

На правах рукописи

Горюнов Илья Андреевич

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ
ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДЛЯ
КОНТРОЛЯ КРОВЕНАПОЛНЕНИЯ И
ОКСИГЕНАЦИИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ**

Направление 12.04.04 – Биотехнические системы и технологии
Направленность «Фотоника и электроника в медико-биологической практике»

АВТОРЕФЕРАТ

Магистерской выпускной квалификационной работы

Орел, 2025

Работа выполнена на кафедре приборостроения, метрологии и сертификации
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего
образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»

Научный руководитель: кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
научно-технологического центра
биомедицинской фотоники,
доцент кафедры приборостроения,
метрологии и сертификации
Дрёмин Виктор Владимирович

Официальный рецензент: кандидат технических наук, доцент
инженерно-исследовательского факультета
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
национальный исследовательский
университет информационных технологий,
механики и оптики» (г. Санкт-Петербург)
Маргарянц Никита Борисович

Защита состоится 27 июня 2025 года в 10⁰⁰ часов на заседании Государственной
экзаменационной комиссии по адресу: 302020, РФ, г. Орел, Наугорское шоссе, 29.

С выпускной квалификационной работой можно ознакомиться на кафедре
приборостроения, метрологии и сертификации ФГБОУ ВО «Орловский
государственный университет имени И.С. Тургенева»

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Функциональная активность биологических тканей напрямую зависит от состояния регионарного кровотока, который обеспечивает доставку кислорода и субстратов обмена веществ, а также удаление продуктов метаболизма. Микроциркуляторное русло, представляющее собой сеть артериол, капилляров и венул, играет ключевую роль в регуляции тканевого гомеостаза, поддерживая баланс между потребностями клеток и их снабжением. Нарушения микроциркуляции лежат в основе широкого спектра острых и хронических патологий, включая ишемическое повреждение органов, воспалительные процессы и опухолевые состояния. Современные клинические исследования подтверждают, что даже кратковременное снижение локального кровотока способно вызвать дисфункцию и морфологические изменения различных тканевых структур, которые при отсутствии своевременной диагностики и лечения могут стать необратимыми. При этом первые признаки ишемических нарушений часто ограничиваются нарушением капиллярного кровоснабжения и остаются нечувствительными для традиционных показателей макроциркуляции, таких как артериальное давление или пульс. Особенно остро эта проблема актуальна в абдоминальной хирургии, где раннее выявление ишемизированных участков кишечника интраоперационно может иметь решающее значение для определения объема резекции и предотвращения развития перитонита или септических осложнений. По данным эпидемиологических исследований, острые формы мезентериальной ишемии сопровождаются летальностью до 80%, а хронические стенозы мезентериальных сосудов выявляются у значительного процента пожилых пациентов.

В то же время мониторинг сосудистых опухолей у детей также является важным направлением диагностики микроциркуляторных нарушений. Так, инфантильные гемангиомы, являющиеся наиболее частыми сосудистыми новообразованиями младенческого возраста, сопровождаются патологическим ростом микрососудов и нарушением локальной оксигенации тканей. Несмотря на гипervasкуляризацию, гемангиома может содержать гипоксические зоны, предрасположенные к изъязвлению и осложнениям. Поэтому объективная количественная оценка параметров микроциркуляции, таких как кровенаполнение и насыщение тканей кислородом, приобретает большее значение в различных клинических сценариях – от неотложной помощи до планового наблюдения.

Для оценки микроциркуляции в клинической практике используется широкий спектр методов, к которым могут относиться УЗИ, магнитно-резонансная томография, флуоресцентная ангиография, а также спектроскопические и визуализирующие оптические методы. Каждый из этих методов имеет определенные преимущества и ограничения, среди которых можно выделить высокое пространственное или временное разрешение, возможность регистрации метаболических параметров в режиме реального

времени. Однако на сегодняшний день ни один из существующих подходов не сочетает в себе одновременно высокую чувствительность к параметрам оксигенации, широкую зону зондирования, неинвазивность и возможность картирования физиологических параметров с высоким пространственным разрешением.

В связи с этим, гиперспектральная визуализация является перспективным направлением, способным объединить ключевые преимущества спектроскопии и визуализации. В отличие от методов, дающих только точечные или интегральные значения, гиперспектральная визуализация способна обеспечивать построение двухмерных карт физиологических параметров, позволяя выявлять локальные зоны гипоперфузии и гипоксии.

Цель данной работы заключается в разработке и экспериментальной оценке системы гиперспектральной визуализации для неинвазивной оценки параметров микроциркуляции, таких как кровенаполнение и оксигенация, при интраоперационном выявлении ишемически измененных участков кишечной стенки и объективном мониторинге терапии сосудистых новообразований кожи у детей.

Задачи исследования:

- 1) обзор современных методов визуализации и количественной оценки параметров микроциркуляции в биологических тканях;
- 2) разработка измерительного канала оценки энергетических характеристик источника излучения с целью контроля оптической мощности и обеспечения воспроизводимости результатов измерения;
- 3) составление документации для осуществления контроля технического состояния разрабатываемого устройства;
- 4) проектирование печатной платы измерительных каналов и интеграция аппаратного модуля в состав гиперспектральной системы визуализации;
- 5) разработка аппаратной архитектуры гиперспектральной системы с учетом спектральных свойств биологической ткани и особенностей лабораторного и клинического применения;
- 6) разработка программных алгоритмов обработки гиперспектральных данных с возможностью автоматизированного анализа с использованием нейросетевых и кластерных методов для сегментации и визуализации зон микроциркуляторных нарушений.

Объектом исследования являются биологические ткани человека и модельных животных, характеризующиеся различными уровнями кровенаполнения и оксигенации.

