

ПРИБОРЫ, БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 615.471+681.784.8

DOI: 10.33979/2073-7408-2022-351-1-139-147

Н.В. ГОЛУБОВА, В.В. ДРЁМИН, Е.В. ПОТАПОВА, А.В. ДУНАЕВ

МУЛЬТИМОДАЛЬНАЯ ЛАПАРОСКОПИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПЕРФУЗИИ И МЕТАБОЛИЗМА БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ

Аннотация. *Внедрение оптических методов в практику проведения малоинвазивных лапароскопических вмешательств представляется весьма перспективным благодаря способности данных методов распознавать наличие перфузионных и микроциркуляторных нарушений in vivo. В работе предложена экспериментальная многопараметрическая лапароскопическая система с тремя каналами: флуоресцентной, гиперспектральной, а также лазерной спекл-контрастной визуализации. Проведенные измерения на биообъекте позволили провести тестирование системы и определить её чувствительность к изменению скорости движения крови, а также к изменению кровенаполнения и сатурации при моделировании ишемии посредством окклюзии. В работе описаны результаты, полученные при регистрации данных в трех каналах мультимодальной системы при проведении окклюзионного теста.*

Ключевые слова: *оптические методы, лапароскопия, лазерная спекл-контрастная визуализация, флуоресцентная визуализация, гиперспектральная визуализация.*

Введение

Вопросы диагностики и лечения острых заболеваний органов брюшной полости являются актуальными в современном мире, так как согласно статистике данные состояния в структуре общей заболеваемости населения занимают одно из ведущих мест по распространенности без видимой тенденции к снижению [1]. Актуальными остаются проблемы своевременной диагностики и выбора тактики при острых ишемических поражениях кишечника и несостоятельности анастомозов. Одним из клинических проявлений подобных заболеваний является нарушение кровообращения кишечника или его части с последующим развитием ишемии, приводящей к некрозу тканей и высокому уровню смертности при несвоевременной постановке диагноза [2–4]. Также важным аспектом является определение оптимальных границ удаления пораженной ткани. Неоправданно обширная резекция кишечника может привести к энтеральной недостаточности, и в то же время её ограниченный объём может повысить вероятность обнаружения некротических тканей в оставшейся части органа и спровоцировать некроз кишечной стенки в раннем послеоперационном периоде.

На данный момент существует несколько способов определения жизнеспособности кишечника: клинические, инструментальные и биофизические [5]. Клинические способы основаны на визуальной диагностике и являются субъективными, а к недостаткам инструментальных и биофизических способов можно отнести их относительную техническую сложность. К тому же, рассматриваемые методы применяются в основном при открытых операциях и имеют определенные трудности с интеграцией в процесс малоинвазивных вмешательств. Исходя из этого, перспективной является разработка новых объективных критериев жизнеспособности тканей кишечника, получаемых при лапароскопических операциях и позволяющих корректно определять границы резекции.

Одними из новых, перспективных и многообещающих направлений развития современных методов оценки функционального состояния биотканей являются методы оптической диагностики, часто объединяемые термином «оптическая биопсия» [6]. Важным является тот факт, что информация, предоставляемая оптическими методами исследования, является количественной, и, таким образом, может дать дополнительную степень объективности процессу диагностики заболеваний. К методам оптической биопсии, используемым в медицинской практике, относятся технологии, дающие информацию о морфологии тканей (оптическая когерентная и оптоакустическая томография), о

метаболической активности (флуоресцентная и гиперспектральная визуализация), о кровотоке (методы динамического рассеяния света, в том числе фотоплетизмография [7]) и др. Современной тенденцией в развитии биомедицинской оптической диагностики, позволяющей уменьшить ряд недостатков при отдельных применениях методов, является мультимодальный подход, когда в одной диагностической технологии комбинируются различные оптические методы исследования [8-10].

Так как решающую роль в улучшении результатов лечения заболеваний, связанных с ишемизацией кишечника, играет своевременная оценка перфузионно-метаболического статуса тканей, необходимо выбирать оптические методы диагностики, позволяющие получить данные об интенсивности кровотока в сосудах исследуемой области, о происходящих метаболических процессах, уровне кровенаполнения и оксигенации тканей. На основании этого в данном исследовании было предложено использовать такие методы как лазерная спекл-контрастная (ЛСКВ) [11], флуоресцентная (ФВ) [12] и гиперспектральная (ГВ) [13] визуализации, совмещенные в единой мультимодальной лапароскопической системе.

Метод ЛСКВ основан на регистрации случайной интерференционной картины, формирующейся на матрице камеры, регистрирующей обратно рассеянный свет от поверхности освещенной когерентным лазерным излучением ткани [14]. Размытое изображение формируется вследствие усреднения картины наблюдаемой области за выбранное время выдержки. При исследовании микроциркуляции выбирают длины волн красного и инфракрасного спектральных диапазонов, так как они обеспечивают достаточную глубину зондирования биоткани для регистрации факта движения эритроцитов для мониторинга изменений кровотока. Результаты выражаются в относительных единицах спекл-контраста для формирования изображений перфузии исследуемой области.

