

На правах рукописи

Шуплецов Валерий Витальевич

**МЕТОД И УСТРОЙСТВО ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ
ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ГИПЕРПЛАЗИИ СОСУДОВ И НАРУШЕНИЙ
МЕЗЕНТЕРИАЛЬНОГО КРОВОТОКА**

Специальность 2.2.12. Приборы, системы и изделия медицинского назначения
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Орёл – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»

Научный

руководитель: кандидат технических наук
Дрёмин Виктор Владимирович

Официальные

оппоненты: **Мачихин Александр Сергеевич**
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, лаборатория медицинских приборов, заведующий лабораторией (г. Москва)

Волынский Максим Александрович

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», научно-образовательная лаборатория «Техническое зрение», директор (г. Санкт-Петербург)

Ведущая

организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» (г. Саратов)

Защита состоится «23» декабря 2025 года в 11⁰⁰ часов на заседании объединённого диссертационного совета 99.2.029.03, созданного на базе Юго-Западного государственного университета, Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева, Белгородского государственного национального исследовательского университета, по адресу: 305000, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Юго-Западного государственного университета и на сайте <https://swsu.ru/upload/iblock/965/piirmgavkz70wfljut5t9p5n0w7j4yha/Dissertatsiya-V.V.-SHupletsov.pdf>

Автореферат разослан _____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета 99.2.029.03

Милостная Наталья Анатольевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. На сегодняшний день сосудистые заболевания являются одними из наиболее распространенных патологий и имеют ряд осложнений как опухолевой, так и неопухолевой этиологии. Различные сосудистые аномалии могут провоцировать гипоксический стресс, вызывающий сверхэкспрессию ангиогенных клеток, что является одним из наиболее вероятных факторов развития инфантильных гемангиом. Данное заболевание поражает до 10 % всех новорожденных, при этом более чем в 10% случаев могут возникать опасные для здоровья ребенка осложнения. Среди наиболее часто встречаемых осложнений в зависимости от локализации гемангиом выделяют функциональные риски, изъязвления, а также риск угрозы жизни. Зачастую малозаметные гемангиомы могут излечиваться без специального курса терапии, однако существуют определённые риски, связанные с проявлением массивного роста образований и их изъязвлением. Примерно у 41% всех новорожденных, имеющих данное заболевание, новообразование локализуется в области лица, и до 3% пациентов нуждаются в лечении. В настоящее время наиболее распространенными методами лечения являются лазерная терапия, лечение неселективными бета-блокаторами и пероральными кортикостероидами. Для выбора оптимального лечебного алгоритма необходимо провести комплексную диагностику поражения. Существует потребность в клинических инструментах, которые можно было бы использовать для мониторинга развития гемангиом, а также для объективной оценки эффективности проводимой терапии.

Также наиболее распространенным сосудистым поражением в абдоминальной хирургии является мезентериальная ишемия. По статистическим данным, острая мезентериальная ишемия встречается в 5 случаях на 100 тысяч населения. При этом доля диагностических ошибок достигает в некоторых случаях более 50% на догоспитальном этапе и 19% – в стационаре. Летальность при данной патологии составляет от 9 до 13%, а при тяжелых формах может достигать до 90%. Несмотря на тенденцию к снижению абсолютного количества летальных исходов, ишемические повреждения занимают одно из лидирующих мест среди острых неотложных состояний в абдоминальной хирургии. В то же время существующие методы диагностики и лечения мезентериальной ишемии зачастую являются недостаточно эффективными. Общепринятым способом интраоперационной оценки жизнеспособности кишечника является визуальный метод Керте, основанный на определении пульсации брыжеечных сосудов, перистальтических сокращений и цвета кишечной стенки. Однако перечисленные признаки имеют исключительно субъективный характер, что указывает на необходимость разработки новых инструментальных методов.

Степень разработанности темы исследования. Прогрессирование лечения гемангиом документируется с помощью относительно субъективных методов, основанных на физическом осмотре, визуальной аналоговой шкале и просмотре фотографических снимков новообразования в динамике. Осуществляемая с помощью такого подхода диагностика обладает недостаточной точностью, поскольку во многом зависит от оператора и условий проведения (угол съемки,

освещение помещения и т.д.). Таким образом, отсутствие объективного количественного параметра для оценки гемангиом затрудняет принятие решения о правильном курсе лечения поражений и сравнение эффективности различных методов лечения. Из этого следует, что актуальным является разработка неинвазивного метода и устройства диагностики новообразований биологической ткани, конкретно инфантильных гемангиомных образований, с целью повышения качества мониторинга проводимой терапии лекарственными средствами.

Признаки, используемые в визуальном способе определения жизнеспособности кишечника методом Керте, имеют субъективный характер. По зрительному определению цвета кишки можно достоверно отличить только явно нежизнеспособный (некротический) участок кишечника от здорового. Перистальтика может сохраняться продолжительное время даже после некроза слизистого слоя, но при этом вследствие отсутствия поступления кислорода могут возникать резкие сокращения кишки, которые ошибочно могут быть расценены как перистальтические. Пульсация брыжеечных сосудов может сохраняться при тяжелом расстройстве кровообращения непосредственно в стенке кишки. В этой связи, современный подход ко многим хирургическим вмешательствам требует наличия более широкого спектра интраоперационной диагностической информации о микроциркуляции крови органа, чем просто субъективная оценка визуальных критериев, что также делает актуальным разработку объективного неинвазивного метода и устройства интраоперационной диагностики ткани кишечной стенки.

Общей фундаментальной проблемой в обоих клинических случаях является отсутствие неинвазивного инструмента для количественной оценки функционального состояния микроциркуляторного русла и оксигенации тканей. Решением этой проблемы может стать внедрение в клиническую практику технологий, позволяющих бесконтактно анализировать оптические свойства биологических тканей. Одной из таких перспективных технологий и выступает гиперспектральная визуализация.

Таким образом, поиск и обоснование новых диагностических критериев на основе метода гиперспектральной визуализации, сочетающего в себе возможности цифровой регистрации изображений и анализа диффузного отражения света, для повышения точности диагностики инфантильных гемангиом и жизнеспособности ткани кишечной стенки, а также разработка новых методов и устройств диагностики на их основе являются актуальными задачами в изучении представленных сосудистых нарушений.

Объектом исследования являются массивы гиперспектральных данных патологических изменений сосудистой системы.

Предметом исследования являются метод и устройство гиперспектральной визуализации гиперплазии сосудов и нарушений мезентериального кровотока.

Целью диссертационной работы является повышение точности диагностики инфантильных гемангиом и жизнеспособности ткани кишечной стенки за счет разработки метода и устройства гиперспектральной визуализации с

объективным инструментальным выявлением стадии развития гемангиом и необратимости ишемического повреждения ткани кишечной стенки.

Задачами диссертационной работы являются:

1) Обзор и анализ технических решений и алгоритмов обработки гиперспектральных данных, применяемых в современной клинической и научно-технической практике, для диагностики жизнеспособности биологических тканей, в частности при сосудистых нарушениях.

2) Обоснование специализированных медико-технических требований (МТТ) к разрабатываемому устройству гиперспектральной визуализации, основанных на анализе допустимой мощности излучения, расчетном уровне соотношения сигнал/шум и проведенном численном моделировании распространения оптического излучения в различных типах ткани.

3) Разработка устройства гиперспектральной визуализации, позволяющего проводить диагностику сосудистых нарушений, в том числе гиперплазии сосудов (инфантильных гемангиом) и нарушений мезентериального кровотока.

4) Апробация устройства гиперспектральной визуализации в лабораторных и клинических условиях с целью разработки новых диагностических критериев для выявления сосудистых нарушений.

5) Разработка новых диагностических критериев выявления гиперплазии сосудов (инфантильных гемангиом), и нарушений мезентериального кровотока у модельных животных и пациентов хирургического профиля, основанных на неинвазивной регистрации массивов гиперспектральных данных и их дальнейшей обработке с использованием разработанных моделей классификации на основе кластерного анализа и методов машинного обучения.

6) Разработка метода диагностики гиперплазии сосудов и нарушений мезентериального кровотока, основанного на результатах, полученных с использованием разработанной системы гиперспектральной визуализации.

