модель процесса распространения оптического излучения в диапазоне длин волн от 400 до 850 нм в кожном покрове человека, учитывающая оптическую анизотропию кожного покрова от -1 до 1 , диаметр (от 6 до 9 мкм) и форму (сферу, диск) эритроцитов в слое дермы, артериальное давление крови в плечевой артерии в диапазоне от 90/60 до 195/130 мм.рт.ст., концентрацию белков плазмы в крови (α_1 , α_2 , β_1 , β_2 , γ -глобулинов и фибриногена, г/л), реологические свойства течения крови при диаметре кровеносных сосудов от 4,5 до 500 мкм в поверхностных слоях кожи, температуру кожных покровов от $+35$ до $+41$ °С, позволяющая получить распределение когерентной и флуктуирующей составляющих рассеянного в кожных покровах светового поля, сопоставить параметры спекл-поля от различных характеристик кожных покровов для селективного воздействия когерентного оптического излучения на кожу.

2. Зависимости контраста спекл-пятен от биофизических параметров кожных покровов: степени оксигенации крови от 40 % до 97 % в слое дермы, объемной концентрации меланина в эпидермисе от 2 до 16 % и объемной концентрации кровеносных капилляров в слое дермы от 2 до 16 % – при увеличении которых происходит увеличение показателя поглощения слоев кожи, увеличение концентрации гемоглобина в крови и снижение некогерентного фона, приводящее к снижению контраста спекл-пятен на поверхности кожи в пределах от 0,6 до 0,1, формируемого в процессе рассеяния когерентного оптического излучения между слоями кожи, что позволяет с большей точностью оценить состояние микроциркуляции в кожных покровах в норме и при патологии.

3. Система оценки функционального состояния кровотока в поверхностных слоях кожных покровов, разработанная на основе усовершенствованной математической модели процесса распространения оптического излучения в диапазоне длин волн от 400 до 850 нм в кожном покрове человека, позволяющая сократить время обследования пациента на 20 минут (с 80 до 60 минут) и увеличить точность измерения параметров микроциркуляции на 10 % (линейной от 0,1 до 4,0 см/с и объемной скоростей кровотока от 0,01 до 0,06 мл/мин) для выявления нарушений кровотока в поверхностных слоях кожи в норме и при патологии нервной системы за счет учета интегральных параметров (мощности спектра, средней частоты спектра, среднеквадратической скорости движущихся частиц) оценки состояния кровотока в условиях действия различных вазоактивных (влияющих на тонус и диаметр просвета кровеносных сосудов) факторов (артериального давления в диапазоне от 90/60 до 195/130 мм.рт.ст., температуры кожных покровов от $+35$ до $+41$ °С и т.д.).

Личный вклад соискателя ученой степени

Все основные результаты, изложенные в диссертационной работе, получены соискателем самостоятельно. В совместно опубликованных работах автору принадлежит разработка теоретических моделей и методик расчета, проведение моделирования и экспериментальных исследований, а также обработка, сопоставление данных математической модели с экспериментальными данными, полученными методами спекл-метрии и ультразвуковой доплеровской флоуметрии, анализ и интерпретация полученных результатов, формулировка выводов. Определение целей и постановка задач исследования, обсуждение полученных результатов проводились совместно с научным руководителем, кандидатом физико-математических наук, доцентом С. К. Диком, который также принимал участие в планировании работ. Измерения спектральных характеристик кровотока, полученных методами спекл-метрии (с помощью прибора «Speckle-Scan») и ультразвуковой доплеровской флоуметрии (с помощью прибора «Минимакс Допплер-К»), выполнялись совместно с ведущим научным сотрудником лаборатории клинической патофизиологии нервной системы ГУ «РНПЦ неврологии и нейрохирургии», кандидатом медицинских наук, доцентом Л. А. Василевской. Вклад соавторов В. В. Баруна, А. П. Иванова, В. Г. Петрука, С. М. Кватернюка, И. И. Хлудеева, А. С. Тереха, В. П. Шонти и А. П. Серякова связан с оказанием помощи в проведении исследований и обсуждении результатов.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и симпозиумах: V Троицкая конференция «Медицинская физика и инновации в медицине» (Троицк – Москва, Российская Федерация, 2012); 2nd International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering, (Кишинев, Республика Молдова, 2013); International Conference on Lasers, Applications, and Technologies «ICONO/LAT – 2013» (Москва, Российская Федерация, 2013); Международная научно-техническая конференция, приуроченная к 50-летию МРТИ–БГУИР (Минск, 2014); 2nd Regional workshop on Health Technology Management, (Кишинев, Республика Молдова, 2014); VI Троицкая конференция «Медицинская физика и инновации в медицине» (Троицк – Москва, Российская Федерация, 2014); Международная научная конференция молодых ученых «Молодежь в науке–2014» (Минск, 2014); 8th International Conference on «Microelectronics and Computer Science»: The 50th anniversary of Technical University of Moldova (Кишинев, Республика Молдова, 2014); VIII Международная научно-техническая конференция «Средства

медицинской электроники и новые медицинские технологии – МедЭлектроника–2014» (Минск, 2014); III Всероссийский конгресс молодых ученых (Санкт-Петербург, Российская Федерация, 2014); 5th IEEE International Conference on E-Health and Bioengineering–ЕНВ 2015, (Яссы, Румыния, 2015); VI Троицкая конференция «Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине 2015» (Троицк, Российская Федерация, 2015); XI Международная научно-техническая конференция «Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии – МедЭлектроника–2018» (Минск, 2018).

Результаты, полученные в рамках диссертационной работы, внедрены в лаборатории клинической патофизиологии нервной системы в ГУ «РНПЦ неврологии и нейрохирургии», Республика Беларусь, в 2020 г. в клиническую практику; на кафедре экологии и экологической безопасности Института экологической безопасности и мониторинга окружающей среды Винницкого национального технического университета, Республика Украина в 2019 г. в научно-исследовательскую работу 16ДЗ90 «Разроблення заходів екологічної безпеки у сфері поводження небезпечними відходами та дослідження їх впливу на водні об'єкти з використанням біосенсорних технологій»; в департаменте микроэлектроники и биомедицинской инженерии Технического Университета Молдовы, Республика Молдова в 2018 г. в научно-исследовательскую работу 04ВА «Разработка методов управляемого воздействия света на биологические ткани применительно к фототерапии». Новизна полученных решений подтверждена патентом Российской Федерации [24].

Опубликование результатов диссертации

По материалам диссертации опубликованы 24 научные работы, из которых 6 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК и в зарубежных научных изданиях, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, 5 статей в других рецензируемых научных изданиях, 9 статей в сборниках материалов научных конференций, 3 тезисов докладов, 1 патент на изобретение.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка литературы и шести приложений.

Полный объем диссертации составляет 216 страниц, в которые входят 69 рисунков на 33 страницах, 14 таблиц, занимающих в совокупности 6 страниц, 6 приложений на 33 страницах. Библиографический список содержит 360 наименований, включая собственные публикации соискателя ученой степени (на 29 страницах).

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во **введении** и **общей характеристике работы** обоснована актуальность диссертационной работы, цели и задачи исследования, изложены научная новизна работы, основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения о личном вкладе соискателя и апробации результатов исследований.

