

3. M. R. Tofghi, Dual-mode planar applicator for simultaneous microwave heating and radiometric sensing, *Electronics letters*, v. 48, No 20, pp. 1252-1253 (2012)
4. Afyf, A., et al. "Flexible antenna array for early breast cancer detection using radiometric technique." *Int. J. Biol. Biomed. Eng* 10 (2016): 10-17.
5. Klemetsen Ø., Jacobsen S., Birkelund Y. Radiometric temperature reading of a hot ellipsoidal object inside the oral cavity by a shielded microwave antenna put flush to the cheek // *Physics in Medicine & Biology*. – 2012. – T. 57. – №. 9. – С. 2633
6. Groupas E. et al. Sensing local temperature and conductivity changes in a brain phantom using near-field microwave radiometry // 2017 International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas, Innovative Structures, and Applications (iWAT). – IEEE, 2017. – С. 293-295.
7. D.B. Rodrigues et al. Design and optimization of an ultra wideband and compact microwave antenna for radiometric monitoring of brain temperature *IEEE Transactions on Biom. Eng.*, vol. 61, no.7, pp. 2154-2160, Jul. 2014
8. Leushin V.Y., Agasieva S.V., Porokhov I.O., Gudkov A.G. A broadband spiral applicator antenna for microwave radiothermometry. *Biomedical Engineering*. 2024. Vol. 57(5). Pp. 333–335.
9. Andreuccetti D., Fossi R. and Petrucci C. An Internet resource for the calculation of the dielectric properties of body tissues in the frequency range 10 Hz – 100 GHz. IFAC-CNR, Florence (Italy). 1997. [Online]. Available at: <https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/dielectric-properties/>
10. Leushin V.Yu., Gudkov A.G., Porokhov I.O., Vesnin S.G., Sedankin M.K., Sidorov I.A., Solov'ev Yu.V., Agasieva S.V., Chizhikov S.V. Possibilities of increasing the interference immunity of radiothermograph applicator antennas for brain diagnostics. *Sensors and Actuators: A. Physical*. 2022. Vol. 337. 113439

LOW-PROFILE BROADBAND ANTENNA APPLICATOR FOR MICROWAVE MEDICAL RADIOTHERMOGRAPH

Leushin V.Yu.¹, Agasieva S.V.¹, Porokhov I.O.¹, Gudkov G.A.²

¹ Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, ra3bu@yandex.ru

² Ltd. Hyperion, ooo.giperion@gmail.com

The design of a low-profile broadband slit antenna applicator in the form of a "dumbbell" designed for use as elements of a conformal antenna array of a multichannel medical radiothermograph is considered. The main characteristics of the antenna in the frequency range from 2 to 5 GHz have been simulated. A distinctive feature of the antenna is its small overall dimensions and high manufacturability. This work was financially supported by the Russian Science Foundation (project No. 22-19-00113), <https://rscf.ru/project/22-19-00113/>.

МЕТОД ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОЦИРКУЛЯТОРНЫХ НАРУШЕНИЙ ТКАНЕЙ КИШЕЧНОЙ СТЕНКИ

Горюнов И.А.¹, Шуплецов В.В.¹, Адаменков Н.А.^{1,2}, Мамошин А.В.^{1,2}, Потапова Е.В.¹, Дунаев А.В.¹, Дрёмин В.В.¹

¹ Научно-технологический центр биомедицинской фотоники ОГУ имени И.С. Тургенева, Орёл, Россия

² БУЗ Орловской области «Орловская областная клиническая больница», Орёл, Россия

i.goryunov@oreluniver.ru

Кишечная ишемия – это состояние, связанное с различными нарушениями, вызывающими недостаточный приток крови к кишечнику. Этиологические факторы, приводящие к мезентериальной ишемии, как правило, представлены заболеваниями, которые могут привести к замедлению или прекращению тока крови по брыжеечным сосудам [1]. Механизм циркуляторных нарушений и ишемических расстройств в большинстве случаев имеют единый сценарий развития, который напрямую связан с нарушением микроциркуляции, что приводит к циркуляторной гипоксии кишечной стенки [2]. Тип и прогноз такого повреждения зависит от множества факторов, в том числе и от того, насколько своевременно проведена соответствующая диагностика. Ранняя постановка диагноза имеет жизненно важное значение для обеспечения достаточной функциональности кишечника, а также для предотвращения различных последствий, таких как некроз, перитонит и возможная смерть пациента. При оперативном вмешательстве

