

Возможности оценки перфузии тканей в абдоминальной хирургии: интеграция в систему интраоперационных контрольных точек безопасности

© В.А. КАШЕНКО^{1,2}, А.А. КАМШИЛИН^{1,3}, В.В. ЗАЙЦЕВ^{1,3}, Р.В. ПАВЛОВ^{1,2}, А.А. БОГАТИКОВ^{1,2},
А.В. ЛОДЫГИН^{1,2}, О.Б. ГУЩИНА^{1,2}, Н.А. БОЙКО^{1,2}

¹ФГБУ «Северо-Западный окружной научно-клинический центр им. Л.Г. Соколова федерального медико-биологического агентства», Санкт-Петербург, Россия;

²ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», Санкт-Петербург, Россия;

³ФГБУН «Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук», Владивосток, Россия

Резюме

Цель исследования. Анализ возможности интеграции методик оценки перфузии тканей (ICG-перфузии и визуализирующей фотоплетизмографии — вФПГ) в систему интраоперационных контрольных точек лапароскопических вмешательств с реконструктивным компонентом, предусматривающих формирование межкишечного анастомоза.

Материалы и методы. Количественная оценка ICG флуоресценции и в ФПГ использованы во время 8 лапароскопически ассистированных вмешательств: гастрэктомия при раке желудка (тотальная — 2 и дистальная — 1) и колоректальные резекции (левосторонние коло- ректальные резекции — 4 и правосторонняя гемиколэктомия — 1).

Результаты. Представлены 4 этапа для оценки тканевой перфузии: исходная оценка, до пересечения кишки, до анастомозирования и оценка анастомоза. С точки зрения значимости принятия клинических решений наибольшее значение имеет этап «до пересечения» в связи с простотой переноса уровня резекции в оптимальную зону тканевой перфузии.

Заключение. Интеграции методик оценки перфузии тканей в систему интраоперационных контрольных точек возможна и перспективна.

Ключевые слова: тканевая перфузия, индоцианин зеленый ICG, флуоресцентная ангиография, визуализирующая фотоплетизмография, безопасная хирургия.

Информация об авторах:

Кашенко В.А. — e-mail: surg122@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4958-5850>

Камшилин А.А. — e-mail: alexei.kamshilin@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2506-9736>

Зайцев В.В. — <https://orcid.org/0000-0003-3366-8376>

Павлов Р.В. — <https://orcid.org/0000-0003-2187-2388>

Богатиков А.А. — <https://orcid.org/0000-0002-2510-2308>

Лодыгин А.В. — <https://orcid.org/0000-0002-5535-6915>

Гущина О.Б. — <https://orcid.org/0009-0001-3279-3813>

Бойко Н.А. — <https://orcid.org/0000-0003-4509-4226>

Автор, ответственный за переписку: Кашенко В.А. — e-mail: surg122@yandex.ru

Как цитировать:

Кашенко В.А., Камшилин А.А., Зайцев В.В., Павлов Р.В., Богатиков А.А., Лодыгин А.В., Гущина О.Б., Бойко Н.А. Возможности оценки перфузии тканей в абдоминальной хирургии: интеграция в систему интраоперационных контрольных точек безопасности. *Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова*. 2023;9 вып. 2:33–42. <https://doi.org/10.17116/hirurgia202309233>

Possibilities of tissue perfusion assessment in abdominal surgery: integration into the intraoperative system of safety control points

© V.A. KASHCHENKO^{1,2}, A.A. KAMSHILIN^{1,3}, V.V. ZAITSEV^{1,3}, R.V. PAVLOV^{1,2}, A.A. BOGATIKOV^{1,2}, A.V. LODIGIN^{1,2},
O.B. GUSCHINA^{1,2}, N.A. BOYKO^{1,2}

¹North-Western District Scientific and Clinical Center named after L.G. Sokolov of the Federal Medical and Biological Agency, St. Petersburg, Russia;

²St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia;

³Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

Abstract

Objective. To evaluate the possibility of integrating tissue perfusion assessment techniques (ICG perfusion and imaging photoplethysmography — iPPG) into the system of intraoperative control points of laparoscopic interventions with a reconstructive component.

Materials and methods. Quantitative assessment of ICG fluorescence and iPPG were used during 8 laparoscopically assisted interventions: gastrectomy for gastric cancer (total — 2 and distal — 1) and colorectal resections (left-sided colorectal resections — 4 and right hemicolectomy — 1).

Results. Four stages are presented for the assessment of tissue perfusion: initial assessment, before intestine transection, before anastomosis formation, and evaluation of anastomosis. From the point of view of the significance of clinical decision-making, the «before intestine transection» stage is of great importance, due to the ease of transferring the resection level to the optimal tissue perfusion zone.

Conclusion. Integration of tissue perfusion assessment techniques into the system of intraoperative checkpoints is possible and promising.

Keywords: tissue perfusion, indocyanine green ICG, fluorescence angiography, imaging photoplethysmography (iPPG), safe surgery.

Information about the authors:

Kashchenko V.A. — email: surg122@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4958-5850>

Kamshilin A.A. — email: alexei.kamshilin@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2506-9736>

Zaitsev V.V. — <https://orcid.org/0000-0003-3366-8376>

Pavlov R.V. — <https://orcid.org/0000-0003-2187-2388>

Bogatikov A.A. — <https://orcid.org/0000-0002-2510-2308>

Lodygin A.V. — <https://orcid.org/0000-0002-5535-6915>

Gushchina O.B. — <https://orcid.org/0009-0001-3279-3813>

Boyko N.A. — <https://orcid.org/0000-0003-4509-4226>

Corresponding author: Kashchenko V.A. — email: surg122@yandex.ru

To cite this article:

Kashchenko VA, Kamshilin AA, Zaitsev VV, Pavlov RV, Bogatikov AA, Lodygin AV, Gushchina OB, Boyko NA. Possibilities of tissue perfusion assessment in abdominal surgery: integration into the intraoperative system of safety control points. *Pirogov Russian Journal of Surgery = Khirurgiya. Zhurnal im. N.I. Pirogova*. 2023;9 вып 2:33–42. (In Russ.). <https://doi.org/10.17116/hirurgia202309233>

Введение

В последние годы наблюдается возрастающий интерес к стратегии предотвращения неблагоприятных событий в хирургии. Хирургия становится все более сложной специальностью с возрастающим высокотехнологичным компонентом. При этом стандартизация процессов видится важным компонентом системы обеспечения качества и безопасности оперативных вмешательств.

