

ИНТРАОПЕРАЦИОННАЯ ОЦЕНКА ЖИЗНЕСПОСОБНОСТИ КИШЕЧНОЙ СТЕНКИ

Н.А. Адаменков^{1,2}, А.В. Мамошин^{1,3}, В.В. Дрёмин¹, Е.В. Потапова¹, В.В. Шуплецов¹, Ю.В. Иванов⁴, Д.Н. Панченков⁵, А.В. Дунаев¹

¹ Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Орёл, Россия;

² Орловская областная клиническая больница, Орёл, Россия;

³ Национальный медицинский исследовательский центр хирургии им. А.В. Вишневского, Москва, Россия;

⁴ Федеральный научно-клинический центр специализированных видов медицинской помощи и медицинских технологий, Москва, Россия;

⁵ Российский университет медицины, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Проведён анализ данных отечественной и зарубежной литературы по вопросам интраоперационного определения жизнеспособности кишечника при заболеваниях органов брюшной полости, сопровождающихся нарушением кровоснабжения кишечника. Нарушение мезентериального кровоснабжения часто является следствием ряда причин критических состояний (мезентериального тромбоза, острой спаечной кишечной непроходимости, ущемлённой грыжи и др.) и фактором высокого риска летального исхода. Особое внимание уделяется окклюзионному патогенетическому механизму возникновения мезентериальной ишемии, которая сопровождается быстрым развитием необратимых морфологических изменений тканей и выраженным нарушением системы гомеостаза организма. Общедоступный метод визуальной оценки жизнеспособности кишки не всегда достоверен в определении степени выраженности ишемических изменений кишечной стенки. В алгоритм определения жизнеспособности кишки входит определение цвета кишечника, перистальтики, пульсации и кровенаполнения брыжеечных сосудов с динамической оценкой этих признаков после введения в брыжейку кишки раствора местного анестетика и «согревания» кишки салфетками, смоченными тёплым раствором хлорида натрия. В современных условиях во время хирургической операции необходим более точный интраоперационный способ определения жизнеспособности тканей. Для объективной оценки кровоснабжения кишечника рекомендуется использовать интраоперационную ультразвуковую, лазерную доплеровскую флоуметрию, регионарную трансиллюминационную ангиотензометрию внутристеночных сосудов тонкой кишки. Ряд оптических методов спектроскопии и визуализации имеет высокую чувствительность к изменению микроциркуляции крови без использования экзогенного контрастирования, что также может быть успешно использовано в оценке кровотока кишечника. Отсутствие однозначных рекомендаций в отношении эффективности различных методов интраоперационной оценки нарушений регионарной гемомикроциркуляции и жизнеспособности кишки обуславливает необходимость проведения дальнейших исследований.

Ключевые слова: кишечник; ишемия; жизнеспособность; гиперспектральная камера; перфузия.

Для цитирования:

Адаменков Н.А., Мамошин А.В., Дрёмин В.В., Потапова Е.В., Шуплецов В.В., Иванов Ю.В., Панченков Д.Н., Дунаев А.В. Интраоперационная оценка жизнеспособности кишечной стенки. *Клиническая практика*. 2024;15(4):46–58. doi: <https://doi.org/10.17816/clinpract633149>

Поступила 03.06.2024

Принята 26.10.2024

Опубликована online 27.10.2024

ВВЕДЕНИЕ

Согласно клиническим рекомендациям Всемирного общества экстренных хирургов (World Society of Emergency Surgery, WSES), острая мезентериальная ишемия возникает при внезапном прекраще-

нии кровоснабжения кишечника, приводит к повреждению клеток, некрозу кишечной стенки и смерти пациента. Ишемия кишечника может иметь окклюзионную и неокклюзионную природу. Окклюзионный патогенетический механизм включает в себя

INTRAOPERATIVE EVALUATION OF THE INTESTINAL WALL VIABILITY

N.A. Adamenkov^{1,2}, A.V. Mamoshin^{1,3}, V.V. Dremine¹, E.V. Potapova¹, V.V. Shupletsov¹, Yu.V. Ivanov⁴, D.N. Panchenkov⁵, A.V. Dunaev¹

¹ Orel State University, Orel, Russia;

² Orel Regional Clinical Hospital, Orel, Russia;

³ National Medical Research Center of Surgery named after A. Vishnevsky, Moscow, Russia;

⁴ Federal Research and Clinical Center of Specialized Medical Care and Medical Technologies, Moscow, Russia;

⁵ Russian University of Medicine, Moscow, Russia

ABSTRACT

An analysis of data from national and foreign literature was carried out in terms of intraoperative determination of the intestinal viability in cases of developing the diseases in the abdominal cavity organs, associated with impaired intestinal blood supply. The basis of this work is the analysis of the modern literature on the methods of intraoperative evaluation of mesenteric ischemia. Impaired mesenteric blood supply is often the consequence of a number of reasons of developing critical conditions (mesenteric thrombosis, acute adhesive intestinal obstruction, incarcerated hernia etc.), also representing a high risk factor for lethal outcomes. Special attention is paid to the occlusion-related pathogenetic mechanism of developing mesenteric ischemia, which is accompanied by rapid development of irreversible morphological changes in the tissues and by significant disorders in the homeostasis systems of the organism. The generally available method for visual evaluation of the intestine viability is not always valid in terms of determining the degree of intensity of the ischemic changes in the intestinal wall. The algorithm of determining the intestine viability includes the determination of the intestine color, the peristaltic motions, the pulsation and the blood filling of mesenteric vessels with dynamic evaluation of these signs after the injecting the local anesthetic drug solution into the mesentery and after "warming" the intestine with towels soaked in warm sodium chloride solution. In the current surgical conditions, a more precise method is required for intraoperative determination of the tissue viability. For the purpose of the objective evaluation of the intestinal blood supply, the recommendations include using intraoperative ultrasonic and laser Doppler flowmetry, as well as the regional transillumination angiotensometry of the intramural vessels in the small intestine. At the same time, a number of optical spectroscopy and visualization methods show high sensitivity to changes in blood microcirculation without using exogenous contrasting, which can also be successfully used when evaluating the intestinal circulation. According to data from modern literature, there is still controversy on the efficiency of various methods for intraoperative evaluation of disorders of the regional blood microcirculation and the intestine viability, which justifies the conduct of further research works.

Keywords: intestine; ischemia; viability; biomedical optics; perfusion.

For citation:

Adamenkov NA, Mamoshin AV, Dremine VV, Potapova EV, Shupletsov VV, Ivanov YuV, Panchenkov DN, Dunaev AV. Intraoperative evaluation of the intestinal wall viability. *Journal of Clinical Practice*. 2024;15(4):46–58. doi: <https://doi.org/10.17816/clinpract633149>

Submitted 03.06.2024

Revised 26.10.2024

Published online 27.10.2024

эмболию брыжеечной артерии (50%), тромбоз брыжеечной артерии (15–25%) или вены (5–15%) [1]. Частота встречаемости неокклюзионной ишемии, по данным J. Сансесо и соавт. [2] из Калифорнийского университета, составляет 25%. Неокклюзионным ишемическим повреждением страдают пациенты с тяжёлой сопутствующей патологией,

гиповолемией, а также пациенты, применяющие сосудосуживающие препараты [3, 4].

К хирургической абдоминальной патологии, вызывающей ишемию кишечника, относятся такие нозологические формы, как ущемлённая грыжа, острая кишечная непроходимость, мезентериальный тромбоз.

Согласно клиническим рекомендациям «Ущемлённая грыжа» [5], под этим термином подразумевается острое или постепенное сдавление одного или нескольких органов брюшной полости в грыжевых воротах, что сопровождается нарушением кровоснабжения органа и приводит к его некрозу. Грыжевой дефект встречается у 5% людей в течение жизни с риском ущемления в 1–3% случаев [6]. Показатель заболеваемости ущемлённой грыжи в Российской Федерации, по данным А.Ш. Ревивили и соавт. [7], сохраняется на протяжении последних 3 лет на высоком уровне и составляет 36–37 случаев на 100 000 взрослого населения. В 2022 году количество госпитализированных пациентов с ущемлённой грыжей превысило показатели последних 20 лет на 19,3%. В.И. Стручков и соавт. [8] в своей работе указывают, что в грыжевом мешке в 50% случаев располагается тонкая кишка, а в 21% — толстая кишка. Некроз кишечной стенки встречается в 9% случаев [9].

По степени перекрытия кишечника ущемление может быть полным и неполным. К неполному варианту перекрытия просвета ущемлённого органа относятся пристеночное ущемление Рихтера и грыжа Литтре [5]. Грыжа Рихтера — это ущемление противобрыжечной части кишечной стенки. По оценке С.М. Regelsberger-Alvarez и соавт. [10], до 10% всех грыж являются грыжами типа Рихтера. Некроз при данном типе грыж доходит до 69% на момент оперативного пособия. Грыжа Литтре представляет собой ущемление дивертикула Меккеля и является чрезвычайно редким осложнением с частотой встречаемости до 0,09% [11].