успешное лечение зависит от точного определения жизнеспособности пораженного кишечника. Важно отметить, что резекция неполного участка ишемизированной кишки повышает вероятность перфорации и сепсиса. И наоборот, если резекции подвергнется вся ишемизированная область, включая здоровые участки, это может привести к развитию синдрома короткой кишки. Таким образом, сохранение даже нескольких дополнительных сантиметров кишки является важной задачей для хирурга.

На сегодняшний день нет объективного критерия оценки степени микроциркуляторных нарушений кишечной стенки. В большинстве случаев для определения наличия ишемизации врач хирург использует субъективные методы, основанные на опыте хирурга, такие как визуальный осмотр, оценка наличия перистальтики и цвет кишки. Таким образом, актуальной задачей является разработка новых методов оценки жизнеспособности кишечной стенки во время хирургического вмешательства. При поиске новых подходов к оценке состояния кишечной стенки закономерно рассмотрению в качестве объекта исследования мезентериального кровотока, нарушения которого напрямую связаны с патологическими изменениями биоткани [3-4]. В этом ключе перспективным является использование оптических методов, уже показавших свою эффективность в различных медицинских приложениях, в том числе при диагностике онкопатологии на различных органно-тканевых уровнях. Гиперспектральная визуализация (ГВ) – это передовой метод оптической визуализации, сочетающий в себе высокое пространственное разрешение со спектральной информацией. Данный метод позволяет получать изображения в широком оптическом диапазоне длин волн, что позволяет идентифицировать и характеризовать ткани на основе их уникальных спектральных признаков. Принцип ГВ заключается в том, что различные вещества по-разному поглощают, отражают и переизлучают свет на различных длинах волн, и это может быть использовано для дифференциации различных состояний биологической ткани. При анализе ишемии кишечной стенки ГВ может предоставить ценную информацию, путем анализа спектральных изменений в пораженных тканях по сравнению с интактными тканями, при этом основными объектами анализа являются показатели окси- и дезоксигемоглобина. Эффективность применения данного метода для анализа ишемии кишечной стенки была продемонстрирована в ряде исследований, результаты которых свидетельствуют о высокой чувствительности метода к изменению микроциркуляции крови, особенно в ближнем инфракрасном оптическом диапазоне [5-6]. Данный подход может также обеспечить неинвазивную и эффективную диагностику жизнеспособности пораженного кишечника, что в итоге позволит облегчить принятие объективных хирургических решений и потенциально минимизировать необходимость резекции здоровой ткани. Перспективы внедрения ГВ в клиническую практику, в первую очередь, продиктованы возможностью количественной оценки параметра тканевой сатурации исследуемой области ткани, а также возможностью применения методов машинного обучения для задачи определения степени ишемического повреждения кишечной стенки. Таким образом актуальной задачей является дальнейшая разработка метода ГВ для внедрения в клиническую практику.