В 2022 г. под эгидой Российского общества хирургов и Российского общества эндоскопических хирургов стартовал проект «безопасная хирургия», направленный на стандартизацию и улучшение качества и безопасности оперативного приема. Проект включает в себя серию мероприятий, на которых ведущие эксперты предлагают варианты стандартизации техники и проводится голосование для утверждения оптимальных предложений. В рамках мероприятий разрабатываются и предлагаются для обсуждения контрольные точки оперативных вмешательств. Это ключевые этапы, исполнение которых обеспечивает более высокий уровень качества и безопасности оперативного вмешательства.

Оперативные вмешательства с реконструктивным компонентом, предусматривающие формирование анастомозов, являются одними из наиболее сложных вмешательств с высоким риском неблаго-

приятных событий. Несостоятельность анастомоза считается серьезным осложнением во многих областях хирургии, связанных с восстановлением непрерывности желудочно-кишечного тракта. Частота возникновения данного осложнения в колоректальной хирургии встречается в 5,6—11,9%, а летальность при этом достигает 32% [1, 2]. Снижение перфузии тканей кишки в зоне анастомозирования играет важнейшую роль в развитии несостоятельности [2].

Существуют различные факторы, влияющие на перфузию тканей во время операции, например, резекция части органа, сопровождающаяся перевязкой регионарных сосудов, лимфодиссекцией и рассечением брыжейки, или мобилизация органа для перемещения его в другую анатомическую область для формирования анастомоза [1]. Любой из них может нарушить кровообращение и стать фактором риска развития несостоятельности.

Интраоперационная оценка кровоснабжения — важнейший компонент интраоперационного контроля безопасности: если оценка выявляет недостаточную перфузию, хирург может изменить уровень резекции. Для оценки перфузии органов были предложены различные клинические признаки, включая цвет кишки, пульсацию сосудов, кровотечение из тканей и т. д. Однако эти признаки субъективны и могут привести к неправильному толкованию, особенно при висцеральном ожирении или поврежде-

нии серозной оболочки органа вследствие хирургических манипуляций [1].

В последнее время в ряде научных лабораторий проводится активный поиск новых инструментальных методов интраоперационной оценки перфузии. Среди них одним из перспективных для клинического применения считается метод флуоресцентной визуализации с использованием красителя индоцианинового зеленого (ICG) [3].

ICG-флуоресцентная ангиография позволяет оценить индивидуальные особенности сосудистой анатомии, что помогает хирургу выбрать оптимальный уровень резекции в соответствии с анатомией кровоснабжения. Кроме того, данный метод позволяет расширить спектр критериев оценки кровоснабжения кишки, а в некоторых случаях получить не только визуальную оценку сосудистой сети, но и количественное измерение уровня перфузии тканей.

Дополнительными показаниями к проведению флуоресцентной оценки кровоснабжения тканей являются наличие у пациента тяжелых сопутствующих заболеваний (ожирение, сахарный диабет, распространенный атеросклероз), а также особенности самого анастомоза (низкая передняя резекция прямой кишки, резекция селезеночного изгиба, атипичные резекции).

Опубликованные результаты использования ICG-флуоресцентной перфузии свидетельствуют о высокой информативности метода. В исследовании PILLAR II после левосторонних резекций ободочной кишки, включая переднюю резекцию прямой кишки, не было отмечено несостоятельности анастомозов у пациентов, где по результатам ICG-флуоресцентного контроля кровоснабжения был изменен уровень пересечения кишки [3]. По данным систематического анализа установлено, что частота несостоятельности анастомозов в группе с NIR-флуоресцентной оценкой перфузии составила 3,5%, а в группе с обычной визуализацией — 7,4% [4]. При этом уровень резекции был изменен в 10,8% случаев после применения NIR-флуоресценции.

Визуализирующая фотоплетизмография (вФПГ) — это другой оптический метод, при котором обычная видеокамера используется для обнаружения крошечных модуляций, связанных с пульсацией крови в сосудах [5, 6]. Эта методика бесконтактна, чрезвычайно проста и не влияет на гемодинамические процессы в живых органах. Это новый метод, который позволяет улавливать сигналы сердечно-сосудистой системы во внешних слоях кожи [7]. Существенными преимуществами вФПГ являются отсутствие необходимости какой-либо инъекции в кровеносную систему и возможность непрерывного измерения распределения перфузии и его изменения в периодах, практически не ограниченных во времени. Различные исследовательские группы недавно применили вФПГ для мониторинга сосудистых изменений (рас-

ширение или сужение сосудов), вызванных функциональными тестами [8–10]. Эти эксперименты продемонстрировали, что нормализованную амплитуду сигнала фотоплетизмографии можно рассматривать как показатель перфузии. Совсем недавно наша группа продемонстрировала возможность использования вФПГ для оценки изменений кортикального кровотока при открытой нейрохирургии головного мозга [11] и перфузии тканей во время абдоминальной хирургии [12]. Следует отметить, что в обоих случаях оценки интраоперационной перфузии сравнительный анализ с альтернативными методами не проводился из-за отсутствия таких технологий в большинстве клиник. Недавние интраоперационные пилотные эксперименты, проведенные нашей группой, показали, что количественные оценки распределения перфузии, полученные методом вФПГ, хорошо коррелируют с распределениями, измеренными флуоресцентной ICG [13].

Систематизация и тщательная методологическая проработка использования методов оценки перфузии позволит корректно применить технологии и правильно интерпретировать полученные результаты. Мы интегрировали мультимодальную оценку перфузии тканей с использованием двух методов в систему стандартизации оперативных вмешательств на основе выделения ключевых интраоперационных контрольных точек (чекпойнтов).

Цель работы — оценка возможности интеграции методик оценки перфузии тканей (ICG-перфузии и вФПГ) в систему интраоперационных контрольных точек лапароскопических вмешательств с реконструктивным компонентом, предусматривающих формирование межкишечного анастомоза.