Метод ФВ основан на использовании явления возбуждения флуоресценции в биологической ткани под действием ультрафиолетового или видимого излучения с последующей регистрацией матрицей камеры набора спектральных флуоресцентных снимков для каждой точки кадра. При этом возможно детектировать флуоресценцию как от искусственно внедренных в организм или клетку флуоресцентных белков и флуорофоров, так и от эндогенных молекул, так называемую автофлуоресценцию. Общее излучение содержит много информации, имеющей диагностическое значение, поскольку представляет собой сумму вкладов автофлуоресценции флуорофоров, участвующих в энергетическом метаболизме клеток, в том числе, окисленной формы флавинадениндинуклеотида (FAD) и восстановленной формы никотинамидадениндинуклеотида (NADH), находящихся в тесной взаимосвязи с нормальными, измененными или патологическими состояниями биологических тканей [15]. При обработке полученных методом ФВ результатов исследования сравнению и анализу подвергаются форма спектра и максимальные значения интенсивности. Для удобства сравнения результаты выражаются в относительных единицах интенсивности флуоресценции, для этого к данным применяют метод нормализации, который заключается в делении значения интенсивности флуоресценции в каждой точке спектра на максимальное значение обратноотраженного излучения возбуждения.

Метод ГВ реализуется посредством регистрации спектральной информации об объекте, а именно об интенсивности отраженного света на разных длинах волн в каждой точке поверхности образца при освещении его широкополосным излучением [16]. Это позволяет проводить двумерное картирование и оценку динамики наполнения тканей кровью и ее насыщения кислородом при использовании специальных методов постобработки сигнала [17,18].

Целью работы является тестирование возможностей разработанной мультимодальной лапароскопической системы регистрировать изменения перфузии и метаболизма тканей при моделировании ишемии в биообъекте.

Материалы и методы

Для оценки возможности мониторинга перфузии и метаболизма тканей во время лапароскопического вмешательства была разработана экспериментальная мультимодальная

система, совмещенная с оптической схемой 5-миллиметрового ригидного лапароскопа (Richard Wolf GA-S001, Германия).

Для освещения объекта в канале ЛСКВ использовался лазерный источник излучения LASER-785-LAB-ADJ (Ocean Optics, США) с длиной волны 785 нм. Спекл-картина регистрировалась монохромной КМОП-камерой UI-3360CP-NIR-GL Rev 2 (IDS GmbH, Германия) через ахроматическую линзу AC254-050-B-ML (Thorlabs, США). Для освещения объекта в каналах ФВ и ГВ были выбраны светодиодный источник M450LP1 (Thorlabs, США) с длиной волны 450 нм и широкополосный осветитель SLS201L (Thorlabs, США) с диапазоном излучения 360-2600 нм соответственно. Для получения изображений ФВ и ГВ использовалась гиперспектральная камера Specim IQ (Specim, Spectral Imaging Ltd., Финляндия) с диапазоном длин волн от 400 до 1000 нм и минимальной шириной полосы пропускания 7 нм. Также в канале регистрации флуоресценции перед камерой был установлен фильтр FELH0500 (Thorlabs, США), пропускающий излучение с длиной волны от 500 нм, а перед источником излучения – фильтр возбуждения MF445-45 (Thorlabs, США) с шириной полосы пропускания 45 нм и центральной длиной волны 445 нм.

На рисунке 1 представлены схемы каждого из каналов экспериментальной лапароскопической мультимодальной системы для проведения исследований, а также фотография исследуемого биообъекта.