7) Разработка биотехнической системы диагностики гиперплазии сосудов и нарушений мезентериального кровотока, основанной на применении разработанной системы гиперспектральной визуализации.

Методы исследования. Результаты работы получены на основе методов прикладной математической статистики, экспертного оценивания, метода численного моделирования Монте-Карло, методов машинного обучения, методов клинических исследований, а также систем автоматизированного проектирования.

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

1) Устройство гиперспектральной визуализации для диагностики сосудистых нарушений, *включающее* гиперспектральную камеру, широкополосный источник излучения с волоконно-кольцевым излучателем, систему крепления, *отличающееся* расширенным диапазоном детектирования электромагнитного излучения, равномерностью освещения исследуемого биологического объекта, наличием специализированных конфигураций для обследования младенцев и работы в хирургических условиях, включая интраоперационную диагностику, а также оригинальными алгоритмами обработки гиперспектральных данных,

позволяющее выявлять стадии развития инфантильных гемангиом и степень жизнеспособности ткани кишечной стенки за счет регистрации и последующего анализа пространственного распределения диффузно отраженного света.

2) Вероятностная модель классификации для определения доброкачественных мальформаций, *базирующаяся* на анализе массива гиперспектральных данных и его последующей обработке с использованием методов кластерного анализа, *отличающаяся* внедрением подхода на основе Гауссовой смеси и *позволяющая* определять стадию развития инфантильных гемангиом и прогнозировать возможность развития изъязвлений с диагностической точностью, превышающей точность общепринятого клинического метода визуального осмотра.

3) Ансамблевая модель классификации для определения мезентериальных нарушений кровотока, *базирующаяся* на анализе массива гиперспектральных данных и его последующей обработке с использованием методов машинного обучения, *отличающаяся* выбором наиболее важных спектральных признаков и *позволяющая* выявлять обратимость/необратимость ишемических повреждений тканей кишечной стенки с диагностической точностью, превышающей точность общепринятого клинического метода Кертъе.

4) Метод диагностики гиперплазии сосудов и нарушений мезентериального кровотока, *базирующийся* на применении разработанной системы гиперспектральной визуализации и предложенных моделях классификации статуса биологических тканей, *отличающийся* возможностью использования в качестве системы поддержки принятия врачебных решений и *позволяющий* с высокой диагностической точностью определять стадию развития инфантильных гемангиом и степень ишемии ткани кишечной стенки.

Теоретическая значимость состоит в том, что предложен новый метод диагностики, позволяющий получать новые клинические знания о гиперплазии сосудов у пациентов с наличием инфантильных гемангиом и нарушении мезентериального кровотока у пациентов с наличием ишемии кишечной стенки различной этиологии, основанный на применении разработанной системы гиперспектральной визуализации, расчете новых диагностических критериев и применении методов машинного обучения и кластерного анализа в виде классификационных карт.

Практическая значимость работы состоит в том, что:

1) Обоснованы специализированные МТТ к устройству гиперспектральной визуализации, основанные на анализе диагностического объема, рассчитанного с помощью численного моделирования распространения оптического излучения в биологических тканях.

2) Разработано устройство гиперспектральной визуализации, позволяющее регистрировать пространственное распределение диффузно отраженного света и рассчитывать ряд диагностических параметров, включая сатурацию, объемную долю кровенаполнения и индексы окси- и дезоксигемоглобина.

3) Предложен метод диагностики сосудистых нарушений, основанный на гиперспектральной визуализации с последующим представлением результатов

измерений в виде диагностических карт и обработке в соответствии с разработанными моделями классификации, позволяющий определять необратимость ишемии ткани кишечной стенки и стадию развития инфантильной гемангиомы.

4) Проведена апробация метода гиперспектральной диагностики в клинических условиях педиатрического и хирургического отделений больниц на пациентах с наличием инфантильных гемангиом и различного типа ишемических повреждений ткани кишечной стенки, подтверждающая преимущество применения предлагаемого метода по сравнению с традиционно используемыми на данный момент в клинической практике.

Результаты диссертационного исследования прошли апробацию в хирургическом отделении БУЗ Орловской области «Орловская областная клиническая больница» (г. Орёл) на 16 пациентах, в педиатрическом отделении научно-клинического многопрофильного центра имени З.И. Круглой (г. Орёл) на 33 пациентах, внедрены в ООО НПП «ЛАЗМА» (г. Москва), а также внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева» (г. Орёл) при подготовке магистров по направлению 12.04.04 «Биотехнические системы и технологии» (направленность «Фотоника и электроника в медико-биологической практике») и специалистов по направлению 31.05.01 «Лечебное дело» (направленность «Лечебное дело»). Все результаты, полученные соискателем, использованы при выполнении работ по темам: «Разработка системы гиперспектральной визуализации для экспресс-диагностики жизнеспособности биотканей», выполненной в рамках гранта Фонда содействия инновациям по программе «Студенческий стартап» (№ 80931, 2022-2023 гг.); «Разработка метода гиперспектральной диагностики гиперплазии сосудов и нарушений мезентериального кровотока», выполняемой в рамках гранта РФФИ № 25-25-00482 (2025-2026 гг.); «Механизм нейродегенерации: древняя молекула как необходимый элемент физиологии и патологии клеток мозга», выполняемой в рамках гранта Правительства Российской Федерации №075-15-2025-011 (2024-2028 гг.).

Личный вклад автора заключается в проведении обзора текущего состояния вопросов диагностики сосудистых нарушений, разработке математических моделей, планировании и проведении экспериментальных исследований, разработке моделей классификации и диагностических критериев для выявления гиперплазии сосудов и нарушений мезентериального кровотока, формулировке требований к разрабатываемому методу диагностики гиперспектральной визуализации на основании проведённой аналитической работы, математического анализа и математической статистики.

Положения, выносимые на защиту:

1) Устройство гиперспектральной визуализации для диагностики сосудистых нарушений, включающее гиперспектральный детектор, с расширенным диапазоном детекции электромагнитного излучения от 400 до 1000 нм, широкополосный источник излучения с волоконно-кольцевым излучателем, реализующий равномерное освещение объекта исследования, систему крепления для измерений в условиях клиники, позволяет выявлять стадии развития

инфантильных гемангиом и степень жизнеспособности ткани кишечной стенки за счет анализа массивов гиперспектральных данных.

2) Вероятностная модель классификации для определения доброкачественных мальформаций, основанная на анализе зарегистрированного массива гиперспектральных данных, представляющих собой пространственное распределение диффузно отраженного света, и его последующей обработке с использованием кластеризации методом k -средних и вероятностной модели взвешенной суммы гауссовых распределений, позволяет определять стадию развития инфантильных гемангиом и прогнозировать возможность развития изъязвлений с общей диагностической точностью не менее 0,81.

3) Ансамблевая модель классификации для определения мезентериальных нарушений кровотока, основанная на анализе зарегистрированного массива гиперспектральных данных и последующей обработке с использованием алгоритма градиентного бустинга с настройкой гиперпараметров перед обучением, позволяет выявлять обратимость/необратимость ишемических повреждений тканей кишечной стенки с общей диагностической точностью не менее 0,96.

4) Метод диагностики гиперплазии сосудов и нарушений мезентериального кровотока, основанный на применении разработанной системы гиперспектральной визуализации и предложенных моделях классификации, позволяет с чувствительностью не менее 0,83 и специфичностью не менее 0,75 определять стадию развития инфантильных гемангиом; с чувствительностью не менее 0,95 и специфичностью не менее 0,94 выявлять степень ишемии ткани кишечной стенки.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность представленных результатов диссертационного исследования подтверждается воспроизводимостью экспериментальных и расчетных данных метода гиперспектральной визуализации, а также их соответствием результатам других научных коллективов в данной области исследования. Основные результаты работы опубликованы в российских и международных рецензируемых научных журналах.

Апробация результатов диссертационной работы проводилась на базе хирургического отделения БУЗ Орловской области «Орловская областная клиническая больница» (г. Орёл).

