

## Оценка перфузии кишечной стенки в условиях ишемии с применением метода гиперспектральной визуализации

© Н.А. АДАМЕНКОВ<sup>1,2</sup>, А.В. МАМОШИН<sup>1,2</sup>, В.В. ДРЕМИН<sup>1</sup>, Е.В. ПОТАПОВА<sup>1</sup>, В.В. ШУПЛЕЦОВ<sup>1</sup>, И.А. ГОРЮНОВ<sup>1</sup>, А.А. ПАЛАЛОВ<sup>1</sup>, А.В. ДУНАЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева», Орел, Россия;

<sup>2</sup>БУЗ Орловской области «Орловская областная клиническая больница», Орел, Россия

### РЕЗЮМЕ

**Обоснование.** Острая ишемия кишечника — заболевание, характеризующееся нарушением кровоснабжения, приводящим к гипоксии тканей кишечной стенки и вторичным патологическим изменениям. Одной из основных позиций, определяющих актуальность проблемы острой ишемии кишечника, является интраоперационная оценка жизнеспособности кишечной стенки, которая играет ведущую роль в определении объема операции и в прогнозе послеоперационного периода.

**Цель исследования.** Улучшение результатов диагностики нарушения кровоснабжения тканей кишечной стенки у малых модельных животных на основе применения метода гиперспектральной визуализации.

**Материал и методы.** Экспериментальное исследование выполнено на 9 клинически здоровых половозрелых лабораторных крысах линии Wistar. Оценка жизнеспособности кишечника и развития вторичных патологических изменений проведена визуальным методом Керте. Определение перфузии кишечной стенки осуществляли с применением системы гиперспектральной визуализации. В качестве объекта исследования рассматривали модель ишемии кишечника при нарушении мезентериального кровотока с формированием лигатуры, перерывающей питающий сосуд во время лапаротомии под ингаляционным наркозом. Релапаротомию осуществляли через 1; 6 и 12 ч, при которой из брюшной полости извлекали кишечник и выполняли интраоперационную оценку жизнеспособности тканей кишечника. Резекцию кишечника с забором фрагментов для морфологического исследования выполняли в соответствии с временными интервалами наложения лигатур протокола исследования.

**Результаты.** Получены двумерные цветковые карты тканевой сатурации кишечника на различных этапах моделирования ишемии (1; 6 и 12 ч). Среднее значение сатурации для интактной кишечной стенки составило  $66 \pm 2\%$ , через 1 ч от момента моделирования ишемии —  $42 \pm 5\%$ , через 6 ч —  $26 \pm 3\%$ , через 12 ч среднее значение —  $21 \pm 3\%$ .

**Заключение.** Применение гиперспектральной визуализации обеспечивает неинвазивную и объективную интраоперационную оценку характера ишемического повреждения кишечной стенки без дополнительного применения экзогенных флуоресцентных препаратов. Это может качественно улучшить возможность выполнения оперативных вмешательств при ишемическом поражении кишечника.

**Ключевые слова:** кишечник, ишемия, жизнеспособность, гиперспектральная камера, сатурация, перфузия.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Адаменков Н.А. — <https://orcid.org/0000-0002-0238-2941>

Мамошин А.В. — <https://orcid.org/0000-0003-1787-5156>

Дремин В.В. — <https://orcid.org/0000-0001-6974-3505>

Потапова Е.В. — <https://orcid.org/0000-0002-9227-6308>

Шуплецов В.В. — <https://orcid.org/0009-0006-0024-8518>

Горюнов И.А. — <https://orcid.org/0000-0002-6258-545X>

Палалов А.А. — <https://orcid.org/0000-0003-4295-9968>

Дунаев А.В. — <https://orcid.org/0000-0003-4431-6288>

Автор, ответственный за переписку: Адаменков Н.А. — e-mail: nikita-ad@mail.ru

### КАК ЦИТИРОВАТЬ:

Адаменков Н.А., Мамошин А.В., Дремин В.В., Потапова Е.В., Шуплецов В.В., Горюнов И.А., Палалов А.А., Дунаев А.В. Оценка перфузии кишечной стенки в условиях ишемии с применением метода гиперспектральной визуализации. *Оперативная хирургия и клиническая анатомия (Пироговский научный журнал)*. 2024;8(1):5–13. <https://doi.org/10.17116/operhirurg202480115>

## Assessment of intestinal wall perfusion under ischemic conditions using hyperspectral imaging

© N.A. ADAMENKOV<sup>1,2</sup>, A.V. MAMOSHIN<sup>1,2</sup>, V.V. DREMIN<sup>1</sup>, E.V. POTAPOVA<sup>1</sup>, V.V. SHUPLETSOV<sup>1</sup>, I.A. GORYUNOV<sup>1</sup>, A.A. PALALOV<sup>1</sup>, A.V. DUNAEV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Turgenev Orel State University, Orel, Russia;

<sup>2</sup>Orel Regional Clinical Hospital, Orel, Russia

### ABSTRACT

**Background.** Acute intestinal ischemia is a disease characterized by a violation of blood supply, which leads to hypoxia of intestinal wall tissues and secondary pathological changes. One of the main factors determining the urgency of the problem of acute

intestinal ischemia is the intraoperative determination of the viability of the intestinal wall, which plays a leading role in determining the volume of surgery and in the prognosis of the postoperative period.

**Objective.** Improving the results of diagnosing disorders of the blood supply to the tissues of the intestinal wall in small model animals based on the use of the hyperspectral imaging method.

**Material and methods.** The experimental study was conducted in 9 clinically healthy, sexually mature Wistar laboratory rats. The assessment of intestinal viability and the development of secondary pathologic changes was performed using the Kerte's visual method. Intestinal wall perfusion was determined using a hyperspectral imaging system. The object of the study was a model of intestinal ischemia with violation of mesenteric blood flow with the formation of a ligature blocking the feeding vessel during laparotomy under inhalation anesthesia. Relaparotomy was performed after 1, 6 and 12 hours, during which the intestine was removed from the abdominal cavity and an intraoperative assessment of intestinal tissues viability was performed. Intestinal resection with sampling of fragments for morphologic examination was performed in accordance with the time intervals of ligature application of the study protocol.

**Results.** The studies resulted in obtaining two-dimensional color maps of intestinal tissue saturation at different stages of ischemia modeling (1, 6 and 12 hours). The mean saturation value for the intact intestinal wall was  $66\pm 2\%$ , after 1 hour from the time of ischemia modeling it was  $42\pm 5\%$ , after 6 hours —  $26\pm 3\%$ , after 12 hours the mean saturation value was  $21\pm 3\%$ .