Предметом исследования являются метод и техническая реализация системы гиперспектральной визуализации, предназначенные для оценки параметров микроциркуляции биологических тканей на основе спектральных признаков.

Методы исследования. В работе использовались аналитические и экспериментальные методы, методы спектрального анализа, математического моделирования и статистической обработки данных. Для анализа гиперспектральных данных применялись алгоритмы машинного обучения, нейросетевые и кластерные модели.

Научная новизна заключается в том, что при решении поставленных задач исследования:

1) разработана гиперспектральная система визуализации, ориентированная на количественную оценку параметров микроциркуляции биологических тканей в условиях клинического применения с системой контроля параметров освещения;

2) обоснован и реализован подход к автоматизированному анализу гиперспектральных данных, включающий этапы сегментации изображений и спектральной кластеризации;

3) предложен метод картирования физиологических параметров тканей, применяемый к задачам диагностики ишемических повреждений и неинвазивного мониторинга сосудистых новообразований кожи;

4) проведена экспериментальная апробация разработанной системы в лабораторных и клинических условиях, включая задачи интраоперационного контроля жизнеспособности тканей и оценки динамики сосудистых опухолей у детей.

Практическая значимость работы заключается в разработке системы для неинвазивной оценки параметров кровенаполнения и оксигенации биологических тканей при интраоперационной оценке жизнеспособности кишечной стенки, а также в задачах мониторинга сосудистых новообразований кожи. Применение такой системы в клинической практике позволит проводить объективную оценку состояния биологической ткани и своевременно корректировать тактику лечения.

Личный вклад автора заключается в разработке архитектуры и составных элементов гиперспектральной системы, реализации программных модулей обработки данных, проведении лабораторных и клинических исследований, интерпретации результатов и формулировании основных выводов.

Положения, выносимые на защиту:

1) разработанная система гиперспектральной визуализации, включающая аппаратно-программные модули, обеспечивает неинвазивную оценку параметров микроциркуляции и оксигенации тканей в лабораторных и клинических условиях;

2) метод автоматизированной обработки гиперспектральных данных, включающий сегментацию изображений и спектральную кластеризацию, позволяет выделять и классифицировать биологические ткани по спектральным признакам;

3) результаты лабораторных и клинических экспериментов подтверждают чувствительность разработанной системы для диагностики ишемических состояний и мониторинга сосудистых новообразований кожи.

Степень достоверности и апробации результатов:

Достоверность результатов обоснована использованием апробированных и подтвержденных методов и методик обработки результатов измерений. Материалы исследований доложены и обсуждены на 12 всероссийских и международных конференциях.

Публикации:

По теме диссертации опубликованы 12 работ, из которых 2 в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, и 2 статьи, индексируемых в БД Web of Science/Scopus. Получено 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем выпускной квалификационной работы:

Работа состоит из введения, трех разделов, заключения, списка использованных источников, включающего 67 наименований, 4 приложения и изложена на 209 страницах машинописного текста, содержит 45 рисунков, 23 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, определены объект и предмет исследования, а также раскрыта научная новизна.

В первом разделе представлено медико-биологическое обоснование необходимости разработки системы гиперспектральной визуализации для оценки параметров кровенаполнения и оксигенации биологических тканей. Проведён анализ структурно-функциональной организации микроциркуляторного русла и механизмов регуляции регионарного кровотока с учётом ключевых физиологических факторов. Рассмотрены патофизиологические изменения при ишемии кишечной стенки, включая зависимость характера морфологических повреждений от степени нарушения кровотока и снижения уровня тканевой оксигенации. Дополнительно проанализированы особенности сосудистых новообразований, включая инфантильные гемангиомы, для которых характерна аномальная сосудистая морфология и нарушение локального кровоснабжения. Эти особенности подчёркивают необходимость применения неинвазивных методов, обеспечивающих количественную оценку гемодинамических параметров в поверхностных структурах биологической ткани.

С учётом применения системы в медицинской практике особое значение имеет источник оптического излучения. Его спектральные характеристики должны быть согласованы с приёмным каналом гиперспектральной камеры, а энергетические параметры подлежат контролю для обеспечения безопасности и воспроизводимости результатов измерений. На основании проведённого

анализа сформулированы медико-технические требования, на основе которых была разработана структурная схема системы, представленная на рисунке 1.