Основной формой ущемления кишечника в грыжевых воротах, приводящей к ишемии, является антеградная, которая чаще всего возникает при наличии небольшого отверстия в мускулатуре и значительного количества содержимого внутри самой грыжи [6]. Ретроградная форма ущемления, известная как грыжа Майдля, представлена двумя петлями кишечника в грыжевом мешке и соединяющей их внутри брюшной полости третьей петлёй [12]. Кроме того, возможен вариант внезапного ущемления в грыжевых воротах при отсутствии грыжи в анамнезе [5]. При ущемлённой грыже странгуляция вызывает венозный стаз, что приводит к отёку стенки кишечника, нарушению её проницаемости и выходу элементов крови и плазмы в стенку кишечника и грыжевой мешок. На этом фоне в ограниченном пространстве грыжевого мешка запускаются процессы разло-

жения содержимого кишечника с образованием токсинов [13].

Острая кишечная непроходимость — это синдром, объединяющий различные неонкологические заболевания, приводящие к нарушению пассажа по кишке вследствие механического препятствия либо недостаточности двигательной функции кишки. По механизму развития острой кишечной непроходимости к ишемии кишечника приводит в первую очередь странгуляционная форма, к которой относятся спаечная болезнь брюшной полости, заворот, инвагинация и узлообразование [14].

Спайки брюшной полости — это протекающее бессимптомно, без нарушения функции органов брюшной полости сращение листков париетальной и висцеральной брюшины в результате нарушения нормальных этапов мезотелизации [15]. Частота встречаемости спаечной болезни брюшной полости доходит до 93% у пациентов, которым повторно выполняют операцию на органах брюшной полости [16]. В работе группы R.P. Ten Broek [17] частота острой спаечной кишечной непроходимости достигала 2% от общего числа хирургических больных в стационарах. Спаечная непроходимость тонкой кишки составляла 55–75% случаев непроходимости тонкой кишки [18]. По данным А.Ш. Ревивили и соавт. [7], количество случаев острой спаечной кишечной непроходимости увеличилось на 8,6% в сравнении с 2021 годом, а госпитальная и послеоперационная летальность снизились до уровня 2019 года и составили 4,33% и 4,03% соответственно. Однозначного мнения о причинах формирования спаечного процесса в брюшной полости не существует [19], но чаще всего он образуется на фоне повреждения брюшины во время хирургических пособий [20]. Нарушение целостности тканей при хирургическом вмешательстве приводит к активации ангиогенеза в базальном слое брюшины, что влечёт за собой нарушение процессов фибринолиза и инициирует развитие спаек [21]. При повреждении брюшины отслоившиеся мезотелиальные клетки экспрессируют молекулы клеточной адгезии и различные хемотаксические факторы, которые вызывают большой приток воспалительных клеток, преимущественно макрофагов, продуцирующих воспалительные цитокины, такие как интерлейкины 1 и 6 (interleukin, IL-1, IL-6) и фактор некроза опухоли (tumour necrosis factor, TNF). В адгезиогенезе основную роль играет IL-6, мощными индукторами которого являются IL-1 и TNF. Эти воспалительные реакции прямо пропорциональны степени повреждения брюшины [22].

К.Р. Пашкин и соавт. [23] указывают, что заворот брыжейки кишечника составляет 4–5% всех видов кишечной непроходимости. По локализации наиболее часто имеет место заворот сигмовидной (60–75%), реже слепой (20–35%), тонкой (7–18%) и поперечной ободочной (3–5%) кишок. Как правило, в патологическом процессе задействован большой участок кишечника с выраженными некробиотическими изменениями и тяжёлыми гемодинамическими и системными нарушениями гемостаза [14]. Согласно исследованию Т.А. Никоноровой и соавт. [24], инвагинация кишки встречается в 5% наблюдений во взрослом возрасте. В патогенезе данного типа кишечной непроходимости играют роль странгуляционный и обтурационный компоненты. Обтурационный механизм обусловлен ригидным сужением просвета кишечника за счёт внедрения одной части кишки в просвет другой, а странгуляционный механизм связан со сдавлением сосудов брыжейки кишки между средним и внутренним сегментами инвагината [25].

Среди тяжёлых форм странгуляционной кишечной непроходимости 3–4% приходится на узлообразование, при котором происходит сдавление сосудов брыжейки обеих петель кишечника, при этом одна из них всегда является тонкой кишкой [9].

При странгуляционной кишечной непроходимости первично страдает кровоснабжение вовлечённой в процесс кишки, что обусловлено сдавлением сосудов брыжейки кишки и вызывает в результате быстрый некроз кишечной стенки. Вторым по частоте вариантом развития кишечной непроходимости является обтурационная кишечная непроходимость. Основным этиологическим фактором данной формы кишечной непроходимости остаётся опухоль толстой кишки, которая возникает у 15–20% больных и может наблюдаться во всех возрастных группах [26]. По данным за 2022 год [7], количество случаев острой кишечной непроходимости опухолевого генеза в Российской Федерации уменьшилось на 2,3% по сравнению с 2021 годом, однако госпитальная и послеоперационная летальность увеличились и составили 17,75% и 19,57% соответственно. По материалам А.Г. Хасанова с соавт. [27], частота желчнокаменной обтурационной кишечной непроходимости по отношению к общему числу наблюдений кишечной непроходимости составляет от 0,17% до 6,2%.

Во вторую фазу острой кишечной непроходимости (интоксикация) происходит нарушение внутристеночной кишечной гемоциркуляции [28]. Кровоснабжение участка, расположенного выше

препятствия, нарушается вторично в связи с перерастяжением кишечным содержимым за счёт массивного выхода жидкости в стенку и просвет кишечника, что приводит к системной гиповолемии и гемоконцентрации. Развивающийся отёк кишечника и сниженный приток и отток крови приводят к кишечной ишемии [29]. Ишемическое повреждение кишечника сопровождается снижением выработки аденозинтрифосфата клеточными митохондриями, активизацией гидролазы, снижением селективной проницаемости клеточных мембран и увеличением притока кальция в ишемизированные клетки. Когда кишечная ишемия становится критической, развивается полиорганная недостаточность — главная причина смертности [30].

Традиционным способом интраоперационного определения жизнеспособности кишечника является визуальный метод Керте [31], основанный на цвете, наличии перистальтических волн, пульсации, кровенаполнении сосудов кишки, а также динамике этих признаков после введения в брыжейку раствора местного анестетика и «согревания» кишки салфетками, смоченными тёплым водным раствором хлорида натрия (NaCl) с массовой долей ω (NaCl) ~0,9% [14]. По данным А. Karliczek и соавт. [32], чувствительность визуальной оценки жизнеспособности кишки составляет 61,3%, специфичность — 88,5%.

В 2020 году группа авторов под руководством А.А. Захаренко [33] опубликовала обзор таких методов объективной оценки интраоперационной жизнеспособности кишечника, как ультразвуковая доплерография, полярографический метод, лазерная доплеровская флоуметрия, лазерная спекл-контрастная визуализация, флуоресцентная ангиография, боковая темнопольная микроскопия, оптическая когерентная томография, микродиализ. Лазерная флуоресцентная спектроскопия коферментов окислительного метаболизма в обзоре отмечена как потенциально перспективная интраоперационная методика объективного определения жизнеспособности кишечной стенки.

В 2022 году группой авторов из Санкт-Петербурга под руководством Д.А. Ведянской [34] опубликован научный обзор, посвящённый современным методам интраоперационной оценки перфузии тканей, при этом вектор внимания в работе направлен на рассмотрение передовых методов определения микроциркуляции кишечной стенки, в частности гиперспектральную и ICG-визуализацию, фотоплетизмографию, с учётом потенциала их практи-

ческого использования и необходимости больших клинических испытаний.

В обзоре литературы А.А. Валиева и соавт. [35], посвящённом современным методам оценки жизнеспособности кишечника, указано, что наиболее распространённым методом интраоперационной оценки микроциркуляции кишечной стенки является визуальный. По мнению авторов, флуоресцентная ангиография — широко применяемый и наиболее изученный метод, а гиперспектральная визуализация и мультимодальная когерентная томография — наиболее перспективные методы интраоперационной оценки жизнеспособности кишки.

В работе нашей группы авторов обобщены данные современной зарубежной и отечественной литературы о методах интраоперационной объективной оценки жизнеспособности кишечной стенки при острой хирургической патологии, сопровождающейся ишемией кишечника, типах и эффективности используемых методов, а также продемонстрированы результаты собственного применения технологии оценки перфузии кишечной стенки в эксперименте на малых модельных животных с применением гиперспектральной визуализации.