Первая глава посвящена обзору существующей аппаратуры и систем оценки функционального состояния кровотока в поверхностных слоях кожных покровов. Проанализированы в общей форме известные аналитические методы решения уравнения переноса излучения в многократно рассеивающих средах (кожа, кровь) в рамках теории переноса излучения (далее – ТПИ) и ее различных приближениях, что позволило описать оптические свойства биотканей при моделировании распространения излучения в сильно рассеивающих средах. Обосновано, что имеющиеся математические модели распространения излучения в коже следует адаптировать для задач исследования и оценки функционального состояния кровотока в коже по спекл-структуре рассеянного когерентного излучения.

Во второй главе представлены результаты разработки расширенной математической модели (далее – модели) процесса распространения оптического излучения в биотканях (рисунок 1), которое описывается в рамках ТПИ. Основное уравнение ТПИ записывается как уравнение макроскопического баланса энергии в бесконечно малом, элементарном объеме рассеивающей среды.

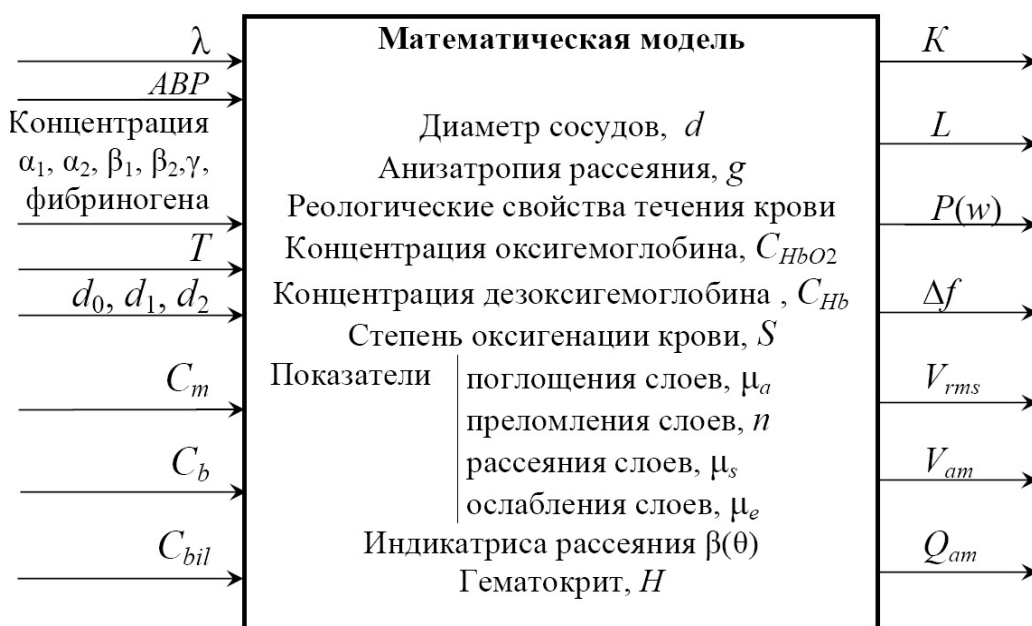


Рисунок 1. – Входные и выходные параметры математической модели

Входными параметрами математической модели являются длина волны λ источника когерентного оптического излучения (диапазон от 400 до 850 нм),

геометрические толщины трех макроскопически однородных слоев кожи (рогового слоя, эпидермиса и дермы) и биофизические параметры биоткани – объемная концентрация меланина в эпидермисе C_m и кровеносных капилляров в слое дермы C_b (долей объема, занимаемых соответствующим хромофором), а также степень оксигенации крови S (отношение концентрации оксигемоглобина к общему гемоглобину). В модели толщина рогового слоя d_0 и эпидермиса d_1 принимались равными 20 и 100 мкм соответственно. Слой дермы d_2 рассматривался как полубесконечный (в оптическом плане) слой.

Модель учитывает спектральные особенности формирования диффузного отражения кожи (наличие в составе дермы воды, меланина, билирубина, гемоглобина и его производных). Вклад различных слоев кожи в процессы поглощения и рассеяния излучения различен. Спектральные зависимости оптических характеристик кожного покрова получены после критического анализа, отбора и усреднения результатов различных авторов.

Основу для моделирования составляют многокомпонентный метод ТПИ, согласно которому индикатрисы рассеяния представлены в виде суммы функций, имеющих различные угловые масштабы, связь между теорией когерентности светового поля в рассеивающей среде и инженерными формулами ТПИ. Это позволило определить требуемые фотометрические характеристики рассеянного оптического излучения и разделить суммарное излучение на когерентное и некогерентное. В модели рассчитываются показатели преломления по отношению к окружающему веществу, показатели поглощения μ_a , рассеяния μ_s и ослабления μ_e в каждом из слоев, индикатрисы рассеяния или их интегральные параметры. Показатели варьируются путем изменения, как длины волны освещающего пучка, так и объемных концентраций хромофоров – соответственно меланина и дериватов гемоглобина крови.

Математическая модель дополнительно учитывает оптическую анизотропию кожного покрова в виде среднего значения косинуса угла рассеяния излучения, значение которого изменяется в пределах от -1 до 1 (значению -1 соответствует случай полного отражения излучения от поверхности кожного покрова, значению 0 – изотропное, т. е. Релеевское рассеяние на мелких частицах, значению 1 – рассеяние Ми на крупных частицах), диаметр (от 6 до 9 мкм) и форму (сферу, диск) эритроцитов в слое дермы, артериальное давление крови в плечевой артерии в диапазоне от 90/60 до 195/130 мм.рт.ст., температуру кожных покровов от $+35$ до $+41$ °С, концентрацию белков плазмы в крови (α_1 , α_2 , β_1 , β_2 , γ - глобулинов и фибриногена, г/л), реологические свойства течения крови при диаметре кровеносных сосудов от 4,5 до 500 мкм в поверхностных слоях кожи.

Для определения различных характеристик биотканей разработана аналитическая методика расчета параметров спекл-структуры светового поля внутри кожи и на ее поверхности. Радиус корреляции (средний размера пятна) $L_{i,j}$ случайной спекл-структуры светового поля в слое j (индекс 0 – в роговом

слое, 1 – в эпидермисе, 2 – в слое дермы) биоткани на глубине z имеет три характерных масштаба (индекс $i = 0, 1$ и 2 – соответствует нерассеянному излучению, дифракционной (рассеянной) и диффузионной составляющим соответственно) [7, 12]:

$$L_{i,j}(z) = \lambda / \{ \pi [2D_{i,j}(z)]^{0,5} \}, \text{ мм}, \quad (1)$$

где $D_{i,j}(z)$ – дисперсия углового распределения.

В предложенной методике радиальное распределение суммарной освещенности в горизонтальной плоскости $W_j(r,z)$ (нормирована на плотность мощности излучения, падающего на поверхность) записывается в виде:

$$W_j(r, z) = \sum_{i=0}^2 E_{i,j}(z) \{1 + \cos[\pi r / L_{i,j}(z)]\} + E_{nc,j}(z), \quad (2)$$

где $E_{i,j}$ – i -я когерентная составляющая средней освещенности j -ого слоя;

$E_{nc,j}$ – некогерентный фон j -ого слоя (флуктуирующая составляющая освещенности).