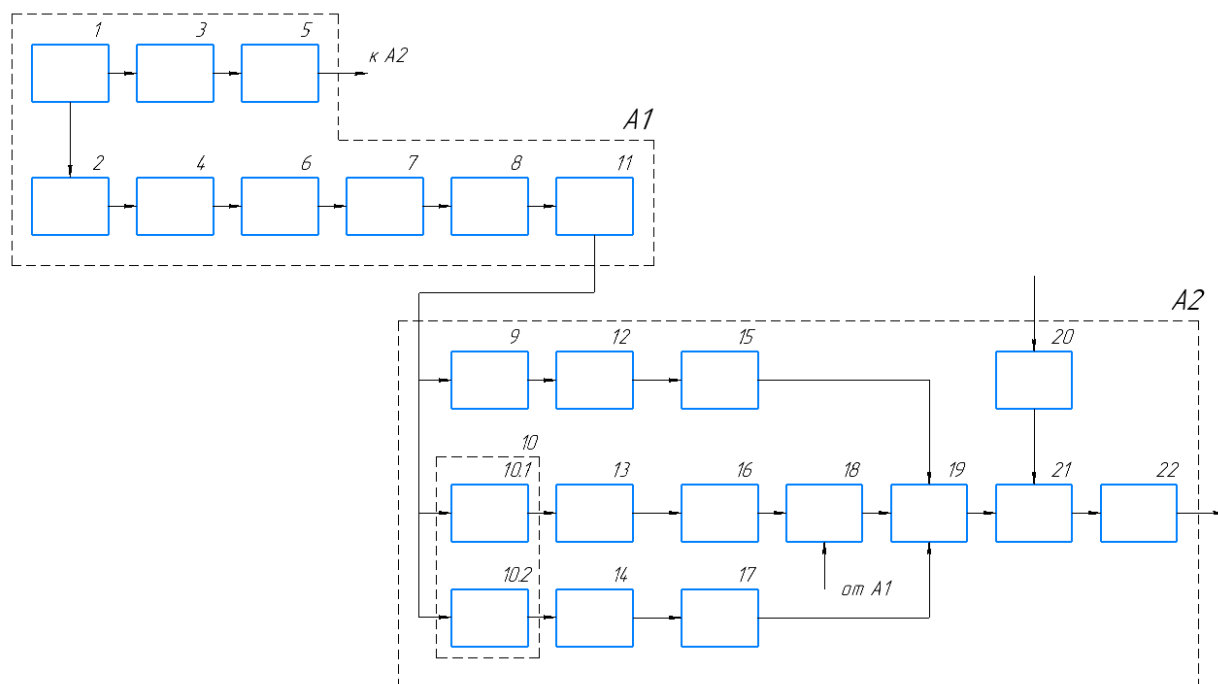


Рисунок 1 – Структурная схема системы гиперспектральной визуализации: 1 – сетевой фильтр; 2 – фазоимпульсный регулятор; 3 – понижающий трансформатор; 4 – выпрямитель сетевого напряжения; 5 – стабилизатор напряжения; 6 – ШИМ драйвер; 7 – каскад силовых ключей; 8 – выходной выпрямитель; 9 – фотодиод; 10 – термобатарея; 10.1 – термопара; 10.2 терморезистор; 11 – галогенная лампа; 12 – ПТН; 13, 17 – дифференциальный усилитель; 14 – ПСН; 15,16 – усилитель; 18 – сумматор, 19 – АЦП; 20 – блок управления; 21 – микроконтроллер; 22 – дисплей.

Для питания устройства используется блок А1, который состоит из двух функциональных цепей. Первая цепь предназначена для генерации стабильного напряжения ± 5 В, необходимого для питания аналоговых и управляющих частей схемы. Сетевое напряжение 220 В поступает на сетевой фильтр (1), который подавляет высокочастотные помехи и ограничивает импульсные скачки напряжения. Затем напряжение поступает на понижающий трансформатор (3), который обеспечивает гальваническую развязку и снижает амплитуду напряжения. После этого оно выпрямляется мостовым выпрямителем (4) и сглаживается. Стабилизированное напряжение ± 5 В генерируется на выходе стабилизатора (5) и подается на блок А2. Вторая цепь питает источник широкополосного излучения. Напряжение после сетевого фильтра поступает на фазоимпульсный регулятор (2), который обеспечивает ручное управление мощностью, подаваемой на контур лампы. Затем сигнал выпрямляется в выпрямителе сетевого напряжения (4) и подается на ШИМ-драйвер (6), который обеспечивает импульсное управление силовыми переключателями. Каскад силовых переключателей (7), управляет

подачей энергии на импульсный трансформатор и выходной выпрямитель (8), после чего питание подается на галогенную лампу (11).

Измерительная часть реализована в блоке А2. Излучение от широкополосного источника, попадает на фотодиод (9). Полученный фототок преобразуется в напряжение с помощью преобразователя тока в напряжение (12), после чего сигнал усиливается усилителем (15). Одновременно с измерением мощности регистрируется инфракрасное тепловое излучение с помощью термобатареи (10), которая содержит термопару (10.1), сигнал которой поступает на дифференциальный усилитель (13), а затем усиливается усилителем (16). Для коррекции температуры сигнала используется сумматор (18). Также, для измерения температуры окружающей среды используется терморезистор (10.2), сопротивление которого преобразуется в напряжение преобразователем сопротивления в напряжение (14), а затем усиливается дифференциальным усилителем (17). Аналоговые сигналы с трех измерительных каналов поступают в аналого-цифровой преобразователь (19), где преобразуются в цифровую форму. Затем данные обрабатываются в микроконтроллере (21). Работа устройства управляется через блок управления (20), а результат отображается на дисплее (22).

На основании реализуемой структурной схемы было проведено математическое описание, направленное на разработку электрической принципиальной схемы устройства. Основной задачей расчёта являлось определение параметров элементов, обеспечивающих требуемые режимы работы функциональных блоков, включая согласование входных и выходных сигналов. В расчёте учитывались характеристики используемых первичных преобразователей, усилительных каскадов и схем преобразования сигналов. Также был выполнен расчёт функционального узла, реализующего управление уровнем оптической мощности источника излучения.

Для обоснования метрологических характеристик измерительного канала был выполнен расчёт его точности, включающий анализ основных составляющих первичной погрешности, обусловленных свойствами чувствительных элементов, параметрами электронных компонентов и влиянием окружающей среды. По результатам расчёта установлено, что суммарная абсолютная погрешность не превышает значения, заданного в медико-технических требованиях.

Также проведён расчёт показателей надёжности разрабатываемой системы, являющийся обязательным этапом проектирования измерительных и управляющих устройств. Надёжность рассматривается как один из ключевых показателей качества приборной продукции. Оценка надёжности выполнена методом суммирования интенсивностей отказов отдельных компонентов. С учётом того, что архитектура устройства основана на последовательном соединении функциональных узлов и использовании типовых элементов, расчёт надёжности произведён для эквивалентного модуля с учётом параметров всех задействованных компонентов.

Завершающим этапом данного раздела являлось разработка печатной платы измерительного канала. В ходе проектирования были сформулированы и обоснованы конструктивные требования, обеспечивающие работу устройства. Также проведён расчёт на электромагнитную совместимость, включающий анализ паразитных наводок, экранирования и разводки сигнальных и силовых цепей, что позволило обеспечить минимальный уровень электромагнитных помех.