МЕТОДЫ ИНТРАОПЕРАЦИОННОЙ ОБЪЕКТИВНОЙ ОЦЕНКИ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ КИШЕЧНОЙ СТЕНКИ ВО ВРЕМЯ ПРОВЕДЕНИЯ ХИРУРГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ

Ультразвуковая доплерография

Ультразвуковая доплерография является разновидностью ультразвукового исследования, использующего эффект Доплера для определения уровня кровотока внутри кровеносных сосудов [36]. Интраоперационная оценка ультразвуковых параметров кровотока в брыжеечных сосудах является достоверным критерием жизнеспособности кишечника [33]. В исследовании М. Соорерман и соавт. [37], включающем более 200 пациентов с резекцией толстой кишки, применение интраоперационной ультразвуковой доплерографии привело к снижению частоты несостоятельности анастомоза в послеоперационном периоде до 1%. Однако метод, по данным литературы, имеет большое количество ложноположительных и ложноотрицательных результатов [38] и практически сопоставим с визуальной оценкой [39]. Чувствительность метода снижает вклад в информативный сигнал из области исследования помех от окружающих сосудистых структур [33].

Полярографический метод

Полярографический метод основан на регистрации уровня кислорода тканевой жидкости в процессе электролиза при взаимодействии с заряженным электродом [40]. По результатам исследования W.G. Sheridan и соавт. [41], возможна прямая интраоперационная тканевая оксиметрия желудочно-кишечного тракта человека в качестве средства оценки насыщения тканей кислородом. Однако для определения жизнеспособности кишечной стенки необходим непосредственный контакт электрода с серозным слоем кишечника, и точность оценки перфузии кишечной стенки не превышает 57,7%.

Микродиализ

Микродиализ представляет собой метод получения биологической жидкости из ткани в процессе жизнедеятельности организма с последующим анализом её компонентного состава [42–50]. В основе метода лежит диффузия аналита в перфузируемую жидкость через микродиализный катетер, который вводится в исследуемую ткань или вблизи неё [49, 50]. Различия в перфузии кишечной стенки устанавливаются на основании уровня в диализате лактата, пирувата, глюкозы, цитокинов [44–46]. Инвазивность и стоимость анализаторов, а также расходных материалов остаются главным недостатком данного метода [47].

Лазерная доплеровская флоуметрия

Лазерная доплеровская флоуметрия обеспечивает бесконтактное оптическое измерение перфузии крови в микроциркуляторном русле [48–51]. В основе метода лежит эффект доплеровского сдвига для измерения скорости эритроцитов при использовании лазерного излучения [52]. Данный метод легко воспроизводим и обладает достаточно большой чувствительностью, также позволяет оценить степень перфузии и состояние микроциркуляции в исследуемом участке ткани. Специфика метода заключается в изучении микроциркуляции исследуемой области. Эта картина представляет собой результат наложения разнонаправленных движений частиц в большом количестве микрососудов и изменения концентрации этих частиц в данной области [53]. А.И. Хрипун и соавт. [54] продемонстрировали возможности интраоперационного применения лазерной доплеровской флоуметрии как быстрого, легко интерпретируемого и эффективного метода оценки перфузии кишечника при остром артериальном

нарушении мезентериального кровообращения, который был оценён в группе из 109 пациентов. Метод показал высокую (91%) чувствительность при определении границ жизнеспособности тонкой и толстой кишок. Продемонстрировано достоверное уменьшение частоты случаев некроза кишечника в раннем послеоперационном периоде (с 48,6 до 9,1%), уменьшение частоты послеоперационных осложнений (с 67,6 до 40,9%) [54]. Метод лазерной доплеровской флоуметрии, обладая неинвазивностью и высокой скоростью измерения параметров, не отражает всего разнообразия капиллярной сети кишечной стенки, обеспечивая возможность регистрации параметров измерения в относительных единицах только на небольшой области исследования.

Лазерная спекл-контрастная визуализация

Лазерная спекл-контрастная визуализация основана на регистрации случайной спекл-интерференционной картины, обратно рассеянной от поверхности ткани, освещённой когерентным лазером с длиной волны $\lambda=635$ нм. Получаемое изображение представляет собой более тёмные и светлые области, в основе которых лежит случайная спекл-интерференционная картина, образованная изменением фазы рассеянного в обратном направлении света. Сдвиг интенсивности движения частиц внутри освещённой среды вызывает изменение флуктуации рассеянного излучения, регистрируемого детектором, и приводит к изменению характера и пространственного контраста спеклов. В работе S. Kojima и соавт. [55] продемонстрирована способность лазерной спекл-контрастной визуализации адекватно определять изменения перфузии кишечника с превосходной воспроизводимостью. К похожим результатам пришли R. Ambrus и соавт. [56], показав, что измерения лазерной спекл-контрастной визуализации имеют хорошую корреляцию при оценке микроциркуляции в желудке, печени и тонкой кишке (r^2 0,857, 0,956 и 0,946; коэффициенты вариации 6,0%, 3,2% и 6,4%). Лазерная спекл-контрастная визуализация благодаря отсутствию контакта датчика с тканью и возможности оценить большую площадь поражения в реальном времени является перспективной методикой для интраоперационной оценки жизнеспособности кишечника. Однако авторы отмечают, что дыхательные движения сильно влияют на получаемые данные [56]. К преимуществам данного метода относится возможность проведения бес-

контактных широкопольных измерений микроциркуляторных нарушений в реальном масштабе и режиме реального времени [57–60]. Факторами, снижающими информативность лазерной спекл-контрастной визуализации, являются влияние на регистрируемые данные передаточной пульсации со стороны сердечно-сосудистой системы и механических движений внутренних органов [34], а также относительность показателей параметров микроциркуляции, что влияет на объективность проводимого анализа.

Боковая темнопольная визуализация

Метод боковой темнопольной визуализации заключается в получении контрастного изображения перфузии биоткани за счёт избирательного поглощения стробоскопического освещения с длиной волны 530 нм молекулами гемоглобина в эритроцитах [61]. F.J. de Bruin и соавт. [62] в боковом тёмном поле оценивали жизнеспособность кишечника у 17 пациентов по таким параметрам микроциркуляции, как индекс микрососудистого кровотока, доля перфузированных сосудов, плотность перфузированных сосудов и общая плотность сосудов. Измерения проводились для каждого пациента сублингвально и на серозной оболочке кишечника. Авторы делают вывод, что технология является очень перспективной в визуализации и оценке микроциркуляции в кишечной стенке. С.М. Treu и соавт. [63] указывают, что данный метод визуализации обладает низкой стоимостью, безопасностью и высокой чувствительностью, которая обеспечивает получение надёжных диагностических данных. Однако S.M. Jansen и соавт. [64] в своей работе отмечают, что метод требует непосредственного соприкосновения датчика с серозной оболочкой кишки, что влияет на регистрацию данных таких факторов погрешности со стороны оператора (тремор рук, неравномерное давление датчика) и объекта исследования (дыхательные движения, передаточная пульсация сердечно-сосудистой системы).

Оптическая когерентная томография

Оптическая когерентная томография — метод визуализации, который предоставляет информацию о поперечном сечении тканей с высоким разрешением и не требует непосредственного контакта с исследуемым объектом. Метод основан на анализе обратно отражённого излучения с измерением задержки для определения глубины,

на которой произошло отражение. При оптической когерентной томографии используется свет в ближнем инфракрасном диапазоне. Задержка обратно отражённых волн не может быть измерена напрямую, поэтому используется эталонное измерение. При использовании интерферометра часть света направляется на образец, а другая часть — на эталонное плечо хорошо известной длины [65]. Y. Tian и соавт. [66] в экспериментальной работе на малых лабораторных животных оценивали изменения плотности, длину и средний диаметр сосудов в различных слоях кишечной стенки в норме и во время ишемии. В результате исследования зарегистрировано значительное снижение плотности перфузии сосудов во всех слоях кишечника во время ишемии. Наиболее значимому воздействию подвергается слизистая оболочка [66]. Способ регистрации данных при оптической когерентной томографии требует непосредственного контакта датчика с серозной оболочкой кишечника, при этом стандартизированный подход к стерилизации приборов оптической когерентной томографии отсутствует, и возникает необходимость в применении асептических прокладок между устройством и зоной интереса. Оптическая когерентная томография, являясь операторозависимым методом в связи с необходимостью позиционирования датчика устройства в зоне интереса рукой оператора, подвержена влиянию таких факторов, как тремор рук, передаточная пульсация от магистральных сосудов, дыхательные движения пациента. По мнению S.M. Jansen и соавт. [67], оптическая когерентная томография может быть реализована для интраоперационной оценки кишечной перфузии, но существующие приборы нуждаются в технической доработке для применения во время операций.

Флуоресцентная спектроскопия

В основе флуоресцентной спектроскопии лежит оценка содержания различных флуорофоров, отражающих метаболическое состояние биотканей при излучении длины волны 340–370 нм и 450 нм [68–72]. А.А. Захаренко [73] указывает, что измерение уровня флуоресценции кофермента окислительного метаболизма NADH является перспективной в интраоперационной оценке перфузии кишечника. Основным недостатком данной технологии является необходимость контакта оптического зонда прибора с исследуемой тканью [74]. Однако использование флуоресцентной визуализации может решить данную проблему.

