

## Методика интраоперационной оценки жизнеспособности кишечника с применением управляемого полихромного светодиодного источника света для контрастной визуализации биологических тканей

© Н.А. АДАМЕНКОВ<sup>1,2</sup>, И.О. КОЗЛОВ<sup>1</sup>, А.А. ПАЛАЛОВ<sup>1</sup>, А.В. АЛАДОВ<sup>4</sup>,  
А.Е. ЧЕРНЯКОВ<sup>4</sup>, Е.В. ПОТАПОВА<sup>1</sup>, А.В. МАМОШИН<sup>1,3</sup>, А.В. ДУНАЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, Орёл, Российская Федерация

<sup>2</sup>Больница скорой медицинской помощи им. Н.А. Семашко, Орёл, Российская Федерация

<sup>3</sup>Орловская областная клиническая больница, Орёл, Российская Федерация

<sup>4</sup>Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Обоснование.** Заболевания, сопровождающиеся нарушением кровоснабжения кишечной стенки, занимают одно из основных мест в ургентной хирургии органов брюшной полости. Интраоперационная оценка жизнеспособности кишки является одной из сложных задач, играет ведущую роль в определении объема оперативного пособия и прогнозе течения послеоперационного периода.

**Цель.** Изучить возможность использования контрастной визуализации с применением управляемого полихромного светодиодного источника света для оценки жизнеспособности кишечной стенки модельного животного в условиях острой ишемии.

**Методы.** В основу работы положены результаты экспериментальных исследований, проведенных на 15 клинически здоровых половозрелых лабораторных крысах. Выполнялось моделирование ишемии тонкой кишки продолжительностью от 15 минут до 12 часов путём перевязки магистральных сосудов. Каждому животному через соответствующий временной интервал осуществлялась релапаротомия. Из брюшной полости извлекался кишечник и производилась оценка визуальных параметров некроза стенки методом Керте и с применением полихромного светодиодного источника света для контрастной визуализации биологических тканей при хирургических операциях. После определения визуальных признаков ишемии и некроза фрагменты кишечника направлялись на патоморфологическое исследование. Исследование завершилось выведением животного из эксперимента в соответствии с протоколом, одобренным этическим комитетом.

**Результаты.** По результатам исследования было установлено, что спектральный состав источника света, при котором максимально достоверно распознается некроз кишечной стенки, представлен двумя спектральными линиями с максимумами длин волн  $\lambda_{peak} = 503$  нм,  $\lambda_{peak} = 594$  нм и примерным соотношением интенсивностей линий 2:1. При моделировании ишемии тонкой кишки в эксперименте на основании морфологического исследования было установлено, что значимыми являются интервалы: 1 час после наложения лигатуры – время наступления ишемии, 6 часов, когда ишемия была обратима и 12 часов – время, при котором регистрируется некроз тонкой кишки.

**Ключевые слова:** жизнеспособность кишечника; полихромный светодиодный источник света; хирургическое освещение; контрастная визуализация биологических тканей

## Method of Objective Assessment of Intestinal Viability Using “Smart Light” Polychrome LED Light Source for Contrast Imaging of Biological Tissues during Surgical Operations

© N.A. ADAMENKOV<sup>1,2</sup>, I.O. KOZLOV<sup>1</sup>, A.A. PALALOV<sup>1</sup>, A.V. ALADOV<sup>4</sup>, A.E. CHERNYAKOV<sup>4</sup>,  
E.V. POTAPOVA<sup>1</sup>, A.V. MAMOSHIN<sup>1,3</sup>, A.V. DUNAIEV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russian Federation

<sup>2</sup>N.A. Semashko Emergency Hospital, Orel, Russian Federation

<sup>3</sup>Orel Regional Clinical Hospital, Orel, Russian Federation

<sup>4</sup>Submicron Heterostructures for Microelectronics, Research & Engineering Center Russian Academy of Science, St. Petersburg, Russian Federation

**Introduction.** Diseases accompanied by a violated blood supply to the intestinal wall take one of the major places in urgent surgery of the abdominal organs. Intraoperative assessment of intestinal viability is one of the most challenging and plays a leading part in determining the volume of surgical aid, predicting the course of the postoperative period.

**The aim of the study** was to investigate the potential of contrast imaging using a controlled polychrome LED light source to assess the viability of the intestinal wall in a model animal under simulated acute ischemia.