Во второй главе представлено метрологическое обоснование, проведена классификация устройства как медицинского изделия с измерительными функциями в соответствии с положениями Федерального закона № 323-ФЗ «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации» и Постановления Правительства РФ № 1416 «Об утверждении Правил государственной регистрации медицинских изделий». На основании анализа функционального назначения и технических характеристик системы обосновано отсутствие необходимости её включения в реестр средств измерений. С учётом специфики эксплуатации устройства в клинической среде и наличия измерительных каналов разработана методика контроля технического состояния (КТС), направленная на обеспечение стабильности и воспроизводимости показаний в процессе эксплуатации. В рамках методики определена последовательность действий и условия проведения КТС. На рисунке 2 представлена схема реализации программы контроля качества.

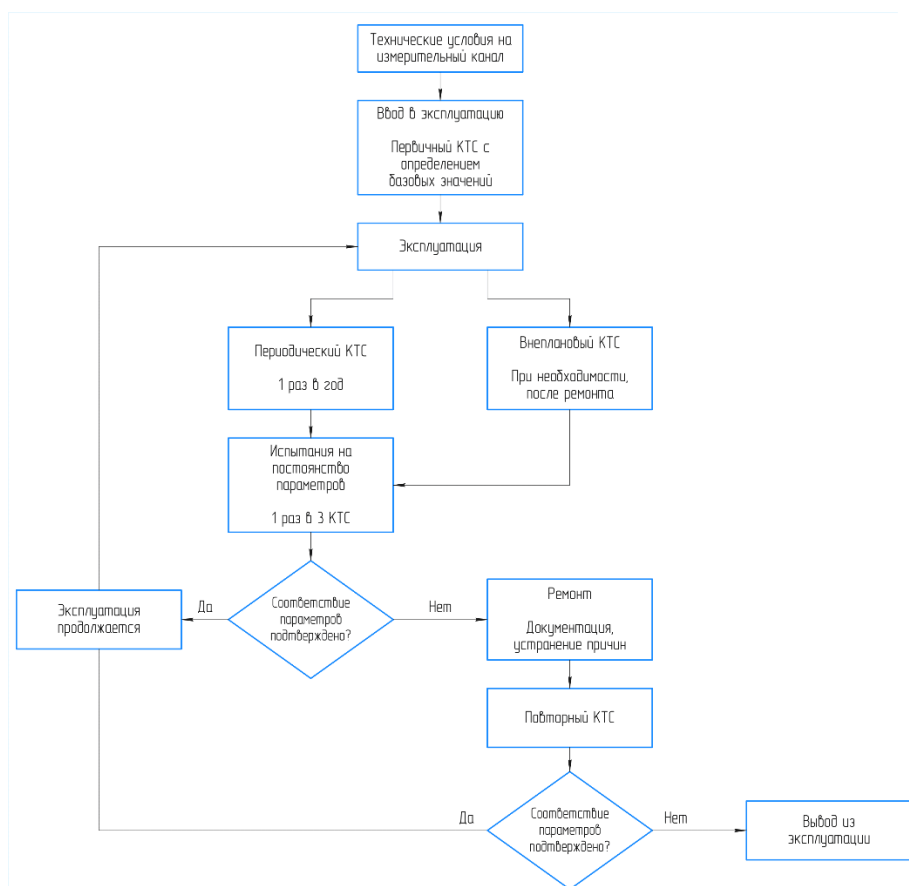


Рисунок 2 – Схема реализации программы контроля качества измерительного канала оптической мощности.

В третьем разделе представлена экспериментальная валидация разработанной системы гиперспектральной визуализации в лабораторных и клинических условиях. Основной целью данного этапа является проверка функциональности и практической пригодности системы для неинвазивной оценки физиологических параметров биологических тканей. В рамках проведённого исследования решались задачи организации экспериментальных условий, регистрации гиперспектральных данных, последующей обработки полученной информации, а также анализа воспроизводимости и информативности измерений.

В рамках экспериментальной валидации проводились лабораторные исследования, которые включали моделирование различной степени ишемии кишечной стенки на модельных животных с целью оценки изменений, возникающих в условиях нарушения кровоснабжения. В ходе эксперимента выполнялась регистрация гиперспектральных изображений, обеспечивающих получение пространственно-спектральной информации, что позволило не только выявлять характерные признаки ишемии, но и определять локализацию и площадь поражённых участков ткани. Для первичной оценки степени ишемических изменений использовался двухволновой подход, основанный на регистрации коэффициентов отражения на длинах волн, соответствующих изобестическим и неизобестическим точкам окси- и дезоксигемоглобина. В дополнение применялись алгоритмы машинного обучения, направленные на автоматизированную сегментацию гиперспектральных изображений и классификацию зон с различной степенью ишемических повреждений. Использовалась модель XGBoost, обученная на признаках, полученных после снижения размерности методом главных компонент (PCA). Для формирования обучающей выборки были размечены участки тканей с различной степенью ишемических изменений, подтверждённых гистологическим анализом, что позволило определить три класса: интактная ткань, зона обратимой ишемии и зона необратимого повреждения. По результатам оценки модели на тестовом наборе данных были получены метрики точности, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Метрики модели

	Accuracy	AUC	Se	Sp
Класс 0	0,98	0,99	0,98	0,94
Класс 1	0,95	0,99	0,95	0,96
Класс 2	0,97	0,99	0,97	0,97

На основе применения модели были получены карты классификации, которые позволили получить детальные изображения областей интактной ткани и областей с различной степенью ишемии, что сочетается с оценкой насыщения тканей кислородом с использованием двухволнового подхода. Такой комбинированный метод позволил оценить первичное распределение

ишемии по картам оксигенации и получить области классификации классов ишемии. Пример такой оценки представлен на рисунке 3.