Как видно из (2), радиальная зависимость $W_j(r,z)$ в каждом из слоев кожи задается суммой трех периодических функций координаты r с различными амплитудами и пространственными частотами.

Освещенность E_{nc} рассчитывалась в рамках асимптотического приближения ТПИ с учетом многократного переотражения излучения между слоями и поверхностью кожи. Угловую структуру интенсивности когерентного излучения оптического диапазона полагали гауссовой.

Разработанная методика [7, 12] применена для описания переноса излучения в кожу человека при исследовании спектров эффективных показателей поглощения эндогенных порфиринов в мягких биотканях [10, 16, 17, 18, 19].

Выходными параметрами математической модели являются контраст K и размеры $L_{i,j}$ спекл-пятен, линейная V и объемная Q скорости кровотока в поверхностных слоях кожных покровов. Диапазоны вариаций модельных параметров для нормальной и патологически измененной кожи указаны в таблице 1.

Таблица 1. – Диапазоны вариаций модельных параметров

Параметр	Диапазон	Параметр	Диапазон	Параметр	Диапазон
d_0 , роговой слой, мкм	0 – 20	λ , нм	400 – 850	C_{a1} , г/л	1,3 – 5,3
d_1 , эпидермис, мкм	100 – 400	T , °С	+35 – +41	C_{a2} , г/л	5,1 – 13
d_2 , дерма, мм	0,12 – 5	S , %	40 – 97	$C_{\beta 1}$, г/л	1,3 – 3,6
d , мкм	4,5 – 500	C_m , %	1 – 16	$C_{\beta 2}$, г/л	0,6 – 1,21
ABP , мм.рт.ст	90/60 – 195/130	C_b , %	1 – 16	C_{γ} , г/л	3,3 – 17
d_s , мкм	6 – 9	g	–1 – 1	C_{fib} , г/л	1 – 10
$L_{i,j}$, мм	10^{-4} – 1	K	0 – 1	C_{bil} , мг/л	0,1 – 50
Q , мл/мин	0,01 – 0,06	H , %	30 – 55	V , см/с	0,1 – 4,0

В **третьей главе** установлены взаимосвязи между биофизическими параметрами кожи и спекл-структурой воздействующего на нее светового поля. На рисунке 2 представлена полная (интегральная) спекл-структура обратно рассеянного оптического излучения на верхней границе среды [9, 15].

На рисунке 3 представлена спектральная зависимость контраста K спекл-пятен от глубины z проникновения оптического излучения в кожу. Глубина z отсчитывается от поверхности кожи. Проведен анализ размеров $L_{i,j}$ спеклов, формируемых составляющими когерентного оптического излучения, расчет контраста интерференционных пятен внутри среды при широкой вариации структурных (толщины эпидермиса, глубины проникновения оптического излучения z в биоткань) и биофизических характеристик биоткани (объемной концентрации меланина в эпидермисе и капилляров в слое дермы, степени оксигенации крови), оценена возможность прогноза глубины z проникновения излучения на длинах волн по спектральным значениям размеров $L_{i,j}$ спеклов [4, 15].

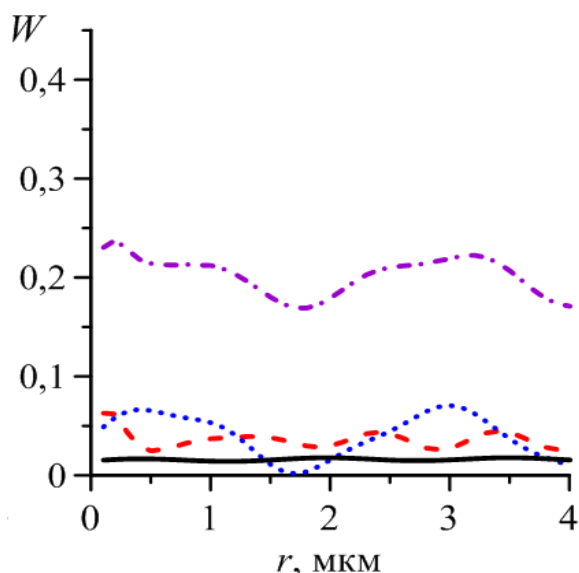


Рисунок 2. – Вклад освещенностей рогового слоя W_0 (сплошные), эпидермиса W_1 (пунктирные) и дермы W_2 (штриховые) в полную спекл-структуру обратно рассеянного оптического излучения W (штрихпунктирные) на поверхности кожи $\lambda = 600$ нм

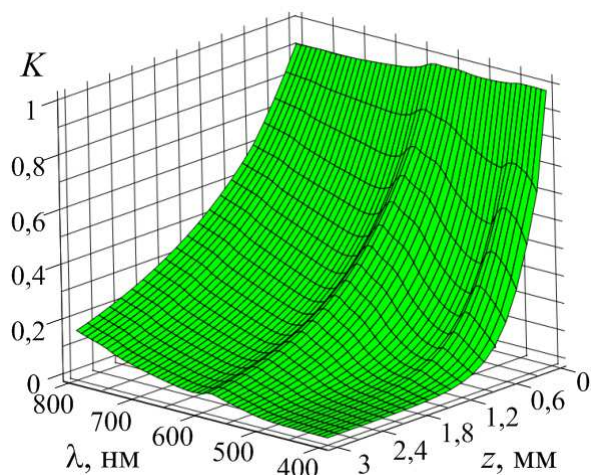


Рисунок 3. – Спектральная зависимость контраста K от глубины проникновения оптического излучения в кожу z , $C_m = 4$ %, $C_b = 4$ %, $S = 75$ %

Установлено, что контраст спекл-пятен не зависит от толщины эпидермиса и в красной области спектра уменьшается в 4 раза (с 0,73 до 0,18), при смещении в фиолетовую область спектра контраст уменьшается в 40 раз, с 0,4 до 0,01, из-за роста показателя ослабления (рассеяние + поглощение) биоткани при увеличении глубины проникновения оптического излучения в биоткань в 8 раз (с 0,3 до 2,4 мм); контраст уменьшается от 4 до 5 % при увеличении объемной концентрации меланина в эпидермисе (от 2 до 16 %) или кровеносных капилляров в слое дермы (от 2 до 16 %), при увеличении степени оксигенации S крови (от 40 до 97 %).

Получены расчетные характеристики светового поля на поверхности кожи: распределения вкладов нерассеянной, дифракционной (рассеянной) и диффузионной составляющих когерентного излучения в полную спекл-структуру излучения на длинах волн 500, 600, 700, 800 нм при степени оксигенации крови 75 %, объемных концентрациях меланина в эпидермисе и капилляров в слое дермы, равных 8 %, при толщине эпидермиса 100 мкм за счет использования в математической модели взаимосвязи оптических (оптической толщины кожи, показателей ослабления, поглощения, рассеяния) и биофизических параметров кожи (степени оксигенации капиллярной крови, объемной концентрации меланина в эпидермисе и объемной концентрации капилляров в слое дермы), позволяющие определить контраст спекл-пятен на поверхности кожи для диагностики патологий кожных покровов [4, 9, 15, 23].