**Materials and methods.** The study included results of experiments involving 15 clinically healthy sexually mature laboratory rats. The simulation of small intestine acute ischemia lasting from 15 minutes to 12 hours was performed by ligation of the major vessels. Each animal underwent a relaparotomy after a corresponding time interval. The intestine was extracted from the abdominal

cavity and visual parameters of wall necrosis were assessed using Kerte method and a polychrome LED light source for contrast imaging of biological tissues during surgery. After determining the visual signs of necrosis, intestinal fragments were examined pathomorphologically. The animals were withdrawn from the experiment according to the protocol approved by the Ethics Committee.

**Results.** The spectral composition of the light source providing the most reliable detection of necrosis of the intestinal wall is represented by two spectral bands with maximum wavelengths of  $\lambda_{peak} = 503 \text{ nm}$ ,  $\lambda_{peak} = 594 \text{ nm}$  and an approximate ratio of band intensities of 2:1. The morphological study helped detect the following intervals to be significant when simulating small intestinal ischemia in the experiment: 1 hour after ligation – the time of ischemia onset, 6 hours – the time when ischemia is reversible, and 12 hours – the time when small intestine necrosis was recorded.

**Conclusions.** The use of a controlled shadowless semiconductor light source for contrast imaging of biological tissues during surgery in the selected mode improves the definition of visual parameters of intestinal viability.

**Keywords:** intestinal viability; polychrome LED light source; surgical illumination; contrast imaging of biological tissues

В настоящее время заболевания, сопровождающиеся нарушением кровоснабжения кишечной стенки, занимают одно из ведущих мест в рейтинге актуальных вопросов urgentной хирургии органов брюшной полости. Развитие некроза кишечника является поздней стадией нескольких различных патологических процессов, характеризующихся гибелью клеток из-за снижения притока крови к желудочно-кишечному тракту. Частыми причинами ишемии и последующего некроза кишечника являются: острая брыжеечная окклюзия, хроническая ишемия, воспалительные заболевания, механические препятствия и внешнее сдавление. Прогноз при этом осложнении неблагоприятный, а снижение летальности зависит от раннего выявления патологических изменений и сроков выполнения оперативного вмешательства [1]. Резекция кишечника выполняется у 12% пациентов с периодом ожидания операции менее 24 часов и у 29% – с ожиданием более суток [2].

Интраоперационная оценка жизнеспособности кишки является одной из самых сложных задач и играет ведущую роль в определении объема оперативного пособия, прогнозе течения послеоперационного периода, развитии осложнений и исходе заболевания [3–5]. У 14–16% пациентов перенесших резекцию тонкой кишки наблюдаются осложнения, а летальность доходит до 60% [6]. В таких случаях определяющим фактором в решении вопроса о жизнеспособности кишечной стенки является визуальная оценка её состояния в динамике. Любые сомнения в жизнеспособности кишки трактуются в пользу выполнения резекции [7].

Таким образом, улучшение и повышение точности интраоперационной диагностики жизнеспособности кишки остается актуальным вопросом в современной хирургии. Традиционным и доступным способом определения жизнеспособности кишечной стенки является визуальный метод Керте. Визуальная оценка кишечника опирается на артериальные пульсации, присутствие перистальтики и субъективное определение цвета, хотя эти параметры не являются специфическими [8]. Жизнеспособная кишечная стенка имеет цвет красных оттенков, при этом орошение теплым физиологическим раствором может улучшить цвет жизнеспособного кишечника. При пальпации кишечной стенки в норме выявляется нормальная или увеличенная толщина стенки по сравнению с осталь-

ной частью прилегающей кишки. Жизнеспособная кишечная стенка способна инициировать и распространять перистальтические волны. Наличие артериального пульса в сосудах, снабжающих пораженный участок также является признаком жизнеспособности. Все перечисленные признаки относятся к визуальным характеристикам ишемически измененного органа и их определение сугубо субъективно. Это обуславливает поиск путей оптимизации метода с целью улучшения визуализации признаков изменения витальных свойств кишечника.

Крайне важным при проведении оперативных вмешательств является высококачественное хирургическое освещение для точной визуализации и интерпретации анатомических структур пациентов. Правильный выбор параметров искусственного света в операционной имеет решающее значение для безопасности пациента и комфорта хирургической бригады. Современные бестеневые хирургические светильники, в том числе светодиодные, предназначены для обеспечения бесперебойного освещения с естественной цветопередачей, контролем теней и высокой освещенностью операционного поля без чрезмерного нагрева воздуха.

