***Семнадцатая Международная научно-техническая конференция***
***«Оптические методы исследования потоков»***
***Москва, 26–30 июня 2023 г.***

УДК 535-92

Шуплецов В.В.[1], Горюнов И.А.[1], Адаменков Н.А.[2], Журило И.П.[3], Потапова Е.В.[1], Дрёмин В.В.[1]

*[1] Научно-технологический центр биомедицинской фотоники, ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», Россия, 302015, Орёл, Наугорское шоссе, 29, E-mail: valery.shupletsov@bmecenter.ru*
*[2] Больница скорой медицинской помощи им. Н.А. Семашко, Россия, 302027, Орёл улица Матвеева, 9, E-mail: nikita-ad@mail.ru*
*[3] Кафедра хирургии детского возраста и инновационных технологий в педиатрии, ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», Россия, 302028 Орёл, ул. Октябрьская, д. 4, E-mail: zhipsurg@mail.ru*

# ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОЦИРКУЛЯТОРНЫХ НАРУШЕНИЙ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ

## АННОТАЦИЯ

*В работе представлена система гиперспектральной оптической визуализации, применимая для диагностики микроциркуляторных нарушений различной этиологии. В качестве объекта исследования выступили инфантильные гемангиомы, являющиеся доброкачественными сосудистыми образованиями, а также ткани кишечной стенки лабораторных животных при моделировании локальной ишемии кишечника. Полученные результаты были обработаны с использованием двухволнового подхода для расчета параметра тканевой сатурации в ближней инфракрасной области, а также с использованием ранее разработанной нейронной сети, обученной по обобщенной объектно-ориентированной модели Монте-Карло. В работе представлены двухмерные карты сатурации кишечной стенки, рассчитанные с использованием двухволнового подхода, а также карты кровенаполнения, тканевой сатурации и индексов содержания окси- и дезоксигемоглобина гемангиом, рассчитанные с использованием нейросетевого подхода. Полученные результаты свидетельствует о широком спектре возможностей использования разработанной гиперспектральной системы для оценки микроциркуляторных нарушений.*

ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ, ИНФАНТИЛЬНЫЕ ГЕМАНГИОМЫ, ЛОКАЛЬНАЯ ИШЕМИЯ КИШЕЧНОЙ СТЕНКИ, МОДЕЛИРОВАНИЕ МОНТЕ-КАРЛО

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время использование гиперспектральной визуализации (ГВ) стало мировым трендом при решении различных прикладных медицинских задач. Возможность неинвазивного использования данного метода, а также высокий потенциал математической обработки, обеспечиваемый спектральным разрешением, позволяют рассматривать ГВ как альтернативу уже широко распространенным методам, таким как магнитно-резонансная

томография, интраоперационная допплерография, рентгеновская томография и др. [1]. В частности, ГВ может быть эффективно использована для диагностики патологий кожи с технической реализацией в виде микроскопической системы [2]. Или может быть совмещена с измерением поляризации и использована для изучения кожных осложнений, связанных с сахарным диабетом [3, 4]. Современные схемотехнические решения позволяют ультракомпактно реализовывать гиперспектральные измерения, встраивая данные системы в лапароскоп или камеры смартфонов, существенно расширяя области использования данного метода в медицине [5]. Благодаря высокому спектральному разрешению современных систем ГВ становится возможной реализация высокоточных классификационных моделей на основе классических методов сегментации [6] и продвинутых нейросетевых подходов [7]. Но, несмотря на такое широкое использование ГВ, все еще остается множество областей медицины, в которых применение данного оптического метода исследования было бы эффективным.