Материалы диссертационного исследования доложены и обсуждены на 4 международных и 11 всероссийских конференциях, в том числе: Всероссийский молодежный научный Форум «Наука будущего – наука молодых (2023 – Орёл, Россия), Международная конференция «Оптические методы исследования потоков – 2023» (2023 – Москва, Россия), Международная конференция «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации» (2024 – Суздаль, Россия), Международная научная конференция «Физика и Радиоэлектроника в Медицине и Экологии» (2024 – Суздаль, Россия), Международная научная конференции «Системы и технологии цифровой медицины» – STDH-2025 (2025 – Санкт-Петербург, Россия).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 24 работы, из которых 6 в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, и 3 статьи,

индексируемые в БД Web of Science/Scopus (1 статья в рецензируемом журнале 2-ого квартиля). Получено 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ (№ 2023664678 и № 2023616506).

Объём и структура диссертационной работы. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 209 наименований, и изложена на 181 странице машинописного текста, содержит 47 иллюстраций и 10 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

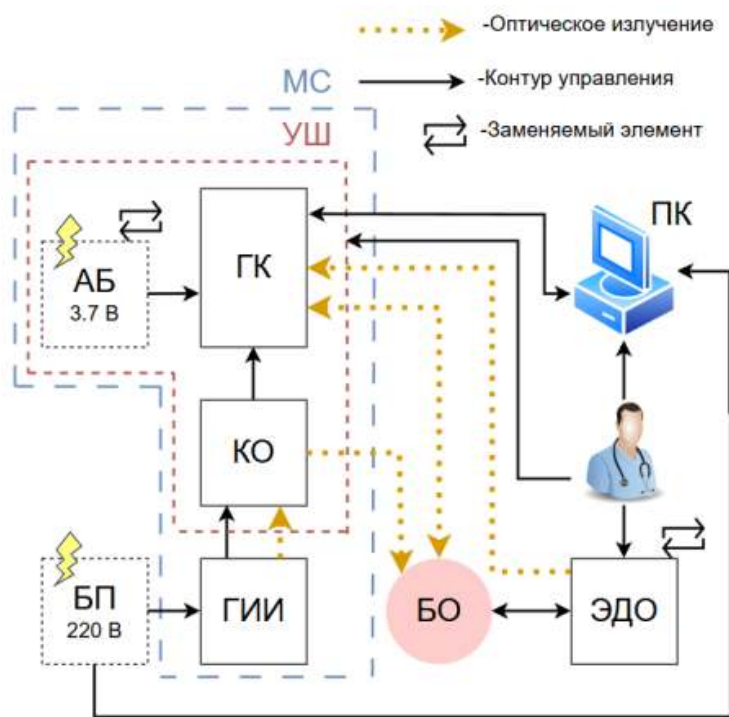
Во **введении** раскрыта актуальность темы диссертационной работы, определены цели и задачи исследования, научная новизна и положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена комплексному анализу проблем диагностики сосудистых нарушений при инфантильных гемангиомах и мезентериальных нарушений при ишемических повреждениях кишечника. Существующие подходы к мониторингу гемангиом, основанные на визуальной оценке, являются субъективными и недостаточно точными, что затрудняет принятие решений о терапии. Аналогично, интраоперационная диагностика жизнеспособности кишечника, опирающаяся на визуальные критерии, часто неэффективна и требует объективных данных о состоянии микроциркуляторного русла. Таким образом, главной проблемой, определяющей актуальность данного диссертационного исследования, является отсутствие универсального инструмента для количественной оценки кровенаполнения и тканевой сатурации, что позволило бы существенно улучшить качество диагностики и контроля лечения обеих патологий.

Проведенный обзор применяемых в медицине инструментальных методов диагностики обозначенных сосудистых нарушений продемонстрировал эффективность в этом направлении метода гиперспектральной визуализации (ГВ) как высокоинформативного оптического метода, который, в отличие от стандартной RGB-съемки, позволяет получать спектры отражения для каждого пикселя изображения, тем самым характеризуя физиологическое состояние биологических тканей. Проведенный обширный анализ научной литературы по техническим реализациям и алгоритмам обработки результатов гиперспектральных измерений показал высокую эффективность метода ГВ при анализе опухолевых образований различного типа (со средней точностью ~90%) и диагностике ишемических повреждений (со средней точностью ~95%), что подтвердило высокий потенциал ГВ для создания объективных систем диагностики и интраоперационного мониторинга сосудистых нарушений.

Вторая глава посвящена разработке и экспериментальному обоснованию медико-технических требований (МТТ) к устройству ГВ для диагностики сосудистых нарушений. Проведенный патентный анализ, в рамках которого были рассмотрены способы определения типа ткани и аппаратное обеспечение этих способов, позволил выделить несколько ключевых технических решений для эффективной реализации системы ГВ, структурно-функциональная схема которой представлена на рисунке 1 (а). Структурная схема устройства в качестве основных

элементов включает гиперспектральную камеру (ГК), галогенный источник широкого спектра излучения (ГИИ), кольцевой осветитель (КО) для ГИИ, усиленный штатив (УШ) и эталон диффузного отражения (ЭДО), а также содержит, аккумуляторный блок (АБ) для ГК, блок питания (БП) для ПК, ноутбук/ПК и медицинскую стойку (МС).



(а)



(б)

Рисунок 1 – (а) Структурно-функциональная схема разработанного устройства ГВ, где МС – медицинская стойка, УШ – усиленный штатив, АБ – аккумуляторный блок, ГК – гиперспектральная камера, КО – кольцевой осветитель, БП – блок питания, ГИИ – галогенный источник излучения, БО – биологический объект, ЭДО – эталон диффузного отражения; (б) фотография разработанного устройства гиперспектральной визуализации

Алгоритм работы с системой определяется следующим образом. Врач управляет УШ, на котором закреплена ГК и КО. При этом УШ и ГИИ расположены на МС, которая позволяет врачу быстро расположить всю систему около хирургического стола. Далее врач наводит ГК на биологический объект (БО) и, зондируя широкополосным оптическим излучением, производит регистрацию гиперспектральных массивов. После измерения БО врач производит измерение от ЭДО для нормировки измеряемых данных. Далее измеренные данные отправляются на персональный компьютер (ПК), где производится математический расчет, построение диагностических карт и применение разработанных моделей классификации.

Для реализации данной структурно-функциональной схемы в виде экспериментального диагностического устройства, фотография которого представлена на рисунке 1(б), были разработаны и использованы следующие блоки: блок сопряжения оптического канала широкополосного источника и кольцевого осветителя; блок механического сопряжения излучательной головы кольцевого осветителя и объектива гиперспектральной камеры и создания соответствующей системы крепления для соосного размещения излучательной головы и гиперспектральной камеры. Также для предлагаемого устройства была разработана система крепления с возможностью адаптации конструкции под исследование гемангиом на младенцах в виде трехножного штатива или под исследование во время проведения открытых операций в виде усиленного штатива с 3 плоскостями движения для удобной навигации устройства над изучаемым органом брюшной полости.

Проведено обоснование МТТ разработанного экспериментального устройства ГВ, включающее расчет мощности излучения, подтвердивший соответствие характеристик используемого источника света установленным нормам безопасности, и расчет соотношения сигнал/шум, показавший значение $\sim 178:1$ дБ, что гарантирует высокую достоверность получаемых гиперспектральных данных. Кроме того, были сформулированы комплексные требования к устройству, обеспечивающие его электробезопасность, электромагнитную совместимость, климатическую стойкость и пригодность для дезинфекции в соответствии с действующими нормами ГОСТ. Для исследования глубины проникновения зондируемого излучения (на длине волны 550 нм) в биологические ткани было проведено численное моделирование методом Монте-Карло (МК) распространения оптического излучения в синтезированных 4 слойных моделях (для ткани кишечника и для кожи человека соответственно), где длина свободного пробега каждого фотона (из 1 млн смоделированных) определялась по формуле (1):

$$s = -\ln(\xi) / \mu_t, \quad (1)$$

где ξ – случайное число от 0 до 1; $\mu_t = \mu_a + \mu_s$ – коэффициент ослабления; μ_a – коэффициент поглощения; μ_s – коэффициент рассеяния.

Проведенное численное моделирование методом МК показало, что глубина распространения оптического излучения при длине волны 550 нм в ткани кишечной стенки составляет более 2 мм и в ткани кожи более 1 мм, что подтверждает возможность регистрации сигнала от слоев с наличием глубокого сосудистого сплетения.