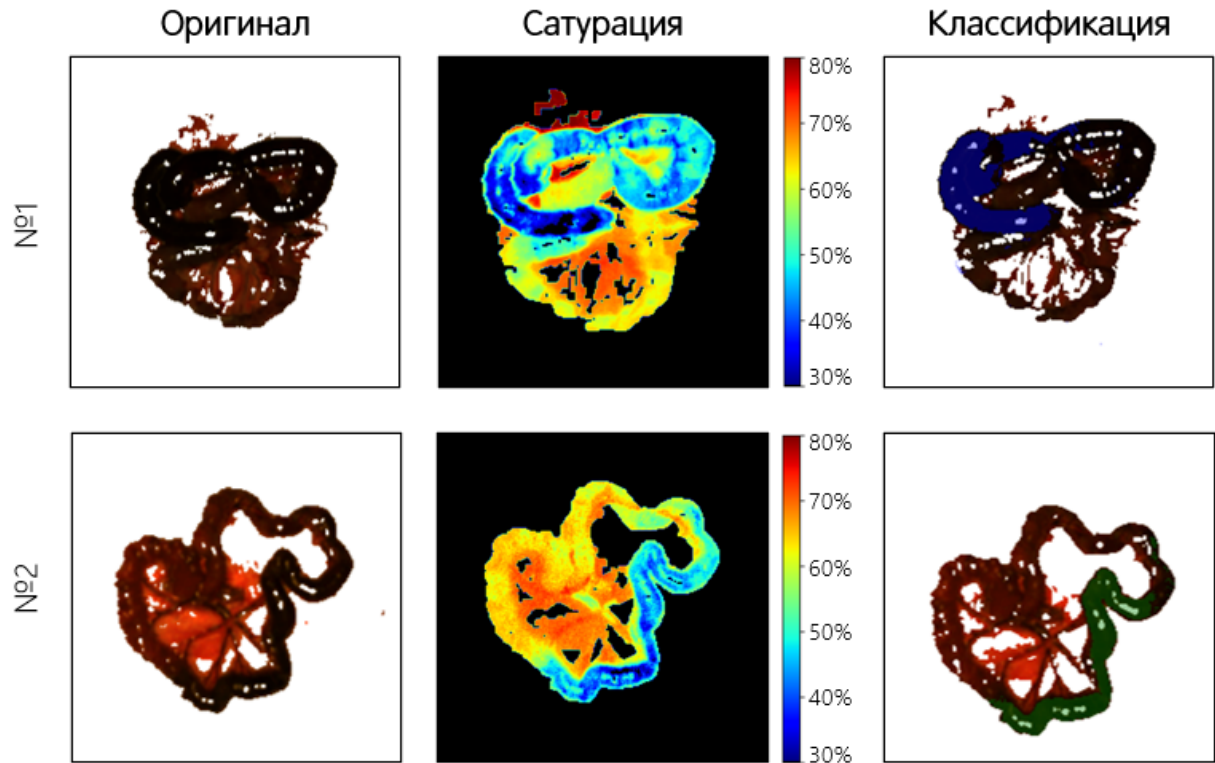


Рисунок 3 – Комбинационная карта оценки ишемии с учетом классификации механического типа повреждения

На представленных картах классификаций отображена цветовая маска, соответствующая результатом автоматической классификации ткани кишечной стенки. Зеленый цвет маски указывает на зону, отнесенную моделью к состоянию обратимой ишемии, а синий цвет – необратимой ишемии. В частности, в случае модельного животного №2 усредненное значение параметров тканевой сатурации в выделенной области составляет 39,9%, при этом модель с вероятностью более 99,9% классифицирует данный участок как область обратимой ишемии. Полученные результаты полностью коррелируют с данными гистологического анализа, согласно которым данный участок был отнесен к степени повреждения Grade 3, соответствующей обратимым изменениям.

У модельного животного №1 наблюдается общее снижение значений тканевой сатурации в области верхних петель кишечника, достигающее 23,2%. Однако, по данной карте нельзя сделать однозначный вывод о степени ишемических повреждений. Тем не менее, модель нанесла синюю маску, соответствующую классификации как необратимая ишемия, на левую часть верхних петель с вероятностью 99,9%. Этот результат также подтверждается гистологическим заключением – Grade 7, что соответствует необратимой ишемии.

Следующий этап валидации системы осуществлялся в условиях клинической практики. В рамках клинических исследований оценивалась применимость разработанного подхода для интраоперационной оценки состояния кишечной стенки у пациентов с острой хирургической патологией, сопровождающейся ишемией. В ходе лапаротомии, после восстановления кровоснабжения, осуществлялась регистрация гиперспектральных изображений для оценки уровня оксигенации тканей. В процессе анализа клинических данных потребовалась дополнительная предварительная фильтрация фоновых элементов изображения, таких как хирургические инструменты, марлевые салфетки и участки кожной ткани которые не подлежат анализу. Для этой цели была применена одномерная сверточная нейронная сеть, обученная на спектральных векторах пикселей, полученных из размеченных гиперкубов, зарегистрированных с поверхности тонкого кишечника. Разметка включала три класса: кишечная ткань, фон и аномальный фон, где отсутствовала корректная нормировка на эталон диффузного отражения. Нейронная сеть осуществляла бинарную классификацию, выделяя пиксели, соответствующие кишечной стенке, по характеру их спектральной кривой. Пространственный контекст при этом не учитывался, поскольку спектральные различия между тканью и фоном были достаточны для их разделения. Разработанный подход позволил использовать обученную модель для автоматической сегментации гиперспектральных изображений, направленной на выделение кишечной ткани среди фоновых структур. После применения модели дополнительно выполнялась постобработка полученной классификационной маски с использованием морфологических фильтров и методов устранения артефактов. Это обеспечивало сглаживание контуров, устранение шумов и повышение непрерывности выделенной области кишечника. Применение сверточной нейронной сети представлена на рисунке 4.