**Conclusion.** Application of hyperspectral imaging allows noninvasive and objective intraoperative assessment of the nature of ischemic damage of the intestinal wall without additional use of exogenous fluorescent substances. This may improve the quality of surgical procedures for ischemic intestinal lesions.

**Keywords:** intestines, ischemia, viability, hyperspectral camera, saturation, perfusion.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Adamenkov N.A. — <https://orcid.org/0000-0002-0238-2941>

Mamoshin A.V. — <https://orcid.org/0000-0003-1787-5156>

Dremin V.V. — <https://orcid.org/0000-0001-6974-3505>

Potapova E.V. — <https://orcid.org/0000-0002-9227-6308>

Shupletsov V.V. — <https://orcid.org/0009-0006-0024-8518>

Goryunov I.A. — <https://orcid.org/0000-0002-6258-545X>

Palalov A.A. — <https://orcid.org/0000-0003-4295-9968>

Dunaev A.V. — <https://orcid.org/0000-0003-4431-6288>

**Corresponding author:** Adamenkov N.A. — e-mail: nikita-ad@mail.ru

#### TO CITE THIS ARTICLE:

Adamenkov NA, Mamoshin AV, Dremin VV, Potapova EV, Shupletsov VV, Goryunov IA, Palalov AA, Dunaev AV. Assessment of intestinal wall perfusion under ischemic conditions using hyperspectral imaging. *Russian Journal of Operative Surgery and Clinical Anatomy = Operativnaya khirurgiya i klinicheskaya anatomiya (Pirogovskii nauchnyi zhurnal)*. 2024;8(1):5–13. (In Russ.). <https://doi.org/10.17116/operhirurg202480115>

## Введение

Острая ишемия кишечника — заболевание, причиной которого является снижение или полное прекращение поступления кислорода к тканям кишечника на фоне окклюзии магистральных мезентериальных артерий или вен. Ишемия кишечника может быть неокклюзионной природы и окклюзионной этиологии, включающей эмболию брыжеечной артерии (50%), тромбоз брыжеечной артерии (20–35%) или тромбоз брыжеечной вены (5–15%). Современные результаты исследований показывают, что на острую брыжеечную ишемию приходится 0,1% случаев госпитализации, но летальность достигает 90% [1]. Среди окклюдизирующих причин возникновения некроза кишечника выделяют ущемление питающих сосудов кишечника, обусловленное странгуляционной кишечной непроходимостью при спайках брюшной полости, инвагинации, завороте [2], узлообразовании [3] и ущемленной грыже [4, 5]. К неокклюзионным причинам некроза кишечной стенки относится закрытая травма живота с разрывом или повреждением сосудов, кровоснабжающих кишку. Летальность при странгуляционной кишечной непроходимости составляет 12–20%, при спаечной

кишечной непроходимости — почти 15% [6], при завороте кишечника — 46%, при узлообразовании — 40% [2], а при ущемленной грыже — до 9% [3].

Общепринятым способом интраоперационного определения жизнеспособности кишечника является визуальный метод Керте, основанный на определении пульсации брыжеечных сосудов, перистальтических сокращений и оценке цвета кишечной стенки [7, 8]. Однако указанные признаки имеют субъективный характер, так как по зрительному определению цвета кишки можно достоверно отличить только практически неизмененную кишку от явно нежизнеспособной. Перистальтика может сохраняться продолжительное время даже после некроза слизистого слоя, а в неизмененной кишке может отсутствовать. 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.

Современный подход ко многим хирургическим вмешательствам требует наличия более широкого спектра интраоперационной диагностической информации о микроциркуляции крови органа,

чем просто субъективная оценка визуальных критериев [9]. Существующие интраоперационные методики (ультразвуковая доплерография, полярографический метод, лазерная доплеровская флоуметрия и визуализация, лазерная спекл-контрастная визуализация, боковая темнопольная микроскопия, флуоресценция компартментов окислительного метаболизма, оптическая когерентная томография, фотоплетизмография, ICG-флуоресцентная визуализация), предоставляющие определенную объективную информацию относительно жизнеспособности кишечника, имеют потенциал для клинического использования, однако почти все они обуславливают необходимость разработки оборудования для интраоперационного использования и больших клинических испытаний [10, 11].

При поиске новых решений для интраоперационного определения состояния кишечной стенки целесообразно в качестве объекта исследования рассматривать мезентериальный кровоток, нарушения которого напрямую связаны с патологическими изменениями кишечной стенки. Перспективным в этом направлении является использование такого метода оптической диагностики, как гиперспектральная визуализация, сочетающая в себе возможности цифровой визуализации и спектроскопии диффузного отражения.

Спектральные изображения биологических тканей содержат информацию о пространственном распределении и концентрациях биологических хромофоров [11, 12] таких как окси- и дезоксигемоглобин ( $\text{Hb}/\text{HbO}_2$ ), меланин, билирубин, вода и др. Методы картирования основных хромофоров кожи, а также оценки насыщения крови кислородом имеют долгую историю [13]. Традиционный подход обычно использует 2–4 длины волн в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне или цветовые RGB сенсоры [14, 15]. Мультиспектральные измерения обычно включают от 4 до 10 длин волн, обеспечивая более согласованные данные для анализа, в то время как устройства гиперспектральной визуализации способны выполнять измерения в сотнях спектральных диапазонов. Таким образом, регистрируя спектр диффузного отражения в каждом пикселе изображения, возможно определить, например, оксигенацию тканей, используя форму спектра (его наклон, площадь под кривой) и соответствующую математическую обработку для установления зависимости между коэффициентом отражения и концентрацией  $\text{Hb}/\text{HbO}_2$ .

Эффективность гиперспектральной визуализации продемонстрирована в ряде исследований [16–18], результаты которых свидетельствуют о высокой чувствительности метода к изменению параметров микроциркуляции крови. Перспективы внедрения гиперспектральной визуализации в алгоритм определения жизнеспособности кишечника продиктованы

возможностью количественной оценки параметров кровенаполнения и кислородонасыщения исследуемой области ткани.

Цель исследования — улучшение результатов диагностики нарушения кровоснабжения тканей кишечной стенки у малых модельных животных на основе применения метода гиперспектральной визуализации.