Далее разработанная модель была использована для оценки изменения процентного соотношения кровенаполнения и насыщения кислородом, что является следствием развивающихся процессов нарушений мезентериального кровотока и ишемии кишечной стенки, в соответствии с синтезированной формулой (2):

$$\mu_a = B \cdot (S \cdot \mu_a^{HbO_2} + (1 - S) \cdot \mu_a^{Hb}), \quad (2)$$

где B – объемная доля крови; S – насыщение гемоглобина кислородом; $\mu_a^{HbO_2}$ и μ_a^{Hb} – коэффициенты поглощения оксигенированной (насыщенной кислородом) и дезоксигенированной крови, соответственно.

Разработанная модель учитывает широкий диапазон вариаций кровенаполнения и тканевой сатурации для многослойных структур. Для кишечника наибольшая чувствительность к изменению этих параметров наблюдается в слизистой оболочке, являющейся наиболее васкуляризированным слоем, тогда как для кожи ведущую роль играет дерма.

Далее был реализован алгоритм первичной обработки результатов измерений, включающий калибровку на ЭДО, расчет диагностических карт тканевой сатурации с использованием двухволнового подхода и использование ранее разработанного нейросетевого подхода на основе многослойного перцептрона, для расчета диагностических карт распределения объемной доли крови и сатурации кислорода.

Проведены экспериментальные исследования на 5 условно-здоровых добровольцах с нагрузочными пробами различного типа, подтвердившие способность системы регистрировать статистически значимые изменения параметров микроциркуляции, включая выявление атипичных реакций. Также реализованное устройство ГВ апробировано путем измерения изготовленных оптических фантомов кожи, показав линейную зависимость спектров флуоресценции от концентрации ФАД ($r=0,99$) и высокую согласованность с данными спектрометра, используемого в качестве эталонного метода, что подтверждает корректность работы разработанного устройства.

Третья глава посвящена комплексным экспериментальным и клиническим исследованиям с применением разработанной гиперспектральной системы для диагностики различных патологических состояний.

Проведены экспериментальные исследования с участием 33 пациентов с наличием инфантильных гемангиом различного типа для определения изменений в диагностических параметрах областей доброкачественных образований в сравнении с условно-здоровой тканью. Полученные результаты измерений инфантильных гемангиом были рассчитаны с использованием нейросетевого подхода и представлены в виде диагностических карт, пример которых для гемангиомы с ихъязвлением представлен на рисунке 2.

Статистический анализ по рассчитанным диагностическим картам выявил значимое увеличение объемной доли крови и снижение тканевой сатурации в области простых гемангиом по сравнению с интактной тканью, что соответствует их патофизиологии, характеризующейся гиперваскуляризацией и локальной гипоксией. Вместе с тем, была обнаружена вариабельность параметров при различных формах и стадиях гемангиом, в частности, увеличение сатурации при изъязвлениях, что указывает на необходимость учета клинического контекста и подтверждает комплексный характер изменений микроциркуляции при данной

патологии. Таким образом, система продемонстрировала свой потенциал в качестве инструмента для неинвазивного мониторинга гемангиом.

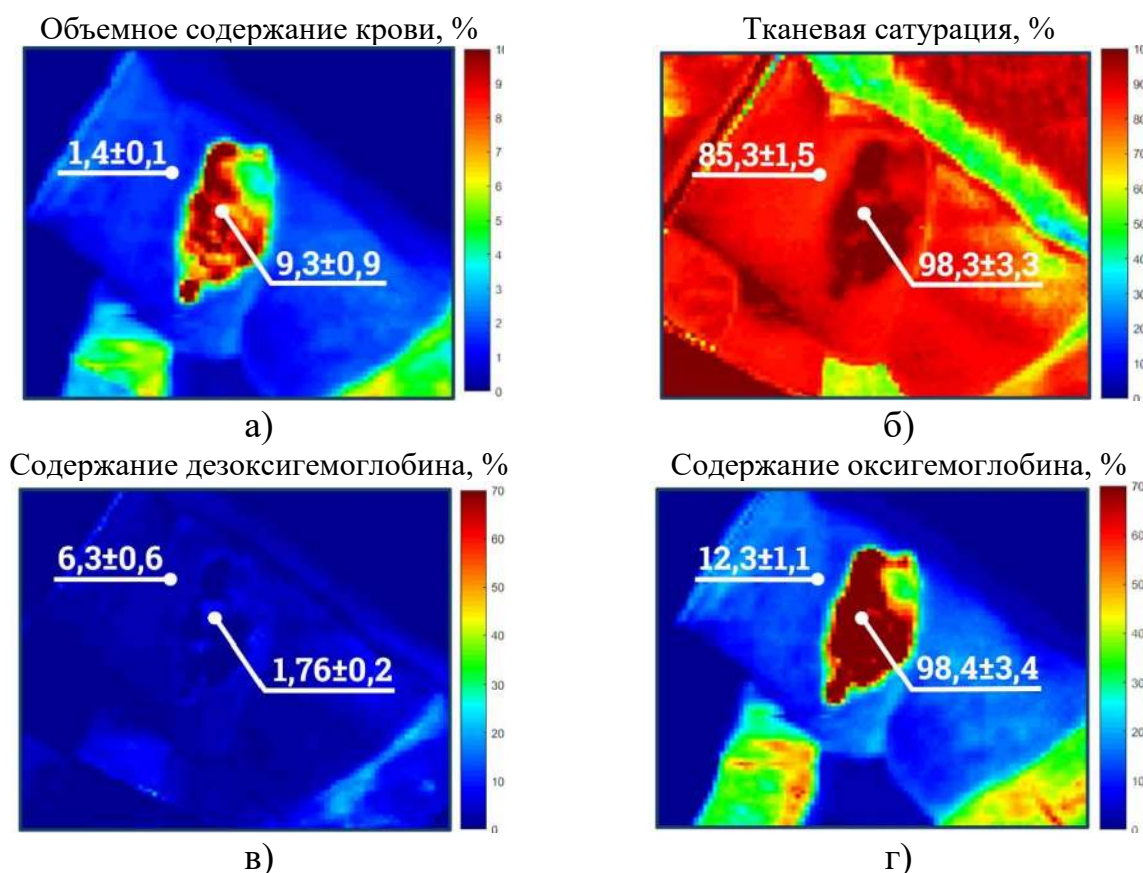


Рисунок 2 – Репрезентативный пример рассчитанных двумерных диагностических карт для гемангиомы в области плеча: (а) параметр объемного содержания крови, (б) параметр тканевой насыщенности, (в) параметр содержания дезоксигемоглобина, (г) параметр содержания оксигемоглобина

Также были проведены экспериментальные исследования на 6 модельных животных с моделируемой локальной ишемией кишечника разной длительности для определения тяжести ишемических повреждений по параметру тканевой насыщенности в сравнении с гистологическим анализом. Полученные диагностические карты тканевой насыщенности, рассчитанные с использованием двухволнового подхода по формуле (3), достоверно фиксировали прогрессирующее снижение оксигенации в ишемизированных зонах с $66 \pm 2\%$ (норма) до $21 \pm 3\%$ через 12 часов, что имело статистически значимые различия на всех этапах и было подтверждено гистологическим анализом по шкале Park-Chiu, как показано на рисунке 3.

$$SO_2 = \frac{\mu_a^{Hb}(\lambda_1) - \mu_a^{Hb}(\lambda_2) \cdot \frac{R(\lambda_2)}{R(\lambda_1)}}{\mu_a^{Hb}(\lambda_1) - \mu_a^{HbO_2}(\lambda_1)} \quad (3)$$

где $R(\lambda)$ – измеренный коэффициент диффузного отражения на выбранной длине волны; λ_1 и λ_2 – длина волны неизобестической и изобестической точек.