Плохое освещение во время оперативных вмешательств может привести к утомлению глаз хирурга и поставить под угрозу безопасность пациента. Новое технологическое направление модернизации освещения хирургических операционных направлено на разработку ламп, позволяющих улучшать контрастность биологических тканей на основе «акцентного» окрашенного освещения, учитывающего спектральные характеристики отражения биологических тканей [9, 10]. Такой подход можно реализовать на базе полихромных светодиодных излучателей с регулируемыми спектрально-цветовыми характеристиками [11]. Разработка оптимальных источников света для улучшения контрастирования биологических тканей является актуальной, в том числе для усиления цветовых различий между ишемизированными и нормальными тканями кишечника [12].

### Цель

Изучить возможность использования контрастной визуализации с применением управляемого полихромного светодиодного источника света для оцен-

ки жизнеспособности кишечной стенки модельного животного в условиях острой ишемии.

### Материалы и методы

Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях на базе НТЦ биомедицинской фотоники ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева» (г. Орел, Россия) в период с сентября по декабрь 2022 г. Исследования проводились на 15 клинически здоровых половозрелых лабораторных крысах линии Wistar (самцы) трехмесячного возраста с массой тела 200 г. Содержание животных и экспериментальные работы соответствовали ГОСТ 33216-2014 «Руководство по содержанию и уходу за лабораторными животными» и этическим нормам по гуманному обращению с животными. Все проведенные манипуляции были одобрены Этическим комитетом Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева (протокол № 12 от 06.09.2018), разработанным в соответствии с принципами надлежащей лабораторной практики GLP (согласно ГОСТу 33647-2015). Животных содержали в условиях карантина, контролируемых по температуре, влажности и чистоте. Специальной предоперационной подготовки животным не проводилось. На всех экспериментальных животных заводились индивидуальные протоколы исследования.

В качестве источника света для подбора оптимального освещения использовался специально разработанный НТЦ микроэлектроники РАН (г. Санкт-Петербург, Россия) управляемый цветодинамический хирургический осветитель на основе светодиодной матрицы, состоящей из шести спектральных составляющих от светодиодов синего (460 нм), бирюзового (505 нм), зеленого (530 нм), зелено-желтого (550 нм), оранжевого (590 нм) и красного (630 нм) цветов свечения.

для синтеза окрашенного освещения с практически любыми цветовыми координатами (рис. 1). Как видно из рис. 1б, такой набор оригинальных излучателей позволяет синтезировать около 90% реальных цветов. Используя такую полихромную светодиодную матрицу, можно перекрыть видимый диапазон спектров отражения большинства биологических тканей. Также использование шести независимых спектральных компонентов обеспечивает точную настройку спектра излучения для соответствия спектрам отражения различных тканей. Оптическая система, состоящая из фоконя в форме четырехугольной пирамиды и проекционного объектива создает однородное световое пятно 200 x 200 мм на расстоянии 700 мм от поверхности объектива [13]. Неравномерность по освещенности светового поля лежит в пределах 5%, а неоднородность по цветности  $\sigma < 0.05$ . Максимальная освещенность светового пятна достигает 30 клк.

Программное обеспечение данного светильника позволяет изменять интенсивность всех шести типов светодиодов в составе матрицы. Управление световыми параметрами хирургического осветителя во время проведения исследований осуществлялось удаленно с компьютера с использованием разработанного программного обеспечения, связанного с осветителем по интерфейсу Bluetooth.

Оперативное пособие проводилось с применением ингаляционной анестезии на основе изофлурана 1,5% в стандартных дозировках. Все оперативные вмешательства выполнялись в строго асептических условиях. Моделирование ишемии тонкой кишки производилось следующим способом. После введения животного в состояние наркоза его размещали на