## Материал и методы

Экспериментальные исследования проводили в лабораторных условиях на базе научно-технологического центра биомедицинской фотоники ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева» (Орел, Россия) в период с сентября по декабрь 2022 г. Эксперимент был выполнен на 9 клинически здоровых половозрелых лабораторных крысах линии Wistar (самцы). Возраст животных составил 3 мес, средняя масса —  $194 \pm 6$  г. Работа выполнена с соблюдением правил надлежащей лабораторной практики (Good Laboratory Practice, GLP). Содержание животных и экспериментальные работы соответствовали ГОСТ 33216—2014 «Руководство по содержанию и уходу за лабораторными животными» и этическим нормам по гуманному обращению с животными. Все проведенные манипуляции одобрены этическим комитетом БУЗ Орловской области «Орловская областная клиническая больница», разработанным в соответствии с принципами надлежащей лабораторной практики GLP (протокол №2 от 18.09.23). Животных содержали в условиях карантина, контролируемых по температуре, влажности и чистоте. Специальную предоперационную подготовку животных не проводили. Для всех экспериментальных животных был разработан и использовался единый протокол исследования.

Для достижения поставленной цели была разработана система гиперспектральной визуализации, состоящая из широкополосного источника излучения с волоконно-кольцевым осветителем FRI61F50 (Thorlabs, Inc.) и гиперспектральной камеры Specim IQ со спектральным диапазоном 400–1000 нм (Specim, Spectral Imaging Ltd.). Для нормирования результатов измерений использовали эталон диффузного отражения.

В качестве объекта исследования рассматривали модель ишемии кишечника у 9 лабораторных животных путем нарушения мезентериального кровотока с формированием лигатуры, перекрывающей питающий сосуд. Перед операцией в течение 3 нед животные находились в условиях изоляции и дозированного кормления. Оперативное вмешательство выполняли с применением ингаляционной анестезии на основе 1,5% изофлурана в стандартных дозировках. Все оперативные вмешательства проходили в строго асептических условиях.

Моделирование ишемии тонкой кишки осуществляли следующим способом. После введения животного в состояние наркоза его размещали на специальной фиксирующей платформе и подготавливали операционное поле путем выбривания области передней брюшной стенки и обработки растворами антисептиков. В качестве операционного доступа использовали срединную лапаротомию. Из брюшной полости извлекали тонкую кишку и перевязывали магистральные сосуды, кровоснабжающие кишечник, капроновыми лигатурами 3.0. После этого кишечник погружали в брюшную полость. Лапаротомную рану закрывали полипропиленовой нитью 2.0 с формированием непрерывного шва.

В целях определения пограничных состояний кишки и ее патологических изменений при моделировании ишемии проводили морфологическое исследование в различные интервалы времени после наложения лигатуры на магистральные сосуды кишечника: через 1; 6 и 12 ч.

Каждому животному через соответствующий период времени выполняли лапаротомию. Из брюшной полости извлекали кишечник и проводили интраоперационную оценку его жизнеспособности. В результате экспериментальных исследований получены гиперспектральные массивы изображений тонкой кишки для каждого временного интервала ишемии. В целях стандартизации измеренных данных осуществляли регистрацию спектров от эталона диффузного отражения для каждого измерения.

Основываясь на различном поглощении света несвязанной и связанной с кислородом формами гемоглобина, рассчитывали параметр тканевой сатурации с использованием двухволнового подхода для ближней инфракрасной области на основе измеренных коэффициентов диффузного отражения [19]:

$$S_{tO_2} = \frac{\mu_{Hb}(750) - \mu_{Hb}(795) \frac{R_{795}}{R_{750}}}{\mu_{Hb}(750) - \mu_{HbO_2}(750)},$$

где  $R_{795}$  и  $R_{750}$  — измеренные коэффициенты диффузного отражения на длинах волн 797 и 750 нм соответственно;  $\mu_{Hb}(750)$  и  $\mu_{HbO_2}(750)$  — коэффициенты поглощения в неизобестической точке дезоксигенированной и насыщенной кислородом крови соответственно;  $\mu_{Hb}(795)$  — коэффициент поглощения дезоксигенированной крови в изобестической точке.

После визуального определения внешних признаков ишемии и некроза кишечной стенки выполняли резекцию тонкой кишки с последующей фиксацией в 10% забуференном формалине в течение суток. Осуществляли вырезку репрезентативных участков кишки, которые впоследствии подвергали гистологической проводке по стандартной методике (с помощью гистологического процессора LOGOS, Milestone Medical) и изготавливали парафиновые блоки. Срезы

толщиной 4 мкм получали на ротационном микротоме Leica RM2125 RTS (Leica Biosystems), окрашивали гематоксилином и эозином (Biovitrum). Оценивали патоморфологические изменения в кишечной стенке в условиях смоделированной ишемии тонкой кишки различной длительности. Выраженность морфологической картины ишемии оценивали по классификации Park Chiu [20]. Исследования завершали выведением животных из эксперимента в соответствии с протоколом, одобренным этическим комитетом.

Статистическую обработку полученных данных выполняли в программной среде OriginPro. Полученные результаты представлены в виде диаграмм размаха. Для определения различий показателей между группами использовали критерий Манна—Уитни. Различия считали статистически значимыми при  $p < 0,05$ .