В данной работе предлагается метод ГВ, включающий разработанную лабораторную систему и математические алгоритмы обработки гиперспектральных массивов. В качестве объекта исследования выступили инфантильные гемангиомы, являющиеся доброкачественными сосудистыми образованиями, а также ткани кишечной стенки лабораторных животных при моделировании локальной ишемии кишечника. Актуальность рассмотрения инфантильных гемангиом как одного из объектов исследования связана с тем, что на сегодняшний день отсутствует объективный инструмент для оценки данных патологий, что затрудняет принятие решения о правильном курсе лечения поражения и сравнение эффективности различных методов лечения [8]. Согласно одной из гипотез, на появление гемангиом влияет гипоксический стресс местных тканей [9], таким образом анализ кровенаполнения и тканевой сатурации методом ГВ может быть использован в качестве оценки эффективности лечения данной патологии. Актуальность рассмотрения ишемии кишечной стенки как одного из объектов исследования связана с тем, что на сегодняшний день в хирургии нет единого общепризнанного объективного подхода к оценке жизнеспособности пораженного кишечника, что может помочь в принятии хирургических решений и потенциально минимизировать необходимость резекции здоровой ткани [10]. Эффективность же применения ГВ для анализа ишемии кишечной стенки была продемонстрирована в ряде исследований, результаты которых свидетельствуют о высокой чувствительности метода к изменению микроциркуляции крови, особенно в ближней инфракрасной оптической области спектра [11].

Таким образом, целью данной работы было разработка метода ГВ для определения его возможностей по выявлению микроциркуляторных нарушений в различных приложениях, таких как анализ инфантильных гемангиом и исследование ишемии кишечной стенки.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДОКЛАДА

Для осуществления поставленной цели была разработана система ГВ, применяемая для диагностики микроциркуляторных нарушений с различной этиологией. Система состоит из: широкополосного источника излучения OSL2 (ThorLabs, США) с волоконно-кольцевым осветителем FRI61F50 (ThorLabs, США) и гиперспектральной камеры Specim (Spectral Imaging Ltd., Финляндия) со спектральным диапазоном 400-1000 нм. Технические параметры камеры позволяют регистрировать гиперкуб, состоящий из 204 спектральных полос, время выдержки для каждой полосы было выбрано в значении 150 мс для обеспечения лучшего соотношения сигнал/шум.

Были проведены 2 вида исследований. В первом изучены особенности микроциркуляции гемангиом различной локализации у 6 младенцев (возрастом до 1 года). Во втором исследовании изучены ткани кишечной стенки 6 лабораторных животных (крысы линии Wistar) при наложении лигатур на аркадные сосуды, моделирующих длительность ишемии 0, 1, 6 и 12 часов соответственно, с последующим изъятием гистологических образцов из

областей интереса. Для нормирования данных для каждого измерения были зарегистрированы изображения эталона диффузного отражения.

Полученные результаты измерений инфантильных гемангиом были рассчитаны с использованием ранее разработанной нейронной сети, обученной по обобщенной объектно-ориентированной модели Монте-Карло [3, 4, 11]. Для каждого из пациентов были получены двухмерные карты кровенаполнения, тканевой сатурации, индексы содержания окси/дезоксигемоглобина гемангиом, рассчитанные с использованием нейросетевого подхода. Пример измерения гемангиомы в области плеча представлен на рис. 1.