Материалы и методы

Работа проведена в Северо-Западном окружном научно-клиническом центре им. Л.Г. Соколова Федерального медико-биологического агентства в соответствии с этическими стандартами, представленными в Хельсинкской декларации 2013 г. Разрешение на проведение исследования было получено через Комитет по этике Северо-Западного окружного научно-клинического центра, решение №7 от 20 мая 2021 г. Все пациенты и/или их законные представители предоставили информированное согласие в письменной форме на участие в исследовании и на публикацию идентифицирующей информации/изображений в онлайн-журнале с открытым доступом.

В исследование включены 8 пациентов. Сочетанную количественную ICG-флуоресцентную визуализацию и вФПГ использовали для количественной экстракорпоральной оценки перфузии органов в 8 лапароскопически ассистированных вмеша-

тельств в абдоминальной хирургии: гастрэктомия при раке желудка (тотальная — 2 и дистальная — 1) и колоректальные резекции (левосторонние колоректальные резекции — 4 и правосторонняя гемиколэктомия — 1).

Измерения перфузии проводились в отношении участка кишки, планируемого для формирования анастомоза. В ходе реконструкции после гастрэктомии измеряемый объект был представлен петлей тощей кишки в 20–30 см от связки Третца. В случае резекции левых отделов измерения проводились в отношении кишки, расположенной в 10–20 см проксимальнее опухоли. При правосторонней гемиколэктомии оценивали перфузию поперечной ободочной кишки и подвздошной кишки на уровне предполагаемой резекции.

Оборудование

Для количественной и качественной оценки перфузии тканей параллельно использовали два метода: ICG-флуоресцентную перфузию и вФПГ.

Количественную оценку флуоресцентного свечения проводили с помощью системы SPY (Stryker, США), качественную и полуколичественную оценку осуществляли с использованием систем SPY-PHI (открытая визуализация) (Stryker, США), а также Rubina (KARL STORZ, Германия) (лапароскопическая визуализация).

В качестве флюорофора использовали индоцианин зеленый (ICG).

Обработка данных флуоресцентной ангиографии ICG выполнялась с помощью программного обеспечения, реализованного в системе SPY. Для анализа

был выбран один из кадров, в котором флуоресценция в тканях достигла максимума. В этой системе было выбрано несколько небольших областей для количественной оценки перфузии. После определения максимальной перфузии среди этих выбранных областей было рассчитано распределение относительной перфузии (в процентах) и отображено на исходном изображении.

Система вФПГ была разработана и изготовлена авторами этой статьи. Система включала цифровую камеру GigE Smartek Vision GC1391MP со светочувствительным датчиком Sony ICX267, обладающую максимальным эффективным разрешением 1360×1024 пикселей. В камере использовался объектив KOWA LM5NCL с с-образным креплением, оснащенный переменной регулируемой диафрагмой $f=1,4–16$, минимальным расстоянием фокусировки 18 см, углом обзора 89×67 и возможностью плавной ручной регулировки фокуса.

Камера была подключена к компьютеру под управлением операционной системы Windows 10 (Microsoft corp., США). Используя штативную подставку крана, модуль камеры-осветителя был размещен таким образом, чтобы свет падал нормально на поверхность исследуемого органа. Установка модуля вФПГ не нарушила стерильность рабочего места в операционной (рис. 1).

Параметры камеры были настроены, и изображения были сняты с помощью программного обеспечения, разработанного в нашей группе с использованием библиотеки программного обеспечения, предоставляемой производителем камеры. Камера записывала монохромные изображения в несжатом (без потерь) формате глубины 8 бит с частотой 39 кадров в секунду.

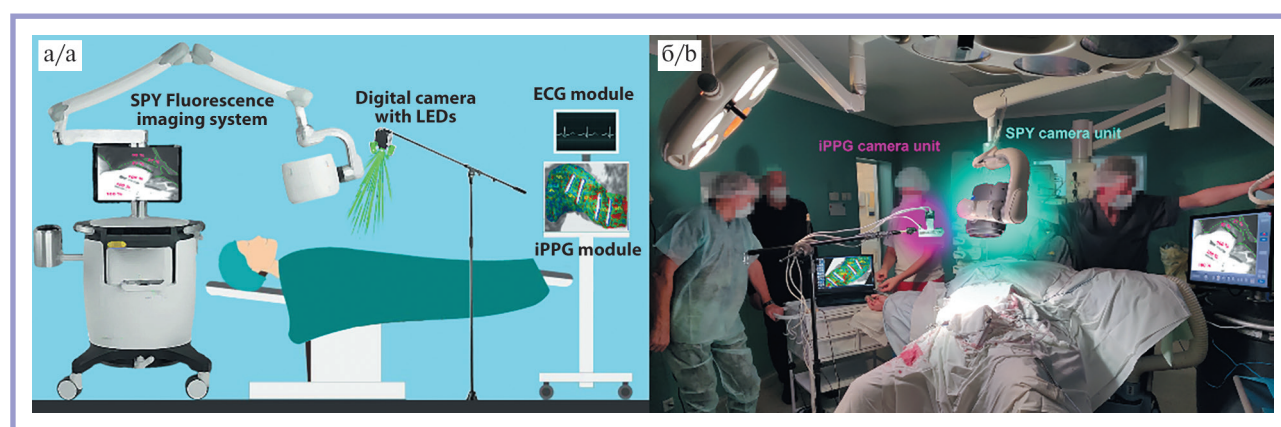


Рис. 1. Установка для интраоперационного сравнительного мониторинга перфузии тканей.

а — схема экспериментальной установки; б — фотография операционной во время исследования. Блок iPPG-камеры выделен пурпурным цветом, в то время как блок ICG — голубым. Модули электрокардиография (ЭКГ) и iPPG обеспечивают синхронную запись видеок кадров и ЭКГ.

Fig. 1. Installation for intraoperative comparative monitoring of tissue perfusion.

а — scheme of the experimental setup; б — photograph of the operating room during the study. The iPPG camera block is highlighted in magenta, while the ICG block is highlighted in cyan. ECG and iPPG modules provide synchronous recording of video frames and ECG.

Для углубленного выявления сигнала, связанного с сердечной деятельностью [20], была организована запись ЭКГ одновременно и синхронно с видеокдрами. С этой целью был использован электронный электрокардиограф (КАП-01 «Кардиотехника-ЭКГ», ООО «Инкарт», Россия), который позволяет записывать ЭКГ с шестью отведениями с частотой дискретизации 1 кГц.