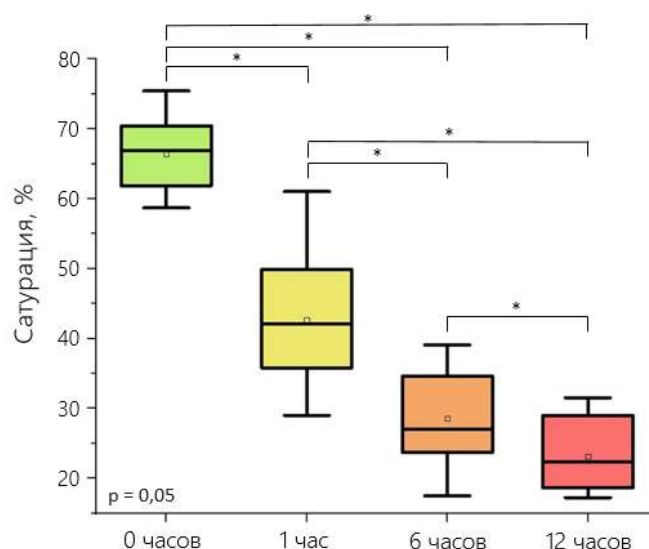


Рисунок 3 – Диаграммы размаха с показателями тканевой сатурации соответствующих областей кишечника, полученными из двумерных карт, с уровнем статистической значимости $p < 0,05$ (U -тест Манна-Уитни)

Таким образом, метод доказал свою чувствительность для неинвазивной и объективной диагностики степени ишемического повреждения кишечной стенки, хотя использование упрощенного двухволнового алгоритма указывает на потенциал для дальнейшего улучшения точности за счет более сложных методов обработки данных. Далее были проведены экспериментальные исследования с участием пациентов с наличием ишемических повреждений кишечной стенки различного типа для определения показателей тканевой сатурации для возможно обратимой ишемии и для ткани с тотальным некрозом.

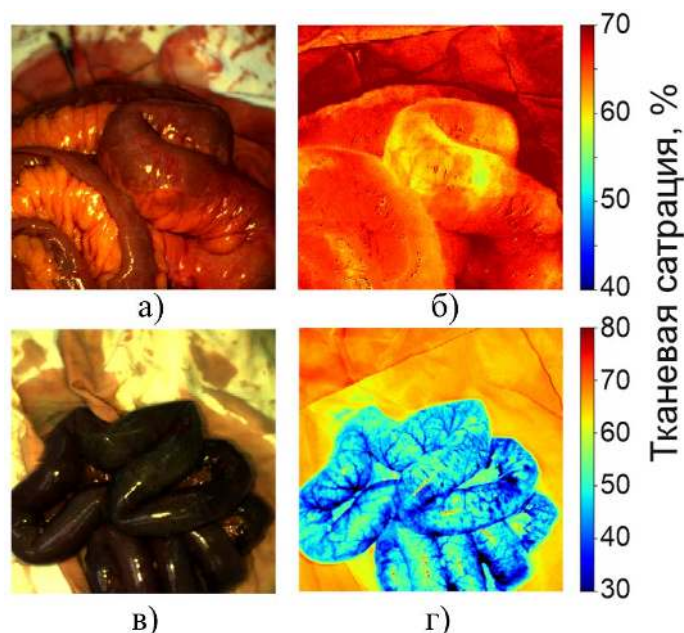


Рисунок 4 – (а) Фотография кишечника с ущемлением; (б) двумерные карты тканевой сатурации кишечника при ущемлении; (в) фотография кишечника с тотальным некрозом; (г) двумерные карты тканевой сатурации кишечника при тотальном некрозе

Рассмотрены два клинических случая, продемонстрировавшие чувствительность разработанного подхода к выявлению зон ишемии, наглядно отображая на псевдоцветных картах снижение тканевой сатурации как в случае потенциально обратимой ишемии (60% против 65% в норме) на рисунке 4 (а,б), так и при тотальном некрозе (40%) на рисунке 4 (в,г), при этом пороговые значения у пациентов оказались выше, чем в экспериментах на животных. Однако для установления точных диагностических критериев и повышения достоверности метода необходимы дальнейшие исследования на более широкой клинической выборке в сочетании с применением усовершенствованных алгоритмов обработки данных.

Четвертая глава посвящена разработке и валидации продвинутых моделей обработки гиперспектральных массивов на основе методов машинного и глубокого обучения для решения поставленной цели настоящего диссертационного исследования.

Разработана вероятностная модель на основе кластерного анализа для экспериментов, проведенных на 33 пациентах с наличием инфантильных гемангиом. Последовательный алгоритм разработанной модели включает предварительную обработку и масштабирование данных с целью их нормализации, а также применение метода PCA с выбором главных компонент по формуле (4):

$$V_k = [v_1 | v_2 | \dots | v_k], \quad (4)$$

где V_k – матрица первых k главных компонент, v_i – i -й собственный вектор (главная компонента), k – количество сохраняемых компонент (выбрано 2 первые).

Следующим шагом разработанной вероятностной модели является кластеризация методом k -средних, реализация которого может быть описана уравнением (5):

$$J(U, M) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k u_{ij} \times \|x_i - m_j\|^2, \quad (5)$$

где $J(U, M)$ – целевая функция кластера, U – матрица значений кластеров, M – множество центроидов кластеров, n – количество наблюдений, k – количество кластеров, u_{ij} – индикатор принадлежности точки i кластеру j $\{0, 1\}$, x_i – i -я точка данных, m_j – центроид j -го кластера, $\|x_i - m_j\|^2$ – квадрат евклидова расстояния между точкой и центроидом.

Совместно с алгоритмом k -средних в разработанной модели используется вероятностный подход на основе Гауссовой смеси (GMM), который в отличие от k -средних, выполняет «мягкую» кластеризацию и учитывает эллиптическую форму кластеров с областями перекрытия. Оценка функции правдоподобия для применяемой GMM проводится по формуле (6):

$$p(x|\theta) = \sum_{j=1}^k \pi_j \times N(x|\mu_j, \Sigma_j), \quad (6)$$

где $p(x|\theta)$ – функция правдоподобия точки x при заданных параметрах, θ – параметры модели, π_j – вес j -й компоненты смеси ($\sum_j \pi_j = 1$), $N(x|\mu_j, \Sigma_j)$ – функция плотности многомерного нормального распределения, μ_j – математическое ожидание j -й компоненты, Σ_j – ковариационная матрица j -й компоненты.

Разработанная модель показала свою эффективность для решения задачи объективной классификации стадий развития инфантильных гемангиом и прогнозирования изъязвлений. Высокие значения метрик качества подтверждают диагностическую эффективность метода. В частности, алгоритм продемонстрировал высокую точность (0,95), чувствительность (0,91) и специфичность (0,92) для стадии изъязвления, что является наиболее клинически значимым результатом, так как позволяет с высокой достоверностью идентифицировать данное осложнение. Результат проведенного анализа в виде эллипсов доверительных областей главных компонент по кластерам представлен на рисунке 5.

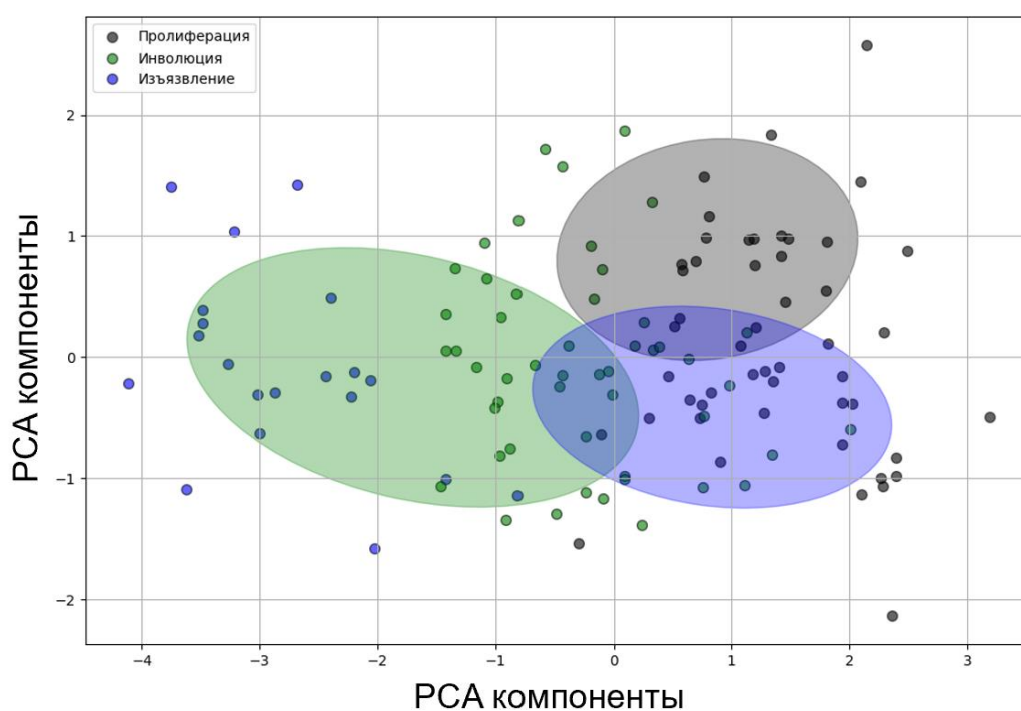


Рисунок 5 – Классификация стадии развития гемангиом разработанным методом кластерного анализа

