

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

*На правах рукописи*

УДК 612.15-045.85, 57.087

КИШКЕВИЧ  
Инна Вячеславовна

**АППАРАТНОЕ И МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РЕГИСТРАЦИИ СПЕКЛ-ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЛАЗЕРНОЙ ДИАГНОСТИКЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

магистерской диссертации на соискание степени  
магистра техники и технологии

по специальности 1-59 81 01 «Управление безопасностью производственных процессов»

Научный руководитель  
канд.техн.наук, доцент  
Меженная М.М.

Минск 2019

Работа выполнена на кафедре инженерной психологии и эргономики учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель:

**Меженная Марина Михайловна,**  
кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной психологии и эргономики учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Рецензент:

**Рифицкая Ирина Ивановна,**  
кандидат психологических наук, доцент кафедры педагогики и психологии учреждения образования «Белорусский государственный экономический университет»

Защита диссертации состоится «24» июня 2019 г. года в 9<sup>00</sup> часов на заседании Государственной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П.Бровки, 6, 2 уч.корп., ауд. 610, тел.: 293-89-92, e-mail: [kafepie@bsuir.by](mailto:kafepie@bsuir.by).

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

## **ВВЕДЕНИЕ**

Мониторинг состояния системы микроциркуляции как основного звена, обеспечивающего метаболический гомеостаз в органах и тканях, является одной из важных проблем современной медицинской диагностики, так как функциональные и морфологические изменения в микроциркуляторном русле наблюдаются при многих заболеваниях: сердечно-сосудистых осложнениях, атеросклерозе, сахарном диабете, хронической венозной недостаточности и других. В настоящее время мониторинг микроциркуляционной функции ограничен по ряду причин, основными из которых являются: существование ограниченного числа безопасных методов исследования и сложность интерпретации получаемых данных.

Для изучения системы микроциркуляции все чаще применяются оптические методы диагностики, обладающие следующими преимуществами: высокой точностью и чувствительностью, дистанционностью, высоким пространственным разрешением и воспроизводимостью результатов измерений. По сравнению с традиционно используемыми в медицинской практике морфологическими исследованиями, проводящимися в большинстве случаев биопсийным методом, отражающими состояние микроциркуляции только в конкретной точке и не дающие представлений о динамических процессах, данные методы характеризуются неинвазивностью и безопасностью для пациента. Возможность проведения диагностики состояния сосудистой системы и микроциркуляции крови в режиме реального времени обеспечивается рядом оптических методов: лазерная доплеровская флуометрия, доплеровская оптическая когерентная томография, интравитальная микроскопия, магнитнорезонансная томография и ангиография, транскраниальная доплерография и др. Однако, они имеют ряд существенных ограничений: недостаточно высокое пространственное и временное разрешение, ограниченность информации о потоке частиц, особенно при сканировании по глубине биоткани, инвазивность измерений и др.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

В современной клинической практике крайне актуальны оценка состояния микроциркуляции крови и диагностика микроциркуляторных расстройств при самых различных заболеваниях: в кардиологии, диабетологии, при онкологии, в дерматологии, стоматологии, хирургии и реаниматологии. Расстройства микроциркуляции весьма разнообразны как по своему патогенезу, так и по клиническим проявлениям. Поэтому в клинике различных заболеваний и экстремальных состояний, а также при коррекции микроциркуляторных нарушений необходимы методы как оперативной оценки состояния кровотока на тканевом уровне, так и длительного его мониторинга.

Интерес к исследованию микрососудистого русла системы кровообращения обусловлен значительной ролью капилляров в осуществлении основных процессов жизнедеятельности организма, в трофическом обеспечении органов и их непосредственном участии в тканевом и клеточном дыхании. От согласованной работы сердца, крупных кровеносных магистралей и сосудов микроциркуляции в целом зависят здоровье и продолжительность жизни человека.

### **Цель и задачи исследования**

Целью данной работы является разработка методического и аппаратного обеспечения спекл-визуализации для диагностики микроциркуляции поверхностных биотканей человека.

Для достижения поставленной цели были изучены современные оптические методы диагностики микроциркуляции. Обоснована целесообразность применения метода спекл-визуализации для неинвазивной экспресс-оценки состояния микроциркуляторного русла поверхностных биотканей человека. Для реализации метода спекл-визуализации разработано методические и программное обеспечение. Экспериментально обоснованы параметры обработки, наиболее оптимальные с точки зрения соотношения пространственно-временного разрешения и времени вычислений. Проведены исследования состояния микроциркуляции в поверхностных сосудах кожи при проведении физиотерапевтических процедур (криотерапия, инфракрасная терапия).