Продолжительность видеозаписи обычно составляла от 40 до 120 с, в зависимости от перистальтической активности кишечника. Записанные кадры с разрешением 752×480 пикселей непрерывно сохранялись в персональном компьютере. После записи эти кадры обрабатывались в автономном режиме с помощью специального программного обеспечения, реализованного на платформе MATLAB (MathWorks Inc., США).

Обе системы измеряли перфузию последовательно с задержкой между измерениями 10–30 с. Из-за разницы как в углах обзора, так и в объективах камер систем, пространственное соответствие положения областей для оценки перфузии выбиралось вручную.

Интраоперационные контрольные точки оценки перфузии

В работе представлены 4 этапа для оценки тканевой перфузии: исходная оценка, до пересечения

кишки, до анастомозирования и оценка анастомоза. С точки зрения значимости принятия клинических решений наибольшее значение имеет этап «до пересечения».

Результаты

1. Исходная оценка

Исходная оценка тканевой перфузии может быть выполнена как открытым, так и лапароскопическим методом. На **рис. 2** представлена оценка перфузии петли кишки с использованием вФПГ до начала диссекции брыжейки.

В случае лапароскопии целесообразно маркировать заинтересованную область органа. Однако, если ключевой этап оценки («до пересечения кишки») планируется выполнить экстракорпорально, целесообразно и первый этап выполнить в открытом варианте. Дело в том, что извлечение органа из брюшной полости может существенно изменить параметры кровообращения, что нарушит правильную интерпретацию всего случая.

Так поисковый этап оценки перфузии ориентирует хирурга в отношении стратегии подготовки петли перед скелетизацией. Обычно на этом этапе отсутствуют существенные градиенты перфузии, и хирургу важно получить общую информацию о том, что пер-

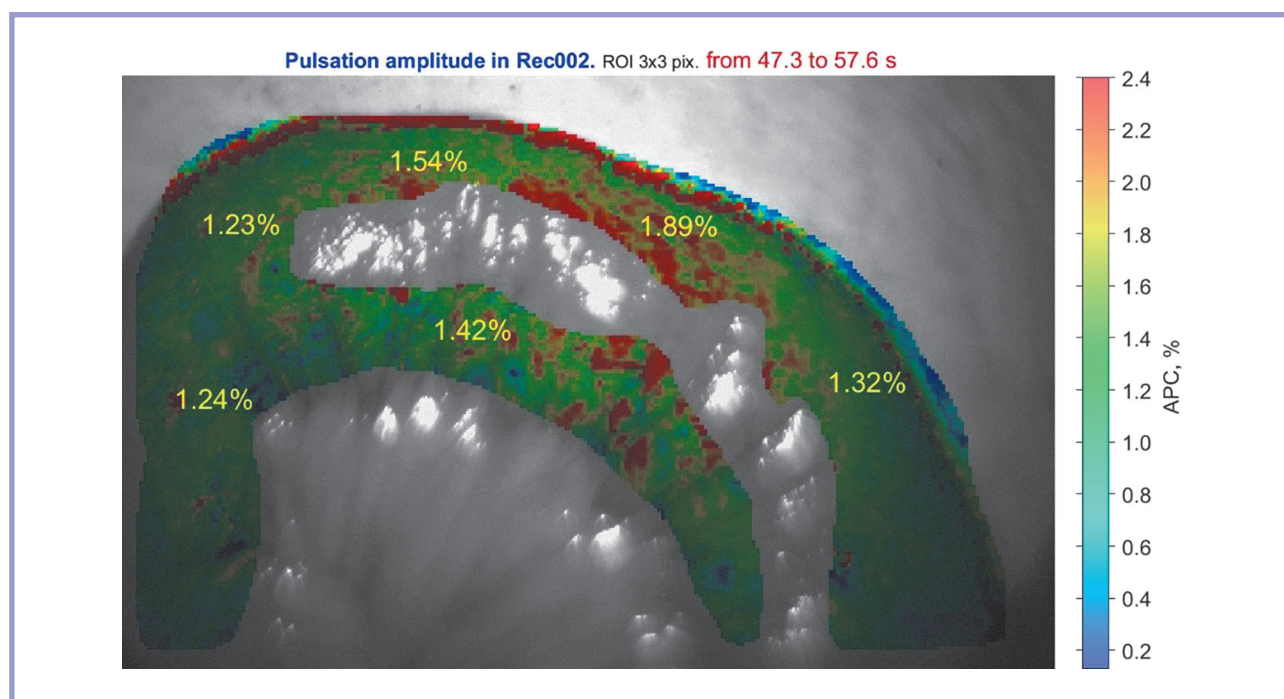


Рис. 2. Фото фотоплетизмографической оценки тощей кишки на этапе реконструкции после гастрэктомии.

Чекпойнт «исходная оценка» методом вФПГ. Определяется равномерное распределение перфузионных показателей во всех отделах измерения.

Fig. 2. Photo of a photoplethysmographic assessment of the jejunum at the stage of reconstruction after gastrectomy.

Checkpoint «initial estimate» by the WFI method. A uniform distribution of perfusion parameters in all measurement departments is determined.



Рис 3. Интраоперационная фотография экстракорпорального этапа резекции сигмовидной кишки и полуколичественной оценки перфузии с использованием ICG-флуоресцентной системы (SPY-PHI).

Контрольная точка — «до пересечения». Оранжевый цвет отражает очень высокую перфузию; синий — хорошую; серый — отсутствие кровообращения. Определяется четкая линия демаркации.

Fig. 3. Intraoperative photograph of the extracorporeal sigmoid colon resection and semi-quantitative perfusion assessment using the ICG fluorescent system (SPY-PHI).

The control point is «before the intersection». Orange color reflects very high perfusion; blue — good; gray — lack of blood circulation. A clear line of demarcation is defined.

фузия достаточная и можно приступать к формированию компонентов будущего анастомоза.

2. Чекпойнт до пересечения

Это наиболее значимый этап, который позволяет определить, а при необходимости и своевременно изменить уровень резекции. Он проводится после завершения диссекции и скелетизации, непосредственно перед пересечением кишки.