ICG-визуализация

ICG-визуализация (indocyanine green imaging) основана на способности красителя (индоцианин зелёный) излучать флуоресцентный сигнал при возбуждении источником света с определённой длиной волны (ближний инфракрасный спектр света 700–900 нм). Способ получил широкое распространение в плановой и ургентной хирургии желудочно-кишечного тракта [75]. К. Nohara и соавт. [76] продемонстрировали в своей работе применение ICG у двух пациентов со странгуляционной кишечной непроходимостью в оценке скомпрометированного участка кишечника. Оба пациента успешно и без осложнений выздоровели после операции. Авторы установили, что флуоресцентную визуализацию ICG можно рассматривать в качестве метода принятия решения о резекционном вмешательстве на кишечнике у пациентов со странгуляционной кишечной непроходимостью, предупредив, однако, что количественная оценка флуоресценции не проводилась и оптимальная доза ICG для оценки кишечника в настоящее время не установлена. Представляет определённые трудности и макроскопическая идентификация границ флуоресценции, позволяющих прогнозировать жизнеспособность ишемизированного кишечника. Авторы указывают, что ICG нельзя использовать у пациентов с аллергией на йодосодержащие препараты [76]. В двух метаанализах отмечается 70% снижение частоты несостоятельности анастомозов при применении ICG [77]. Недостатком методики является её инвазивность. В литературе описаны случаи аллергических реакций при применении индоцианина зелёного [35]. Важным аспектом является отсутствие количественной оценки интенсивности сигнала, которая зависит от расстояния между кишкой и камерой и субъективного мнения хирурга [78].

Инфракрасная термография

Инфракрасная термография основана на фиксации инфракрасного излучения, выходящего с поверхности объекта. Это обеспечивает регистрацию распределения температурных полей биотканей, обусловленных микроциркуляторной, метаболической и вегетативной активностью [79]. Термографические камеры способны улавливать излучение в инфракрасном диапазоне (0,9–14,0 мкм) [80]. К преимуществам метода можно отнести невысокую стоимость реализации, низкие эксплуатацион-

ные расходы, большое удобство и оперативность применения. Кроме того, с помощью инфракрасной термографии можно проводить исследования одномоментно или многократно в динамике [81]. G.J. Tattersall и соавт. [82] тем не менее указывают, что данный метод не позволяет фиксировать минимальные тепловые изменения, возникающие при воспалении тканей. Кроме того, группа авторов под руководством А. Репеж [83] отмечает, что сдвиг температуры не всегда коррелирует с перфузией кишечника.

Фотоплетизмография

Фотоплетизмография — неинвазивный метод измерения изменений объёма крови в микрососудистом русле, основанный на оптических свойствах, таких как поглощение, рассеяние и пропускание через ткани определённых длин волн света [84]. На поглощение и отражение света кишечной стенкой влияют содержание в ней гемоглобина и общий объём циркулирующей крови. С помощью RGB-камеры (red, green and blue ranges — красный, зелёный и синий диапазоны) фиксируются сдвиги отражённого света, обусловленные изменением объёма крови. Среди преимуществ данного метода выделяют отсутствие необходимости использования экзогенного контрастного реагента, возможность постоянного отслеживания состояния кровотока кишечной стенки, доступность оборудования и одновременное сканирование нескольких показателей (насыщение крови кислородом, или сатурация, SpO_2 ; частота сердечных сокращений; частота дыхательных движений) [85, 86]. Недостатком данного метода является задержка во времени, которая требуется для получения изображения перфузии кишечной стенки. Кроме того, колебания параметров центральной гемодинамики, изменение артериального давления также могут вносить погрешности в измеряемые параметры [34]. Использование RGB-камеры совместно с системой увеличения и соответствующими алгоритмами обработки изображений позволяют реализовать измерение скорости кровотока в капиллярах в произвольном участке тела [87]. Данный подход потенциально позволяет выявлять на ранней стадии различные заболевания, связанные с нарушениями микроциркуляции. К недостатку данного метода относится чувствительность к дыханию и колебаниям тела. Кроме того, неровная поверхность тканей может затруднять получение надёжных данных.

Гиперспектральная визуализация

Гиперспектральная визуализация основана на пространственной спектроскопии, реализующей трёхмерный набор данных (гиперкуб) и представляющей собой пространственные координаты в широком и непрерывном диапазоне электромагнитного спектра. Гиперспектральная визуализация позволяет измерить спектральную характеристику каждого пикселя, содержащего спектральную кривую [88–92]. В последние 5 лет в зарубежной литературе чаще стали появляться публикации, где в качестве метода оценки жизнеспособности кишечника применяется гиперспектральная визуализация. Метод демонстрирует высокую эффективность анализа ишемии кишечника с высокой чувствительностью к изменению микроциркуляции крови, особенно в ближней инфракрасной оптической области спектра [93–95].

На базе научно-технологического центра биомедицинской фотоники ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева» выполнены экспериментальные исследования на крысах по оценке возможностей метода гиперспектральной визуализации для анализа ишемии кишечника [96]. В исследовании использована разработанная 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., Финляндия). Камера имеет размеры 207×91×74 мм (объектив 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 оценки перфузии кишечной стенки в эксперименте составляло не более 5 минут, что не могло негативно повлиять на выполнение оперативного вмешательства. Продемонстрировано, что гиперспектральная камера позволяет получить информацию о состоянии микроциркуляции кишечной стенки путём оценки сатурации тканей. Помимо этого, данная технология позволяет оценивать индексы оксигемоглобина и дезоксигемоглобина и воды. Наше исследование показало, что цветовые двумерные карты сатурации, построенные при моделировании ишемии кишечника, позволяют выделить несколько интервалов SpO_2 , соответствующих морфологическим изменениям кишечной стенки, и таким образом судить об обратимости повреждения кишечника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Каждый метод оценки микроциркуляции кишечной стенки имеет свои ограничения. Интраоперационная система поддержки врачебных решений в определении жизнеспособности кишечной стенки, основанная на количественных параметрах, является необходимым элементом хирургических пособий при ишемии кишечника. Методы оптической спектроскопии и визуализации, в частности гиперспектральная визуализация, являются перспективным неинвазивным инструментарием оценки ишемического повреждения кишечной стенки, позволяющим получить комплексную информацию о состоянии микроциркуляции крови кишечной стенки. Важно определить показания и место каждого объективного подхода оценки перфузии в алгоритме интраоперационной диагностики острой ишемии кишечника.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Источник финансирования. Исследование поддержано Российским научным фондом в рамках проекта № 21-15-00325.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Вклад авторов. Н.А. Адаменков — написание текста, сбор и обработка материала; А.В. Мамосин — концепция и дизайн исследования; написание текста; В.В. Дремин — редактирование текста; В.В. Шуплетов — сбор и обработка материала, статистическая обработка данных; Д.Н. Панченков, Ю.В. Иванов, А.В. Дунаев, Е.В. Потапова — концепция и дизайн исследования, редактирование текста. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение поисково-аналитической работы и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. The research was supported by the Russian Science Foundation within the framework of project No. 21-15-00325.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Authors' contribution. N.A. Adamenkov — manuscript writing, data collection and processing;