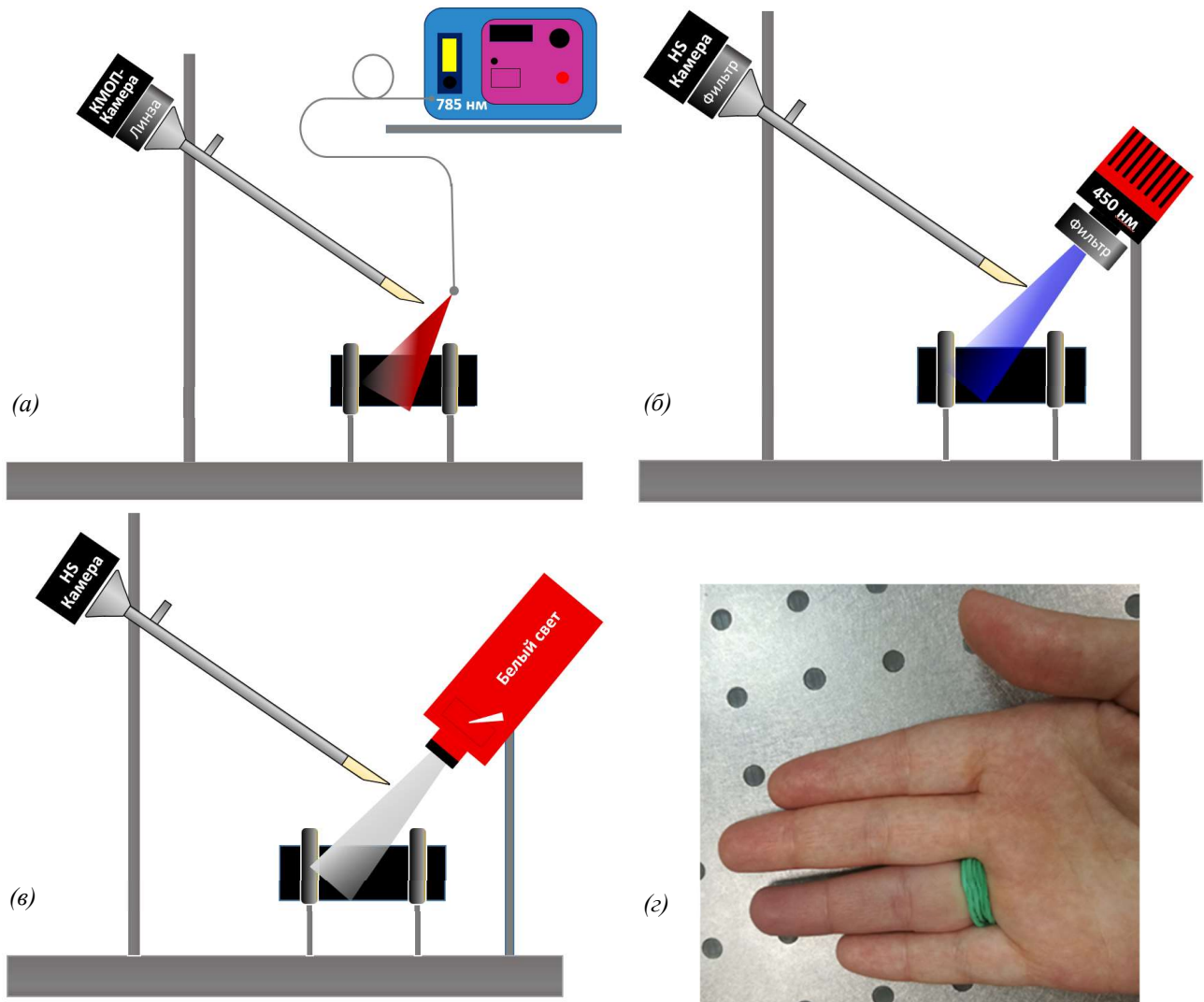


Рисунок 1 – Схема каналов лазерной спекл-контрастной (а), флуоресцентной (б) и гиперспектральной (в) визуализации разработанной лапароскопической мультимодальной системы, а также фотография биообъекта (2); HS камера – гиперспектральная камера

В качестве объекта исследования была выбрана внутренняя поверхность пальцев правой ладони. Безымянный палец подвергался окклюзии посредством пережатия эластичной лентой, при этом приложенное давление было выше систолического. Это обеспечивало прекращение поступления крови в палец, и соответственно, уменьшение перфузии, снижение уровня оксигенации и кровенаполнения биотканей.

Протокол эксперимента состоял из нескольких этапов: регистрация данных до окклюзии, через 3 минуты после начала окклюзии и через 1 минуту с момента снятия окклюзии и начала реперфузии. В канале ЛСКВ регистрировались 3 записи длиной 10 секунд для каждого этапа проведения исследования; частота записи изображений камерой составляла 50 кадров в секунду, время экспозиции камеры – 9 мс. В каналах ФВ и ГВ отдельно производилась регистрация гиперспектрального изображения для каждого этапа; время экспозиции камеры в канале ФВ составляло 500 мс, в канале ГВ – 250 мс.

Результаты и обсуждение

Исходные данные, полученные в каждом канале, передавались на компьютер для последующей обработки с использованием алгоритмов, разработанных в программной среде Matlab R2018b. Для анализа данных, полученных методом ЛСКВ, был применен пространственно-временной алгоритм обработки десятисекундных последовательностей [11]. Для каждого изображения рассчитывалось значение среднего спекл-контраста K по формуле:

$$K = \left\langle \frac{\sigma_N}{\langle I \rangle_N} \right\rangle_k, \quad (1)$$

где $\langle \rangle$ – символ усреднения;
 N – окно усреднения $N \times N$;
 k – число захватываемых кадров; $k = 50$;
 $\langle I \rangle_N$ – средняя интенсивность в окне $N \times N$;
 σ_N – стандартное отклонение в окне $N \times N$; $N = 5$.

Расчеты производились в области 40×40 пикселей в центральной части изображений безымянного и среднего пальцев. Для визуализации перфузии исследуемой области кровью значения рассчитанного контраста на изображениях были преобразованы в псевдоцвета, где высокой скорости потока рассеивающих частиц и соответственно более низкому контрасту соответствовал красный цвет, низкой скорости (высокому контрасту) – синий.