На **рис. 3 и 4** представлены полуколичественная и количественная оценка флуоресцентной перфузии на этапе «до пересечения». Оба метода демонстрируют оптимальную зону для пересечения кишки. Однако количественный метод более информативен в отношении степени снижения перфузии по мере приближения к зоне деваскуляризации.

Распределение перфузии, оцененное при параллельном использовании систем ICG-флуоресценции (SPY) и вФПГ, показано на **рис. 5, 6, в** соответственно. Как видно на **рис. 5**, оба метода визуализации показали, что перфузия уменьшилась по направлению к предполагаемой линии резекции. Таким образом, высокий градиент между перфузией в благоприятных и неблагоприятных зонах и высокие показатели перфузии тканей

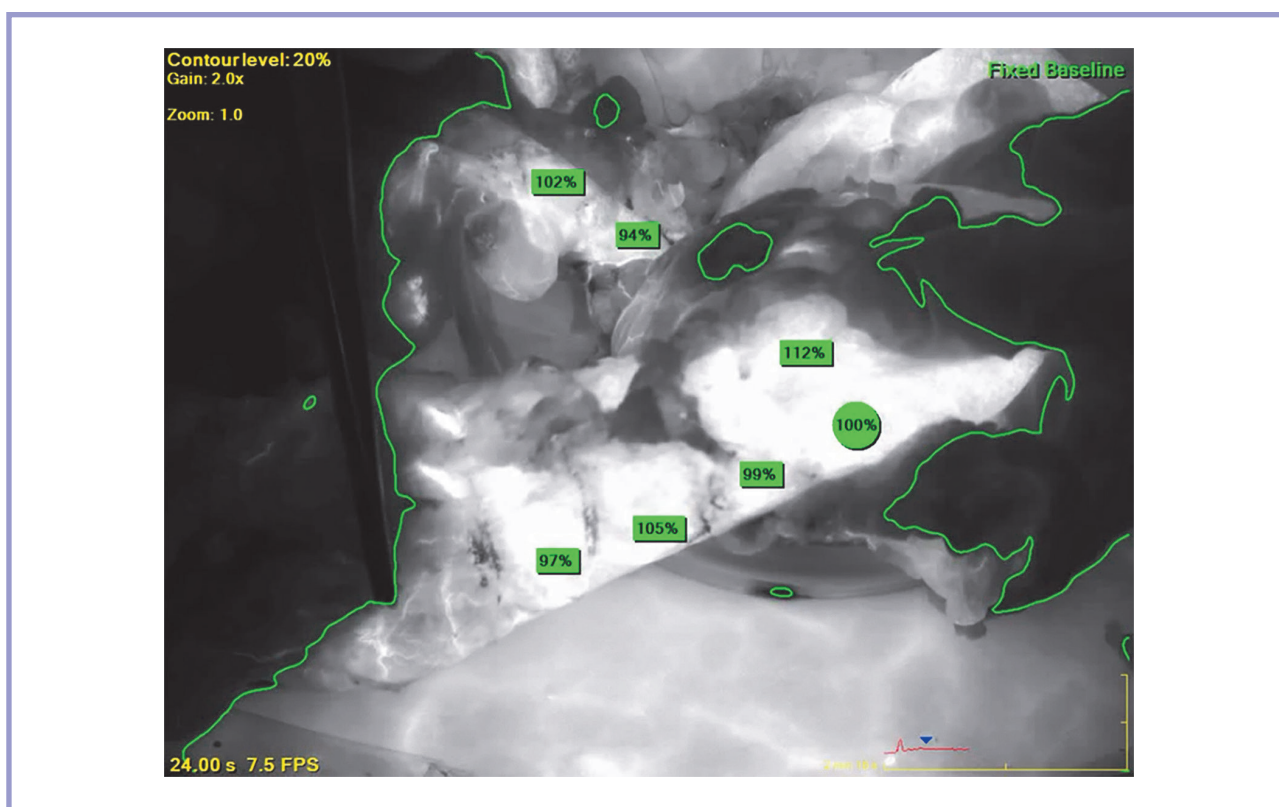


Рис. 4. Интраоперационная фотография экстракорпорального этапа резекции сигмовидной кишки и количественной оценки перфузии с использованием ICG-флуоресцентной системы (SPY).

Контрольная точка — «до пересечения». За 100% принято максимальное свечение наиболее хорошо кровоснабжаемого участка кишки. На уровне пинцета определяется четкая зона снижения интенсивности свечения.

Fig. 4. Intraoperative photograph of the extracorporeal sigmoid colon resection and perfusion quantification using the ICG fluorescent system (SPY).

The control point is «before the intersection». For 100%, the maximum luminescence of the most well-perfused area of the intestine was taken. At the level of the tweezers, a clear zone of decrease in the intensity of the glow is determined.