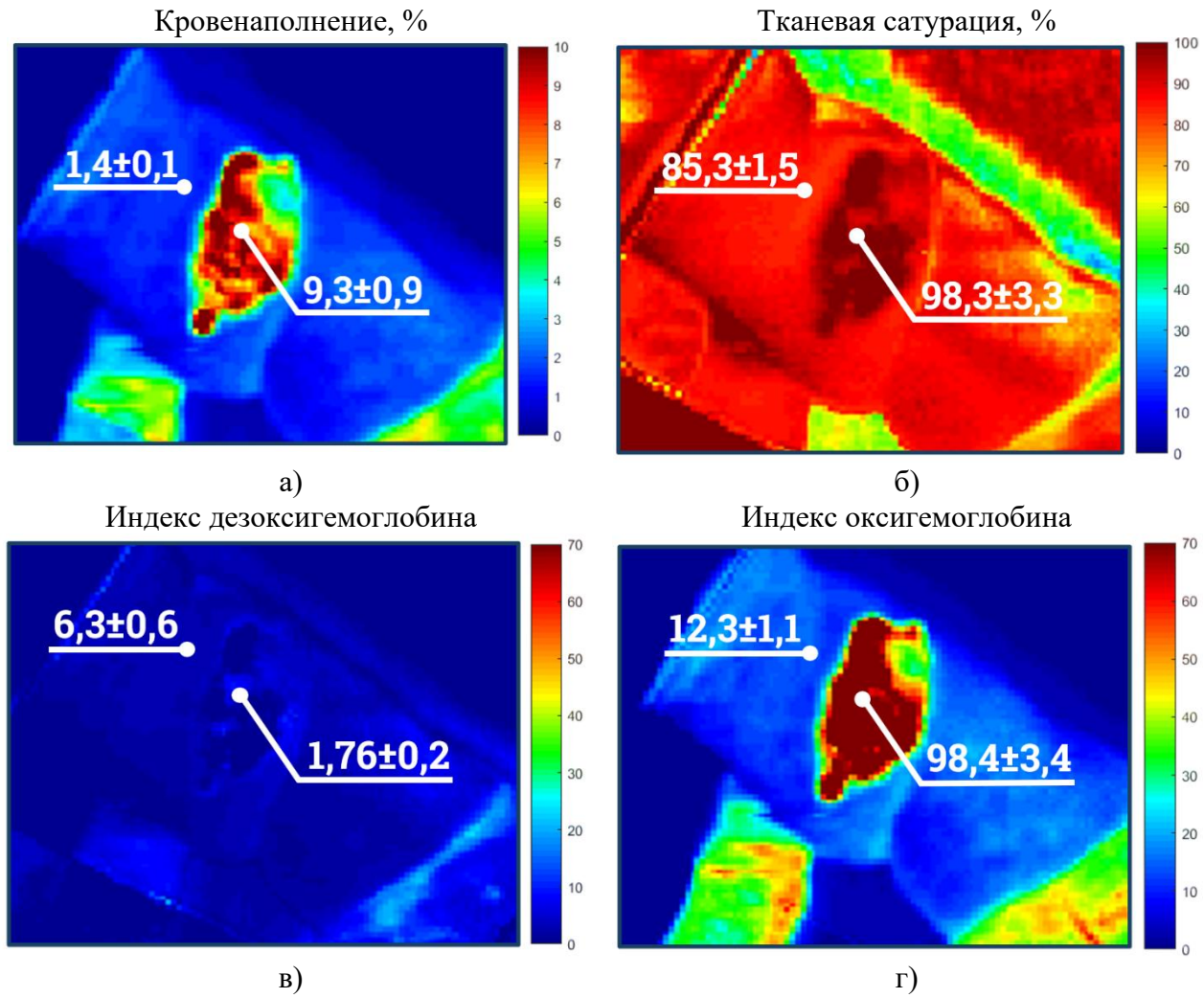


Рис. 1. Репрезентативный пример рассчитанных двумерных карт для гемангиомы в области плеча:
а – параметр кровенаполнения, б – параметр тканевой сатурации, в – параметр содержания дезоксигемоглобина, г – параметр содержания оксигемоглобина

Исходя из полученных результатов, выявлен возможный предиктор развития изъязвлений гемангиом, связанный с увеличением показателя тканевой сатурации и индекса содержания оксигемоглобина в области сосудистых образований в сравнении с интактной тканью. Полученные результаты свидетельствуют о возможности эффективного применения разработанного метода ГВ в данном направлении медицинских исследований для анализа гемангиом.

Результаты измерений ишемии кишечной стенки были рассчитаны с использованием двухволнового подхода и коэффициентов отражения на изобестических и неизобестических длинах волн в ближней инфракрасной области [12]. Результатом явились рассчитанные двухмерные цветовые карты тканевой сатурации кишечника, репрезентативные примеры которых представлены на рис. 2. На картах сатурации, рассчитанных для всех стадий ишемии,

было обнаружено визуальное снижение контрастности в области ишемии кишечной стенки по сравнению с интактными участками.