## Результаты

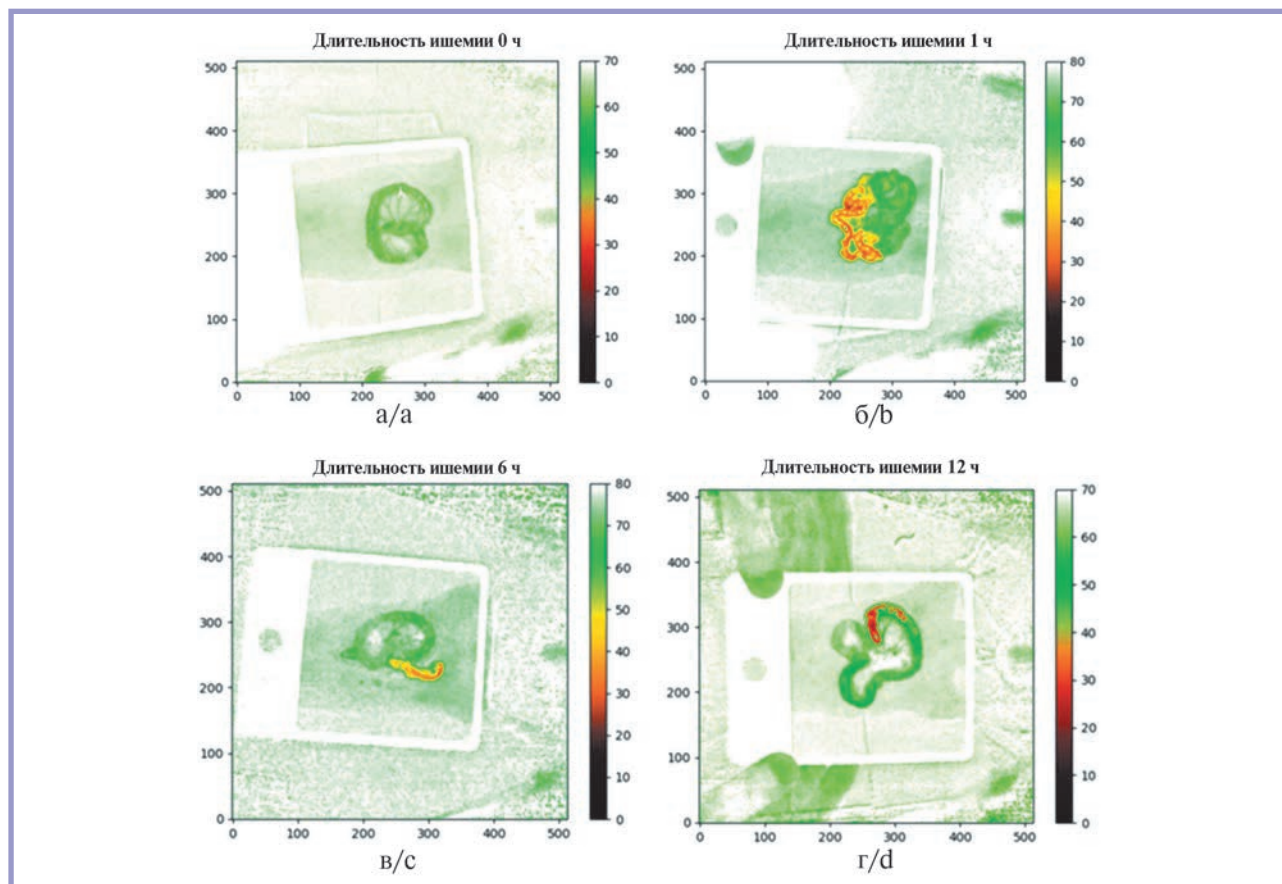
Интактная кишечная стенка на рассчитанной карте параметров тканевой сатурации имела светло-зеленый цвет (рис. 1, а), а среднее значение показателя  $\pm$  среднеквадратичное отклонение составили  $66 \pm 2\%$ . Через 1 ч после наложения лигатуры на магистральные сосуды кишечника сатурация достигала  $42 \pm 5\%$ , а на гиперспектральной карте кишечная стенка имела светло-коричневый цвет (рис. 1, б). Через 6 ч от момента моделирования ишемии кишечника сатурация составляла  $26 \pm 3\%$ , и кишечная стенка имела темно-коричневый цвет на гиперспектральной карте (рис. 1, в). При измерении через 12 ч после наложения лигатуры на магистральные сосуды кишечника сатурация составляла  $21 \pm 3\%$  и на гиперспектральной карте кишечная стенка имела черный цвет (рис. 1, г). На картах тканевой сатурации, рассчитанных для всех стадий моделирования ишемии кишечника, визуально прослеживалось увеличение контрастности цвета в области ишемии кишечной стенки по сравнению с интактными участками.

Усредненные значения тканевой сатурации для каждого интервала времени моделирования ишемии кишечника представлены на рис. 2.

По результатам морфологического исследования, статистически значимые изменения с точки зрения жизнеспособности стенки кишки имелись от момента наложения лигатуры через 1; 6 и 12 ч (рис. 3).

Через 1 ч после моделирования ишемии при морфологическом исследовании во фрагментах кишки обнаружены фокальная десквамация эпителия и выраженный отек ворсин. В собственной пластинке наблюдалась умеренная лимфогистиоцитарная инфильтрация, в подслизистой — отек и инъецированные сосуды. Описанные изменения соответствовали интестинальной ишемии Grade 2 по классификации Park Chiu. Морфологические изменения стенки кишки через 6 ч от момента моделирования ишемии были представлены





**Рис. 1.** Двумерные карты тканевой сатурации при моделировании ишемии кишечной стенки.

а — интактный кишечник; б — через 1 ч с момента моделирования ишемии; в — через 6 ч с момента моделирования ишемии; г — через 12 часов с момента моделирования ишемии.

**Fig. 1.** Two-dimensional maps of tissue saturation modeling of intestinal ischemia.

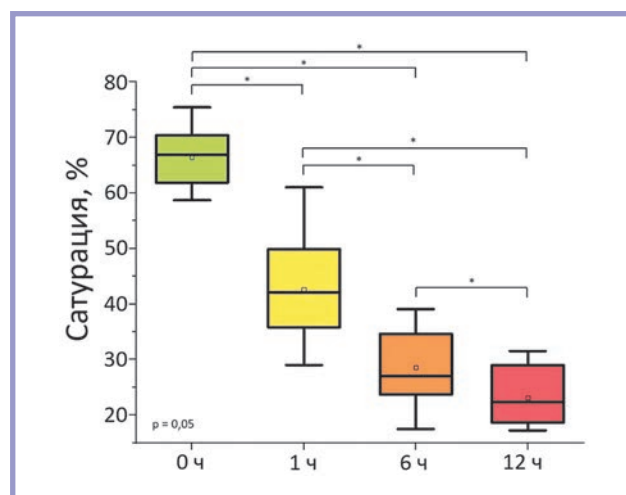
a — intact intestine; b — 1 hour after the simulation of ischemia; c — 6 hours after the simulation of ischemia; d — 12 hours after the simulation of ischemia.

диффузным коагуляционным некрозом ворсин с геморрагическим компонентом и фокальной деструкцией крипт. Подслизистая оболочка была с признаками выраженного отека, с полиморфноклеточной инфильтрацией и расширенные сосуды со стазом крови. Описанные изменения соответствовали интестинальной ишемии Grade 5—6 по классификации Park Chiu (рис. 4).

Спустя 12 ч от момента создания ишемии стенка кишки была представлена некротизированной тканью с примесью крови (рис. 5).