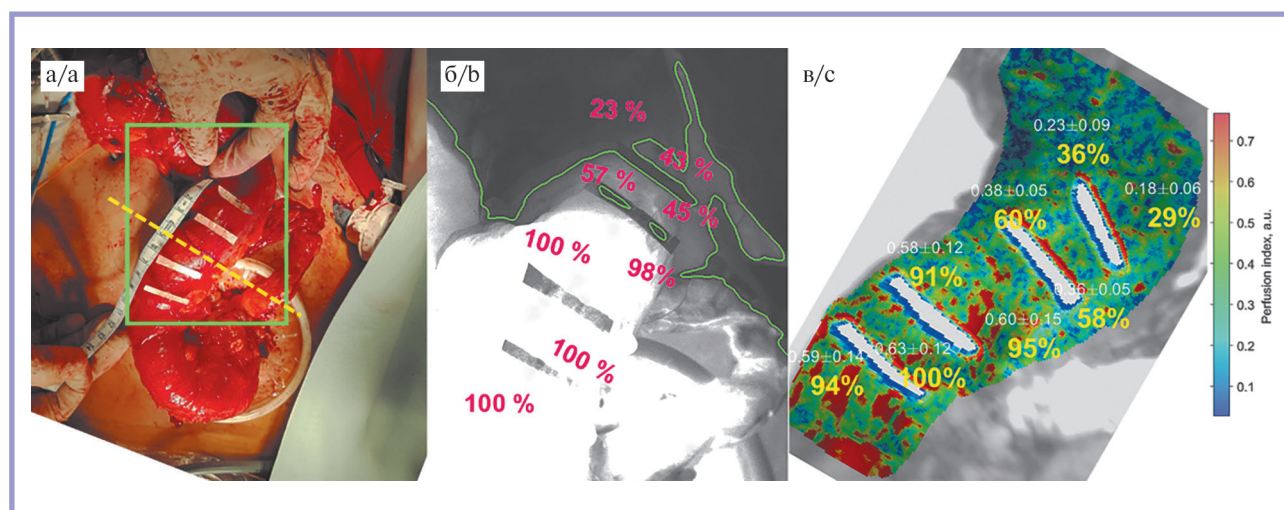


Рис. 5. Интраоперационная фотография экстракорпорального этапа резекции сигмовидной кишки и количественной оценки перфузии с использованием ICG-флуоресцентной системы и фотоплетизмографии.

Контрольная точка — «до пересечения». а — цветная фотография этапа; б — ICG-флуоресценция (SPY); в — вФПГ.

Fig. 5. Intraoperative photograph of the extracorporeal stage of sigmoid colon resection and perfusion quantification using the ICG fluorescent system and photoplethysmography.

The control point is «before the intersection». а — color photograph of the stage; б — ICG fluorescence (SPY); в — vFIG.

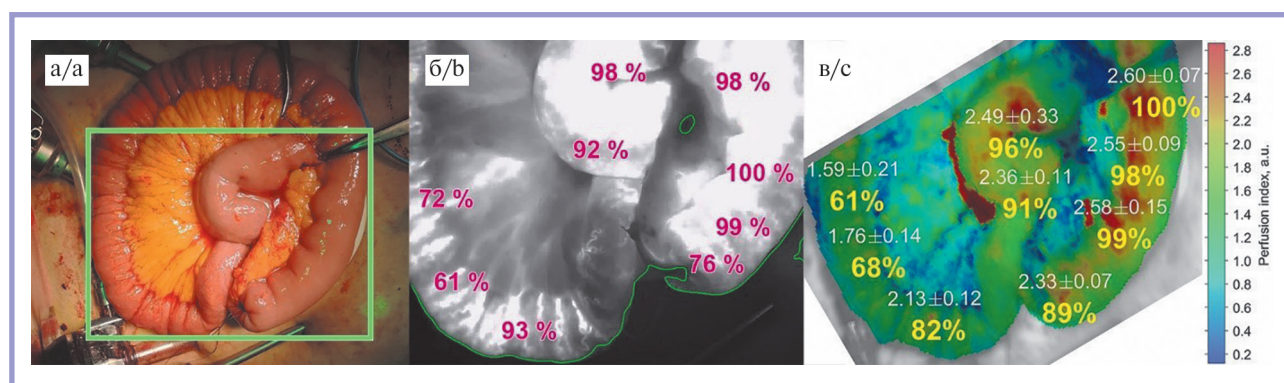


Рис. 6. Интраоперационная фотография экстракорпорального этапа реконструкции по Ру после лапароскопической тотальной гастрэктомии и количественная оценка перфузии с использованием ICG флуоресцентной системы (SPY) и фотоплетизмографии. Контрольная точка — «до анастомозирования».

а — цветная фотография этапа; б — ICG-флуоресценция; в — фотоплетизмография.

Fig. 6. Intraoperative photograph of the extracorporeal Roux-en-Y reconstruction after laparoscopic total gastrectomy and perfusion quantification using the ICG fluorescent system (SPY) and photoplethysmography. The control point is «before anastomosis».

а — color photograph of the stage; б — ICG fluorescence; в — photoplethysmography.

в области предполагаемой линии резекции дали дополнительный аргумент хирургу в правильном выборе уровня рассечения кишки. Распределения перфузии, полученные обоими методами, показывают высокий коэффициент корреляции между ними: $r=0,89$, $p=0,003$. Если выбранный ранее уровень резекции находится в зоне плохого кровоснабжения, то он перемещается в зону наибольшей флуоресценции (наилучшей перфузии).

3. Контрольная точка «до анастомозирования»

После пересечения кишки и подготовки ее к анастомозированию может понадобиться контроль перфузии кишки непосредственно перед формировани-

ем анастомоза. Целесообразность оценки перфузии на этом этапе определяется возникшими изменениями параметров кровообращения в органе. Например, потребовалась дополнительная диссекция брыжейки кишки или возникли сомнения при перемещении петли в другую анатомическую позицию, появились видимые признаки нарушения питания органа и др. При правильно подготовленной кишке перфузионные показатели будут соответствовать таковым для хорошо перфузируемых участков кишки прошлого этапа, однако существенных градиентов быть не должно (**рис. 6**). Появление последних может свидетельство-

вать о риске нарушения кровоснабжения в анализируемом участке кишки.

Пример визуализации перфузии на этапе «до анастомозирования» для дистальной лапароскопической резекции желудка по поводу рака антрального отдела показан на **рис. 6**. После этапа резекции предварительно подготовленную алиментарную и билио-

панкреатическую петли экстракорпорально вывели наружу через центральную минилапаротомию. Визуализацию кровоснабжения проводили для контроля перфузии уже сформированных петель перед формированием Ру анастомоза. По данным оценки флуоресцентного свечения, перфузия в билиопанкреатической петле в области предлагаемого анастомоза со-