Для реализации поставленной задачи была разработана система ГВ, основанная на регистрации диффузно отраженного света от биологической ткани, который позволяет получать пространственное распределение спектральной информации об объекте измерения. В качестве широкополосного источника излучения HL-2000-FHSA (Ocean Optics Inc., США) совместно с волоконно-кольцевым осветителем FRI61F50 (ThorLabs, США), в качестве детектора – гиперспектральная камера Specim (Spectral Imaging Ltd., Финляндия) со спектральным диапазоном 400-1000 нм и спектральным разрешением 7 нм. В качестве объекта исследования выступали здоровые половозрелые лабораторные крысы (n = 9) линии Wistar. Проведение исследований было одобрено Этическим комитетом Орловского государственного университета. В соответствии с протоколом исследования проводилась наркотизация лабораторного животного с использованием ингаляционной анестезии. Для получения доступа к брюшной полости осуществлялась срединная лапаротомия в области живота с последующим выделением петель тонкого кишечника вместе с брыжейкой. Создание локальной ишемии производилось путем наложения множественной лигатуры на аркадные сосуды для остановки брыжеечного кровотока в нескольких участках и для моделирования различной степени ишемического повреждения. Измерения окклюзированного кишечника осуществлялись в несколько этапов: до наложения лигатуры (0 час) и после наложения лигатуры (1, 6 и 12 часов). Для нормировки измеряемых данных производилась регистрация спектров от эталона диффузного отражения. Каждый этап сопровождался взятием гистологического образца кишечной стенки.

В результате проведения экспериментальных исследований были получены гиперспектральные массивы с распределённой спектральной информацией тонкой кишки для каждого временного интервала. Для анализа полученных результатов применялась комбинация двух подходов к обработке гиперспектральных данных: двухволновой подход и методы машинного обучения. Использование двухволнового подхода позволяет оценить параметр тканевой сатурации, основываясь на коэффициентах диффузного отражения на длинах волн, соответствующих изобестическим и неизобестическим точкам окси- и дезоксигемоглобина для ближней инфракрасной области [7]. Для оценки степени ишемического повреждения кишечной стенки возможно применение методов машинного обучения для классификации полученных гиперспектральных данных на основе их спектральных характеристик. Таким образом, комбинация двух подходов может быть использована для выявления наличия ишемии, её границ, а также для оценки степени ишемического повреждения кишечной стенки. Расчет сатурации был осуществлен в каждой точке (пикселе) гиперспектральных изображений, на длинах волн 750 и 795 нм. Полученные значения сатурации являются относительными и соответствуют приведенной шкале псевдоцветового контраста, представленные на рисунке 1.

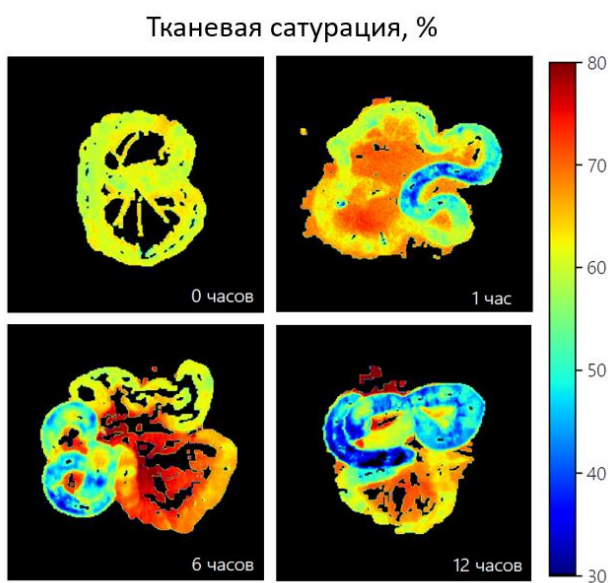


Рисунок 1 – Цветовые карты параметра тканевой сатурации для каждого интервала измерения

На рассчитанных цветовых картах сатурации для всех этапов ишемии наблюдается визуальное уменьшение контраста в области ишемии кишечной стенки по сравнению с интактными участками, что связано с уменьшением параметра сатурации вследствие недостаточного локального притока крови в областях с лигированными питающими сосудами. В соответствии с проведённым гистологическим анализом ишемизированных участков ткани, было выделено две степени по классификации Park/Chiu. Обратимая ишемия (Grade 0 – Grade 5) – соответствует результатам измерения после 1-го часа. Необратимые ишемические изменения (Grade 6 – Grade 8) – соответствует результатам измерения после 6-го и 12-го часа. Для классификации степени ишемического повреждения использовалось обучение с учителем. Предварительная обработка гиперспектрального куба включала сглаживание для удаления шумов и коррекцию фона за счет различия спектральных данных информативного объекта относительно фона. Разметка полученных данных включала выделения трех классов, основанных на результатах гистологического исследования: интактная ткань, обратимая ишемия и необратимая ишемия. В качестве модели для машинного обучения использовался алгоритм экстремального градиентного бустинга (XGBoost) из-за его высокой скорости работы и способности обрабатывать большие объемы данных сложных однородных структур [8]. Для анализа влияния признаков на работу модели и снижения размерности данных использовался метод главных компонент (PCA). Модель была оптимизирована для общих параметров, параметров бустинга и параметров обучения. Для оценки степени ишемизации кишечной