**Объектом** исследования выступает микроциркуляторное русло поверхностных биотканей человека.

**Предметом** работы выступает методика обеспечения регистрации биоспеклов, аппаратное обеспечение для реализации спекл-визуализации при оценке состояния микроциркуляция поверхностных биотканей человека.

**Область исследования.** Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1-59 81 01 «Управление безопасностью производственных процессов»

### **Теоретическая и методологическая основа исследования**

В основу диссертации легли результаты известных исследований российских и зарубежных ученых в области спекл-визуализации.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в разработке методики регистрации спекл-изображений и апробация разработанной методики при проведении физиотерапевтических процедур.

**Теоретическая значимость** диссертации заключается в том, что на основе предложенной методики мониторинга микроциркуляции возможна оценка эффективности проведения физиотерапевтических процедур.

**Практическая значимость** диссертации состоит в том, мониторинг состояния системы микроциркуляции позволяет оценить происходящие в организме естественные адаптивные процессы терморегуляции

### **Апробация и внедрение результатов исследования**

Отдельные положения диссертации, в частности аппаратное и программное обеспечение динамического измерения биоспектров для мониторинга состояния системы микроциркуляции при воздействии различных физиотерапевтических факторов, используются при преподавании курса «Методы и средства контроля физических и медико-биологических параметров».

### **Публикации**

Основные положения работы и результаты диссертации изложены в девяти опубликованных работах, в том числе трех в журналах, входящих в перечень ведущих периодических изданий ВАК.

**Структура и объем работы.** Структура диссертационной работы обусловлена целью, задачами и логикой исследования. Работа состоит из введения, трёх глав и заключения, библиографического списка и приложений. Общий объем диссертации – 53 страницы. Работа содержит 9 таблиц, 25 рисунков. Библиографический список включает 21 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** рассмотрено современное состояние проблемы диагностики микроциркуляции, определены основные направления исследований, а также дается обоснование актуальности темы диссертационной работы.

В **общей характеристике работы** сформулированы ее цель и задачи, показана связь с научными программами и проектами, даны сведения об объекте исследования и обоснован его выбор, представлены положения, выносимые на защиту, приведены сведения о личном вкладе соискателя, апробации результатов диссертации и их опубликованность, а также, структура и объем диссертации.

В **первой главе** рассматриваются существующие методы диагностики микроциркуляции, метод регистрации спекл-изображений и применяемое для его реализации аппаратное обеспечение.

Дана краткая характеристика таких методов, как фотоплетизмография, пульсоксиметрия, лазерная доплеровская флоуметрия, оптическая когерентная томография (ОКТ), интравитальная микроскопия, видеокапилляроскопия, анемометрия по изображениям частиц (АИЧ), оптический видеомониторинг, оптическая топометрия, 3D-моделирование кожи.

Рассмотрена методика спекл-визуализации и оборудование, применяемое для реализации методики.

Лазерные спеклы, созданные отраженным или прошедшим светом, который может свободно перемещаться в пространстве, могут создавать интерференционное пространство с различной яркостью. Если сделать фотографию этой области в некоторой плоскости, то получаем изображение с пятном, называемое спекл-изображением. В связи с тем, что изображение формируется рассеянным когерентным светом, изменение спекл-изображения соответствует изменению свойств объекта.

Поскольку большинство систем визуализации рассматривают спекл как шум, ухудшающий качество изображения, значительные усилия были потрачены на устранение спеклов. На самом деле спекл это носитель информации, который несет информацию о положении (месте) рассеяния, таком как динамика или геометрия, которая может быть получена путем анализа спекл-структуры. Например, если место рассеяния испытывает движение жидкости с движением рассеивателей, таких как эритроциты, наблюдается быстро меняющийся спекл-рисунок. В частности, тип движения спеклов часто описывается как хаотичное движение, которое не имеет явной связи с предыдущим моментом.

Экспериментальная установка для данной методики спекл-визуализации проста:

Расходящийся лазерный свет освещает объект, находящийся под детектором ПЗС-камера (или эквивалент). Данные передаются на персональный компьютер для обработки с помощью специализированного программного обеспечения. Выбор количества пикселей, для вычисления контраста спеклов очень важный момент: слишком мало пикселей и статистика будет нарушена, слишком много, и пространственное разрешение уменьшится. На практике было установлено, что квадрат размером 5x5 или 3x3 пикселей, как правило, подходит лучше всего.