A.V. Mamoshin — concept and design of the study, manuscript writing; V.V. Dreminev — editing; V.V. Shupletsov — data collection and processing, statistical processing of the data; D.N. Panchenkov, Yu.V. Ivanov, A.V. Dunaev, E.V. Potapova — concept and design of the study, editing. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Bala M, Catena F, Kashuk J, et al. Acute mesenteric ischemia: updated guidelines of the World Society of Emergency Surgery. *World J Emerg Surg*. 2022;17(1):54. EDN: ALDIVR doi: 10.1186/s13017-022-00443-x
- Canceco J, Winokur EJ. Mesenteric ischemia: Concepts of care for the bedside nurse. *Gastroenterol Nurs*. 2018;41(4):305–311. doi: 10.1097/SGA.0000000000000329
- Bourcier S, Klug J, Nguyen LS. Non-occlusive mesenteric ischemia: Diagnostic challenges and perspectives in the era of artificial intelligence. *World J Gastroenterol*. 2021;27(26): 4088–4103. EDN: QSHUOB doi: 10.3748/wjg.v27.i26.4088
- Reintam Blaser A, Preiser JC, Fruhwald S, et al. Gastrointestinal dysfunction in the critically ill: A systematic scoping review and research agenda proposed by the section of metabolism, endocrinology and nutrition of the Endocrinology and Nutrition of the European Society of Intensive Care Medicine. *Crit Care*. 2020;24(1):1–17. EDN: XEBFHC doi: 10.1186/s13054-020-02889-4
- Клинические рекомендации. Ущемленная грыжа. Москва: Российское общество хирургов, 2023. 65 с. [Clinical Guidelines. *Pinched hernia*. Moscow: Russian Society of Surgeons; 2023. 65 p. (In Russ.)]
- Pastorino A, Alshuqayfi AA. *Strangulated hernia*: Book. In: Stat Pearls [Internet]. StatPearls Publishing; 2022. Режим доступа: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32310432/>. Дата обращения: 03.06.2024.
- Ревишвили А.Ш., Оловянный В.Е., Сажин В.П., и др. Хирургическая помощь в Российской Федерации. Москва: Доминант, 2023. 200 с. [Revishvili AS, Olovyanny VE, Sazhin VP, et al. *Surgical care in the Russian Federation*. Moscow: Dominant; 2023. 200 p. (In Russ.)] EDN: DTZCQK
- Стручков В.И. Основные проблемы при лечении ущемленных грыж // *Советская медицина*. 1958. Т. 22, № 1. С. 20–25. [Struchkov VI. Major problems in the treatment of impingement hernias. *Sovetskaya meditsina*. 1958;22(1):20–25. (In Russ.)]
- Кабешев Б.О., Зыблев С.Л. Острая кишечная непроходимость. Гомель, 2019. 48 с. [Kabeshov BO, Zyblev SL. *Acute intestinal obstruction*. Gomel; 2019. 48 p. (In Russ.)]
- Regelsberger-Alvarez CM, Pfeifer C. *Richter hernia*: Book. In: Stat Pearls [Internet]. StatPearls Publishing; 2023. Режим доступа: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK537227/>. Дата обращения: 03.06.2024.
- Seok D, Akrawe S, Mittal V. Littre's hernia: A reason for resection. *J Surg Case Rep*. 2023;(1):rjac617. doi: 10.1093/jscr/rjac617
- Благовестнов Д.А., Драйер М., Ярцев П.А., и др. Видеолaparоскопия в диагностике и лечении ущемленных паховых грыж: учебное пособие. Москва, 2021. 65 с. [Blagovestnov DA, Dreyer M, Yartsev PA, et al. *Videolaparoscopy in the diagnosis and treatment of pinched inguinal hernias: A textbook*. Moscow; 2021. 65 p. (In Russ.)] EDN: BHMEWR
- Кириенко А.И. Руководство по неотложной хирургии органов брюшной полости. Руководство для врачей / под ред. В.С. Савельева. 2-е изд., испр. и доп. Москва: Медицинское

- информационное агентство, 2014. 544 p. [Kirienko AI. *Manual of emergency abdominal surgery*. A manual for physicians. Ed. by V.S. Savelyev. 2nd revised and updated. Moscow: Meditsinskoe informatsionnoe agentstvo; 2014. 544 p. (In Russ.)]
14. Шаповалыantz С.Г., Ларичев С.Е., Сажин А.В., и др. Национальные клинические рекомендации «Острая неопуховидная кишечная непроходимость». Приняты на XII Съезде хирургов России «Актуальные вопросы хирургии», Ростов-на-Дону, 7–9 октября. Ростов-на-Дону, 2015. 36 p. [Shapovalyants SG, Larichev SE, Sazhin AV, et al. *National clinical recommendations "Acute non-tumour intestinal obstruction"*. Adopted at the XII Congress of Surgeons of Russia "Topical issues of surgery", Rostov-on-Don, 7–9 Oct. Rostov-na-Donu; 2015. 36 p. (In Russ.)]
15. Аюшинова Н., Шурыгина И., Чепурных Е., и др. Спаечная болезнь брюшной полости — междисциплинарная проблема // *Врач*. 2017. № 5. С. 8–10. [Ayushinova N, Shurygina I, Chepurnykh E, et al. Adhesive disease of the abdominal cavity is an interdisciplinary problem. *Vrach*. 2017;(5):8–10. EDN: YPVNJR]
16. Райимов Г.Н., Косимов Ш.Х. Современные аспекты профилактики и лечения больных спаечной болезнью брюшины и ее осложнений // *Экономика и социум*. 2021. № 11-2. С. 1002–1014. [Rajimov GN, Kosimov SX. Modern aspects of prevention and treatment of patients with adhesive disease of the personal disease and its complications. *Ekonomika i socium*. 2021;(11-2):1002–1014. EDN: SGEAZH]
17. Ten Broek RP, Issa Y, van Santbrink EJ, et al. Burden of adhesions in abdominal and pelvic surgery: Systematic review and met-analysis. *BMJ*. 2013;347:f5588. doi: 10.1136/bmj.f5588
18. Catena F, de Simone B, Coccolini F, et al. Bowel obstruction: A narrative review for all physicians. *World J Emerg Surg*. 2019;14(1):20. EDN: MVUYHO doi: 10.1186/s13017-019-0240-7
19. Радзинский В.Е., Соловьёва А.В., Стуров В.Г., и др. Анемия и репродуктивное здоровье: монография / под ред. В.Е. Радзинского. Москва: Медиабюро Статус презенс, 2019. 200 с. [Radzinsky VE, Solovyova AV, Sturov VG, et al. *Anaemia and reproductive health: A monograph*. Ed. by V.E. Radzinsky. Moscow: Mediabyuro Ctatys pezens; 2019. 200 p.] EDN: EKWAMS
20. Ten Broek RP, Krielen P, di Saverio S, et al. Bologna guidelines for diagnosis and management of adhesive small bowel obstruction (ASBO): 2017 Update of the evidence-based guidelines from the world society of emergency surgery ASBO working group // *World J Emerg Surg*. 2018;(13):24. doi: 10.1186/s13017-018-0185-2
21. Аржаева И.А., Тяпкина Д.А., Тараскин А.Ф., Тараскин А.А. Частота встречаемости спаечного процесса брюшной полости после кесарева сечения (по результатам повторных оперативных вмешательств) // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2022. № 3-1. С. 102–107. [Arzhaeva IA, Tyapkina DA, Taraskin AF, Taraskin AA. Frequency of occurrence of the adhesive process of the abdominal cavity after cesarean section (according to the results of repeated surgery). *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*. 2022;(3-1):102–107. (In Russ.)] EDN: UWPOOI doi: 0.23670/IRJ.2022.117.3.017
22. Ghimire P, Maharjan S. Adhesive. Small bowel obstruction: A review. *JNMA*. 2023;61:390–396. doi: 10.31729/jnma.8134
23. Пашкин К.П., Мотырова Е.В., Крымов О.В., и др. Заворот брыжейки тонкой кишки, вызванный фрагментами энтероколита, у пациента с дивертикулёзом тонкой кишки // *Вестник хирургии имени И.И. Грекова*. 2018. Т. 177, № 3. С. 59–60. [Pashkin KP, Motyrova EV, Krymov OV, et al. Small intestinal mesentery inversion caused by the enterolith fragments in the patient with small intestine diverticulosis. *Vestnik khirurgii named after I.I. Grekov = Grekov's Bull Surg*. 2018;177(3):59–60. EDN: XRSVYD doi: 10.24884/0042-4625-2018-177-3-59-60
24. Никонорова Т.А., Ростовцев М.В., Нуднов Н.В., и др. КТ-диагностика кишечной непроходимости, вызванной инвагинацией на фоне липомы в стенке тощей кишки // *Вестник рентгенологии и радиологии*. 2022. Т. 103, № 1-3. С. 69–76. [Nikonorova TA, Rostovtsev MV, Nudnov NV, et al. CT diagnostics of intestinal obstruction caused by invagination due to the jejunal wall lipoma. *Vestnik rentgenologii i radiologii = J Radiol Nuclear Med*. 2022;103(1-3):69–76. EDN: RGYQAR doi: 10.20862/0042-4676-2022-103-1-3-69-76
25. Соловьёв И.А., Суров Д.А., Балюра О.В., и др. Хирургическое лечение пациента с илеоцекальной инвагинацией // *Вестник Национального медико-хирургического центра им. Н.И. Пирогова*. 2020. Т. 15, № 3-2. С. 185–188. [Soloviev IA, Surov DA, Balura OV, et al. Case of surgical treatment of ileocecal invagination. *Bulletin Pirogov National Med Surg Center*. 2020;15(3-2):185–188. EDN: HLZGYC doi: 10.25881/BPNMSC.2020.21.19.033
26. Ачкасов С.И., Багателья З.А., Багненко С.Ф., и др. Клинические рекомендации. Острая толстокишечная непроходимость опухолевой этиологии (K56.6; C18, C19, C20), взрослые // *Коллопроктология*. 2023. Т. 22, № 2. С. 10–31. [Achkasov SI, Bagateliya ZA, Bagnenko SF, et al. Clinical guidelines. Acute colonic obstruction of tumour aetiology (K56.6; C18, C19, C20), adults. *Coloproctology*. 2023;22(2):10–31. doi: 10.33878/2073-7556-2023-22-2-10-31
27. Хасанов А.Г., Нуртдинов М.А., Ибраев А.В. Обтурационная кишечная непроходимость, вызванная желчными камнями // *Вестник хирургии имени И.И. Грекова*. 2015. Т. 174, № 3. С. 20–23. [Khasanov AG, Nurtidinov MA, Ibraev AV. Obturative bowel obstruction caused by gallstones. *Vestnik khirurgii named after I.I. Grekov = Grekov's Bull Surg*. 2015;174(3):20–23. EDN: TTVQJZ doi: 10.24884/0042-4625-2015-174-3-20-23
28. Михин И.В., Кухтенко Ю.В., Косивцов О.А. Острая кишечная непроходимость: учебное пособие. Волгоград: Изд-во ВолГМУ, 2019. 104 с. [Mikhin IV, Kukhtenko YV, Kosivtsov OA. *Acute intestinal obstruction: Textbook*. Volgograd: Izdatel'stvo Volgogradskogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta; 2019. 104 p. (In Russ.)] EDN: YRSUCU
29. Demelo-Rodríguez P, Ordieres-Ortega L, Oblitas CM. Trombosis venosa mesentérica. *Medicina Clínica*. 2023;160(9):400–406. doi: 10.1016/j.medcle.2023.01.010
30. Jin Y, Blikslager AT. Intestinal ischemia-reperfusion: Rooting for the SOCS? *Dig Dis Sci*. 2017;62(1):4–6. EDN: HBRSLB doi: 10.1007/s10620-016-4328-6
31. Родин А.В., Плешков В.Г. Интраоперационная оценка жизнеспособности кишки при острой кишечной непроходимости // *Вестник Смоленской государственной медицинской академии*. 2016. Т. 15, № 1. С. 75–82. [Rodin AV, Pleshkov VG. Evaluation of the viability of the intestine during surgical treatment in the course of acute intestinal obstruction. *Vestnik Smolenskoi gosudarstvennoi meditsinskoi akademii*. 2016;15(1):75–82. EDN: VVVMHR
32. Karliczek A, Harlaar NJ, Zeebregts C, et al. Surgeons lack predictive accuracy for anastomotic leakage in gastrointestinal surgery. *Int J Color Dis*. 2009;24(5):569–576. EDN: YYRERS doi: 10.1007/s00384-009-0658-6
33. Захаренко А.А., Беляев М.А., Трушин А.А., и др. Интраоперационная оценка жизнеспособности стенки кишки (обзор литературы) // *Вестник хирургии имени И.И. Грекова*. 2020. Т. 179, № 1. С. 82–88. [Zacharenko AA, Belyaev MA, Trushin AA, et al. Bowel viability assessment during surgery (review of the literature). *Vestnik khirurgii named after I.I. Grekov = Grekov's Bull Surg*. 2020;179(1):82–88. EDN: QJDEXH doi: 10.24884/0042-4625-2020-179-1-82-88
34. Ведянская Д.А., Краморов Е.С., Ратников В.А., и др. Современные методы интраоперационной оценки перфузии тканей // *Клиническая больница*. 2022. № 2. С. 42–54. [Vedynskaya DA, Kramorov ES, Ratnikov VA, et al. Current methods of intraoperative assessment of tissue perfusion. *Clin Hospital*. 2022;(2):42–54. EDN: WJHAZM doi: 10.56547/22263071_2022_2_42
35. Валиев А.А., Хасанов Р.Ш., Галимова Л.Л., Гатауллин И.Г. Современные методы оценки жизнеспособности стенки кишки (обзор литературы) // *Коллопроктология*. 2023. Т. 22, № 3. С. 140–148. [Valiev AA, Hasanov RS, Galimova LL, et al.