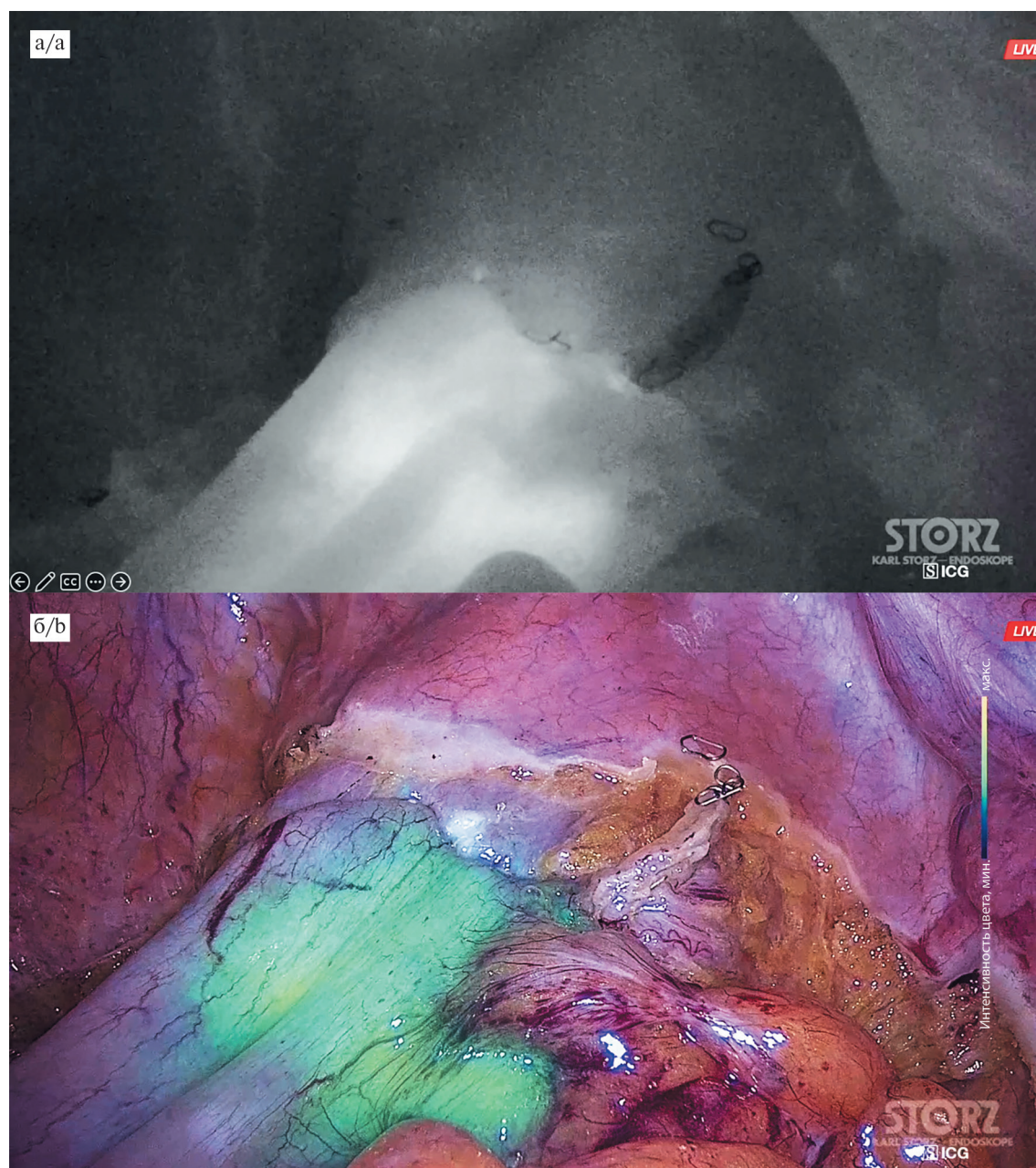


Рис. 7. Фото этапа лапароскопической резекции сигмовидной кишки после формирования сигморектоанастомоза. Качественная оценка перфузии с использованием ICG-флуоресцентного метода.

Fig. 7. Photo of the stage of laparoscopic resection of the sigmoid colon after the formation of sigmorectoanastomosis. Qualitative assessment of perfusion using ICG-fluorescent method.

ставляла от 92 до 98%, в то время как в алиментарной петле — от 76 до 100%. вФПГ выявила сходное распределение относительной перфузии (91—96% и 89—100% в соответствующих областях) и высокую корреляцию с данными флуоресцентной оценки: $r=0,85$, $p=0,003$. Небольшое снижение перфузии в концевой зоне пищеварительной петли можно объяснить краевым расположением участка и инвагинацией линии сшивания, которая деформирует ткани и изменяет их натяжение.

4. Заключительный этап оценки перфузии «после анастомозирования» (рис. 7).

Это второй по значимости чекпойнт после этапа «до резекции». Следует отметить некоторые ограничения в осуществлении данного этапа. Поскольку большинство операций выполняется лапароскопически, чаще всего для измерения параметров перфузии требуется лапароскопическая система. Однако даже в том случае, когда операция проводится открытым методом, наиболее рискованные анастомозы, такие как при низкой передней резекции или после гастрэктомии с резекцией абдоминального отдела пищевода, могут располагаться в анатомически малодоступных для измерения зонах. В клинике мы широко используем лапароскопический метод для оценки ICG-флуоресцентной перфузии. Перспективным является и использование вФПГ лапароскопа.

Перфузионные показатели данного этапа также характеризуются равномерным распределением и отсутствием существенных градиентов. Вместе с тем в зоне стейплерных линий отчетливо определяются зоны гипоперфузии, которых избежать практически невозможно.

При оценке послеоперационного периода признаков несостоятельности не возникло ни в одном случае.

Обсуждение

Правильное применение современных технологий является залогом максимальной реализации их потенциала. В представленной работе сделана попытка интегрировать две методики оценки перфузии тканей в систему интраоперационных контрольных точек. ICG-флуоресцентная визуализация остается наилучшим эталонным методом оценки перфузии. Понятная логика восприятия информации, которая отчетливо напоминает контрастную ангиографию, характеризует отчетливые преимущества метода. Возможность полуколичественной и количественной оценки еще больше повышает ценность флуоресцентной визуализации. Требуются дальнейшие исследования, чтобы определить критерии хорошей и безопасной перфузии и показания к изменению уровня резекции. Вместе с тем зависимость от внутривенного введения флюорофора не позволяет использовать методику для продленного мониторинга. Кроме

того, каждое последующее измерение наслаивается на фон предшествующего, что затрудняет интерпретацию данных. Все вышеперечисленное определяет недостаточную привлекательность метода для многократных измерений перфузии. Обычно выбирается ключевой этап оценки перфузии для принятия решения об уровне пересечения кишки.