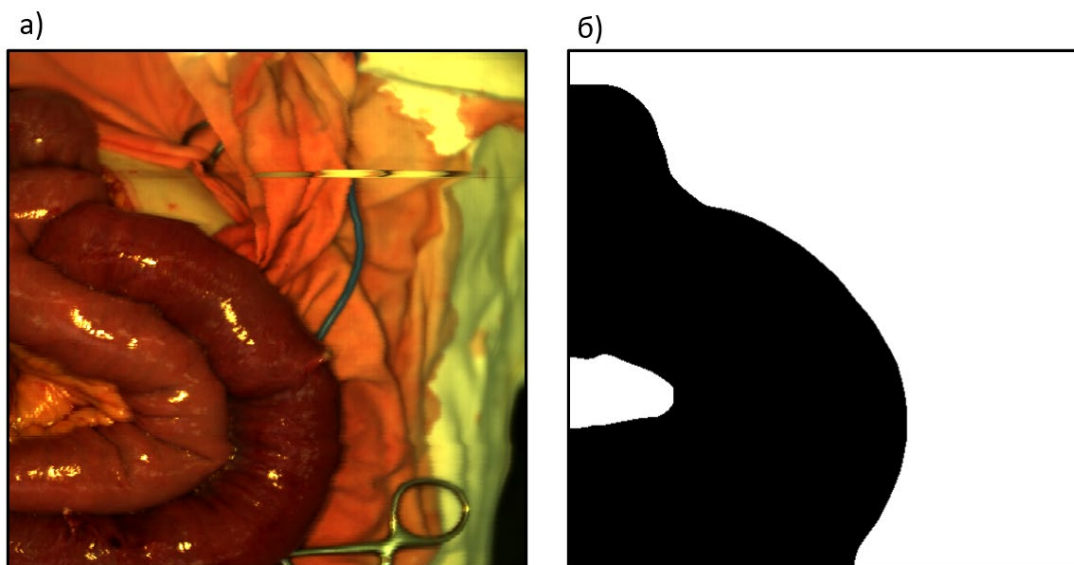


Рисунок 4 – Изображение кишечника
а) оригинальное, б) маска кишечной ткани

После формирования окончательной маски кишечной ткани была проведена кластеризация спектральных данных внутри сегментированной области для выявления характерных подтипов изменений. Из исходного гиперспектрального изображения извлекались спектры всех пикселей, отнесённых моделью к кишечной ткани, и формировался новый массив данных для анализа. В связи с высокой размерностью спектральных признаков первым этапом анализа стало снижение размерности методом главных компонент. Спектры были преобразованы в пространство с числом компонент, объясняющим не менее 99% общей дисперсии, что позволило сократить количество признаков до трёх информативных координат без значительной потери информации. На проекциях, полученных методом PCA, была применена кластеризация с использованием алгоритма смеси гауссовых распределений. Оптимальное число кластеров подбиралось автоматически - модель обучалась с различным количеством компонент (от 2 до 5), при этом выбор наилучшего варианта осуществлялся на основе значения байесовского информационного критерия, учитывающего баланс между точностью аппроксимации и сложностью модели. Кластеры с долей менее 5% исключались из выборки, поскольку они отражают спектральные артефакты, включая блики и шумовые образования, не относящиеся к морфологии ткани. Полученные кластеры были визуализированы в пространстве главных компонент, что позволило оценить их спектральную структуру разделения и устойчивость. Распределение классов представлено на рисунке 5.

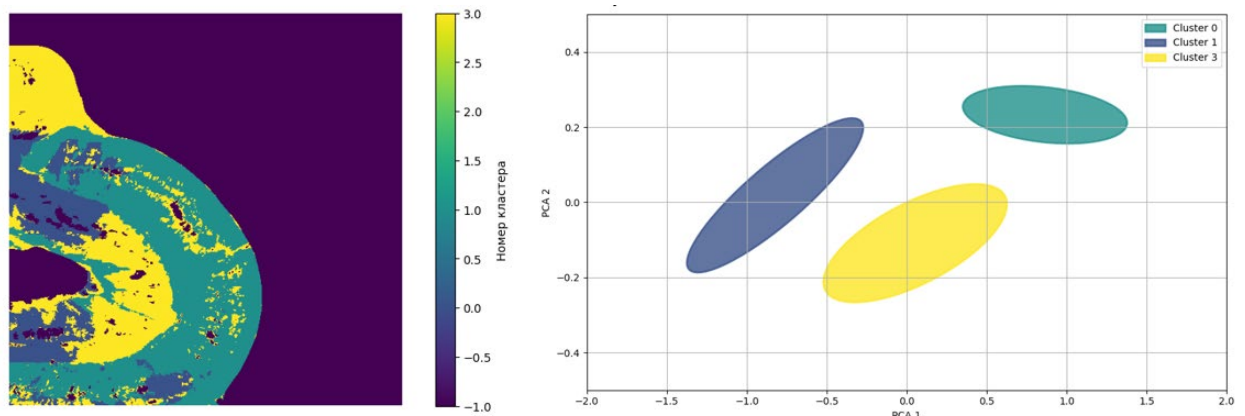


Рисунок 5 – Разделение классов в пространстве признаков

Такой подход к кластеризации не только позволяет выявлять области с различными спектральными свойствами внутри кишечной стенки, но и формирует обобщённое пространство признаков, пригодное для анализа новых гиперспектральных данных. Это создаёт основу для масштабируемой и стандартизированной оценки ишемических изменений, включая потенциальную дифференциацию подтипов поражений.