- Modern methods of assessing the viability of the intestinal wall (review). *Koloproktologia*. 2023;22(3):140–148]. EDN: NZCELY doi: 10.33878/2073-7556-2023-22-3-140-148
36. Moorthy RS. Doppler ultrasound. *Med J Armed Forces India*. 2002;58(1):1–2. doi: 10.1016/S0377-1237(02)80001-6
 37. Cooperman M, Martin EW, Carey LC. Evaluation of ischemic intestine by Doppler ultrasound. *Am J Surg*. 1980;139(1):73–77. doi: 10.1016/0002-9610(80)90232-9
 38. Dyess DL, Bruner BW, Donnell CA, et al. Intraoperative evaluation of intestinal ischemia: A comparison of methods. *Southern Med J*. 1991;84(8):966–969. doi: 10.1097/00007611-199108000-00008
 39. Bulkley GB, Zuidema GD, Hamilton SR, et al. Intraoperative determination of small intestinal viability following ischemic injury: A prospective, controlled trial of two adjuvant methods (Doppler and fluorescein) compared with standard clinical judgment. *Ann Surg*. 1981;193(5):628. doi: 10.1097/0000658-198105000-00014
 40. Clark LC. Monitor and control of blood and tissue oxygen tensions. *Trans Am Soc Artif Intern Organs*. 1956;2:41–48.
 41. Sheridan WG, Lowndes RH, Young HL. Intraoperative tissue oximetry in the human gastrointestinal tract. *Am J Surg*. 1990;159(3):314–319. doi: 10.1016/S0002-9610(05)81226-7
 42. Baumann KY, Church MK, Clough GF, et al. Skin microdialysis: methods, applications and future opportunities: An EAACI position paper. *Clin Translational Allergy*. 2019;9:24. doi: 10.1186/s13601-019-0262-y
 43. Pischke SE, Hodnebo S, Wester T, et al. Intraperitoneal microdialysis detects intestinal leakage earlier than hemodynamic surveillance and systemic inflammation in a pig model. *Scand J Gastroenterol*. 2021;56(2):219–227. doi: 10.1080/00365521.2020.1863459
 44. Jansson K, Jansson M, Andersson M, et al. Normal values and differences between intraperitoneal and subcutaneous microdialysis in patients after non-complicated gastrointestinal surgery. *Scand J Clin Lab Invest*. 2005;65(4):273–282. doi: 10.1080/00365510510013802
 45. Birke-Sorensen H, Andersen NT. Metabolic markers obtained by microdialysis can detect secondary intestinal ischemia: An experimental study of ischemia in porcine intestinal segments. *World J Surg*. 2010;34(5):923–932. EDN: BYJHGD doi: 10.1007/s00268-010-0502-8
 46. Sushkov AI, Voskanyan SE, Gubarev KK. Microdialysis: Opportunities and prospects in liver transplantation (review). *Modern Technologies Med*. 2018;10(3):184–191. EDN: YLLJQL doi: 10.17691/stm2018.10.3.23
 47. Тимофеев И.С. Тканевой микродиализ: принципы и клиническое применение метода в интенсивной терапии // *Интенсивная терапия* [электронный ресурс]. 2007. № 1. [Timofeev IS. Tissue microdialysis: Principles and clinical application of the method in intensive care. *J Intensive Care*. 2007;(1). (In Russ.)] Режим доступа: <https://icj.ru/journal/number-1-2007/104-tkanevoy-mikrodializ-principy-i-klinicheskoe-primenenie-metoda-v-intensivnoy-terapii.html?ysclid=m46www5pcfm684886005>. Дата обращения: 15.10.2024.
 48. Daly SM, Leahy MJ. 'Go with the flow': A review of methods and advancements in blood flow imaging. *J Biophotonics*. 2013;6(3):217–255. doi: 10.1002/jbio.201200071
 49. Makovik IN, Dunaev AV, Dremmin VV, et al. Detection of angiospastic disorders in the microcirculatory bed using laser diagnostics technologies. *J Innovative Optical Health Sci*. 2018;11(1):1750016. EDN: PRIHHF doi: 10.1142/S179354581750016X
 50. Dremmin VV, Zhrebtsov EA, Makovik IN, et al. *Laser Doppler flowmetry in blood and lymph monitoring, technical aspects and analysis*. In: Dynamics and fluctuations in biomedical photonics XIV, ed. by V.V. Tuchin, K.V. Larin, M.J. Leahy, R.K. Wang. Proc. of SPIE, Vol. 10063. doi: 10.1117/12.2252427
 51. Dunaev AV, Sidorov VV, Krupatkin AI, et al. Investigating tissue respiration and skin microcirculation under adaptive changes and the synchronization of blood flow and oxygen saturation rhythms. *Physiological Measurement*. 2014;35(4):607. EDN: SKPCTF doi: 10.1088/0967-3334/35/4/607
 52. Крупаткин А.И., Сидоров В.В. Лазерная доплеровская флоуметрия микроциркуляции крови. Москва: Медицина, 2005. 254 с. [Krupatkin AI, Sidorov VV. *Laser Doppler flowmetry of blood microcirculation*. Moscow: Meditsina; 2005. 254 p. (In Russ.)]
 53. Vasilev PV, Margaryants NB, Erofeev NP. Laser doppler flowmetry in the microlymphodynamics study. *Modern Technologies Med*. 2019;11(2):92–96. doi: 10.17691/stm2019.11.2.13
 54. Хрипун А.И., Прямиков А.Д., Шурыгин С.Н., и др. Лазерная доплеровская флоуметрия в выборе объема резекции кишечника у больных острым артериальным нарушением мезентериального кровообращения // *Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова*. 2012;(10):40–44. [Khripun AI, Priamikov AD, Shurygin SN, et al. The possibilities of laser doppler flowmetry for the estimation of the intestine resection volume by the acute mesenteric ischemia. *Zhurnal imeni N.I. Pirogova = N.I. Pirogov Russ J Surg*. 2012;(10):40–44]. EDN: PIWBNF
 55. Kojima S, Sakamoto T, Nagai Y, et al. Laser speckle contrast imaging for intraoperative quantitative assessment of intestinal blood perfusion during colorectal surgery: A prospective pilot study. *Surg Innovat*. 2019;26(3):293–301. doi: 10.1177/1553350618823426
 56. Ambrus R, Strandby RB, Svendsen LB, et al. Laser speckle contrast imaging for monitoring changes in microvascular blood flow. *Eur Sur Res*. 2016;56(3-4):87–96. doi: 10.1159/000442790
 57. Golubova N, Potapova E, Seryogina E, et al. Time-frequency analysis of laser speckle contrast for transcranial assessment of cerebral blood flow. *Biomed Signal Processing Control*. 2023;85:104969. EDN: NSXLJD doi: 10.1016/j.bspc.2023.104969
 58. Dremmin VV, Potapova EV, Mamoshin AV, et al. Monitoring oxidative metabolism while modeling pancreatic ischemia in mice using a multimodal spectroscopy technique. *Laser Physics Letters*. 2020;17(11):115605. EDN: YFICWQ doi: 10.1088/1612-202X/abbefa
 59. Mizeva IA, Dremmin VV, Potapova EV, et al. Wavelet analysis of the temporal dynamics of the laser speckle contrast in human skin. *IEEE Trans Biomed Eng*. 2019;67(7):1882–1889. EDN: BEQRHZ doi: 10.1109/TBME.2019.2950323
 60. Potapova EV, Seryogina ES, Dremmin VV, et al. Laser speckle contrast imaging of blood microcirculation in pancreatic tissues during laparoscopic interventions. *Quantum Electronics*. 2020;50(1):33. EDN: SLSWCB doi: 10.1070/QEL17207
 61. Goedhart PT, Khalilzade M, Bezemer R, et al. Sidestream Dark Field (SDF) imaging: A novel stroboscopic LED ring-based imaging modality for clinical assessment of the microcirculation. *Optics Express*. 2007;15(23):15101–15114. doi: 10.1364/OE.15.015101
 62. De Bruin AF, Kornmann VN, van der Sloot K, et al. Sidestream dark field imaging of the serosal microcirculation during gastrointestinal surgery. *Colorectal Dis*. 2016;18(3):103–110. doi: 10.1111/codi.13250
 63. Treu CM, Lupi O, Bottino DA, et al. Sidestream dark field imaging: The evolution of real-time visualization of cutaneous microcirculation and its potential application in dermatology. *Arch Dermatol Res*. 2011;303(2):69–78. EDN: FUGKEQ doi: 10.1007/s00403-010-1087-7
 64. Jansen SM, de Bruin DM, Faber DJ, et al. Applicability of quantitative optical imaging techniques for intraoperative perfusion diagnostics: A comparison of laser speckle contrast imaging, side stream dark-field microscopy, and optical coherence tomography. *J Biomed Opt*. 2017;22(8):086004–086004. doi: 10.1117/1.JBO.22.8.086004
 65. Aumann S, Donner S, Fischer J, et al. *Optical coherence tomography (OCT): Principle and technical realization*. In: High resolution imaging in microscopy and ophthalmology: New frontiers in biomedical optics [Internet]. Chapter 3. 2019. Cham (CH): Springer; 2019. doi: 10.1007/978-3-030-16638-0_3
 66. Tian Y, Zhang M, Man H, et al. Study of ischemic progression in different intestinal tissue layers during acute intestinal ischemia using swept-source optical coherence