На рассчитанных картах тканевой сатурации для всех этапов моделирования ишемии выявлено увеличение контраста в области ишемизированной части кишки в сравнении с интактной тканью, что связано с уменьшением сатурации вследствие недостаточного локального притока крови в области наложения лигатур.

Полученные результаты служат основанием для применения гиперспектральной визуализации в интраоперационной диагностике состояния кишечника, связанного с нарушением его кровоснабжения (ущемленные грыжи, заворот кишечника,

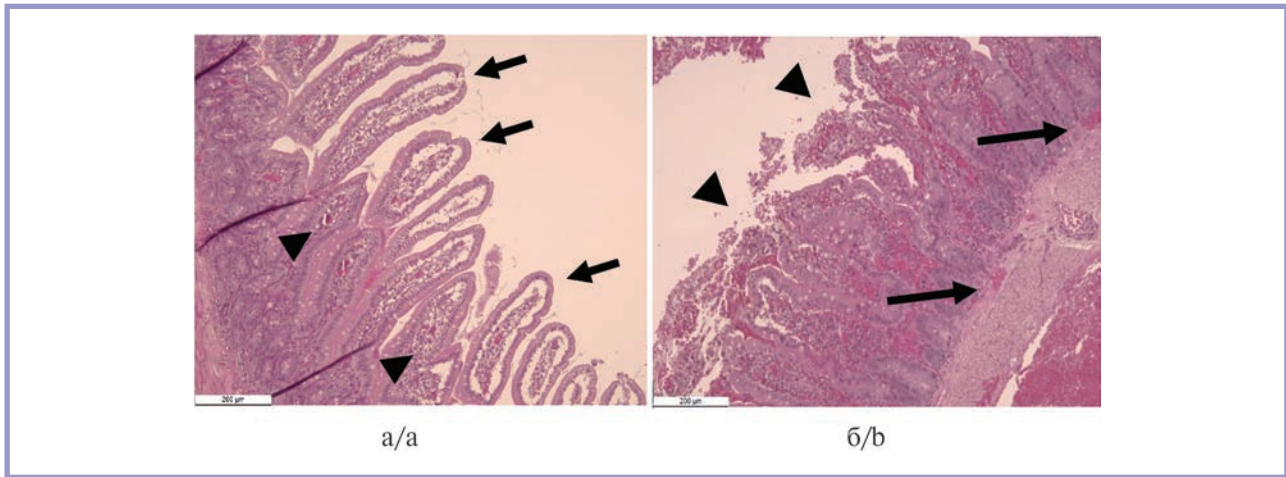


**Рис. 2.** Усредненные значения тканевой сатурации для каждого интервала времени.

\* — различия в группах статистически значимы ( $p < 0,05$ ; критерий Манна—Уитни).

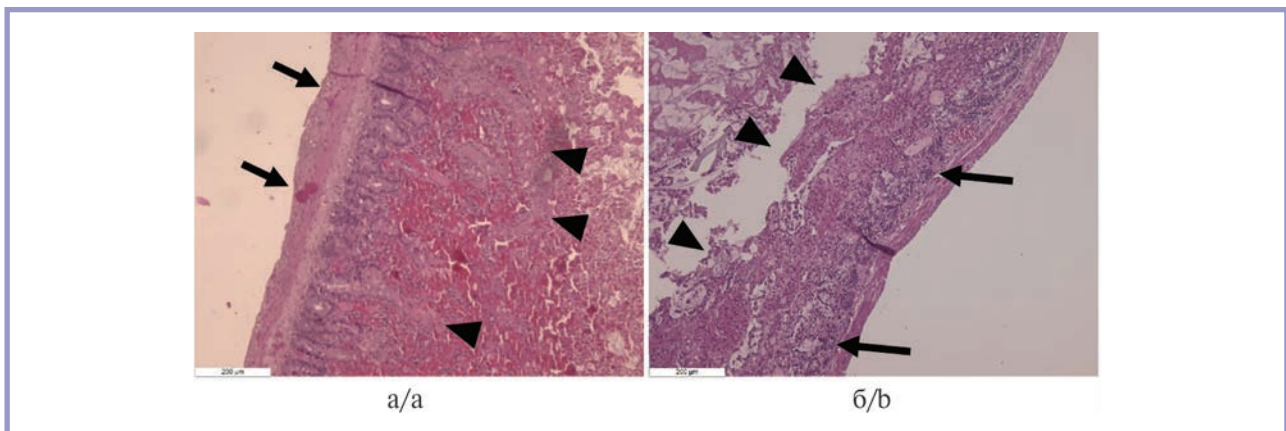
**Fig. 2.** Averaged values of the tissue saturation parameter for each time interval.

\* — statistically significant difference between values ( $p < 0,05$ , Mann—Whitney test).



**Рис. 3. Микропрепарат фрагмента кишки (×100), 1 ч после моделирования ишемии: кишечная стенка жизнеспособна.**  
 а — выраженный отек ворсин (стрелка), умеренная лимфогистиоцитарная инфильтрация в собственной пластинке (указатель); б — фокальная десквамация эпителия (указатель), отек и инъецированные сосуды в подслизистой оболочке (стрелка).

**Fig. 3. Histological section of the intestines (×100), 1 hour after ischemia modeling: the intestinal wall is viable.**  
 а — marked swelling of villi (arrow), moderate lymphohistiocytic infiltration in the lamina propria (arrowhead); б — focal desquamation of the surface epithelium (arrowhead), swelling and injected vessels in the submucosa (arrow).



**Рис. 4. Микропрепарат фрагмента кишки (×100), 6 ч после моделирования ишемии: кишечная стенка условно жизнеспособна.**

а — коагуляционный некроз ворсин с геморрагическим компонентом (указатель), расширенные сосуды со стазом крови (стрелка); б — диффузный коагуляционный некроз ворсин (указатель), фокальная деструкция единичных крипт (стрелка).