Лазерная спекл-контрастная визуализация (LSCI) обеспечивает бесконтактный, в режиме реального времени и неинвазивный мониторинг изменений кожного кровотока. Этот метод включает в себя отображение интегрированных во времени спекл-структур, генерируемых лазерным излучением малой мощности, с использованием камеры с зарядовой связью (ПЗС) с высоким пространственно-временным разрешением. LSCI имеет несколько преимуществ по сравнению с существующими методами, включая одновременно высокое пространственное и временное разрешение, простоту реализации и относительно низкую стоимость внедрения. Однако функциональные характеристики систем LSCI ограничены артефактами движения. Для устранения этого барьера сообщается о постобработке сложных изображений. Такой подход основан на усреднении информации, собранной из нескольких последовательных кадров.

**Во второй главе** приведен анализ аппаратного обеспечения регистрации спекл-изображений.

Для видеорегистрации динамических спекл-полей использовалась высокоскоростная камера Basler с интерфейсом GigE, объективом KowaLM50HC, CCD-матрицей и частотой 120 кадров в секунду при разрешении VGA.

Регистрируемые со скоростью 120 кадров в секунду спекл-изображения подвергались цифровой обработке. Целью цифровой обработки являлся расчет контрастности для каждого пикселя спекл-изображения.

Интерференционная картина рассеянного биообъектом лазерного излучения регистрировалась с помощью видеокамеры, снабженной специальной

оптической системой. Полученная видеоинформация поступала на персональный компьютер для отображения и цифровой обработки.

Также разработана методика спекл-визуализации.

Для методики спекл-визуализации необходимо определить функции, которые будет выполнять устройство для регистрации спекл-изображений, и с помощью каких элементов это можно реализовать.

В процессе измерения динамических биоспеклов на исследуемый участок кожного покрова фокусировался пучок лазерного излучения, сформированного красным лазером мощностью 3 мВт с длиной волны 633нм, на которой наблюдается существенное рассеяние зондируемого излучения эритроцитами. Интерференционная картина рассеянного биообъектом лазерного излучения регистрировалась с помощью высокоскоростной камеры с интерфейсом GigE, CCD-матрицей и частотой 120 кадров в секунду при разрешении VGA. Оптическая система камеры представлена объективом Kowa LM50HC.

Проведена корректировка методики.

Используемая установка имеет существенный недостаток, который заключается в неудобном расположении пациента при регистрации спекл-изображений. Закрепленные в горизонтальном положении камера и лазер диктуют условие по расположению исследуемого биообъекта в вертикальной плоскости, что зачастую затруднено в виду отсутствия какой-либо опоры, а как следствие – создает двигательные артефакты, препятствующие объективной регистрации спекл-картины.

Для решения вышеизложенного недостатка был приобретен штатив, который позволил закрепить камеру и лазер по отдельности и расположить их над объектом (а не перед объектом, как это было ранее). Как следствие – исследуемый объект переместился в горизонтальную плоскость, что позволило обеспечить комфортные условия для проведения исследований, а также объективность получаемых данных в виду неподвижности биообъекта. Штатив позволяет регулировать фокусное расстояние для различных видов исследований, повышает быстроту и качество исследований.

В **третьей главе** представлены результаты апробации разработанных методических и аппаратных средств для регистрации спекл-изображений.

Регистрация спекл-изображений при проведении криотерапии.

В исследовании приняли участие 7 человек. Испытуемый помещался в кабину на 3 минуты, температура внутри кабины составляла – 110°С. Полученные в результате обработки спекл-изображения отображают снижение процессов микроциркуляции в поверхностных тканях человека непосредственно после окончания процедуры криотерапии и постепенное их восстановление спустя 30 минут.

Регистрация спекл-изображений при проведении инфракрасной терапии.

Исследования состояния микроциркуляции человека при проведении физиотерапевтических процедур проводились на базе ИК камеры для низко-

интенсивного воздействия на тело человека, представляющей собой кабину с входной дверью, воздушными отверстиями и размещенными внутри нее источниками инфракрасного излучения.

Объектом исследования являлся участок кожи на запястье и ладони правой руки пациента в форме квадрата 40×40 мм. Расстояния от источника света, а также от объектива камеры до исследуемого участка составляли 400 мм. Продолжительность сеанса составила 30 минут. Температура внутри кабины во время сеанса составляла 39°C. Регистрировалось исходное состояние микроциркуляции исследуемых участков кожи (0 мин), после завершения сеанса (10 мин), и спустя 20 минут. Визуальных изменений на исследуемых участках после проведения процедуры не наблюдалось.