Разработаны методики определения биофизических параметров биоткани по спекл-структуре когерентного оптического излучения, описано решение обратной задачи по восстановлению биофизических параметров кожи: степени оксигенации крови и объемной концентрации капилляров в слое дермы – по контрасту интерференционной картины внутри кожи. Методика оценки контраста спекл-структуры светового поля, рассеянного мягкими биотканями, включает вычисление интенсивностей некогерентного фона (флуктуирующей составляющей рассеянного поля оптического излучения) E_b и ярких участков интерференционной картины E_s (рисунок 4) [1, 2, 24].

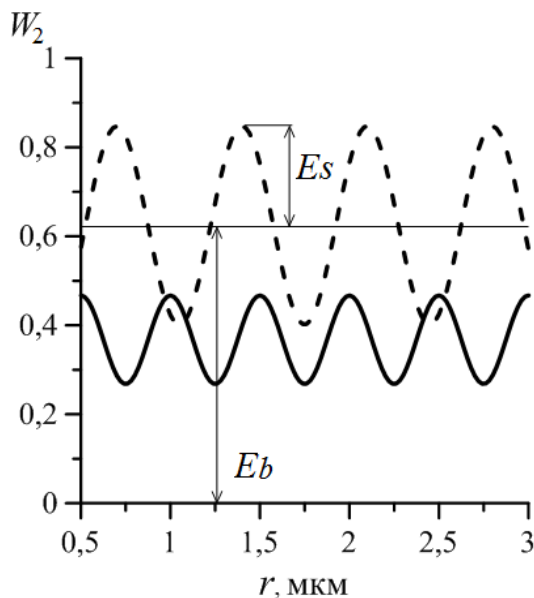


Рисунок 4. – Радиальное распределение освещенности спекл-структуры W_2 в слое дермы $\lambda = 600$ нм (сплошные) и 700 нм (штриховые), $z = 1$ мм, $C_m = 8$ %, $C_b = 4$ %

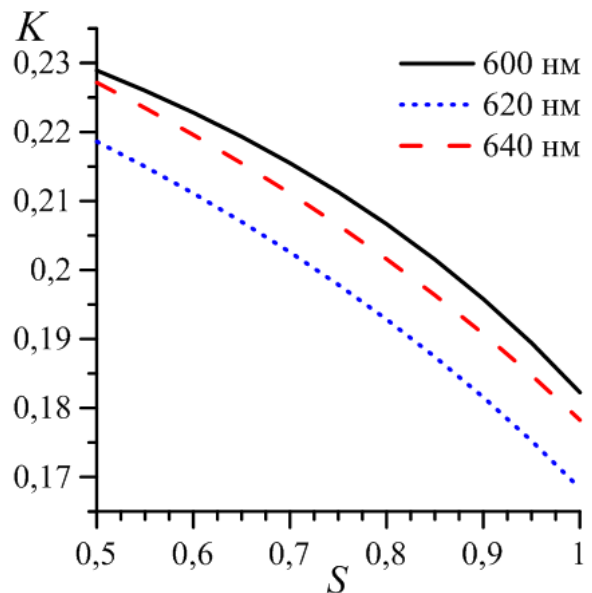


Рисунок 5. – Градуировочный график зависимости контраста K спекл-структуры от степени оксигенации S крови для $\lambda = 600$ нм (сплошная), 620 нм (пунктирная) и 640 нм (штриховая), $C_b = 8$ %, $C_m = 4$ % и $z = 1,5$ мм

На основе значений E_b и E_s , зарегистрированных приемником, рассчитывали контраст K спекл-структуры по формуле 3:

$$K = (E_{\max} - E_{\min}) / (E_{\max} + E_{\min}) = E_s / E_b, \quad (3)$$

где E_{\max} и E_{\min} – максимальное и минимальное значения освещенности.

После расчета значений контраста строили градуировочный график (рисунок 5) зависимости контраста K спекл-структуры на длине волны λ от степени оксигенации S капиллярной крови на глубине z нахождения приемника при известной объемной концентрации кровеносных капилляров в слое дермы C_b . По измеренному контрасту и градуировочному графику находили степень оксигенации S капиллярной крови [2, 24].

Методика определения величины объемной концентрации капилляров включает в себя расчет и построение градуировочного графика зависимости контраста спекл-структуры K (на глубине z нахождения приемника оптического излучения) в изобестической точке на длине волны $\lambda = 500$ или 530 нм. По измеренному контрасту и градуировочному графику определяли объемную концентрацию C_b кровеносных капилляров. Методики определения степени оксигенации крови и объемной концентрации капилляров в слое дермы обеспечивают повышение точности измерений за счет уменьшения ошибки измерения в 2 раза при использовании только одной длины волны, и, в отличие от существующих методик, не зависят от параметров эпидермиса, и не требуют нормирования по эталону [1, 2, 24].

Практическая значимость подтверждается патентом Российской Федерации [24], а также актами о практическом внедрении.

В **четвертой главе** разработана система оценки функционального состояния кровотока в поверхностных слоях кожных покровов (рисунок 6).

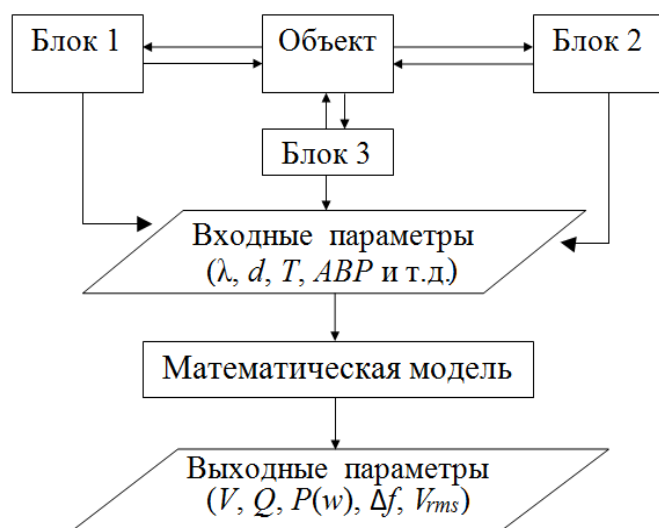


Рисунок 6. – Структурная схема системы оценки функционального состояния кровотока

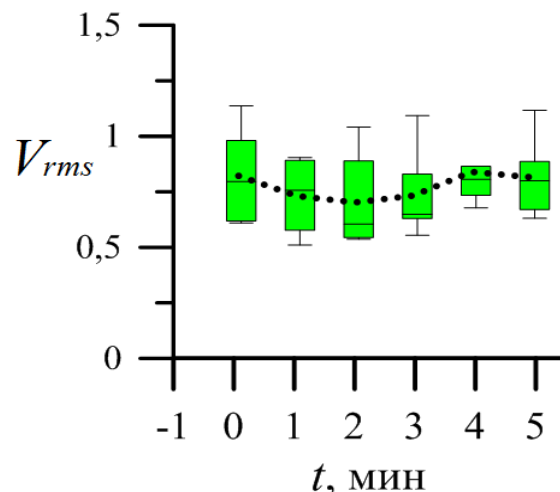


Рисунок 7. – Среднеквадратическая скорость движущихся частиц в эксперименте с декомпрессией плечевой артерии

Блок 1 – лазерный анализатор «Speckle-Scan», с помощью которого проводится мониторинг состояния микроциркуляции крови в коже, регистрация

и измерение в относительных единицах временных флуктуаций интенсивности спекл-поля, образующегося в результате рассеивания диффузными объектами когерентного излучения. Блок 2 – высокочастотный ультразвуковой доплерограф «Минимакс Допплер-К», используемый для измерения диаметра кровеносного сосуда. Блок 3 – измеритель артериального давления серии ИАД – 01 «Адьютор», который использовался для неинвазивного измерения артериального давления у человека. В математической модели на основе входных параметров проводится прием и обработка поступающей информации, определение показателей функционального состояния кровотока в поверхностных слоях кожных покровов.