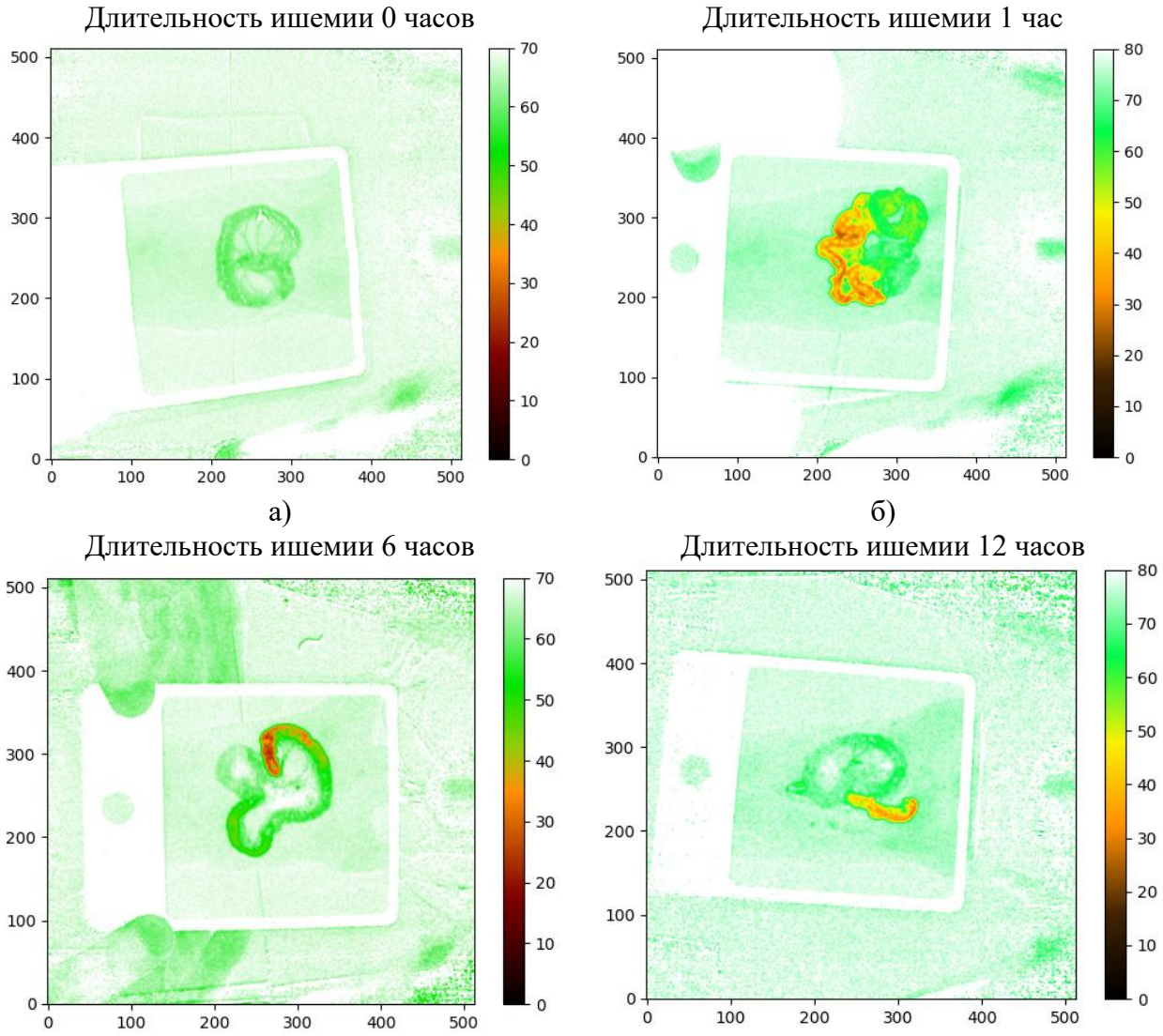


Рис. 2. Репрезентативный пример рассчитанных двумерных карт тканевой сатурации кишечной стенки: а – неишемизированный кишечник, б – после 1 часа наложения лигатуры, в – после 6 часов наложения лигатуры, г – после 12 часов наложения лигатуры