При записи спекл-изображений пальцы рук располагались таким образом, чтобы исследуемая область была в фокусе лапароскопа, что контролировалось экспериментатором по изображению на камере. На рисунке 2 показаны обработанные пространственно-временным алгоритмом первые кадры спекл-контрастных изображений каждого этапа протокола эксперимента.

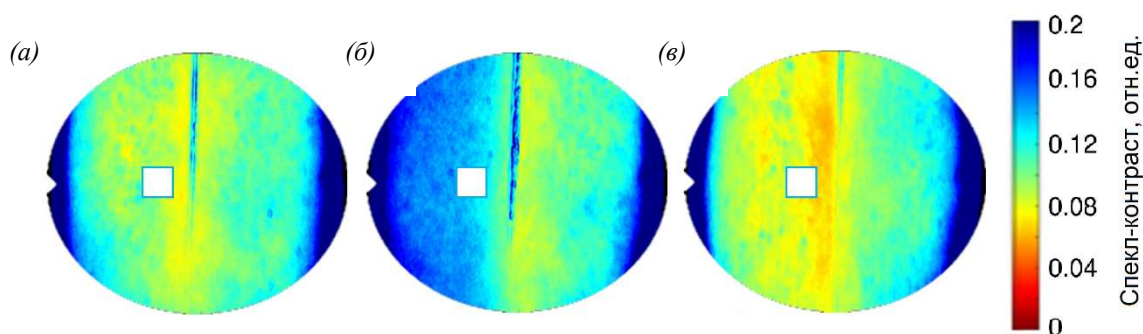


Рисунок 2 – Спекл-контрастные изображения, полученные до (а), во время (б) и после (в) окклюзии безымянного пальца.

При визуальном анализе полученных изображений можно отметить значительное изменение спекл-картины в период наложения окклюзии и в момент реперфузии.

На рисунке 3 представлены результаты статистической обработки данных относительного изменения контраста на разных этапах эксперимента в виде диаграмм размаха. На диаграммах размаха центральная линия является медианой, края бокса – нижний и верхний квартили (25-й и 75-й). Значимость статистических различий выборок была оценена с помощью критерия Манна-Уитни. Статистически значимой считалась вероятность $p < 0,01$.

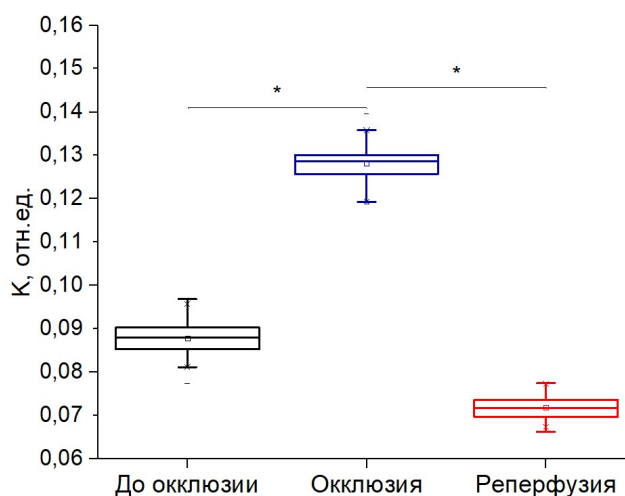


Рисунок 3 – Пространственно-временной спекл-контраст, рассчитанный в области интереса для трех этапов проведения исследования

**Статистическая значимость различий по отношению к предыдущему этапу протокола с вероятностью $p < 0,01$*

Проведение окклюзии безымянного пальца, сопровождающееся остановкой кровоснабжения на 1 этапе эксперимента, отражается на графике резким ступенчатым увеличением значения спекл-контраста. После снятия окклюзии происходит значительное уменьшение спекл-контраста, что соответствует представлениям о реактивной гиперемии в органах при реперфузии.

При исследовании методом ФВ была произведена регистрация флуоресценции с разрешением по длине волны. Это оказалось нетривиальной задачей из-за низкого уровня сигнала, связанного с его значительным затуханием в оптическом канале лапароскопа. Использование максимального времени экспозиции гиперспектральной камеры (500 мс) позволило зарегистрировать гиперспектральные кубы, пригодные для дальнейшей обработки. Полученные спектры для той же исследуемой области, в которой был рассчитан пространственно-временной спекл-контраст, представлены на рисунке 4.