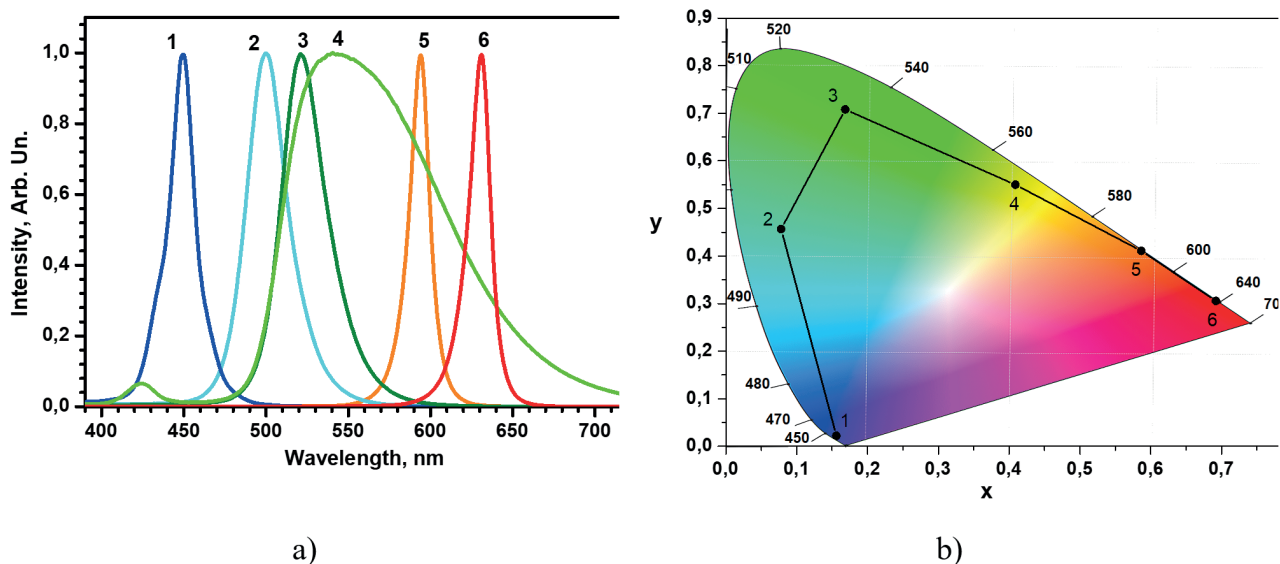


Рис. 1. Спектральные и цветовые параметры светодиодов матрицы: а) спектры излучения; б) координаты цветности на диаграмме МКО 1931: 1 – синего, бирюзового (505 нм), зеленого (530 нм), зелено-желтого (550 нм), оранжевого (590 нм) и красного (630 нм), 2 – бирюзовый, 3 – зеленый, 4 – зелено-желтый, 5 – оранжевый, 6 – красный.

Fig. 1. Spectral and color parameters of matrix LEDs a) emission spectra: b) chromaticity coordinates on the CIE 1931: 1 – blue, 2 – cyan, 3 – green, 4 – lime, 5 – amber, 6 – red.

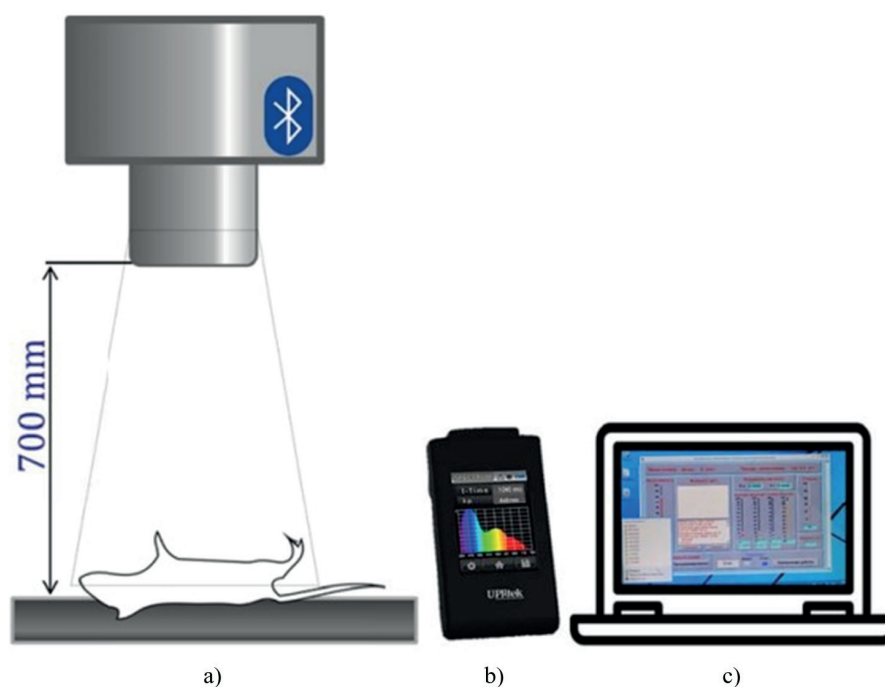


Рис. 2. Схема эксперимента для исследования оптимальных условий освещения для контрастной визуализации биологических тканей: а) положение лабораторного животного на специальной фиксирующей платформе относительно управляемого полихромного светодиодного источника света для контрастной визуализации биологических тканей; б) портативный спектрометр для универсального применения МК350 (UPRtek, Тайвань); в) программное обеспечение на экране персонального компьютера.