Разработана ансамблевая модель на основе методов машинного обучения для экспериментов, проведенных на 6 модельных животных, по определению степени жизнеспособности ткани кишечной стенки. Основные этапы применения разработанной ансамблевой модели, включая предварительную обработку гиперспектральных массивов, разметку данных и используемый метод машинного обучения, представлены на рисунке 6.

Последовательный алгоритм разработанной модели включает предварительную обработку, заключающуюся в нормировке зарегистрированного

сигнала и его последующее сглаживание фильтром Савицкого-Голея, а также оценке значимости различных спектральных данных путем анализа трех подходов к построению признаков.

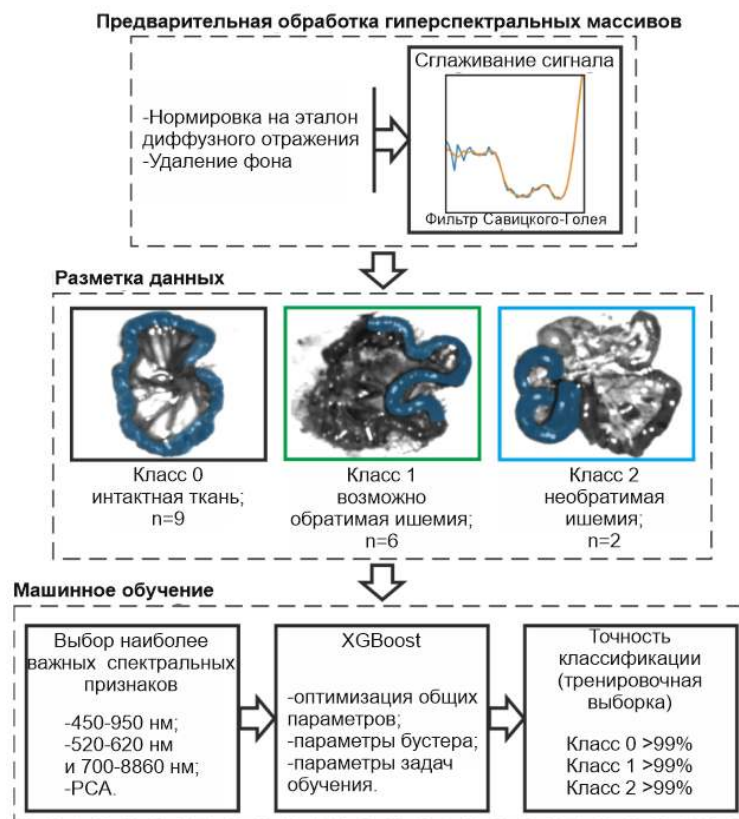


Рисунок 6 – Блок-схема основных этапов применения разработанного метода на основе машинного обучения

Первый подход включал анализ данных по всему диапазону гиперспектральной камеры (450-950 нм), за исключением 50 нм интервалов в начале и в конце диапазона, где возможно возникновение шумов и краевых эффектов. Вторым подходом заключался в анализе данных в характерных областях поглощения крови – 520-620 нм и 700-860 нм. Третий подход предусматривал применение метода PCA, показавший наибольшие значения точности классификации.

Далее данные были размечены в соответствии с гистологической классификацией Park-Chiu с выделением трех классов: интактная ткань, потенциально обратимая ишемия (степени 1-5) и необратимая ишемия (степени 6-8). В результате сегментации был сформирован спектральный датасет для интактной ткани (45 377 точек, 9 животных в обучающем наборе), условно обратимой ишемии (32 715 точек, 6 животных в обучающем наборе) и необратимой ишемии (11 764 точки, 2 животных в обучающем наборе). В качестве основного метода классификации с учителем применялся алгоритм XGBoost с настройкой гиперпараметров по категориям общего уровня, бустинга и задач обучения. Далее, в соответствии с разработанным алгоритмом машинного обучения, были построены классификационные маски, наложенные на измеренные изображения

кишечника, и выполнено их сравнение с диагностическими картами тканевой сатурации для потенциально обратимой ишемии и необратимой ишемии, что показано на рисунке 7.

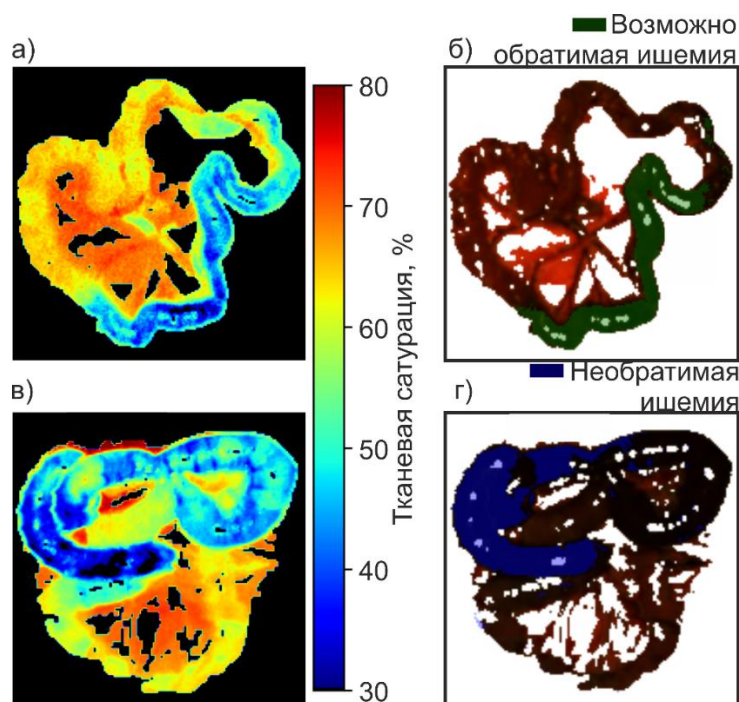


Рисунок 7 – Двумерные карты тканевой сатурации (а) при возможно обратимой ишемии; (б) при необратимой ишемии; (в) классификационные карты при возможно обратимой ишемии; (г) при необратимой ишемии

Сравнение построенных классификационных масок с картами тканевой сатурации, как показано на рисунке 7, подтвердило, что алгоритм позволяет детально определять зоны ишемических изменений и границы резекции. Применение разработанного алгоритма совместно с методом главных компонент позволило получить следующие характеристики: для класса 0 (интактная ткань) – точность 0,98, чувствительность 0,98 и специфичность 0,94; для класса 1 (потенциально обратимая ишемия) – точность 0,95, чувствительность 0,95 и специфичность 0,96; для класса 2 (необратимая ишемия) – точность 0,97, чувствительность 0,97 и специфичность 0,97, что подтверждает возможности его практического применения в интраоперационной диагностике. Таким образом, применение методов машинного обучения даёт возможность уточнять зоны ишемических повреждений, обеспечивая более точное определение обратимости ишемии и, возможно, границ резекции кишечной ткани.