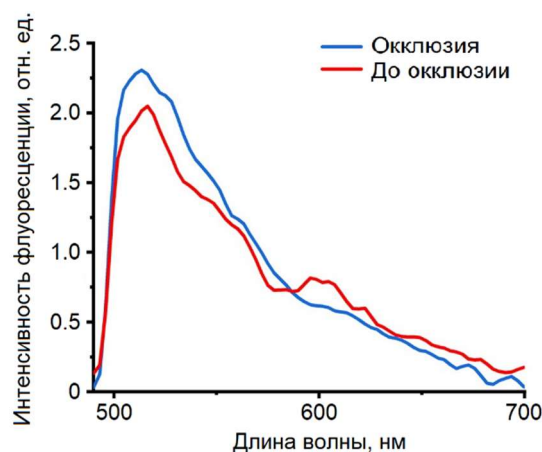


Рисунок 4 – Спектры флуоресценции для безымянного пальца, соответствующие этапам до и во время проведения окклюзии

Их вид объясняется тем, что содержание крови в тканях оказывает заметное влияние на спектры флуоресценции в виде характерного уменьшения интенсивности на длинах волн около 540 и 580 нм. Это связано с поглощением оптического излучения оксигемоглобином. Во время окклюзионного теста кровь вытесняется из кровеносных сосудов, поэтому кровенаполнение ткани в меньшей степени влияет на получаемый спектр флуоресценции. Вследствие этого характерные «провалы» на вышеуказанных длинах волн не должны наблюдаться, что подтверждается зарегистрированными спектрами.

При исследовании перфузионных нарушений в канале ГВ разработанной мультимодальной лапароскопической системы были зарегистрированы гиперспектральные изображения исследуемой области в диапазоне от 400 до 1000 нм. Зарегистрированные данные обрабатывались по алгоритмам восстановления карт кровенаполнения и оксигенации в поверхностных слоях ткани диагностируемого органа с использованием нейронной сети, обученной по обучающей выборке, полученной моделированием методом Монте-Карло [17]. Полученные результаты, соответствующие периоду проведения окклюзии, представлены на рисунке 5.

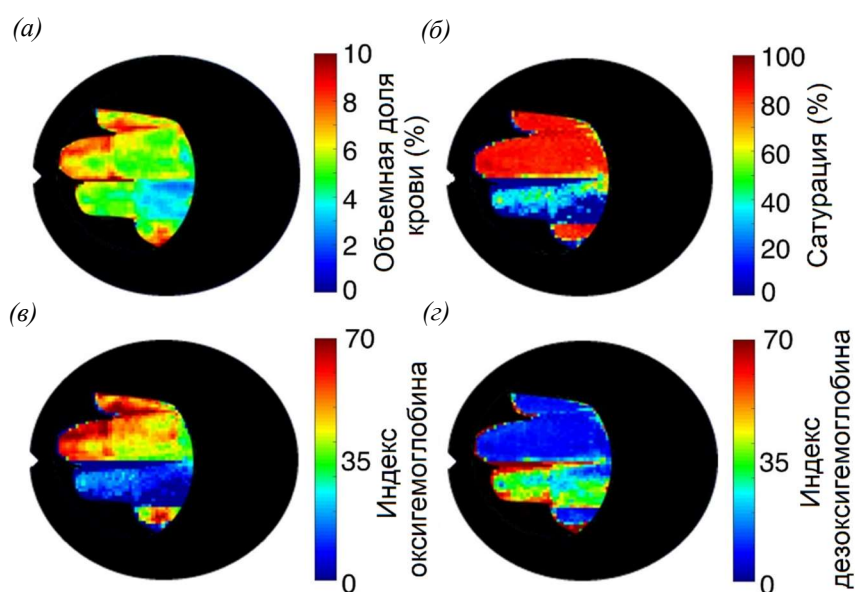


Рисунок 5 – Гиперспектральные изображения пальцев руки во время окклюзии, демонстрирующие значения объемной доли крови в тканях (а), насыщения крови кислородом (б), индексов оксигемоглобина (в) и дезоксигемоглобина (г)

ГВ позволила качественно и количественно оценить показатели, связанные с жизнеспособностью биотканей. Можно видеть, что на подушечках пальцев, которые не подвергались окклюзии, регистрируется повышенное содержание крови в поверхностных слоях кожи, что соответствует известным физиологическим фактам кровоснабжения участков кисти рук человека. Во время окклюзии наблюдалось значительное снижение объемной доли крови, что соответствовало выраженному оттоку крови из поверхностных капилляров средней части окклюдированного пальца. Средний уровень кислорода в крови для неокклюдированных тканей составляет 80-85 %, в то время как трехминутная окклюзия снижает данный показатель в исследуемой области безымянного пальца до 30-40 %. Карты распределения индексов оксигемоглобина и дезоксигемоглобина обратнoзависимы и демонстрируют высокий уровень дезоксигемоглобина в окклюдированном пальце.