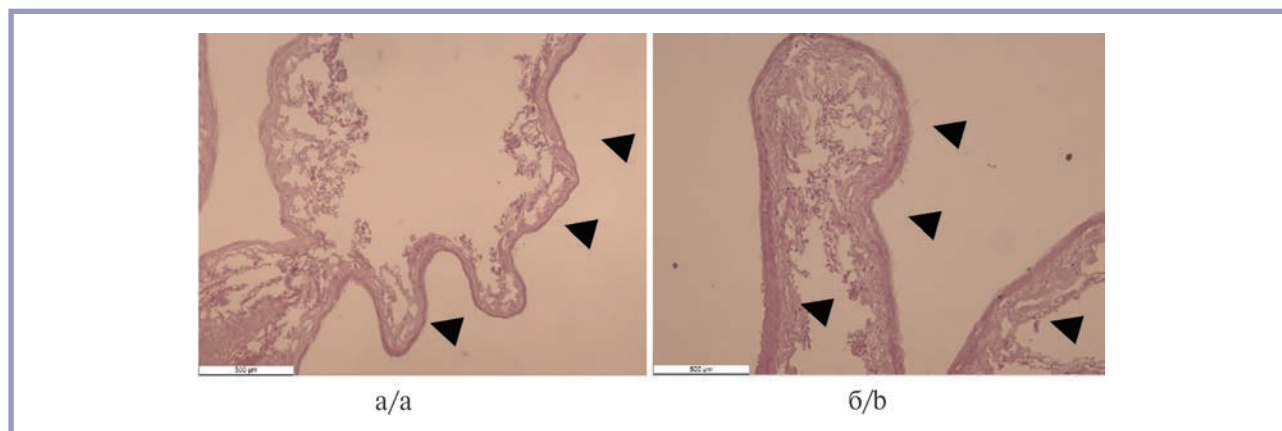
**Fig. 4. Histological section of the intestines (×100), 6 hours after ischemia modeling: the intestinal wall is relatively viable.**  
 а — coagulative necrosis of villi with hemorrhagic component (arrowhead), dilated vessels with stasis of blood (arrow); б — diffuse coagulative necrosis of villi (arrowhead), focal destruction of individual crypts (arrow).

странгуляционная кишечная непроходимость и т.д.) наряду с визуальным методом Керте. После восстановления кровотока к пораженным тканям при сатурации выше 58% состояние кишечной стенки не требует резекционного вмешательства. При сатурации ниже 23%, учитывая необратимые изменения в кишечной стенке, показана резекция кишечника.

## Обсуждение

Острая ишемия сопровождается развитием каскада процессов, приводящих к вторичным воспа-

лительным изменениям кишечной стенки. В отсутствие лечения этот процесс может привести к некрозу кишечника, угрожающему жизни. На начальном этапе ишемии кишечника развивается вазодилатация, переходящая в вазоконстрикцию, что по нашим данным проявлялось инъецированными сосудами с наличием стазов в подслизистой оболочке. Повреждение в первую очередь затрагивает слизистую и подслизистую оболочки кишечника, потенциально нарушая механизмы, препятствующие транслокации бактерий из просвета кишечника. Последовательность этих процессов может привести к активации



**Рис. 5.** Микропрепарат фрагмента кишки ( $\times 40$ ), 12 ч после моделирования ишемии: кишечная стенка нежизнеспособна. а, б — тотальный трансмуральный коагуляционный некроз с примесью эритроцитов (указатель).

**Fig. 5.** Histological section of the intestines ( $\times 40$ ), 12 hours after ischemia modeling: the intestinal wall is non-viable. а, б — total transmural coagulative necrosis admixed with erythrocytes (arrowhead).

системных воспалительных механизмов и в итоге к усилению вазоспазма, дальнейшей регионарной ишемии и более обширному повреждению стенки кишечника. Патологический процесс может прогрессировать до полнослойного поражения кишечной стенки с развитием некроза, перфорации и септического шока [21].

Традиционно оценка состояния ишемического поражения кишечной стенки основывается на визуальном подходе [7]. Известно, что линия резекции кишечника при ишемии, основанная исключительно на клиническом суждении, была проведена правильно только в 50% случаев, и это подтверждает неадекватность человеческого восприятия при оценке ишемии кишечной стенки [22].

В настоящее время существует целый спектр объективных подходов для оценки микроциркуляции крови кишечной стенки, каждый из которых имеет определенные ограничения [9]. Гиперспектральная визуализация представляет собой перспективный инструмент интраоперационной визуализации для объективной оценки перфузии кишечника. По данным М. Barberio и соавт. [23], этот метод улучшает интраоперационное определение перфузии кишечной стенки при решении вопроса об объеме оперативного пособия на кишечнике и возможности формирования безопасного анастомоза [18, 24, 25]. Наше исследование показало, что гиперспектральная визуализация позволяет оценить тканевую сатурацию кишечной стенки.

По данным литературы, необратимые ишемические изменения в кишечнике наступают через 6 ч [4]. В связи с индивидуальностью длительности стадий патологического процесса при острой ишемии кишечника структурные изменения, возникающие в кишечной стенке при восстановлении перфузии, могут претерпевать обратное развитие. По данным, полу-

ченным в ходе нашего исследования, необратимые изменения кишечника наступают через 6 ч, что подтверждается результатами патоморфологического исследования.

По данным литературы, гиперспектральная визуализация позволяет получать данные как в пространственной, так и локальной области, предоставляя обширную физическую и биологическую информацию об исследуемых тканях [26]. Наше исследование показало, что при использовании гиперспектральной визуализации может быть получена информация о состоянии микроциркуляции в кишечной стенке путем оценки тканевой сатурации. Дополнительно на основе этой технологии можно рассчитывать индексы окси- и дезоксигемоглобина, миоглобина, полного гемоглобина, воды и эритроцитов. Однако традиционная гиперспектральная визуализация имеет внутренние ограничения, связанные с громоздкостью приборов, низкой скоростью сбора данных [27]. В ходе нашего исследования применялась гиперспектральная камера Specim IQ (Specim, Spectral Imaging Ltd) со спектральным диапазоном 400—1000 нм. Данная камера имеет размеры 207×91×74 мм (с объективом 125,5 мм), что сопоставимо с размерами фотоаппарата Canon EOS 650D Kit EF-S 133×100×79 мм и не представляет затруднений для мобильного использования в работе операционной. Время измерения в эксперименте составляло не более 5 мин, что не может негативно влиять на ход оперативного вмешательства.

По данным литературы, основным недостатком, препятствующим широкому внедрению гиперспектральной визуализации в клиническую практику, является отсутствие больших клинических испытаний [28—30]. Для активного внедрения гиперспектральной визуализации в хирургическую практику требуются дальнейшие экспериментальные



и клинические исследования. Кроме того, важным аспектом, требующим дальнейшего обсуждения, является определение показаний к проведению гиперспектральной визуализации и места в алгоритме диагностики острой ишемии кишечника.