стенки был создан классификатор, позволяющий эффективно различать интактную ткань, обратимую ишемию и необратимую ишемию. По результатам оценки, совокупный показатель метрики точности AUC для модели XGBoost $0,99 \pm 0,01$. На рисунке 2 представлено сопоставление карт сатурации и классификационных карт для случая необратимой (а) и обратимой ишемии (б).

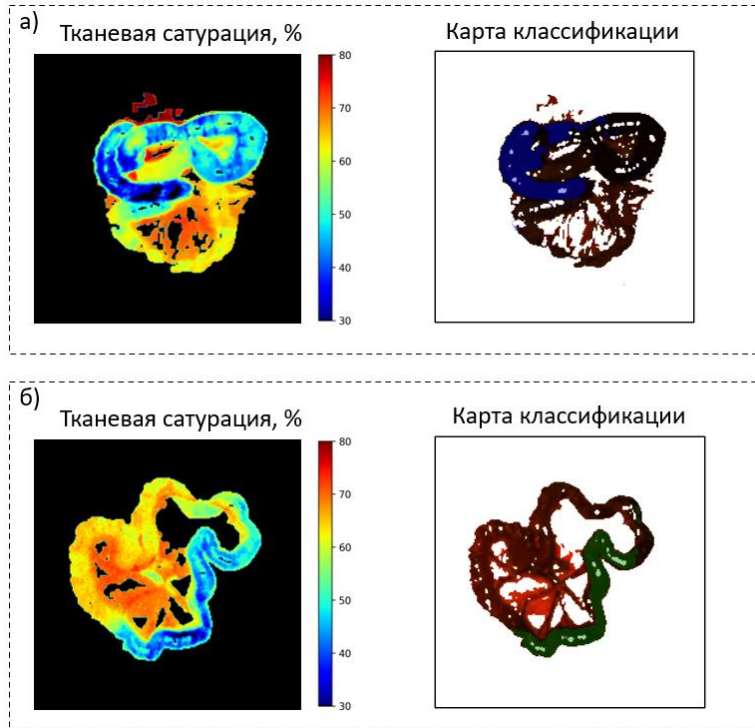


Рисунок 2 – Сравнение карт классификации и тканевой сатурации для необратимой ишемии (а) и обратимой ишемии (б)

На представленных выше картах классификации выделен конкретный сегмент, отражающий степень ишемического повреждения. Синяя область на карте классификации (а) указывает на необратимую ишемию, где каждый пиксель данной маски с вероятностью более 99,9% относится к классу необратимой ишемии по результатам гистологического исследования. Для выделения области обратимой ишемии используется маска зеленого цвета (б), которая также означает принадлежность всех пикселей данного участка к классу обратимой ишемии с вероятностью более 99,9%.

Выявленная разница в форме спектров отражения указывает на изменение оптических свойств ишемизированного кишечника по сравнению с интактной тканью, что позволяет провести дальнейшую математическую обработку полученных результатов с использованием комбинации различных подходов. С использованием двухволнового подхода были рассчитаны двумерные карты тканевой сатурации, а для классификации степени ишемического повреждения применялся метод машинного обучения. На рассчитанных картах сатурации для всех этапов ишемии было выявлено уменьшение контраста в области ишемизированной области петель кишечника по сравнению с интактной тканью, что связано с уменьшением уровня сатурации вследствие недостаточного локального притока крови. Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод что ГВ с последующим определением тканевой сатурации и классификацией степени ишемии может стать перспективным методом интраоперационной оценки ишемического повреждения кишечной стенки.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 22-75-10088.