Наблюдаемые изменения индексов насыщения для окклюзированных областей на каждом этапе измерения позволяют предположить, что ГВ может быть использована для оценки степени ишемии кишечника. Последующий гистологический анализ участков ишемизированной ткани выявил три степени ишемии, основанные на классификации Park/Chiu. Обратимая ишемия была определена по результатам измерений, проведенных через 1 час после наложения лигатуры. Возможная обратимая ишемия – по результатам измерений, проведенных через 6 часов после наложения лигатуры. Необратимые ишемические изменения наблюдались по результатам измерений, проведенных через 12 часов после наложения лигатуры. На рис. 3 представлены усредненные значения параметра тканевой сатурации, построенные по полученным цветовым картам для ишемизированных областей кишечника и интактной ткани.

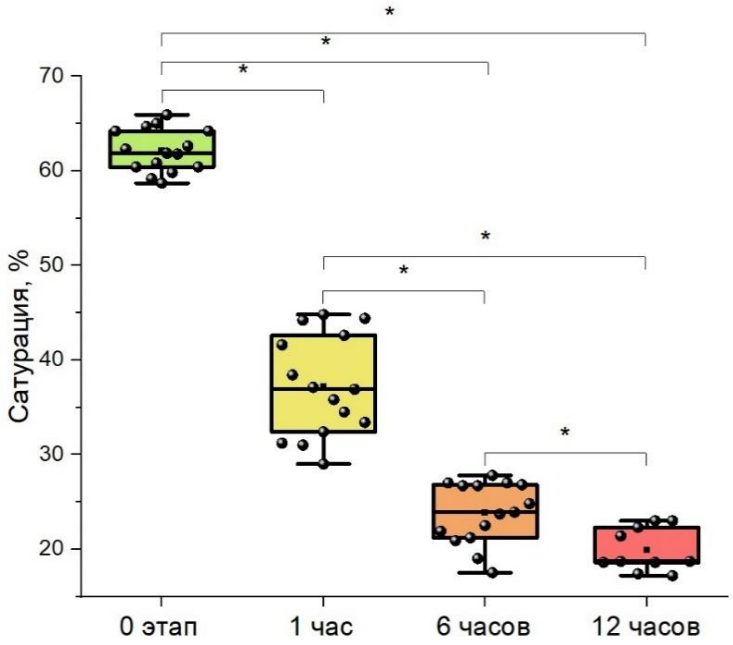


Рис. 3. Усредненные значения параметра тканевой сатурации на всех интервалах измерения, выявлена статистическая значимость по U-критерию Манна-Уитни, значение $p < 0,05$

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что предложенный подход и система ГВ способны диагностировать ишемию кишечника в течение часа после наложения лигатуры и определять обратимый характер нарушений кровотока. Полученные результаты свидетельствуют о возможности эффективного применения разработанного метода ГВ в данном направлении медицинских исследований для анализа нарушений мезентерального кровотока тканей кишечника.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов измерений младенческих гемангиом показал возможность эффективной оценки параметров объема крови и насыщения кислородом с помощью разработанного ранее нейросетевого подхода. Продемонстрирована достаточная эффективность разработанной диагностической системы для ее дальнейшего использования с целью мониторинга эффективности лечения гемангиом.

Предлагаемый метод ГВ также демонстрирует высокую чувствительность и способность диагностировать ишемию кишечника на ранних стадиях и возможность определять обратимый характер изменений, вызванных нарушением кровоснабжения.