Для описания движения крови в поверхностных слоях биоткани математическая модель дополнительно учитывает давление крови в плечевой артерии в диапазоне от 90/60 до 195/130 мм.рт.ст., диаметр кровеносных сосудов от 4,5 до 300 мкм в поверхностных слоях кожи, температуру кожных покровов от +35 до +41 °С, концентрацию белков плазмы в крови (α_1 , α_2 , β_1 , β_2 , γ - глобулинов и фибриногена, г/л). Кровь представлена как двухфазная вязкая суспензия, состоящая из ядра эритроцитов, концентрация которых максимальна на оси сосуда, и пристеночного слоя плазмы с нулевой концентрацией эритроцитов. Учитывались следующие реологические свойства течения крови: 1) эффект Фареуса – зависимость гематокрита от диаметра сосуда, когда эритроциты сосредоточены вблизи оси течения, вследствие чего средняя скорость эритроцитов больше средней скорости течения крови в сосуде в целом; 2) около стенки сосуда имеется безэритроцитный пристеночный слой плазмы; 3) профиль скорости течения затупленный; 4) вязкость крови зависит от диаметра кровеносного сосуда (эффект Фареуса – Линдквиста).

В связи с тем, что рассеяние фотонов носит случайный характер, то для определения диффузионной составляющей лучевой интенсивности применялось диффузионное приближение (рассеивание на частицах равномерно во всех направлениях, угловое распределение почти изотропно). Для решения уравнения переноса излучения в диффузионном приближении использовали временную автокорреляционную функцию (АКФ) диффузно отраженного оптического излучения. АКФ находится при решении стационарного уравнения диффузии фотонов, в условиях сильного многократного рассеяния ($\lambda \ll l^* \ll L$, L – характерный размер образца). Для этого представили АКФ в виде $G_1 = G_1^{(0)} + G_1^{(S)}$, где $G_1^{(S)}$ – функция, описывающая влияние потока на корреляционную функцию («рассеянная» волна), $G_1^{(0)}$ – соответствие макроскопическому случаю. Результат решения уравнения диффузии совпадает по форме с выражением для электромагнитной волны, рассеянной на диэлектрическом цилиндре.

Установлены интегральные параметры оценки состояния кровотока в условиях действия различных вазоактивных факторов (влияющих на тонус

и диаметр просвета кровеносных сосудов): мощность спектра, средняя частота спектра, среднеквадратическая скорость движущихся частиц. Дисперсия равна средней мощности процесса (нулевой момент M_0), среднее значение которого равно нулю. Дисперсия связана со средней концентрацией $\langle C \rangle$ движущихся частиц в объеме выборки. Средняя частота спектра (первый момент M_1), пропорциональна среднеквадратической скорости V_{rms} движущихся частиц (рисунок 7), умноженной на их среднюю концентрацию [5, 6, 11, 20].

Для оценки объемной скорости потока использовалась среднеквадратическая скорость движущихся частиц:

$$V_{rms} = M_1 / M_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_{min}}^{\omega_{max}} \omega \cdot S(\omega) d\omega / \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_{min}}^{\omega_{max}} S(\omega) d\omega, \quad (4)$$

где $S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g_1(\tau) \cdot \exp(-j\omega\tau) d\tau$ – энергетический спектр сигнала;

$g_1(\tau) = G(\tau)/G(0)$ – нормированная АКФ флуктуаций рассеянного поля;

$G(0)$ – максимум временной АКФ флуктуаций рассеянного поля;

$G(\tau)$ – величина временной АКФ флуктуаций рассеянного поля в момент времени τ .

При анализе показателей ультразвукового доплерографа по кривой средней скорости определяли скорости кровотока: V_{am} – среднюю линейную скорость (см/с) и Q_{am} – среднюю объемную скорость (мл/мин).

С помощью разработанной системы можно оценить кровотоки в поверхностных слоях кожи в норме и при патологии нервной системы человека, сократить время обследования пациента на 20 минут и повысить точность измерения параметров микроциркуляции кровотока на 10 % (линейной скорости кровотока от 0,1 до 4,0 см/с и объемной скорости кровотока от 0,01 до 0,06 мл/мин).

В приложениях представлены значения оптических показателей для человека, спектральные зависимости составляющих рассеянного оптического излучения при широкой вариации параметров биотканей, оценка точности измерения разработанных методик и параметров микроциркуляции, копия патента и копии актов внедрения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработана расширенная математическая модель процесса распространения оптического излучения в диапазоне длин волн от 400 до 850 нм в кожном покрове человека, учитывающая оптическую анизотропию кожного покрова от -1 до 1 , диаметр (от 6 до 9 мкм) и форму

(сферу, диск) эритроцитов в слое дермы, артериальное давление крови в плечевой артерии в диапазоне от 90/60 до 195/130 мм.рт.ст., концентрацию белков плазмы в крови (α_1 , α_2 , β_1 , β_2 , γ - глобулинов и фибриногена, г/л), реологические свойства течения крови (эффект Фареуса – зависимость гематокрита от диаметра сосуда, наличие безэритроцитного слоя плазмы вблизи стенки сосуда, затупленный профиль скорости течения, эффект Фареуса-Линдквиста – зависимость вязкости крови от диаметра кровеносного сосуда) при диаметре кровеносных сосудов от 4,5 до 500 мкм в поверхностных слоях кожи, температуру кожных покровов от +35 до +41 °С, позволяющая получить распределение когерентной и флуктуирующей составляющих рассеянного светового поля в кожных покровах, сопоставить параметры спекл-поля с различными характеристиками кожных покровов (объемной концентрацией меланина в эпидермисе, объемной концентрацией кровеносных капилляров в слое дермы, степенью оксигенации крови, толщиной эпидермиса и дермы) для селективного воздействия когерентного оптического излучения (мощности, длины волны излучения, глубины проникновения в кожу) на кожу [7, 10, 12, 16, 18, 19].

2. Установлены новые зависимости контраста спекл-пятен от биофизических параметров кожных покровов: степени оксигенации крови от 40 % до 97 % в слое дермы, объемной концентрации меланина в эпидермисе от 2 до 16 % и объемной концентрации кровеносных капилляров от 2 до 16 % в слое дермы – при увеличении которых происходит увеличение показателя поглощения слоев кожи, увеличение концентрации гемоглобина в крови и снижение некогерентного фона, приводящее к снижению контраста спекл-пятен на поверхности кожи в пределах от 0,6 до 0,1, формируемого в процессе рассеяния когерентного оптического излучения между слоями кожи, что позволяет оценить с большей точностью состояние микроциркуляции в кожных покровах в норме и при патологии [1, 3, 4, 8, 9, 13, 14, 15, 17, 21, 22, 23].