Так же, в рамках экспериментальной валидации была проведена серия измерений у пациентов с инфантильными гемангиомами. Исследование включало группу из 21 ребенка в возрасте до трёх лет с подтверждённым

диагнозом. В ходе исследования пациент размещался в положении лёжа, при этом поражённый участок кожи помещался в поле зрения гиперспектральной камеры. Оценка физиологических параметров в зоне поражения осуществлялась с использованием комбинированного подхода, включающего обобщённое Монте-Карло моделирование и нейросетевую регрессию разработанную ранее, что позволило получить двумерные карты распределения таких параметров, как объёмная фракция крови, насыщения тканей кислородом, относительное содержание окси- дезоксигемоглобина. Пример полученных карт представлен на рисунке 6.

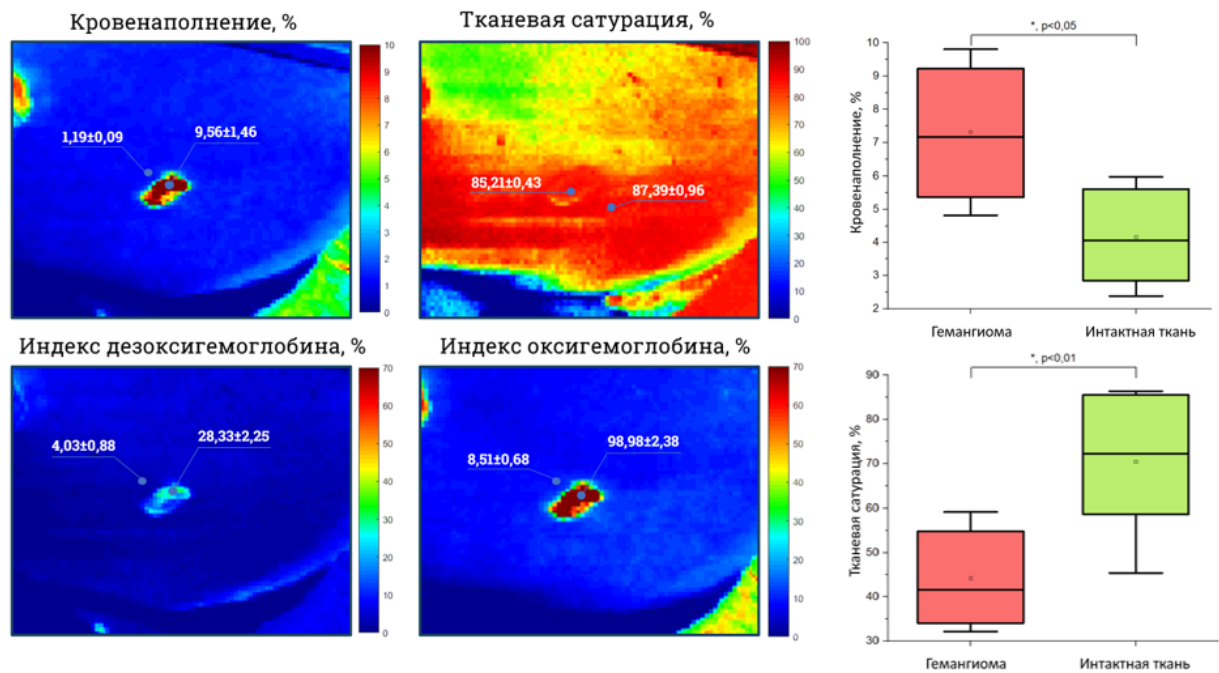


Рисунок 6 – Цветовые карты параметров гемангиомы

Анализ полученных данных подтвердил статистически значимые различия между поражёнными и интактными участками. Средние значения кровенаполнения в зоне гемангиомы были значительно выше, тогда как оксигенация тканей в этих же участках была ниже. Эти различия соответствуют известным патофизиологическим характеристикам гемангиом - высокой сосудистой плотности, преобладанию венозного компонента и признакам относительной гипоксии, обусловленной интенсивным ростом сосудистой сети и нарушением тканевого кислородоснабжения. Полученные результаты свидетельствуют о возможности применения данной технологии для объективного мониторинга состояния гемангиом и оценки динамики лечения.

Результаты, представленные в работе, были получены при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 25-25-00482.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

- 1) Проведён анализ современных методов оценки кровотока и тканевой оксигенации, выявлены их ограничения при применении в условиях интраоперационного мониторинга, что обосновало необходимость разработки системы гиперспектральной визуализации;
- 2) разработан измерительный канал, обеспечивающий регистрацию энергетических характеристик источника излучения. Проведён расчет и составлено математическое описание;
- 3) разработана и оформлена документация, определяющая структуру, последовательность и условия проведения контроля технического состояния устройства;
- 4) спроектирована и реализована печатная плата измерительного канала, реализована её интеграция в состав гиперспектральной системы, с учётом требований совместимости с остальными аппаратными модулями;
- 5) разработана аппаратная архитектура системы, включающая блок управления источником излучения, блок регистрации оптической мощности и интеграцию с гиперспектральной камерой;
- 6) созданы программные алгоритмы обработки гиперспектральных данных, включающие этапы сегментации, фильтрации и анализа. Реализованы методы машинного обучения, включая нейросетевые и кластерные подходы, обеспечивающие автоматизированное выявление зон ишемии и визуализацию параметров микроциркуляции в тканях.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях

1 Адаменков Н.А., Возможности метода гиперспектральной визуализации для определения жизнеспособности кишечника при моделировании локальной ишемии / Н.А. Адаменков, В.В. Шуплецов, **И.А. Горюнов**, А.В. Мамошин, Е.В. Потапова, В.В. Дрёмин // Медицинская физика. – 2023. – № 2. – С. 17-18.