Вышеперечисленные недостатки компенсируются включением в мультимодальную программу фотоплетизмографии, которая представляет собой уникальную бесконтрастную методику оценки перфузии тканей. Особенности метода позволяют оценивать перфузию в режиме перманентного мониторинга, что очень привлекательно для использования оценки параметров кровотока на различных этапах реконструкции. Однако информация, предоставляемая в результате использования фотоплетизмографии, несколько сложнее для хирургической оценки и принятия хирургических решений. Метод отражает пульсативность поверхностных капилляров, а фотоплетизмографические показатели имеют более широкий диапазон колебаний. Вместе с тем наши предшествующие работы показали хорошую корреляцию между параметрами флуоресцентной визуализации и фотоплетизмографией [12, 13]. Все вышеперечисленное определяет перспективы сочетанного использования обоих методов в рамках мультимодальной системы оценки перфузии, при которой фотоплетизмография играет роль мониторинга, а ICG-флуоресцентная визуализация — экспертной подтверждающей оценки ключевых этапов. Одной из наиболее важных ключевых контрольных точек является этап принятия решения об уровне пересечения кишки. Полученная информация может определить своевременное изменение уровня пересечения, что позволит избежать формирования анастомоза с плохо перфузируемым участком кишки. Вместе с тем возможность интеграции фотоплетизмографии в лапароскопические системы создает перспективы постоянного информационного канала о состоянии перфузии тканей во время операции, что определит новый уровень хирургической безопасности лапароскопических вмешательств.

Заключение

Внедрение новых технологий должно интегрироваться в надежную и отработанную систему хирургической безопасности. Первостепенное значение для интраоперационного контроля качества и безопасности оперативных вмешательств имеет система ключевых интраоперационных контрольных точек или чекпойнтов. Современные технологии оценки перфузии тканей (ICG-флуоресцентная диагностика и фотоплетизмография) позволяют объективизировать данные, что создает перспективы улучшения

интраоперационной системы принятия хирургических решений и профилактики неблагоприятных событий, представляя новый уровень управления хирургическими рисками.

Таким образом, направление стандартизации оперативных вмешательств, разработки ключевых интра-

операционных контрольных точек и использование навигационных технологий являются важными элементами обеспечения хирургической безопасности.

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interest.**

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Karliczek A, Harlaar NJ, Zeebregts CJ, Wiggers T, Baas PC, van Dam GM. Surgeons lack predictive accuracy for anastomotic leakage in gastrointestinal surgery. *International Journal of Colorectal Disease*. 2009;24(5):569-576. <https://doi.org/10.1007/s00384-009-0658-6>
2. van Genderen ME, Paauwe J, de Jonge J, van der Valk RJ, Lima A, Bakker J, van Bommel J. Clinical assessment of peripheral perfusion to predict postoperative complications after major abdominal surgery early: a prospective observational study in adults. *Critical Care*. 2014;18(3):R114. <https://doi.org/10.1186/cc13905>
3. Jafari MD, Wexner SD, Martz JE, McLemore EC, Margolin DA, Sherwinter DA, Lee SW, Senagore AJ, Phelan MJ, Stamos MJ. Perfusion assessment in laparoscopic left-sided/anterior resection (PILLAR II): a multi-institutional study. *Journal of the American College of Surgeons*. 2015;220(1):82-92.e1. <https://doi.org/10.1016/j.jamcollsurg.2014.09.015>
4. Blanco-Colino R, Espin-Basany E. Intraoperative use of ICG fluorescence imaging to reduce the risk of anastomotic leakage in colorectal surgery: a systematic review and meta-analysis. *Techniques in Coloproctology*. 2018;22(1):15-23. <https://doi.org/10.1007/s10151-017-1731-8>
5. Wu T, Blazek V, Schmitt HJ. Photoplethysmography imaging: a new noninvasive and noncontact method for mapping of the dermal perfusion changes. Optical Techniques and Instrumentation for the Measurement of Blood Composition, Structure, and Dynamics. Priezzhev A.V., Öberg P.A. Optical Techniques and Instrumentation for the Measurement of Blood Composition, Structure, and Dynamics. *Proceedings of SPIE*. 2000;4163:62-70.
6. Verkruijsse W, Svaasand LO, Nelson JS. Remote plethysmographic imaging using ambient light. *Optics Express*. 2008;16(26):21434-21445. <https://doi.org/10.1364/oe.16.021434>
7. Marcinkevics Z, Rubins U, Zaharans J, Miscuks A, Urtane E, Ozolina-Moll L. Imaging photoplethysmography for clinical assessment of cutaneous microcirculation at two different depths. *Journal of Biomedical Optics*. 2016;21(3):35005. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.21.3.035005>
8. Volynsky MA, Margaryants NB, Mamontov OV, Kamshilin AA. Contactless monitoring of microcirculation reaction on local temperature changes. *Applied Sciences*. 2019;9(22):4947.
9. Rasche S, Huhle R, Junghans E, de Abreu MG, Ling Y, Trumpp A, Zunseder S. Association of remote imaging photoplethysmography and cutaneous perfusion in volunteers. *Scientific Reports*. 2020;10(1):16464. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73531-0>
10. Lyubashina OA, Mamontov OV, Volynsky MA, Zaytsev VV, Kamshilin AA. Contactless Assessment of Cerebral Autoregulation by Photoplethysmographic Imaging at Green Illumination. *Frontiers in Neuroscience*. 2019;13:1235. <https://doi.org/10.3389/fnins.2019.01235>
11. Mamontov OV, Shcherbinin AV, Romashko RV, Kamshilin AA. Intraoperative imaging of cortical blood flow by camera-based photoplethysmography at green light. *Applied Sciences*. 2020;10(18):6192.
12. Kamshilin AA, Zaytsev VV, Lodygin AV, Kashchenko VA. Imaging photoplethysmography as an easy-to-use tool for monitoring changes in tissue blood perfusion during abdominal surgery. *Scientific Reports*. 2022;12(1):1143. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05080-7>
13. Kashchenko VA, Zaytsev VV, Ratnikov VA, Kamshilin AA. Intraoperative visualization and quantitative assessment of tissue perfusion by imaging photoplethysmography: comparison with ICG fluorescence angiography. *Biomedical Optics Express*. 2022;13(7):3954-3966. <https://doi.org/10.1364/BOE.462694>

Поступила 12.06.2023

Received 12.06.2023

Принята к печати 10.07.2023

Accepted 10.07.2023