На основании проведенных исследований были сформулированы следующие выводы:

1 Метод динамического измерения и цифровой обработки биоспеклов кожи позволяет проводить неинвазивную диагностику микроциркуляции в режиме реального времени и получать оптические изображения внутренней структуры поверхностного кровотока.

2 Метод динамического измерения и цифровой обработки биоспеклов кожи позволяет выявить изменения в микроциркуляции, происходящие при проведении различных физиотерапевтических процедур.

3 Результаты анализа спекл-изображений согласуются с общей реакцией микроциркулярного кровотока в условиях различных воздействий на покровные ткани человека.

Мониторинг состояния системы микроциркуляции при воздействии различных физиотерапевтических факторов позволяет оценить эффективность проводимых мероприятий по профилактике и лечению функциональных систем человека.

С другой стороны мониторинг состояния системы микроциркуляции содержит диагностическую информацию, так как позволяет оценить происходящие в организме естественные адаптивные процессы терморегуляции. Значения времени для возвращения уровня микроциркуляции в исходное состояние после окончания физиотерапевтической процедуры переменны у каждого человека, однако важным критерием нормального функционирования регуляторных механизмов является тенденция к восстановлению исходных функциональных показателей и их последующее достижение в пределах временных параметров нормы. Иная тенденция к восстановлению функциональных показателей является поводом для прекращения сеансов физиотерапевтических процедур и последующей консультации с врачом.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Использование оптических методов для исследования кожного покрова человека позволяет оценить состояние биологических тканей на различной глубине и с различной разрешающей способностью. По сравнению с тради-

ционно используемой в медицинской практике биопсией данные методы характеризуются неинвазивностью, высокой точностью и чувствительностью, дистанционностью, высоким пространственным разрешением и воспроизводимостью результатов измерений, а также безопасностью для пациента. В данной работе исследовался метод лазерной спекл-визуализации, основанный на использовании лазерного излучения для исследования биоспеклов кожи.

Для реализации метода спекл-визуализации разработано методическое и аппаратное обеспечение. Экспериментально обоснованы параметры обработки, наиболее оптимальные с точки зрения соотношения пространственно-временного разрешения и времени вычислений. Установлено, что в целом пространственная обработка имеет существенный недостаток – она уменьшает пространственное разрешение спекл-изображений, в то время как временная обработка отлично подходит для идентификации движущихся частиц, т.е. для оценки общего уровня микроциркуляции в исследуемой области, а пространственно-временная передает топологию крупных поверхностных кровеносных сосудов.

Установлено, что в целом пространственная обработка имеет существенный недостаток – она уменьшает пространственное разрешение спекл-изображений, в то время как временная обработка отлично подходит для идентификации движущихся частиц, т.е. для оценки общего уровня микроциркуляции в исследуемой области, а пространственно-временная передает топологию крупных поверхностных кровеносных сосудов.

Проведены исследования состояния микроциркуляции в поверхностных сосудах кожи при проведении физиотерапевтических процедур (криотерапия, ИК терапия). Наиболее оптимальным оказалась пространственно-временная обработка в окне 3х3х9. Она обеспечивает меньшие потери в разрешении итогового изображения за счет использования минимального размера окна, высокую точность результатов за счет использованием значений интенсивности пикселей из ряда соседних кадров.

Результаты проведенных исследований доказали целесообразность использования разработанного методического и аппаратного обеспечения для качественной диагностики состояния микроциркуляции поверхностных биотканей человека: выявлены первичные изменения в микроциркуляции, обеспечена визуализация дальнейших изменений, происходящих в процессе прохождения физиотерапевтических процедур.

#### **Список опубликованных работ**

1. Табунов, С.Н. Исследование воздействия физиотерапевтических факторов на микроциркуляцию поверхностных биотканей / С.Н. Табунов, Т.В. Гордейчук, М.Х.-М. Тхостов, П.И. Никитенко, Е.Н. Рункевич, И.В. Кишкевич, Э.С. Кашицкий. – Научный журнал «Доклады БГУИР» / редкол.: М.П. Батура [и др.]. – Мн.: БГУИР, №7 (101), 2016. – С. 75–79
2. Дик, С.К. Диагностика микроциркуляции поверхностных биотканей

при артрите на основе метода динамического измерения биоспеклов / С.К. Дик, Т.В. Гордейчук, Д.А. Завацкий, Т.Б. Мелик-Касумов, Т.О. Павлють, Н.И. Счастливая, Е.Н. Рункевич, И.В. Кишкевич. – Научный журнал «Доклады БГУИР» // редкол.: М.П. Батура [и др.]. – Мн.: БГУИР, №7 (101), 2016. – С. 47–52.