- tomography angiography. *J Biophoton.* 2024;17(4):e202300382. EDN: KUJMXF doi: 10.1002/jbio.202300382
67. Jansen SM, Almasian M, Wilk LS, et al. Feasibility of optical coherence tomography (OCT) for intra-operative detection of blood flow during gastric tube reconstruction. *Sensors.* 2018;18(5):1331. EDN: VIEGDE doi: 10.3390/s18051331
68. Кандурова К.Ю., Дремин В.В., Жеребцов Е.А., и др. Методы оптической биопсии и их перспективы применения для интраоперационного анализа тканевого метаболизма и микроциркуляции крови в мини-инвазивной хирургии // *Регионарное кровообращение и микроциркуляция.* 2018. Т. 17, № 3. С. 71–79. [Kandurova KY, Dremmin VV, Zhrebtsov EA, et al. Optical biopsy methods and their prospects of application for intraoperative analysis of tissue metabolism and blood microcirculation in minimally invasive surgery. *Region Blood Circulat Microcirculat.* 2018;17(3):71–79]. EDN: YAUORV doi: 10.24884/1682-6655-2018-17-3-71-79
69. Бабкина АС. Лазер-индуцированная флуоресцентная спектроскопия в диагностике тканевой гипоксии (обзор) // *Общая реаниматология.* 2019. Т. 15, № 6. С. 50–61. [Babkina AS. Laser-induced fluorescence spectroscopy in the diagnosis of tissue hypoxia (review). *Obshchaya reanimatologiya = General Reanimatol.* 2019;15(6):50–61]. EDN: DRDCQI doi: 10.15360/1813-9779-2019-6-50-61
70. Dunaev AV, Dremmin VV, Zhrebtsov EA, et al. Individual variability analysis of fluorescence parameters measured in skin with different levels of nutritive blood flow. *Med Engineering Physics.* 2015;37(6):574–583. EDN: UFUZNB doi: 10.1016/j.medengphy.2015.03.011
71. Dremmin V, Sokolovski S, Rafailov E, et al. *In vivo fluorescence measurements of biological tissue viability.* In: Advanced photonics methods for biomedical applications. Chapter: 1. CRC Press; 2023. P. 1–37. doi: 10.1201/9781003228950-1
72. Zhrebtsov E, Zajnulina M, Kandurova K, et al. Machine learning aided photonic diagnostic system for minimally invasive optically guided surgery in the hepatoduodenal area. *Diagnostics.* 2020;10(11):873. EDN: IINXFS doi: 10.3390/diagnostics10110873
73. Захаренко А.А., Беляев М.А., Трушин А.А., и др. Комбинированная оценка жизнеспособности кишки методами лазерной доплеровской флоуметрии и лазерной флуоресцентной спектроскопии // *Регионарное кровообращение и микроциркуляция.* 2021. Т. 20, № 2. С. 70–76. [Zacharenko AA, Belyaev MA, Trushin AA, et al. Combined assessment of intestinal viability using laser doppler flowmetry and laser fluorescence spectroscopy. *Region Blood Circulat Microcirculat.* 2021;20(2):70–76]. EDN: VCUXSY doi: 10.24884/1682-6655-2021-20-2-70-76
74. Дунаев А.В. Мультимодальная оптическая диагностика микроциркуляторно-тканевых систем организма человека: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2022. 440 с. [Dunayev AV. *Modal optical diagnostics of microcirculatory-tissue systems of human organism:* Monograph. Stary Oskol: TNT; 2022. 440 p. (In Russ.)]
75. Cassinotti E, Al-Taher M, Antoniou SA, et al. European Association for Endoscopic Surgery (EAES) consensus on Indocyanine Green (ICG) fluorescence-guided surgery. *Surg Endoscopy.* 2023;37(3):1629–1648. EDN: DOALIV doi: 10.1007/s00464-023-09928-5
76. Nohara K, Takemura N, Ito K, et al. Bowel perfusion demonstrated using indocyanine green fluorescence imaging in two cases of strangulated ileus. *Clin J Gastroenterol.* 2022;15(5):886–889. EDN: RCEIVJ doi: 10.1007/s12328-022-01656-y
77. Nusrath S, Kalluru P, Shukla S, et al. Current status of indocyanine green fluorescent angiography in assessing perfusion of gastric conduit and oesophago-gastric anastomosis. *Int J Surg.* 2024;110(2):1079–1089. EDN: JPOQQR doi: 10.1097/JS9.0000000000000913
78. Беджанян А.Л., Петренко К.Н., Сумбаев А.А., и др. Роль ICG-ангиографии в профилактике несостоятельности колоректальных анастомозов // *Хирургия. Журнал им.* Н.И. Пирогова. 2023. № 9-2. С. 25–32. [Bedzhanyan AL, Petrenko KN, Sumbaev AA, et al. ICG angiography in prevention of colorectal anastomotic leakage. *Zhurnal imeni N.I. Pirogova = N.I. Pirogov Russ J Surg.* 2023;(9-2):25–32]. EDN: UTXIXG doi: 10.17116/hirurgia202309225
79. Сергеев А.Н., Морозов А.М., Чарьев Ю.О., и др. О возможности применения медицинской термографии в клинической практике // *Профилактическая медицина.* 2022. Т. 25, № 4. С. 82–88. [Sergeev AN, Morozov AM, Charyev YuO, et al. On the possibility of using medical thermography in clinical practice. *Russ J Preventive Med.* 2022;25(4):82–88]. EDN: ENVGDT doi: 10.17116/profmed20222504182
80. Bernard V, Staffa E, Mornstein V, et al. Infrared camera assessment of skin surface temperature-effect of emissivity. *Physica Medica.* 2013;29(6):583–591. doi: 10.1016/j.ejmp.2012.09.003
81. Сушков А.И., Мальцева А.П., Рудаков В.С., и др. Применение инфракрасной термографии в области донорства и трансплантации органов: состояние вопроса и первые собственные результаты // *Клиническая и экспериментальная хирургия. Журнал имени академика Б.В. Петровского.* 2021. Т. 9, № 2. С. 96–107. [Sushkov AI, Mal'tseva AP, Rudakov VS, et al. The use of infrared thermography in organ donation and transplantation: State of the issue and own results. *Clin Exp Surg Petrovsky J.* 2021;9(2):96–107]. EDN: LXZZSD doi: 10.33029/2308-1198-2021-9-2-96-107
82. Tattersall GJ. Infrared thermography: A non-invasive window into thermal physiology. *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol.* 2018;202:78–98. EDN: XYWZRD doi: 10.1016/j.cbpa.2016.02.022
83. Repež A, Oroszy D, Arnež ZM. Continuous postoperative monitoring of cutaneous free flaps using near infrared spectroscopy. *J Plast Reconstr Aesthet Surg.* 2008;61(1):71–77. EDN: RRMEYF doi: 10.1016/j.bjps.2007.04.003
84. Park J, Seok HS, Kim SS, et al. Photoplethysmogram analysis and applications: An integrative review. *Front Physiol.* 2022;12:808451. EDN: XVVLXU doi: 10.3389/fphys.2021.808451
85. Kashchenko VA, Zaytsev VV, Ratnikov VA, et al. Intraoperative visualization and quantitative assessment of tissue perfusion by imaging photoplethysmography: Comparison with ICG fluorescence angiography. *Biomed Opt Express.* 2022;13(7):3954–3966. EDN: CUMLWT doi: 10.1364/BOE.462694
86. Kamshilin AA, Zaytsev VV, Lodygin AV, et al. Imaging photoplethysmography as an easy-to-use tool for monitoring changes in tissue blood perfusion during abdominal surgery. *Sci Rep.* 2022;12(1):1143. EDN: HKITED doi: 10.1038/s41598-022-05080-7
87. Machikhin AS, Volkov MV, Khokhlov DD, et al. Exoscope-based videocapillaroscopy system for in vivo skin microcirculation imaging of various body areas. *Biomed Opt Express.* 2021;12(8):4627–4636. EDN: OVLOXZ doi: 10.1364/BOE.420786
88. Barberio M, Benedicenti S, Pizzicannella M, et al. Intraoperative guidance using hyperspectral imaging: A review for surgeons. *Diagnostics.* 2021;11(11):2066. EDN: SMCGWL doi: 10.3390/diagnostics11112066
89. Pham QT, Liou NS. The development of on-line surface defect detection system for jujubes based on hyperspectral images. *Comp Electron Agricult.* 2022;194(7):106743. EDN: KYUDBE doi: 10.1016/j.compag.2022.106743
90. Zhrebtsov EA, Dremmin VV, Popov AP, et al. Hyperspectral imaging of human skin aided by artificial neural networks. *Biomed Opt Express.* 2019;10(7):3545–3559. EDN: ZHSMJR doi: 10.1364/BOE.10.003545
91. Dremmin VV, Marcinkevics Z, Zhrebtsov EA, et al. Skin complications of diabetes mellitus revealed by polarized hyperspectral imaging and machine learning. *IEEE Trans Med Imaging.* 2021;40(4):1207–1216. EDN: CFLBP doi: 10.1109/TMI.2021.3049591
92. Dremmin VV, Zhrebtsov EA, Popov AP, et al. *Hyperspectral imaging of diabetes mellitus skin complications.* In: Biomedical