В итоге на основании полученных результатов можно заключить, что разработанный метод ГВ представляет собой эффективный и перспективный инструмент для анализа сосудистых образований и для диагностики ишемии кишечника. Он может быть использован в медицинских исследованиях для более точной диагностики и мониторинга патологий сосудистой системы. Данный метод может также иметь практическое применение в клинической практике для диагностики ишемии кишечника и для оценки эффективности лечения данной патологии. Полученные результаты подтверждают значимость использования метода ГВ в медицине и обеспечивают основу для дальнейших исследований в этой области.

## БЛАГОДАРНОСТИ, СВЕДЕНИЯ О СПОНСОРАХ

Исследование было поддержано Российским научным фондом в рамках проектов № 21-15-00325 и 22-75-10088.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ГВ – гиперспектральная визуализация

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. **Mangotra H., Srivastava S., Jaiswal G., Rani R., Sharma A.** Hyperspectral imaging for early diagnosis of diseases: A review // Expert Systems. 2023. P. e13311.
2. **Братченко И. А., Алонова М.В., Мякинин О.О., Морятов А.А., Козлов С.В., Захаров В.П.** Гиперспектральная визуализация патологий кожи в видимой области // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40. №. 2. С. 240-248.
3. **Dremin V., Marcinkevics Z., Zherebtsov E., Popov A., Grabovskis A., Kronberga H., Bykov A.** Skin complications of diabetes mellitus revealed by polarized hyperspectral imaging and machine learning // IEEE Transactions on Medical Imaging. 2021. V. 40. №. 4. P. 1207-1216.
4. **Dremin V.V., Zherebtsov E.A., Popov A.P., Meglinski I.V., Bykov A.V.** Hyperspectral imaging of diabetes mellitus skin complications //Biomedical Photonics for Diabetes Research. CRC Press. 2022. P. 177-195.
5. **Tran M.H. Fei B.** Compact and ultracompact spectral imagers: technology and applications in biomedical imaging // Journal of Biomedical Optics. 2023. V. 28. №. 4. P. 040901.
6. **Мясников Е.В.** Сегментация гиперспектральных изображений с использованием снижения размерности и классических методов сегментации // Сборник трудов III международной конференции и молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2017)-Самара: Новая техника. 2017. С. 637-643.
7. **Винокуров В.О., Матвеева И.А., Христофорова Ю.А., Мякинин О.О., Братченко И.А., Братченко Л.А., Захаров В.П.** Нейросетевой классификатор гиперспектральных снимков кожных патологий // Компьютерная оптика. 2021. Т. 45. №. 6. С. 879-886.
8. **Menapace D., Mitkov M., Towbin R., Hogeling M.** The changing face of complicated infantile hemangioma treatment // Pediatric radiology. 2016. V. 46. P. 1494-1506.
9. **Jung H.L.** Update on infantile hemangioma // Clinical and experimental pediatrics. 2021. V. 64. №. 11. P. 559.
10. **Захаренко А.А., Беляев М.А., Трушин А.А., Зайцев Д.А., Курсенко Р.В.** Интраоперационная оценка жизнеспособности стенки кишки (обзор литературы) // Вестник хирургии имени ИИ Грекова. 2020. Т. 179. №. 1. С. 82-88.
11. **Zherebtsov E., Dremin V., Popov A., Doronin A., Kurakina D., Kirillin M., Bykov A.** Hyperspectral imaging of human skin aided by artificial neural networks // Biomedical optics express. 2019. V. 10. №. 7. P. 3545-3559.
12. **Potapova E.V., Dremin V.V., Zherebtsov E.A., Makovik I.N., Zherebtsova A.I., Dunaev A.V., Muradyan V.F.** Evaluation of microcirculatory disturbances in patients with rheumatic diseases by the method of diffuse reflectance spectroscopy //Human Physiology. 2017. V. 43. P. 222-228.