Заключительным этапом явилась разработка усовершенствованной модели машинного обучения, применимой к условиям интраоперационной диагностики у пациентов, сочетающая одномерную сверточную нейронную сеть для точной семантической сегментации ткани кишечника и исключения фоновых помех с последующей неконтролируемой спектральной кластеризацией на основе метода главных компонент и модели гауссовских смесей. Применение такого гибридного метода к данным трех пациентов с различной патологией кишечной стенки

продемонстрировало его высокую эффективность. Разработанная модель подтвердила свою способность визуализировать непрерывное прогрессирующее ишемии кишечной стенки и объективно стратифицировать ее тяжесть непосредственно во время операции, закладывая основу для системы поддержки принятия врачебных решений (СППВР).

Далее был разработан метод диагностики гиперплазии сосудов и нарушений мезентериального кровотока основанный на регистрации и анализе гиперспектральных массивов. Метод предусматривает использование единого аппаратного комплекса для обследования пациентов с наличием инфантильных гемангиом и ишемии кишечной стенки. Верификация метода показала точность классификации стадий развития инфантильных гемангиом свыше 80% при использовании разработанной модели на основе кластерного анализа и точность оценки жизнеспособности кишечной стенки не менее 95% при применении ансамблевой модели машинного обучения. Метод апробирован в клинических условиях и внедрён в образовательный процесс, что подтверждает его практическую значимость и возможность использования в качестве СППВР.

На основании разработанного метода диагностики, синтезирована БТС диагностики сосудистых нарушений тканей, представленная на рисунке 8.

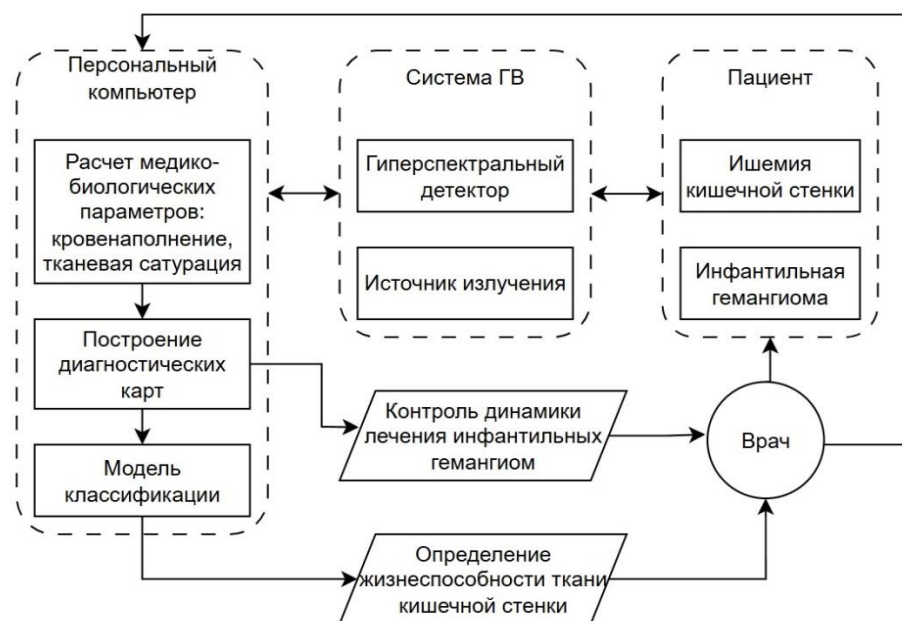


Рисунок 8 – БТС диагностики жизнеспособности ткани с помощью устройства гиперспектральной визуализации

Биотехническая система работает следующим образом. Врач располагает гиперспектральную камеру с кольцевым источником излучения, закрепленные на штативе, над пациентом, после чего запускает процесс диагностики. Зарегистрированный сигнал с устройства передается на ПК посредством проводного подключения или через модуль Bluetooth. На ПК данные подвергаются математической обработке и использованием простейших линейных алгоритмов, представляя результат в виде диагностических карт тканевой сатурации и методов

машинного обучения, представляя результат в виде классификационных карт. После окончания диагностики данные передаются врачу, который выносит решение об оптимальном терапевтическом курсе, при исследовании инфантильных гемангиом, или о возможной резекции пораженного участка кишечника, при исследовании нарушений мезентериального кровотока тканей кишечной стенки, для каждого пациента индивидуально.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена решению научно-технической задачи разработки метода и устройства гиперспектральной визуализации для диагностики сосудистых нарушений. В диссертационной работе получены следующие основные научные результаты:

1) Проведен обзор и анализ применяемых в современной клинической и научно-технической практике инструментальных методов диагностики, в том числе систем ГВ, для оценки жизнеспособности биологических тканей, в частности сосудистых нарушений различного профиля.

3) Приведено обоснование специализированных МТТ к разрабатываемому устройству ГВ, основанных на расчете мощности излучения, соотношения сигнал/шум, а также на анализе диагностического объема с помощью численного моделирования распространения оптического излучения в различных типах биоткани.

4) Разработано устройство ГВ, включающее ГК с диапазоном регистрируемого излучения 400-1000 нм, ГИИ с КО для равномерного зондирования объекта, ЭДО для нормировки данных, а также систему крепления для интраоперационного использования устройства.

5) Проведены экспериментальные исследования на 33 пациентах педиатрического профиля с построением диагностических карт инфантильных гемангиом, а также на 6 модельных животных и 16 пациентах хирургического профиля с определением степени ишемических поражений ткани кишечной стенки по диагностическим картам тканевой сатурации.

6) Разработана вероятностная модель с использованием кластерного анализа, основанная на обоснованных диагностических критериях с применением разработанной гиперспектральной системы, позволяющая определять стадии инфантильных гемангиом с общей диагностической точностью не менее 0,81.

7) Разработана ансамблевая модель с использованием методов машинного обучения, основанная на обоснованных диагностических критериях с применением разработанной гиперспектральной системы, позволяющая классифицировать жизнеспособность тканей кишечной стенки с общей диагностической точностью не менее 0,96.

8) Разработан метод диагностики сосудистых нарушений для пациентов с наличием инфантильных гемангиом и поражений тканей кишечной стенки, основанный на результатах, полученных с использованием разработанного

устройства ГВ, позволяющий повысить качество диагностики по параметру чувствительности с ~61% (по экспертной оценке) до чувствительности не менее 0,83 при определении стадии развития гемангиомы и до чувствительности не менее 0,95 при определении степени ишемических поражений кишечника.

9) Разработана биотехническая система диагностики сосудистых нарушений для пациентов с наличием инфантильных гемангиом и поражений тканей кишечной стенки, основанная на использовании разработанного устройства гиперспектральной диагностики.

Рекомендации. Результаты диссертационного исследования могут быть использованы в других областях медицины при разработке методов и устройств для оптической неинвазивной диагностики опухолевых мальформаций, ревматических заболеваний, респираторных инфекциях, приводящих к повреждению эндотелия и др.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Техническое совершенствование устройства ГВ за счет уменьшения его габаритов, повышения скорости обработки данных и расширения регистрируемого спектрального диапазона. Расширение клинической валидации для повышения точности и надёжности разработанных алгоритмов машинного обучения. Интеграция с другими методами оптической диагностики, например флуоресцентной визуализацией, для создания мультимодальной системы, обеспечивающей комплексную оценку состояния тканей.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Публикации в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК

по специальности диссертации:

1. **Shupletsov, V.V.** Fluorescence Imaging System for Biological Tissues Diagnosis: Phantom and Animal Studies / **V.V. Shupletsov**, K. Kandurova, V. Dremin, E. Potapova, M. Apanaykin, U. Legchenko, A. Dunaev // Journal of Biomedical Photonics & Engineering. – 2020. – Vol. 1, Issue 6, P. 010303 (1-9) (K2).
2. **Шуплецов, В.В.** Техническая реализация и алгоритмы обработки результатов гиперспектральных измерений при изучении ишемических повреждений / **В.В. Шуплецов** // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2025. – Т. 5. – С. 126-134 (K2).
3. Goryunov, I. Hyperspectral image segmentation and clustering for intraoperative diagnosis of intestinal ischemia / I.A. Goryunov, **V.V. Shupletsov**, N.A. Adamenkov, A.V. Mamoshin, E.V. Potapova, A.V. Dunaev, V.V. Dremin // Journal of Biomedical Photonics & Engineering. – 2025. – Vol. 11, Issue 4, P. 040301 (K2).