Заключение

Интеграция оптических методов (в частности, ЛСКВ, ФВ и ГВ) в стандартные инструменты для малоинвазивных вмешательств может позволить врачам объективно оценивать функциональное состояние биологических тканей *in vivo* и решить проблемы своевременной диагностики и выбора лечебной тактики при острых ишемических поражениях кишечника и несостоятельности анастомозов. В работе представлена экспериментальная

мультимодальная лапароскопическая система, совмещенная с коммерчески доступным 5-миллиметровым ригидным лапароскопом, позволяющая регистрировать изменения перфузии и метаболизма тканей. Было показано, что установка имеет хорошую чувствительность к снижению уровня кровенаполнения и оксигенации исследуемой области биообъекта. Для дальнейшего развития и улучшения устройства и метода определения жизнеспособности биоткани с помощью оптических методов диагностики, совмещенных с лапароскопической системой, перспективным представляется полная интеграция освещения в осветительный канал лапароскопа и проведение доклинического этапа испытаний на лабораторных животных.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект №21-15-00325).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Здравоохранение в России. 2019: Статистический сборник. – М.: Росстат, 2019. – 170 с.
2. Kassahun, W.T. Unchanged high mortality rates from acute occlusive intestinal ischemia: six year review / W.T. Kassahun, T. Schulz, O. Richter, J. Hauss // *Langenbeck's archives of surgery*, 2008. – 393 (2). – P. 163–171.
3. Тимербулатов, В.М. Острое нарушение мезентериального кровообращения / В.М. Тимербулатов, В.Г. Сахавудинов, Ш.В. Тимербулатов, Р.А. Смыр, А.М. Саргсян // *Эндоскопическая хирургия*, 2016. – 22 (3). – С. 44–49.
4. Затевахин, И.И. Абдоминальная хирургия. Национальное руководство : краткое издание / ред. И.И. Затевахин, А.И. Кириенко, В.А. Кубышкин. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2016. – 912 с.
5. Родин, А.В. Интраоперационная оценка жизнеспособности кишки при острой кишечной непроходимости / А.В. Родин, В.Г. Плешков // *Вестник Смоленской государственной медицинской академии*, 2016. – 15 (1). – С. 75–82.
6. Bigio, I.J., Mourant, J.R. "Biopsy: Optical". *Encyclopedia of Optical and Photonic Engineering*, Second Edition. – CRC Press, 2015. – P. 1-16.
7. Белавенцева, А.В. Диагностика физиологических процессов в живых тканях методом оптической визуализации пульсаций крови / А.В. Белавенцева, Ю.Н. Кульчин, Р.В. Ромашко, Т.С. Запорожец, Е.В. Персиянова, Л.П. Ляхова, А.А. Камшилин // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*, 2019. – 62 (3). – С. 266-271.
8. Дунаев, А.В. Метод и устройство оценки функционального состояния микроциркуляторно-тканевых систем организма человека на основе мультипараметрической оптической диагностики // *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника*, 2020. – 23 (4). – С. 77-91.
9. Дунаев, А.В. Принципы построения технических средств мультипараметрической оптической диагностики для оценки функционального состояния микроциркуляторно-тканевых систем // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2020. – 344 (6). – С. 131-140.
10. Dremin, V. Multimodal optical measurement for study of lower limb tissue viability in patients with diabetes mellitus / V. Dremin, E. Zherebtsov, V. Sidorov, A. Krupatkin, I. Makovik, A. Zherebtsova, E. Zharkikh, E. Potapova, A. Dunaev, A. Doronin, A. Bykov, I. Rafailov, K. Litvinova, S. Sokolovski, E. Rafailov // *Journal of Biomedical Optics*, 2017. – 22 (8). – P. 1-10.
11. Potapova, E. Laser speckle contrast imaging of blood microcirculation in pancreatic tissues during laparoscopic interventions / E. Potapova, E. Seryogina, V. Dremin, D. Stavtsev, I. Kozlov, E. Zherebtsov, A. Mamoshin, Yu. Ivanov, A. Dunaev // *Quantum Electronics*, 2020. – 50 (1). – P. 33-40.
12. Kandurova K. Application of the fluorescence spectroscopy for the analysis of the state of abdominal cavity organs tissues in mini-invasive surgery / K. Kandurova, V. Dremin, E. Zherebtsov, E. Potapova, A. Dunaev, A. Mamoshin, A. Alyanov, V. Muradyan // *Proceedings Volume 10685, Biophotonics: Photonic Solutions for Better Health Care VI*, 2018. – P. 171.
13. Шуплецов, В.В. Оценка изменения кровенаполнения и сатурации методом гиперспектральной визуализации / В.В. Шуплецов, М.А. Мезенцев, И.О. Козлов, В.В. Дремин // *Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации: сб. тр. XXVII Междунар. науч.-техн. конф., 14 – 20 сентября 2018 г., Алушта. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2018. – С. 249–250.*
14. Boas, D.A. Laser speckle contrast imaging in biomedical optics / D.A. Boas, A.K. Dunn // *Journal of Biomedical Optics*, 2010. – 15 (1). – P. 11109.
15. Тучин, В.В. Оптическая биомедицинская диагностика: в 2-х т.: учебное издание / В.В. Тучин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 559 с.
16. Lu, G. Medical hyperspectral imaging: a review / G. Lu., B. Fei // *Journal of Biomedical Optics*, 2014. – 19 (1). – P. 10901.
17. Zherebtsov, E. Hyperspectral imaging of human skin aided by artificial neural networks / E. Zherebtsov, V. Dremin, A. Popov, A. Doronin, D. Kurakina, M. Kirillin, I. Meglinski, A. Bykov // *Biomedical optics express*, 2019. – 10 (7). – P. 3545–3559.