Разработан и запатентован способ измерения степени оксигенации крови (патент № 2622997 Российской Федерации) при регистрации интенсивности когерентного излучения (для длин волн от 600 до 640 нм), пропущенного слоем дермы толщиной от 1 до 5 мм и величине объемной концентрации кровеносных сосудов 4 и 8 %, который использует установленную обратно пропорциональную зависимость контраста спекл-пятен (в диапазоне от 0,15 до 0,25) от степени оксигенации крови (в диапазоне от 50 до 97 %), что позволяет уменьшить ошибку измерения степени оксигенации крови в 2 раза при диагностике заболеваний кожи [2, 24].

Получены расчетные характеристики светового поля на поверхности кожи: распределения вкладов нерассеянной, дифракционной (рассеянной) и диффузионной составляющих когерентного излучения в полную спекл-структуру излучения на длинах волн 500, 600, 700, 800 нм при степени оксигенации крови 75 %, объемных концентрациях меланина в эпидермисе и капилляров в слое дермы равных 8 %, при толщине эпидермиса 100 мкм за счет использования в математической модели распространения оптического

излучения в кожных покровах взаимосвязи оптических (оптической толщины кожи, показателей ослабления, поглощения, рассеяния) и биофизических параметров кожи (степени оксигенации капиллярной крови, объемной концентрации меланина в эпидермисе и объемной концентрации капилляров в слое дермы), позволяющие определить контраст спекл-пятен на поверхности кожи для диагностики патологий кожных покровов [4, 9, 14, 15, 23].

3. Разработана и экспериментально проверена усовершенствованная система оценки функционального состояния кровотока в поверхностных слоях кожных покровов (на тыльной стороне ладони, на лице), основанная на расширенной математической модели процесса распространения оптического излучения в диапазоне длин волн от 400 до 850 нм в каждом покрове, позволяющая сократить время обследования пациента на 20 минут (с 80 до 60 минут) и увеличить точность измерения параметров микроциркуляции на 10 % (линейной от 0,1 до 4,0 см/с и объемной скоростей кровотока от 0,01 до 0,06 мл/мин) для выявления нарушений кровотока в поверхностных слоях кожи в норме и при патологии нервной системы за счет учета интегральных параметров (мощности спектра, средней частоты спектра, среднеквадратической скорости движущихся частиц) оценки состояния кровотока в условиях действия различных вазоактивных (влияющих на тонус и диаметр просвета кровеносных сосудов) факторов (артериального давления в диапазоне от 90/60 до 195/130 мм.рт.ст., температуры кожных покровов от +35 до +41 °С и т.д.) [5, 6, 11, 20].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработанные методики определения биофизических параметров кожи и параметры оценки функционального состояния кровотока в поверхностных слоях кожи могут быть рекомендованы для использования при диагностике патологического состояния пациента. Полученные результаты могут быть внедрены в практику работы лечебно-профилактических учреждений республиканского уровня. Их практическая значимость подтверждается патентом Российской Федерации № 2622997 «Способ измерения степени оксигенации крови» [24].

Методики расчета характеристик интерференционной картины в многослойной биологической ткани и методики восстановления биофизических параметров биоткани по спекл-структуре когерентного излучения оптического диапазона внедрены в департаменте микроэлектроники и биомедицинской инженерии Технического Университета Молдовы г. Кишинев, Республика Молдова в 2018 г. в научно-исследовательскую работу 04ВА «Разработка методов управляемого воздействия света на биологические ткани применительно к фототерапии» для повышения качества диагностики заболеваний и исследования патологических процессов у человека.

Методики расчета параметров интерференционной картины (спекл-структуры) внутри и на поверхности многослойной биоткани внедрены на кафедре экологии и экологической безопасности Института экологической безопасности и мониторинга окружающей среды Винницкого национального технического университета Республики Украина в 2019 г. в научно-исследовательскую работу 16Д390 «Разроблення заходів екологічної безпеки у сфері поводження небезпечними відходами та дослідження їх впливу на водні об'єкти з використанням біосенсорних технологій» для верифікації і підвищення якості оцінки результатів мультиспектральних методів контролю параметрів забруднення водних серед.

Внедренная в лаборатории клинической патофизиологии нервной системы в ГУ «РНПЦ неврологии и нейрохирургии» г. Минск, Республика Беларусь в 2020 г. в клиническую практику система оценки функционального состояния кровотока в поверхностных слоях кожных покровов позволила определить выраженность микрогемодинамических и метаболических нарушений, улучшить диагностику и оценить эффективность лечения ряда заболеваний, позволила сократить время обследования пациента на 20 минут и повысить точность измерения параметров микроциркуляции кровотока на 10 % при выявлении нарушений кровотока в поверхностных слоях кожи в норме и при патологии нервной системы человека, что подтверждено результатами совместных исследований по теме НИР «Разработать и внедрить метод диагностики и лечения пациентов с преходящими транзиторными церебральными ишемическими приступами (атаками) на фоне хронической ишемии головного мозга» (сроки выполнения 2017–2019 гг.).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь

1. Абрамович, Н. Д. Методика определения объемной концентрации крови по контрасту интерференционной картины внутри биоткани / Н. Д. Абрамович, С. К. Дик // Доклады БГУИР. – 2016. – № 6 (100). – С. 117–120.

2. Абрамович, Н. Д. Методика определения степени оксигенации крови по контрасту интерференционной картины внутри биоткани / Н. Д. Абрамович, С. К. Дик // Доклады БГУИР. – 2016. – № 7 (101). – С. 326–330.

3. Вивчення глибинної структури когерентної складової і некогерентного фону багатократно розсіяного світлового поля за широкої варіації структурних і біофізичних параметрів біотканини / Н. Д. Абрамович,

С. К. Дік, В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – Т. 129, № 6. – С. 90–95.

4. Абрамович, Н. Д. Зависимость размеров спекл-пятен и их контраста от биофизических и структурных параметров биоткани / Н. Д. Абрамович, С. К. Дик // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8, № 2. – С. 177–187. DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-2-177-187.

5. Оцінювання функціонального стану мікроциркуляції крові в тканинах людини методами спекл-метрії і доплерівської флоуметрії / Н. Д. Абрамович, С. К. Дік, Л. О. Васілевська, І. І. Хлудеев, В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2018. – Т. 141, № 6. – С. 7–17. DOI: 10.31649/1997-9266-2018-141-6-7-17.

6. Оценка функционального состояния каждой микрогемодинамики методами доплеровской флоуметрии и спекл-метрии / Н. Д. Абрамович, С. К. Дик, Л. А. Василевская, И. И. Хлудеев // Доклады БГУИР. – 2019. – Т. 121, № 3. – С. 5–11. DOI: 10.35596/1729-7648-2019-123-5-5-11.

Статьи в других рецензируемых научных изданиях

7. Моделирование спекл-структуры светового поля внутри многослойной ткани кожи / В. В. Барун, С. К. Дик, А. П. Иванов, Н. Д. Абрамович // Инженерно-физический журнал. – 2013. – Т. 86, № 6. – С. 1288–1295. DOI: 10.1007/s10891-013-0962-4.