Публикации в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК:

4. **Шуплецов, В.В.** Использование модельных образцов кожи человека на основе полиакриламида в задачах гиперспектральной флуоресцентной визуализации и спектроскопии / **В.В. Шуплецов**, Е.А. Жеребцов, В.В. Дрёмин., А.П. Попов., А.В. Быков, Е.В. Потапова, А.В. Дунаев, И.В. Меглинский // Квантовая Электроника. – 2021. – Т. 51, № 2. – С. 118-123.
5. Адаменков, Н.А. Интраоперационная оценка жизнеспособности кишечной стенки / Н.А. Адаменков, А.В. Мамошин, В.В. Дрёмин, Е.В. Потапова, **В.В. Шуплецов**, Ю.В. Иванов, Д.Н. Панченков, А.В. Дунаев // Клиническая практика. – 2024. – Т. 15, №4. – С. 46-58 (K2).
6. Адаменков, Н.А. Оценка перфузии кишечной стенки в условиях ишемии с применением метода гиперспектральной визуализации / Н.А. Адаменков, А.В. Мамошин, В.В. Дрёмин, Е.В.

Потапова, **В.В. Шуплецов**, И.А. Горюнов, А.А. Палалов, А.В. Дунаев // Оперативная хирургия и клиническая анатомия. – 2024. – Т. 8, №1. – С.5-13 (К2).

Публикации в изданиях, индексируемых в международных наукометрических базах Scopus и Web of Science:

7. **Shupletsov, V.V.** Hyperspectral and machine learning-based classification of ischemic intestinal tissue / **V.V. Shupletsov**, I.A. Goryunov, N.A. Adamenkov, A.V. Mamoshin, E.V. Potapova, A.V. Dunaev, V.V. Dremin // Journal of Biomedical Optics. – 2025. – Vol. 30 (Q2, IF 2,9).
8. **Shupletsov, V.V.** Low-cost fabrication of PPIX liquid phantoms for use in fluorescence measurements / **V.V. Shupletsov**, M. Mikenkina, E. Zherebtsov, V. Dremin, A. Bykov, E. Potapova, A. Dunaev, I. Meglinski // Proc. SPIE. – 2022. – Vol. 12192. – P. 121920U.
9. **Shupletsov, V.V.** Infantile hemangiomas evaluation based on hyperspectral imaging / **V.V. Shupletsov**, I. Gorunov, M. Sergienko, I. Zhurilo, E. Potapova, V. Dremin // Proc. SPIE. – 2023. – Vol. 12627. – P. 126272F.

Публикации в изданиях, входящих в базу данных научного цитирования РИНЦ:

10. Адаменков, Н.А. Оценка жизнеспособности тканей кишечной стенки / Н.А. Адаменков, А.В. Мамошин, Д.С. Сумин, А.В. Ветрова, И.О. Козлов, **В.В. Шуплецов**, К.Ю. Кандурова, В.П. Немов // Материалы Всероссийской конференции молодых ученых «Современные тренды в хирургии». – Москва: ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр хирургии им. А.В. Вишневского» Минздрава России. – 2022. – С. 7-8.
11. Адаменков, Н.А. Современные технологии в улучшении диагностики ишемического поражения кишечника / Н.А. Адаменков, И.О. Козлов, **В.В. Шуплецов**, К.Ю. Кандурова, Н.В. Голубова, А.В. Мамошин // Тезисы III съезда хирургов ПФО. – Нижний Новгород: Приволжский исследовательский медицинский университет. – 2022. – С. 114-115.
12. **Шуплецов, В.В.** Применение метода гиперспектральной визуализации для определения нарушения микроциркуляции крови в животной модели ишемии кишечника / **В.В. Шуплецов**, И.А. Горюнов, Н.А. Адаменков, А.В. Мамошин, Е.В. Потапова, В.В. Дрёмин // 15 Международная научная конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ'2022». – Владимир-Суздаль. – 2022. – Т. 1. – С. 61-64.
13. Горюнов, И.А. Возможности применения гиперспектральной визуализации для оценки степени ишемии кишечной стенки / И.А. Горюнов, **В.В. Шуплецов**, Н.А. Адаменков, А.В. Мамошин, Е.В. Потапова, В.В. Дремин // XX Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике, посвященный 100-летию со дня рождения Н.Г. Басова: сборник трудов конференции. – 2022. – С. 302-307.
14. Адаменков, Н.А. Возможность метода гиперспектральной визуализации для определения жизнеспособности кишечника при моделировании локальной ишемии / Н.А. Адаменков, **В.В. Шуплецов**, И.А. Горюнов, А.А. Палалов, Е.Г. Чугунова, Н.И. Калуга, А.В. Мамошин, В.В. Дрёмин // Медицинская физика. – 2023. – Т. 2. – С. 17-18.
15. **Шуплецов, В.В.** Применение метода гиперспектральной визуализации для определения микроциркуляторных нарушений биологических тканей / **В.В. Шуплецов**, И.А. Горюнов, Н.А. Адаменков, И.П. Журило, Е.В. Потапова, В.В. Дрёмин // Оптические методы исследования потоков: Труды XVII Международной научно-технической конференции, 26–30 июня 2023. – Владимир-Суздаль. – 2023. – С. 650-655.
16. 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.А. Палалов, Н.И. Калуга, В.С. Родионов, А.В. Мамошин, Е.В. Потапова, В.В. Дрёмин, А.В. Дунаев // Современные методы исследования в клеточной биологии и медицине: сборник трудов Всероссийской конференции. – Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева. – 2023. – С. 35.
17. Горюнов, И.А. Система гиперспектральной визуализации для определения микроциркуляторных нарушений биологических тканей / И.А. Горюнов, **В.В. Шуплецов**, Н.А. Адаменков, И.П. Журило, Е.В. Потапова, В.В. Дрёмин // Современные методы

исследования в клеточной биологии и медицине: сборник трудов Всероссийской конференции. – Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева. – 2023. – С. 37.

18. Горюнов, И.А. Метод гиперспектральной визуализации для оценки степени микроциркуляторных нарушений кишечной стенки / И.А. Горюнов, **В.В. Шуплецов**, Д.А. Суббота, В.В. Дрёмин // Труды XIII Всероссийского конгресса молодых ученых. – СПб: Университет ИТМО.– 2024.

19. Горюнов, И.А. Метод гиперспектральной визуализации для определения микроциркуляторных нарушений тканей кишечной стенки / И.А. Горюнов, **В.В. Шуплецов**, Н.А. Адаменков, А.В. Мамошин, Е.В. Потапова, А.В. Дунаев, В.В. Дрёмин // 16 Международная научная конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ'2024». – Владимир-Суздаль. – 2024. – Т. 1. – С. 82-86.

20. **Шуплецов, В.В.** Метод и устройство гиперспектральной визуализации для диагностики гиперплазии сосудов и нарушений мезентериального кровотока / **В.В. Шуплецов** // Прогресс в биомедицине: от исследований до клинической практики: сборник трудов Всероссийской конференции OrelBioMed, 11–12 сентября 2025. – Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева. – 2025. – С. 69.

Прочие публикации в материалах конференций:

21. Адаменков, Н.А. Оценка жизнеспособности толстой кишки при ишемии с применением метода гиперспектральной визуализации / Н.А. Адаменков, **В.В. Шуплецов**, И.А. Горюнов, А.А. Палалов, В.В. Дрёмин, Е.В. Потапова, А.В. Дунаев, А.В. Мамошин // Сборник тезисов конкурса научных работ XIII международная конференция «Российская школа колоректальной хирургии». – Москва. – 2023. – С. 86-89.

22. **Shupletsov, V.** Hyperspectral Imaging of Intestinal Ischemia Supported by Machine Learning / **V. Shupletsov**, I. Goryunov, N. Adamenkov, V. Dremin // 18th International Conference on Laser Applications in Life Science” (LALS-2024), Muğla, Turkey, 11-14 October 2024. – 2024. – P. 22.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

23. **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; опублик. 28.03.2023.

24. **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; опублик. 06.07.2023.

Подписано в печать ____ . ____ .2025 г.

Формат 60x84 1/16. Усл. печ. л. 1,3.

Тираж 100 экз. Заказ № ____.

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»
302026, г. Орёл, ул. Комсомольская, 95.