18. Dremin, V. Skin Complications of Diabetes Mellitus Revealed by Polarized Hyperspectral Imaging and Machine Learning / V. Dremin, Z. Marcinkevics, E. Zhrebtsov, A. Popov, A. Grabovskis, H. Kronberga, K. Geldnere, A. Doronin, I. Meglinski, A. Bykov // IEEE transactions on medical imaging, 2021. – 40 (4). – P. 1207–1216.

Голубова Надежда Владимировна

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл,
Россия
Студент кафедры ПМиС Института
приборостроения, автоматизации и информационных
технологий, стажер-исследователь Научно-
технологического центра биомедицинской фотоники
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел.: +7-4862-41-98-76
E-mail: nadin.golubova@inbox.ru

Дрёмин Виктор Владимирович

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл,
Россия
Кандидат технических наук, старший научный
сотрудник Научно-технологического центра
биомедицинской фотоники
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел.: +7-4862-41-98-37
E-mail: dremin_viktor@mail.ru

Потапова Елена Владимировна

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл,
Россия
Кандидат технических наук, доцент, старший
научный сотрудник Научно-технологического центра
биомедицинской фотоники
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел.: +7-4862-41-98-37
E-mail: potapova_ev_ogu@mail.ru

Дунаев Андрей Валерьевич

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл,
Россия
Кандидат технических наук, доцент, ведущий
научный сотрудник Научно-технологического
центра биомедицинской фотоники
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел.: +7-4862-41-98-37
E-mail: inohvat@yandex.ru

N.V. GOLUBOVA, V.V. DREMIN, E.V. POTAPOVA, A.V. DUNAEV

MULTIMODAL LAPAROSCOPIC SYSTEM FOR BIOLOGICAL TISSUE PERFUSION AND METABOLISM ASSESSMENT

Abstract. *The introduction of optical methods into the practice of minimally invasive laparoscopic interventions seems to be very promising due to the ability of these methods to recognize the presence of perfusion and microcirculatory disorders in vivo. The paper proposes an experimental multi-parameter laparoscopic system with three channels: fluorescence, hyperspectral, and laser speckle contrast imaging. The measurements carried out on the biological object made it possible to test the system and determine its sensitivity to a change in the speed of blood movement, as well as to a change in blood volume and saturation when simulating ischemia by means of occlusion. The paper describes the results obtained when registering data in three channels of a multimodal system during an occlusion test.*

Keywords: *optical techniques, laparoscopy, laser speckle contrast imaging, fluorescence imaging, hyperspectral imaging.*

BIBLIOGRAPHY

1. Zdravookhranenie v Rossii. 2019: Statisticheskii sbornik. – M.: Rosstat, 2019. – 170 s.
2. Kassahun, W.T. Unchanged high mortality rates from acute occlusive intestinal ischemia: six year review / W.T. Kassahun, T. Schulz, O. Richter, J. Hauss // Langenbeck's archives of surgery, 2008. – 393 (2). – P. 163–171.
3. Timerbulatov, V.M. Ostroe narushenie mezenterial'nogo krovoobrashcheniya / V.M. Timerbulatov, V.G. Sakhautdinov, Sh.V. Timerbulatov, R.A. Smyr, A.M. Sargsyan // Endoskopicheskaya khirurgiya, 2016. – 22 (3). – S. 44–49.
4. Zatevakhin, I.I. Abdominal'naya khirurgiya. Natsional'noe rukovodstvo : kratkoe izdanie / red. I.I. Zatevakhin, A.I. Kirienko, V.A. Kubyshkin. – M.: GEOTAR-Media, 2016. – 912 s.
5. Rodin, A.V. Intraoperatsionnaya otsenka zhiznesposobnosti kishki pri ostroi kischechnoi neprokhodimosti / A.V. Rodin, V.G. Pleshkov // Vestnik Smolenskoi gosudarstvennoi meditsinskoi akademii, 2016. – 15 (1). – S. 75–82.
6. Bigio, I.J., Mourant, J.R. "Biopsy: Optical". Encyclopedia of Optical and Photonic Engineering, Second Edition. – CRC Press, 2015. – P. 1-16.
7. Belaventseva, A.V. Diagnostika fiziologicheskikh protsessov v zhivykh tkanyakh metodom opticheskoi vizualizatsii pul'satsii krovi / A.V. Belaventseva, Yu.N. Kul'chin, R.V. Romashko, T.S. Zaporozhets, E.V. Persiyanova, L.P. Lyakhova, A.A. Kamshilin // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroyeniye, 2019. – 62 (3). – S. 266–271
8. Dunaev, A.V. Metod i ustroystvo otsenki funktsional'nogo sostoyaniya mikrotsirkulyatorno-tkanevykh sistem organizma cheloveka na osnove mul'tiparametricheskoi opticheskoi diagnostiki // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii Rossii. Radioelektronika, 2020. – 23 (4). – S. 77–91.
9. Dunaev, A.V. Printsipy postroyeniya tekhnicheskikh sredstv mul'tiparametricheskoi opticheskoi diagnostiki