8. Абрамович, Н. Д. Связь параметров спекл-структуры многократно рассеянного света в многослойных биотканях с их биофизическими характеристиками / Н. Д. Абрамович, С. К. Дик // Приложения к журналу «Вести национальной академии наук Беларуси» Ч.3. : Серия физ.-мат. наук. – 2015. – С. 54–56.

9. Abramovich, N. D. Speckle pattern of radiation scattered of soft biological tissues. Light fields outside tissue / N. D. Abramovich, S. K. Dick, V. P. Sontea // Journal of technical university of Moldova and moldavian engineering association. – 2016. – No 4. – P. 32–36. [http:// repository.utm.md/handle/5014/603](http://repository.utm.md/handle/5014/603).

10. Абрамович, Н. Д. Оптимизация воздействия света на эндогенные порфирины в мягких биотканях / Н. Д. Абрамович, С. К. Дик // Проблемы физики, математики и техники. – 2017. – Т. 30, № 1. – С. 7–12.

11. Methods for assessing the state of microhemocirculation of biotissue by speckle-structure of multiple scattered radiation / N. D. Abramovich, S. K. Dick, L. A. Vasilevskaya, I. I. Khludeyev, V. P. Sontea // Journal of Engineering Sciences. – 2018. – Vol. XXV, No 3 – P. 52–60. DOI: 10.5281/zenodo.2557298.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

12. Аналитическая методика оценки контраста спекл-структуры светового поля, рассеянного мягкими биотканями / Н. Д. Абрамович,

В. В. Барун, С. К. Дик, А. С. Терех // Медицинская физика и инновации в медицине : материалы V Троицкой конференции. –Троицк, 4–8 июня 2012 г. – Т. 1. – С. 212–214.

13. Simulation of speckle structure of scattered light inside multi-layered skin tissue / V. V. Barun, S. K. Dick, A. P. Ivanov, N. D. Abramovich // 2nd International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering, Republic of Moldova, Chişinău, 18–20 April 2013. – P. 503–507.

14. Абрамович, Н. Д. Спекл-структура излучения, рассеянного мягкими биологическими тканями. I. Световые поля внутри среды / Н. Д. Абрамович, В. В. Барун, С. К. Дик // Медицинская физика и инновации в медицине : материалы VI Троицкой конференции. – Троицк, 2–6 июня 2014 г. – Т. 2. – С. 84–86.

15. Абрамович, Н. Д. Спекл-структура излучения, рассеянного мягкими биологическими тканями. II. Световые поля вне среды / Н. Д. Абрамович, В. В. Барун, С. К. Дик // Медицинская физика и инновации в медицине : материалы VI Троицкой конференции. – Троицк, 2–6 июня 2014 г. – Т. 2. – С. 87–89.

16. Optimization of light action spectra for porphyrins in vivo / V. V. Barun, S. K. Dick, V. P. Sontea, N. D. Abramovich, A. P. Seryakov // The 8th International Conference Microelectronics and Computer Science : The ICMCS conference papers. – Chişinău, 22–25 October 2014. – Moldova : Editura UTM, 2014. – P. 417–420.

17. Спектры эффективных показателей поглощения порфиринов в мягких биотканях / Н. Д. Абрамович, С. К. Дик, В. В. Барун, В. П. Шонтя // МедЭлектроника – 2014. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии : Сб. научных статей VIII Международная научно-техническая конференция – Минск, 10–11 декабря 2014 г. / редкол. : В. С. Улащик [и др.]. – Минск : БГУИР, 2014. – С. 55–57.

18. Воздействие света на порфирины. Спектры эффективных показателей поглощения порфиринов в биотканях / Н. Д. Абрамович, В. В. Барун, С. К. Дик // Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине 2015 : материалы Всероссийской молодежной конференции редкол. : Д.А. Усанов [и др.]. – Саратов : Изд-во Саратовский источник, 2015. – С. 246–249.

19. Effective light absorption spectra of endogenic porphyrins in soft biotissue / V. P. Sontea, N. D. Abramovich, V. V. Barun, S. K. Dick, A. P. Seryakov // 2015 E-Health and Bioengineering Conference (EHB), Romania, Iasi, November 19–21, 2015. – Iasi : IEEE. – P. 1–4. DOI: 10.1109/EHB.2015.7391435.

20. Оценка функционального состояния кожной микрогемодинамики методами доплеровской флоуметрии и спекл-метрии / Н. Д. Абрамович, С. К. Дик, Л. А. Василевская, И. И. Хлудеев // МедЭлектроника – 2018. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии : Сб. научных статей. – Минск, 5–6 декабря 2018 г. – Минск : БГУИР, 2018. – С. 243–248.

Тезисы докладов

21. Analysis of speckle patterns in multi-layered skin tissue / V. V. Barun, S. K. Dick, A. P. Ivanov, N. D. Abramovich // International Conference on Coherent and Nonlinear Optics / International Conference on Lasers, Applications and Technologies – 2013 : ICONO/LAT-2013 Technical Digest. – Moscow, 18–22 June, 2013. – P. 1–2.

22. Оценка контраста спекл-структуры светового поля внутри многослойной ткани кожи человека / Н. Д. Абрамович, С. К. Дик, В. В. Барун // Международная научно-техническая конференция, приуроченная к 50-летию МРТИ–БГУИР : материалы конф., В 2 ч. Ч. 2 – Минск, 18–19 марта 2014 г. / редкол. : А. Н. Осипов [и др.]. – Минск : БГУИР, 2014. – С. 117–118.

23. Исследование связи параметров спекл-структуры многократно рассеянного света в многослойных биотканях с их биофизическими характеристиками / Н. Д. Абрамович, С. К. Дик // III Всероссийский конгресс молодых ученых : Сборник тез. докл. III Всероссийского конгресса молодых ученых / Санкт-Петербург, 8–11 апреля 2014 г. – СПб : Университет ИТМО, 2014. – Т. 2. – С. 220–221.

Патенты

24. Способ измерения степени оксигенации крови: пат. RU 2622997 / Н. Д. Абрамович, С. К. Дик. – Оpubл. 21.06.2017.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Абрамович' (Abramovich), written in a cursive style.

РЭЗІЮМЭ

Абрамовіч Мікалай Дзмітрыевіч

Сістэма ацэнкі функцыянальнага стану крывацэку ў павярхоўных пластах скурных пакроваў па спяклістай карціне шматразова расеянага аптычнага выпраменьвання

Ключавыя словы: сістэма, скура, біяфізічныя і структурныя параметры, кроў, кантраст, кагерэнтнае выпраменьванне, спяклістая структура.

Мэта даследавання: ўсталяванне заканамернасцяў змены кантрасту спяклістымі структурамі на паверхні скуры ад біяфізічных і структурных параметраў скурных пакроваў, распрацоўка пашыранай матэматычнай мадэлі распаўсюджвання аптычнага выпраменьвання ў павярхоўных пластах скурных пакроваў чалавека (пры руху крывацэку) у дыяпазоне даўжынь хваль 400 – 850 нм, распрацоўка ўдасканаленай сістэмы ацэнкі функцыянальнага стану крывацэку ў павярхоўных пластах скурных пакроваў.

Метады даследавання: метады тэорыі пераносу выпраменьвання і статыстычнага мадэлявання, тэорыя расейвання святла часціцамі, лікавыя метады рашэння зваротных задач.