Библиографический список

1. Тимербулатов В.М., Тимербулатов Ш.В., Сагитов Р.Б., Асманов Д.И., Султанбаев А.У. Диагностика ишемических повреждений кишечника при некоторых острых хирургических заболеваниях органов брюшной полости // Креативная хирургия и онкология. – 2017. – №3. – С.12–19.
2. Коробков Д.М. Острая кишечная непроходимость – современное видение механизмов развития и дискуссионность в выборе диагностической и лечебной тактики // Бюллетень науки и практики. – 2016. – № 12. – С. 147–170.
3. Tuchin V. V., Popp J., Zakharov V. Multimodal optical diagnostics of cancer // Springer International Publishing. – 2020.
4. Е.А. Жеребцов, В.В. Дрёмин, А.И. Жеребцова, Е.В. Потапова, А.В. Дунаев Флуоресцентная диагностика митохондриальной функции в эпителиальных тканях *in vivo*: монография // Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева. – 2018. – 107 с.
5. Zharebtsov, 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. - Т. 10. – №. 7. – С. 3545-3559.
6. Dremin, V., Marcinkevics, Z., Zharebtsov, 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. – Т. 40. – №. 4. – С. 1207-1216.
7. E. V. Potapova, V. V. Dremin, E. A. Zharebtsov, I. N. Makovik, A. I. Zharebtsova, A. V. Dunaev, K. V. Podmasteryev, V. V. Sidorov, A. I. Krupatkin, L. S. Khakhicheva & V. F. Muradyan Evaluation of microcirculatory disturbances in patients with rheumatic diseases by the method of diffuse reflectance spectroscopy // Human Physiology. – 2017. – Т. 43. – С. 222-228.
8. Chen, T.; Guestrin, C. Xgboost. A scalable tree boosting system. // In Proceedings of the 22nd ACM Sigkdd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. – 2016. – С. 785–794.

HYPERSPETRAL IMAGING FOR DETERMINING MICROCIRCULATORY DISORDERS OF INTESTINAL WALL TISSUES

Goryunov I.A.¹, Shupletsov V.V.¹, Adamenkov N.A.^{1,2}, Mamoshin A.V.^{1,2}, Potapova E.V.¹,
Dunaev A.V.¹, Dremin V.V.¹

¹Research and Development Center of Biomedical Photonics, Orel State University, Orel, Russia

²Orel Regional Clinical Hospital, Orel, Russia

i.goryunov@oreluniver.ru

This paper presents the application of a new method of intraoperative assessment of microcirculatory disorders of intestinal wall tissues using hyperspectral imaging. The study was carried out on laboratory rats, on which the ligature was applied to the feeding arcade vessels to simulate local ischemia of different duration. The hyperspectral imaging system allowed to obtain the spatial distribution of spectral information, which was used to calculate the tissue saturation parameter at different time intervals of ischemia, and a machine learning method was applied to estimate the degree of ischemic damage. The results obtained showed a decrease in the tissue saturation parameter in the zone of local ischemia compared to intact tissues, which indicates a high potential of using this imaging method to determine microcirculatory disorders of intestinal wall tissues.

ПРИМЕНЕНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ МОНИТОРИРОВАНИЯ МЕДИКО- БИОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЧЕЛОВЕКА

Северин А.Е.^{1,2}, Сушкова Л.Т.³, Семенов Ю.Н.⁴, Евстафьева Е.В.⁵ Шалимова Е.В.²

1- Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, (aesever@mail.ru)

2- Национальный исследовательский университет «МЭИ»

3- Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых

4- Институт внедрения новых медицинских технологий РАМЕНА

5- АНИИ физических методов лечения, медицинской климатологии и реабилитации имени И.М. Сеченова