dlya otsenki funktsional'nogo sostoyaniyamikrotsirkulyatorno-tkanevykh sistem // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii, 2020. – 344 (6). – S. 131-140.

10. Dremin, V. Multimodal optical measurement for study of lower limb tissue viability in patients with diabetes mellitus / V. Dremin, E. Zherebtsov, V. Sidorov, A. Krupatkin, I. Makovik, A. Zherebtsova, E. Zharkikh, E. Potapova, A. Dunaev, A. Doronin, A. Bykov, I. Rafailov, K. Litvinova, S. Sokolovski, E. Rafailov // Journal of Biomedical Optics, 2017. – 22 (8). – P. 1-10.

11. Potapova, E. Laser speckle contrast imaging of blood microcirculation in pancreatic tissues during laparoscopic interventions / E. Potapova, E. Seryogina, V. Dremin, D. Stavtsev, I. Kozlov, E. Zherebtsov, A. Mamoshin, Yu. Ivanov, A. Dunaev // Quantum Electronics, 2020. – 50 (1). – P. 33-40.

12. Kandurova K. Application of the fluorescence spectroscopy for the analysis of the state of abdominal cavity organs tissues in mini-invasive surgery / K. Kandurova, V. Dremin, E. Zherebtsov, E. Potapova, A. Dunaev, A. Mamoshin, A. Alyanov, V. Muradyan // Proceedings Volume 10685, Biophotonics: Photonic Solutions for Better Health Care VI, 2018. – P. 171.

13. Shupletsov, V.V. Otsenka izmeneniya krovenapolneniya i saturatsii metodom giperspektral'noi vizualizatsii / V.V. Shupletsov, M.A. Mezentsev, I.O. Kozlov, V.V. Dremin // Sovremennye tekhnologii v zadachakh upravleniya, avtomatiki i obrabotki informatsii: sb. tr. XXVII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., 14 – 20 sentyabrya 2018 g., Alushta. Tambov: Izd-vo FGBOU VO «TGTU», 2018. – S. 249–250.

14. Boas, D.A. Laser speckle contrast imaging in biomedical optics / D.A. Boas, A.K. Dunn // Journal of Biomedical Optics, 2010. – 15 (1). – P. 11109.

15. Tuchin, V.V. Opticheskaya biomeditsinskaya diagnostika: v 2-kh t.: uchebnoe izdanie / V.V. Tuchin. – M.: FIZMATLIT, 2007. – 559 s.

16. Lu, G. Medical hyperspectral imaging: a review / G. Lu., B. Fei // Journal of Biomedical Optics, 2014. – 19 (1). – P. 10901.

17. Zherebtsov, E. Hyperspectral imaging of human skin aided by artificial neural networks / E. Zherebtsov, V. Dremin, A. Popov, A. Doronin, D. Kurakina, M. Kirillin, I. Meglinski, A. Bykov // Biomedical optics express, 2019. – 10 (7). – P. 3545–3559.

18. Dremin, V. Skin Complications of Diabetes Mellitus Revealed by Polarized Hyperspectral Imaging and Machine Learning / V. Dremin, Z. Marcinkevics, E. Zherebtsov, A. Popov, A. Grabovskis, H. Kronberga, K. Geldnere, A. Doronin, I. Meglinski, A. Bykov // IEEE transactions on medical imaging, 2021. – 40 (4). – P. 1207–1216.

Golubova Nadezhda Vladimirovna

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel,
Russia
Student of the «Instrumentation, metrology and
certification» department, research assistant of Research
and Development Center of Biomedical Photonics
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
Ph.: +7-4862-41-98-76
E-mail: nadin.golubova@inbox.ru

Dremin Victor Vladimirovich

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel,
Russia
Ph.D., senior researcher of Research and Development
Center of Biomedical Photonics
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
Ph.: +7-4862-41-98-37
E-mail: dremin_viktor@mail.ru

Potapova Elena Vladimirovna

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel,
Russia
Ph.D., senior researcher of Research and Development
Center of Biomedical Photonics
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
Ph.: +7-4862-41-98-37
E-mail: potapova_ev_ogu@mail.ru

Dunaev Andrey Valer'evich

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel,
Russia
Ph.D., leading researcher of Research and Development
Center of Biomedical Photonics
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
Ph.: +7-4862-41-98-37
E-mail: inohvat@yandex.ru