3. Дик, С.К. Лазерная спекл-визуализация микроциркуляции поверхностных тканей человека при проведении криотерапии / С.К. Дик, Т.В. Гордейчук, М.М. Меженная, С.Н. Табунов, Э.С. Кашицкий, П.И. Никитенко, И.В. Кишкевич, Е.Н. Рункевич // редкол.: В.С. Улащик [и др.]. Научно-практический и научно-теоретический журнал «Новости медико-биологических наук». – Мн., Т.15, №1, 2017 – С.56– 65.

4. Дик, С.К. Исследование воздействия физиотерапевтических факторов на микроциркуляцию поверхностных биотканей человека / Т.В. Гордейчук, М.М. Меженная, С.Н. Табунов, Г.Д. Ситник, П.И. Никитенко, Е.Н. Рункевич, И.В. Кишкевич // BIG DATA and

Advanced Analytics: collection of materials of the third international scientific and practical

conference. (Minsk, Belarus, May 3 – 4, 2017) / editorial board: M. Batura [etc.]. – Minsk, BSUIR, 2017. – P. 324–330.

5. Кишкевич, И. В. Методика исследований зависимости параметров биоспеклов от скорости движения биологических частиц / И. В. Кишкевич, Е. Н. Рункевич, Т. В. Калилец // Компьютерное проектирование и технология производства электронных систем: сборник тезисов 54 научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 23–27 апреля 2018 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; отв. ред. Раднёнок А. Л. – Минск, 2018. – С. 284.

6. Применение спекл-визуализации в оценке микроциркуляции поверхностных биотканей / Т. В. Калилец и др. // BIG DATA Advanced Analytics: collection of materials of the fourth international scientific and practical conference, Minsk, Belarus, May 3 – 4, 2018 / editorial board: M. Batura [etc.]. – Minsk, BSUIR, 2018. – P. 435 – 441.

7. Кишкевич, И. В. Мобильное приложение поиска ближайших аптек с требуемыми медицинскими препаратами / И. В. Кишкевич // Компьютерное проектирование и технология производства электронных систем: сборник тезисов 53 научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов (Минск, 2–6 мая 2017 года) / отв. ред. Раднёнок А. Л. – Минск : БГУИР, 2017.

8. Рункевич, Е. Н. Аппаратно-программные методы оценки микроциркуляции поверхностных биотканей / Е. Н. Рункевич, И. В. Кишкевич, Т. В. Калилец // Компьютерное проектирование и технология производства элек-

тронных систем: сборник тезисов 54 научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 23–27 апреля 2018 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; отв. ред. Раднёнок А. Л. – Минск, 2018.

9. Меженная М.М Расчет контраста спекл-изображений: методическое обеспечение и программная реализация / М.М. Меженная, Е.Н. Рункевич, И.В. Кишкевич, Т.В. Калилец, С.К. Дик, Д.В.Лихачевский, Р.А. Лащетко // Научный журнал «Доклады БГУИР» / редкол.: В.А. Богуш [и др.]. Мн.: БГУИР, №7 (117), 2018. Стр. 139-143.

10. Меженная М.М. Расчёт контраста спекл-изображений в оценке микроциркуляции крови: обоснование выбора параметров обработки / Дик С.К., Калилец Т.В., Рункевич Е.Н., Кишкевич И.В., Лащётко Р.А. // BIG-DATAandAdvancedAnalytics = BIGDATA и анализ высокого уровня : сб. материалов V Междунар. науч.-практ. конф. (Республика Беларусь, Минск, 13–14 марта 2019 года). В 2 ч. Ч. 2 / редкол. : В. А. Богуш [и др.]. – Минск : БГУИР, 2019. – 337-346 с.

11. Mezhennaya M.M. Laser Speckle Image Processing for Visualizing Tissue Perfusion / M.M. Mezhennaya, S.K. Dzik, T.V. Kalilec, K.N. Runkevich, I.V. Kishkevich, R.A. Laschetko // 14th International Conference on Pattern Recognition and Information Processing (PRIP'2019) / Proceedings of the 14th International Conference. – Minsk: BSUIR, 2019. P. 249-253.