## Заключение

Наше исследование показало, что двумерные цветовые карты при гиперспектральной визуализации, которые строились при моделировании ишемии кишечника, позволяют выделить несколько интервалов сатурации, соответствующих морфологическим изменениям кишечной стенки. Важно отметить, что несмотря на визуально оцениваемое состояние кишечной стенки гиперспектральная визуализация позволяет судить об обратимости ишемического повреждения кишечника.

Применение гиперспектральной визуализации целесообразно в качестве метода неинвазивной и объективной интраоперационной оценки ишемического повреждения кишечной стенки без дополнительного применения контрастных препаратов, позволяющего получить представление о микроциркуляции кишечника и ряде количественных диагностических параметров ткани. Вместе с тем требуется продолжение исследований для накопления опыта и повышения достоверности результатов. Дальнейшее активное применение данного метода по стро-

го обоснованным показаниям будет способствовать улучшению результатов лечения пациентов с острой ишемией кишечника.

### Участие авторов:

Концепция и дизайн исследования — А.В. Мамошин, Е.В. Потапова, А.В. Дунаев

Сбор и обработка материала — Н.А. Адаменков, В.В. Шуплецов

Статистическая обработка данных — В.В. Шуплецов, И.А. Горюнов, А.А. Палалов

Написание текста — Н.А. Адаменков, А.В. Мамошин

Редактирование — В.В. Дремин, Е.В. Потапова, А.В. Дунаев

### Participation of authors:

Concept and design of the study — A.V. Mamoshin, E.V. Potapova, A.V. Dunaev,

Data collection and processing — N.A. Adamenkov, V.V. Shupletsov

Statistical processing of the data — V.V. Shupletsov, I.A. Goryunov, A.A. Palalov

Text writing — N.A. Adamenkov, A.V. Mamoshin

Editing — V.V. Dremine, E.V. Potapova, A.V. Dunaev

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №21-15-00325.

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

**The authors declare no conflicts of interest.**

## ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Ярошук С.А., Баранов А.И., Каташева Л.Ю., Лещинин Я.М. Острая мезентериальная ишемия: подходы к диагностике и оперативному лечению. *Медицина в Кузбассе* 2018;17(2):35-42. Yaroshuk SA, Baranov AI, Katasheva LYU, Leshhishin YaM. Ostraya mezenterial'naya ishemiya: podkhody k diagnostike i operativnomu lecheniyu. *Medicina v Kuzbasse* 2018;17(2):35-42. (In Russ.).
2. Шапкин Ю.Г., Чалык Ю.В., Климашевич В.Ю., Стекольников Н.Ю., Беликов А.В., Халеев И.А. Случаи заворота ободочной кишки при аномалиях ее развития. *Вестник хирургии им. И.И. Грекова*. 2020;179(4):87-90. Shapkin YuG, Chalyk YuV, Klimashevich VYu, Stekolnikov NYu, Belyikov AV, Haleev IA. Clinical cases of colonic torsions in patients with inborn anatomic variants. *Vestnik khirurgii im. I.I. Grekova*. 2020;179(4):87-90. (In Russ.).
3. Кабешев Б.О., Зыблев С.Л. *Острая кишечная непроходимость*. Гомель: ГУ РНПЦ РМиЭЧ; 2019. Kabeshev BO, Zy'blev SL. *Ostraya kishhechnaya neprokhodimost'*. GU RNPCh RMe'Ch; 2019. (In Russ.).
4. *Руководство по неотложной хирургии органов брюшной полости. Руководство для врачей. 2-е изд.* Под. ред. Савельева В.С. М.: МИА; 2020. *Rukovodstvo po neotlozhnoj khirurgii organov bryushnoj polosti. Rukovodstvo dlya vrachej. 2-e izdanie*. Pod. red. VS Savel'eva. M.: MIA; 2020. (In Russ.).
5. Шаповальянц С.Г., Ларичев С.Е., Сажин А.В., Щеголев А.А., Гуляев А.А., Бебуришвили А.Г., Прудков М.И., Шулуток А.М., Дарвин В.В. Национальные клинические рекомендации «острая неопухолевая кишечная непроходимость». *XII Съезд хирургов России «Актуальные вопросы хирургии»*. Ростов-на-Дону. 2015. Shapoval'yanc SG, Larichev SE, Sazhin AV, Shhegolev AA, Gulyaev AA, Beburishvili AG, Prudkov MI, Shulutko AM, Darwin VV. Nacional'nye klinicheskie rekomendacii «ostraya neopuholevaya kishhechnaya neprokhodimost'». *XII S'ezd hirurogov Rossii «Aktual'nye voprosy hirurgii»*. Rostov-na-Donu. 2015. (In Russ.).
6. Kurbonov K. Intubation of the Small Intestine as a Component of Treatment of Acute Strangulated Small Bowel Obstruction. *Vestnik Avitsennyyu*. 2018;20(4):436-441. <https://doi.org/10.25005/2074-0581-2018-20-4-436-441>
7. Родин А.В., Плешков В.Г. Интраоперационная оценка жизнеспособности кишки при острой кишечной непроходимости. *Вестник Смоленской государственной медицинской академии*. 2016;15(1):75-82. Rodin AV, Pleshkov VG. Intraoperacionnaya ocenka zhiznesposobnosti kishki pri ostroj kishhechnoj neprokhodimosti. *Vestnik Smolenskoj gosudarstvennoj meditsinskoi akademii*. 2016;15(1):75-82. (In Russ.).
8. Urbanavičius L. How to assess intestinal viability during surgery: a review of techniques. *World J Gastrointest Surg*. 2011;3(5):59.
9. Ведянская Д.А., Краморов Е.С., Ратников В.А., Кашенко В.А. Современные методы интраоперационной оценки перфузии тканей. *Клиническая больница*. 2022;2(34):42-54. Vedyanskaya DA, Kramorov ES, Ratnikov VA, Kashchenko VA. Current methods of intraoperative assessment of tissue perfusion. *Klinicheskaya bol'nitsa*. 2022;2(34):42-54. (In Russ.). [https://doi.org/10.56547/22263071\\_2022\\_2\\_42](https://doi.org/10.56547/22263071_2022_2_42)
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 им. И.И. Грекова*. 2020;179(1):82-88.