Атрыманыя вынікі і іх навізна складаюцца ў распрацоўцы ўдасканаленай сістэмы ацэнкі функцыянальнага стану крывацэку ў павярхоўных пластах скурных пакроваў на аснове пашыранай матэматычнай мадэлі распаўсюджвання аптычнага выпраменьвання ў дыяпазоне даўжынь хваль 400–850 нм пры руху крыві ў паверхневых сляях скурных пакроваў чалавека, якая дазваляе скараціць час абследавання пацыента на 20 хвілін і павысіць дакладнасць вымярэння параметраў мікрацыркуляцыі крывацэку на 10 %, усталяванні залежнасцяў кантрасту спяклістай-структуры ад ступені аксігенацыі і аб'ёмнай канцэнтрацыі крыві і ў атрыманні новых залежнасцяў аўтакарэляцыённай функцыі флуктуацый інтэнсіўнасці спяклістага-поля пры адлюстраваным выпраменьванні ад часу паміж двума расейвальнікамі ва ўмовах рознай дынамікі крывацэку пасля дэкампрэсіі плечавой артэрыі, ўсталяванні залежнасцяў памераў спяклістых-плям і іх кантрасту ад біяфізічных і структурных параметраў скуры.

Вобласць ужывання і рэкамендацыі па выкарыстанні: атрыманыя вынікі могуць выкарыстоўвацца пры стварэнні дыягнастычных сістэм новага пакалення, якія дазваляць ажыццяўляць кантроль у рэжыме рэальнага часу жыццёва важных параметраў стану крывацэку ў павярхоўных пластах скурных пакроваў пацыента, а таксама адбываючыхся ў іх працэсах шматразовага расейвання кагерэнтнага выпраменьвання, і могуць быць укараненыя у практыку работы лячэбна-прафілактычных устаноў рэспубліканскага ўзроўню.

РЕЗЮМЕ

Абрамович Николай Дмитриевич

**Система оценки функционального состояния кровотока
в поверхностных слоях кожных покровов по спекл-структуре
многократно рассеянного оптического излучения**

Ключевые слова: система, кожа, биофизические и структурные параметры, кровь, контраст, когерентное излучение, спекл-структура.

Цель исследования: установление закономерностей изменения контраста спекл-пятен на поверхности кожи от биофизических и структурных параметров кожных покровов, разработка расширенной математической модели распространения оптического излучения в поверхностных слоях кожных покровов человека (при движении кровотока) в диапазоне длин волн 400–850 нм, разработка усовершенствованной системы оценки функционального состояния кровотока в поверхностных слоях кожных покровов.

Методы исследования: методы теории переноса излучения и статистического моделирования, теория рассеяния света частицами, численные методы решения обратных задач.

Полученные результаты и их новизна состоят в разработке усовершенствованной системы оценки функционального состояния кровотока в поверхностных слоях кожных покровов на основе расширенной математической модели распространения оптического излучения в диапазоне длин волн 400 – 850 нм при движении крови в поверхностных слоях кожных покровов человека, позволяющей сократить время обследования пациента на 20 минут и повысить точность измерения параметров микроциркуляции кровотока на 10 %, в получении новых зависимостей контраста спекл-структуры от степени оксигенации и объемной концентрации крови и новых зависимостей автокорреляционной функции флуктуаций интенсивности спекл-поля при отраженном излучении от времени между двумя рассеивателями в условиях различной динамики кровотока после декомпрессии плечевой артерии, в установлении зависимостей размеров спекл-пятен и их контраста от биофизических и структурных параметров кожи.

Область применения и рекомендации по использованию: полученные результаты могут использоваться при создании диагностических систем нового поколения, которые позволят осуществлять контроль в режиме реального времени жизненно важных параметров состояния кровотока в поверхностных слоях кожных покровов пациента, а также происходящих в них процессов многократного рассеяния когерентного излучения могут быть внедрены в практику работы лечебно-профилактических учреждений республиканского уровня.

SUMMARY

Abramovich Nikolai Dmitrievich

**A system for assessing the functional state of blood flow
in the surface layers of the skin by the speckle structure
of multiply scattered optical radiation**

Keywords: system, skin, biophysical and structural parameters, blood, contrast, coherent radiation, speckle structure.

The aim of there search: the establishment of regularities of change in the contrast of speckle spots on the skin surface from the biophysical and structural parameters of the skin, the development of an expanded mathematical model for the propagation of optical radiation in the surface layers of the human skin (when the blood flow is moving) in the wavelength range of 400 – 850 nm, the development of an improved system for assessing the functional state of blood flow in the surface layers of the skin.

Methods of the research: methods of the radiation transfer theory and statistical modeling, theory of light scattering by particles, numerical methods for solving inverse problems.

Obtained results and their novelty consist of the development of an improved system assessment of the functional state of blood flow in the surface layers of the skin based on an expanded mathematical model of optical radiation propagation in the wavelength range of 400–850 nm during the movement of blood in the surface layers of the skin of a person, which allows to reduce the time of examination of the patient by 20 minutes and to improve measurement accuracy parameters blood flow microcirculation by 10 %, in obtaining the new dependences of the speckle structure contrast on the degree of oxygenation and blood volume concentration, and new dependences of the autocorrelation function of the speckle field intensity fluctuations in reflected radiation from time between two scatterers under conditions of different blood flow dynamics after brachial artery decompression, in establishing dependency of the size of speckle spots and their contrast from the biophysical and structural parameters of the skin

The field of application and recommendation for use: obtained results can be used to create diagnostic systems of a new generation that will allow real-time monitoring of a vital parameters of the blood flow state in the surface layers of the patient's skin, as well as the processes of multiple scattering of coherent radiation occurring in them, and can be implemented in the practice of treatment and prophylactic institutions of the Republic level.

Научное издание

Абрамович Николай Дмитриевич

**СИСТЕМА ОЦЕНКИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ
КРОВОТОКА В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ КОЖНЫХ ПОКРОВОВ
ПО СПЕКЛ-СТРУКТУРЕ МНОГОКРАТНО РАССЕЯННОГО
ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности

05.11.17 – Приборы, системы и изделия
медицинского назначения

Подписано в печать 07.10.2020

Гарнитура «Таймс».

Уч. изд. л. 1,5.

Формат 60x84¹/₁₆.

Отпечатано на ризографе.

Тираж 60 экз.

Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,63.

Заказ 222.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,

№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.

Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск

ЛИСТ ИСПРАВЛЕНИЙ

в тексте автореферата диссертации **Абрамовича Николая Дмитриевича**
«Система оценки функционального состояния кровотока
в поверхностных слоях кожных покровов по спекл-структуре многократно
рассеянного оптического излучения»
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.11.17 – Приборы, системы и изделия медицинского
назначения

№ страницы	Напечатано	Следует читать
Оборотная сторона обложки	Боброва Наталья Леонидовна , кандидат технических наук, доцент кафедры «Микропроцессорных систем и сетей» Института информационных технологий учреждения образования «Белорусский государственного университета информатики и радиоэлектроники».	Боброва Наталья Леонидовна , кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры микропроцессорных систем и сетей учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Оборотная сторона обложки	учреждение образования «Белорусский государственный университет»	Белорусский государственный университет

Соискатель



Н.Д. Абрамович

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций,
к.т.н., доцент



О.В. Бойправ