2 Журило И.П., Возможности метода гиперспектральной визуализации при инфантильных гемангиомах у детей / И.П. Журило, В.В. Шуплецов, **И.А. Горюнов**, Е.В. Потапова, А.И. Медведев, В.В. Дрёмин // Российский вестник детской хирургии, анестезиологии и реаниматологии. – 2023. – Т. 13. – С. 64.

Публикации в научных журналах и изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science Core Collection

3 Shupletsov V., Infantile hemangiomas evaluation based on hyperspectral imaging / V. Shupletsov, **I. Gorunov**, M. Sergienko, I. Zhurilo, E. Potapova, V. Dremin // Translational Biophotonics: Diagnostics and Therapeutics III, Technical Digest Series. – 2023. – P. 126272F.

4 Shupletsov V.V., Development of Dual-Mode Hyperspectral/Fluorescence Lifetime Imaging System / V.V. Shupletsov, **I.A. Goryunov**, E.V. Potapova, V.V. Dremmin // 2024 International Conference Laser Optics (ICLO), Saint Petersburg, Russian Federation, 2024. – P. 494.

Прочие публикации

5 **Горюнов И.А.**, Метод гиперспектральной визуализации для оценки степени ишемического повреждения кишечной стенки / И.А. Горюнов, В.В. Шуплецов, Н.А. Адаменков, А.В. Мамошин, Е.В. Потапова, В.В. Дрёмин // XXII Всероссийская молодёжная Самарская конкурс-конференция по оптике, лазерной физике и физике плазмы: Сборник тезисов, Самара, 12-16 ноября 2024 года. – Москва: "Тривант", 2024. – С. 142-143.

6 Шуплецов В.В., Разработка алгоритма машинного обучения для оценки жизнеспособности ткани кишечной стенки с применением метода гиперспектральной визуализации / В.В. Шуплецов, **И.А. Горюнов**, Н.А. Адаменков, А.В. Мамошин, Е.В. Потапова, В.В. Дрёмин // Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации: Труды XVII Международной научно-технической конференции, Суздаль, 23-26 сентября 2024 года. – Москва: Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, 2024. – P. 354-358.

7 Адаменков Н.А., Оценка перфузии кишечной стенки в условиях ишемии с применением метода гиперспектральной визуализации / Н.А. Адаменков, А.В. Мамошин, В.В. Дрёмин, **И.А. Горюнов**, В.В. Шуплецов, Е.В. Потапова // Оперативная хирургия и клиническая анатомия (Пироговский научный журнал). – 2024. – Т. 8. – № 1. – С. 5-13.

8 **Горюнов И.А.**, Применение метода гиперспектральной визуализации для определения микроциркуляторных нарушений биологических тканей / И.А. Горюнов, В.В. Шуплецов, Н.А. Адаменков, А.В. Мамошин, Е.В. Потапова, В.В. Дрёмин // Невская фотоника-2023: Всероссийская научная конференция с международным участием. Сборник научных трудов, Санкт-Петербург, 09-13 октября 2023 года. – Санкт-Петербург: Национальный исследовательский университет ИТМО, 2023. – С. 271.

9 Адаменков Н.А., Применение метода гиперспектральной визуализации для определения жизнеспособности тканей кишечника при моделировании локальной ишемии / Н.А. Адаменков, В.В. Шуплецов, **И.А. Горюнов**, А.В. Мамошин, Е.В. Потапова, В.В. Дрёмин // Современные методы исследования в клеточной биологии и медицине: сборник трудов Всероссийской конференции, Орёл, 16-17 ноября 2023 года. – Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева, 2023. – С. 35.

10 **Горюнов И.А.**, Система гиперспектральной визуализации для определения микроциркуляторных нарушений биологических тканей / И.А. Горюнов, В.В. Шуплецов, Н.А. Адаменков, А.В. Мамошин, Е.В. Потапова, В.В. Дрёмин // Современные методы исследования в клеточной биологии и

медицине: сборник трудов Всероссийской конференции, Орёл, 16-17 ноября 2023 года. – Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева, 2023. – С. 37.

11 Калуга Н.И., Современные оптические технологии интраоперационной оценки жизнеспособности кишечника / Н.И. Калуга, Н.А. Адаменков, В.В. Шуплецов, **И.А. Горюнов**, А.В. Мамошин, Е.В. Потапова, В.В. Дрёмин // Эксперимент в хирургии и онкологии : Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции, Курск, 22 сентября 2023 года: Курский государственный медицинский университет, 2023. – С. 47-49.

12 Шуплецов В.В., Применение метода гиперспектральной визуализации для определения микроциркуляторных нарушений биологических тканей / В.В. Шуплецов, **И.А. Горюнов**, Н.А. Адаменков, А.В. Мамошин, Е.В. Потапова, В.В. Дрёмин // Оптические методы исследования потоков: Труды XVII Международной научно-технической конференции, Москва, 26-30 июня 2023 года. – Москва: Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, 2023. – С. 650-656.

Патенты и свидетельства о регистрации программы для ЭВМ

13 Шуплецов, В.В. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2023616506 Программный модуль для анализа гиперспектральных изображений применяемый в задачах медицинской диагностики биологических тканей / В.В. Шуплецов, **И.А. Горюнов**, В.Н. Приземин, М.: РосПатент; – заявл. 20.03.2023; опубл. 28.03.2023.

14 Шуплецов, В.В. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2023664678 Программный модуль для кластеризации методом К-средних на картах сатурации, полученных методом гиперспектральной визуализации. / В.В. Шуплецов, В.Н. Приземин, **И.А. Горюнов**, М.: РосПатент; – заявл. 29.06.2023; опубл. 06.07.2023.