- Zacharenko A.A. Bowel viability assessment during surgery (review of the literature). *Vestnik khirurgii im. I.I. Grekova Pavlov University*, 2020;179(1):82-88. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.24884/0042-4625-2020-179-1-82-88>
11. Дунаев А.В. Мультимодальная оптическая диагностика микроциркуляторно-тканевых систем организма человека: монография. Старый Оскол: ТНТ; 2022. [440]  
 Dunaev A.V. *Multimodalnaya opticheskaya diagnostika mikroциркуляторно-тканевых систем организма человека: monografiya*. Staryj Oskol: TNT; 2022. [440]
  12. Bydlon T, Nachabé R, Ramanujam N, Sterenborg H, Hendriks B. Chromophore based analyses of steady-state diffuse reflectance spectroscopy: current status and perspectives for clinical adoption. *J Biophotonics*. 2015;8(1-2):9-24.  
<https://doi.org/10.1002/jbio.201300198>
  13. Kapsokalyvas D, Bruscinio N, Alfieri D, de Giorgi V, Cannarozzo G, Cicchi R, Massi D, Pimpinelli N, Pavone FS. Spectral morphological analysis of skin lesions with a polarization multispectral dermoscope. *Optics Express*. 2013;21(4):4826-4840.  
<https://doi.org/10.1364/OE.21.004826>
  14. Tuchin VV. *Tissue optics: light scattering methods and instruments for medical diagnosis*. Bellingham (WA): SPIE Optical Engineering Press; 2000.
  15. Spigulis J, Oshina I, Berzina A, Bykov A. Smartphone snapshot mapping of skin chromophores under triple-wavelength laser illumination. *J Biomed Optics*. 2017;22(9):091508-091508.  
<https://doi.org/10.1117/1.JBO.22.9.091508>
  16. Nishidate I, Tanaka N, Kawase T, Maeda T, Yuasa T, Aizu Y, Yuasa T, Niizeki K. Noninvasive imaging of human skin hemodynamics using a digital red-green-blue camera. *J Biomed Optics*. 2011;16(8):086012-086012.  
<https://doi.org/10.1117/1.3613929>
  17. Zhrebtsov E, Dremin V, Popov A, Doronin A, Kurakina D, Kirillin M, Meglinski I, Bykov A. Hyperspectral imaging of human skin aided by artificial neural networks. *Biomed Optics Express*. 2019;10(7):3545-3559.  
<https://doi.org/10.1364/BOE.10.003545>
  18. Dremin V, Marcinkevics Z, Zhrebtsov E, Popov A, Grabovskis A, Kronberga H, Geldnere K, Doronin A, Meglinski I, Bykov A. Skin complications of diabetes mellitus revealed by polarized hyperspectral imaging and machine learning. *IEEE Transactions Med Imag*. 2021;40(4):1207-1216.  
<https://doi.org/10.1109/TMI.2021.3049591>
  19. Zimmermann A. The role of intraoperative hyperspectral imaging (HSI) in colon interposition after esophagectomy. *BMC Surg*. 2023;2(23):47.  
<https://doi.org/10.1186/s12893-023-01946-3>
  20. Potapova EV, Dremin VV, Zhrebtsov EA, Makovik IN, Zhrebtsova AI, Dunaev AV, Podmasteryev KV, Sidorov VV, Krupatkin AI, Khakhicheva LS, Muradyan VF. Evaluation of microcirculatory disturbances in patients with rheumatic diseases by the method of diffuse reflectance spectroscopy. *Human Physiol*. 2017;43:222-228.  
<https://doi.org/10.1134/S036211971702013X>
  21. Bertacco A. Modulation of intestinal microbiome prevents intestinal ischemic injury. *Frontiers Physiol*. 2017;19(8):1064.  
<https://doi.org/10.3389/fphys.2017.01064>
  22. Bala M, Catena F, Kashuk J, De Simone B, Gomes CA, Weber D, Sartelli M, Coccolini F, Kluger Y, Abu-Zidan FM, Picetti E. Acute mesenteric ischemia: updated guidelines of the World Society of Emergency Surgery. *World J Emerg Surg*. 2022;17(1):1-7.  
<https://doi.org/10.1186/s13017-022-00443-x>
  23. Barberio M, Lapergola A, Benedicenti S, Mita M, Barbieri V, Rubichi F, Altamura A, Giaracuni G, Tamburini E, Diana M, Pizzicannella M. Intraoperative bowel perfusion quantification with hyperspectral imaging: a guidance tool for precision colorectal surgery. *Surg Endosc*. 2022;36(11):8520-8532.  
<https://doi.org/10.1007/s00464-022-09407-3>
  24. Karliczek A, Harlaar N, Zeebregts C, Wiggers T, Baas P, Van Dam G. Surgeons lack predictive accuracy for anastomotic leakage in gastrointestinal surgery. *Int J Colorectal Dis*. 2009;24:569-576.  
<https://doi.org/10.1007/s00384-009-0658-6>
  25. Knospe L. New intraoperative imaging tools and image-guided surgery in gastric cancer surgery. *Diagnostics*. 2022;12(2):507.  
<https://doi.org/10.3390/diagnostics12020507>
  26. Hren R. Imaging perfusion changes in oncological clinical applications by hyperspectral imaging: a literature review. *Radiol Oncol*. 2022;56(4):420-429.  
<https://doi.org/10.2478/raon-2022-0051>
  27. Ji Y. mHealth hyperspectral learning for instantaneous spatio-spectral imaging of hemodynamics. *PNAS nexus*. 2023;2(4):pgad111.  
<https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad111>
  28. Barberio M, Benedicenti S, Pizzicannella M, Felli E, Collins T, Jansen-Winkeln B, Marescaux J, Viola MG, Diana M. Intraoperative guidance using hyperspectral imaging: a review for surgeons. *Diagnostics*. 2021;8(11):2066.  
<https://doi.org/10.3390/diagnostics11112066>
  29. Wagner T. Hyperspectral imaging detects perfusion and oxygenation differences between stapled and hand-sewn intestinal anastomoses. *Innovat Surg Sci*. 2022;7(2):59-63.  
<https://doi.org/10.1515/iss-2022-000729>
  30. Hennig S. Novel intraoperative imaging of gastric tube perfusion during oncologic esophagectomy—a pilot study comparing hyperspectral imaging (HSI) and fluorescence imaging (FI) with indocyanine green (ICG). *Cancers*. 2021;14(1):97.  
<https://doi.org/10.3390/cancers14010097>

Поступила 05.10.2023

Received 05.10.2023

Принята к печати 09.11.2023

Accepted 09.11.2023