- Photonics for Diabetes Research. CRC Press; 2022. P. 177–195. doi: 10.1201/9781003112099-8
93. Mehdorn M, Köhler H, Rabe SM, et al. Hyperspectral imaging (HSI) in acute mesenteric ischemia to detect intestinal perfusion deficits. *J Surg Res.* 2020;254:7–15. doi: 10.1016/j.jss.2020.04.001
 94. Zhang L, Huang D, Chen X, et al. Visible near-infrared hyperspectral imaging and supervised classification for the detection of small intestinal necrosis tissue in vivo. *Biomed Opt Express.* 2022;13(11):6061–6080. doi: 10.1364/boe.470202
 95. Zhang L, Huang D, Chen X, et al. Discrimination between normal and necrotic small intestinal tissue using hyperspectral imaging and unsupervised classification. *J Biophoton.* 2023;16(7):e202300020. EDN: DRAJBG doi: 10.1002/jbio.202300020
 96. Адаменков Н.А., Мамошин А.В., Дремин В.В., и др. Оценка перфузии кишечной стенки в условиях ишемии с применением метода гиперспектральной визуализации // *Оперативная хирургия и клиническая анатомия.* 2024. Т. 8, № 1. С. 5–13. [Adamenkov NA, Mamoshin AV, Dremmin VV, et al. Assessment of intestinal wall perfusion under ischemic conditions using hyperspectral imaging. *Russ J Operative Surg Clin Anatomy.* 2024;8(1):5–13]. EDN: FKQIQR doi: 10.17116/operhirurg202480115

ОБ АВТОРАХ

Автор, ответственный за переписку:

Адаменков Никита Алексеевич;

адрес: Россия, 302028, Орёл, б-р Победы, д. 10;

ORCID: 0000-0002-0238-2941;

eLibrary SPIN: 3348-8250;

e-mail: nikita-ad@mail.ru

Соавторы:

Мамошин Андриан Валерьевич, д-р мед. наук, доцент;

ORCID: 0000-0003-1787-5156;

eLibrary SPIN: 2553-1200;

e-mail: dr.mamoshin@mail.ru

Дрёмин Виктор Владимирович, канд. техн. наук, доцент;

ORCID: 0000-0001-6974-3505;

eLibrary SPIN: 8990-5396;

e-mail: dremin_viktor@mail.ru

Потапова Елена Владимировна, канд. техн. наук, доцент;

ORCID: 0000-0002-9227-6308;

eLibrary SPIN: 9315-8770;

e-mail: potapova_ev_ogu@mail.ru

Шуплецов Валерий Витальевич;

ORCID: 0009-0006-0024-8518;

eLibrary SPIN: 5964-9055;

e-mail: valery.shupletsov@bmecenter.ru

Иванов Юрий Викторович, д-р мед. наук, профессор;

ORCID: 0000-0001-6209-4194;

eLibrary SPIN: 3240-4335;

e-mail: ivanovkb83@yandex.ru

Панченков Дмитрий Николаевич, д-р мед. наук, профессор;

ORCID: 0000-0001-8539-4392;

eLibrary SPIN: 4316-4651;

e-mail: dnpanchenkov@mail.ru

Дунаев Андрей Валерьевич, д-р техн. наук, доцент;

ORCID: 0000-0003-4431-6288;

eLibrary SPIN: 8128-3093;

e-mail: dunaev@bmecenter.ru

AUTHORS' INFO

The author responsible for the correspondence:

Nikita A. Adamenkov;

address: 10 Pobedy blvd, 302028 Orel, Russia;

ORCID: 0000-0002-0238-2941;

eLibrary SPIN: 3348-8250;

e-mail: nikita-ad@mail.ru

Co-authors:

Andrian V. Mamoshin, MD, PhD, Associate Professor;

ORCID: 0000-0003-1787-5156;

eLibrary SPIN: 2553-1200;

e-mail: dr.mamoshin@mail.ru

Viktor V. Dremmin, PhD, Associate Professor;

ORCID: 0000-0001-6974-3505;

eLibrary SPIN: 8990-5396;

e-mail: dremin_viktor@mail.ru

Elena V. Potapova, PhD, Associate Professor;

ORCID: 0000-0002-9227-6308;

eLibrary SPIN: 9315-8770;

e-mail: potapova_ev_ogu@mail.ru

Valery V. Shupletsov;

ORCID: 0009-0006-0024-8518;

eLibrary SPIN: 5964-9055;

e-mail: valery.shupletsov@bmecenter.ru

Yuri V. Ivanov, MD, PhD, Professor;

ORCID: 0000-0001-6209-4194;

eLibrary SPIN: 3240-4335;

e-mail: ivanovkb83@yandex.ru

Dmitry N. Panchenkov, MD, PhD, Professor;

ORCID: 0000-0001-8539-4392;

eLibrary SPIN: 4316-4651;

e-mail: dnpanchenkov@mail.ru

Andrey V. Dunaev, PhD, Associate Professor;

ORCID: 0000-0003-4431-6288;

eLibrary SPIN: 8128-3093;

e-mail: dunaev@bmecenter.ru