Fig. 2. Experimental scheme for the study of optimal lighting conditions for contrast imaging of biological tissues: a) the position of the laboratory animal on a special fixing platform relative to a controlled polychrome LED light source for contrast imaging of biological tissues; b) a portable spectrometer for universal use MK350 (UPRtek, Taiwan); c) software on the screen of a personal computer.

специальной фиксирующей платформе и подготавливали операционное поле путем выбривания области передней брюшной стенки и обработки растворами антисептиков. В качестве операционного доступа использовалась срединная лапаротомия. Из брюшной полости извлекалась тонкая кишка и выполнялась перевязка магистральных сосудов, кровоснабжающих кишечник, капроновыми лигатурами 3.0. После чего кишечник погружался в брюшную полость. Закрытие лапаротомной раны производилось наложением непрерывного шва нитью полипропилен 2.0.

Для определения пограничных состояний кишки и ее патологических изменений, при моделировании ишемии с позиции оценки возможностей управляемого бестеневого полупроводникового источника света для контрастной визуализации биологических тканей при хирургических операциях, проводилось морфологическое исследование в различные временные интервалы после наложения лигатуры на магистральные сосуды кишечника: через 1, 6 и 12 часов.

Каждому животному через соответствующий временной интервал выполнялась лапаротомия. Перестраиваемый по спектру хирургический светильник устанавливался над специальным операционным столом для мелких лабораторных животных на расстоянии 70 см, что обеспечивало создание однородного светового поля размером не менее 20×20 см. (рис. 2). Из брюшной полости извлекался кишечник и проводилась оценка визуальных параметров некроза кишечной

стенки методом Керте. Исследования с применением управляемого полихромного светодиодного источника света проводились в двух условиях освещенности: при спектральном составе света, соответствующем стандартному операционному хирургическому светильнику, и с подобранным оптимальным спектральным составом для контрастной визуализации биологических тканей. Спектральный состав излучения светильника контролировался портативным спектрометром для универсального применения МК350 (UPRtek, Тайвань).

После определения визуальных признаков ишемии и некроза кишечной стенки производилась резекция тонкой кишки с последующей фиксацией в 10% забуференном формалине в течение суток. Осуществлялась вырезка репрезентативных участков кишки, которые впоследствии подвергались гистологической проводке по стандартной методике (с помощью гистологического процессора LOGOS (Milestone Medical) и изготавливали парафиновые блоки. Срезы толщиной 4 мкм получали на ротационном микротоме Leica RM2125 RTS (Leica Biosystems), окрашивали гематоксилином и эозином (Biovitrum). Оценивались патоморфологические изменения в кишечной стенке в условиях смоделированной ишемии тонкой кишки различной длительности. Выраженность морфологической картины ишемии оценивали по классификации Park Chiu [14]. Исследования завершались выведением



животных из эксперимента в соответствии с протоколом, одобренным этическим комитетом.

В исследовании принимали участие 5 врачей-хирургов, которые проводили независимую оценку состояния кишечника визуальным методом Керте в двух режимах управляемого полихромного светодиодного источника света. Последовательно проводилась оценка витальности кишечника при освещении, соответствующем спектральному составу хирургического операционного осветителя, и оценка этих же признаков при подборе оптимизированного состава спектрального освещения.

Статистическая обработка данных включала методы коллективной работы экспертной группы с получением общего мнения в ходе совместного обсуждения решаемой проблемы, метод сегментации на основе использования глубоких нейронных сетей для объективного подтверждения информативности изображения при изменении параметров освещения биологического объекта. Влияние определённого признака на качество моделей оценивали кросс-валидацией модели сегментации изображения на случайных тренировочных и тестовых подвыборках. Оценка точности проводилась с помощью меры перекрытия размеченных областей – коэффициент Жаккарда, с учетом высокой значимости в машинном обучении прироста точности на 1% из-за изменения одного фактора (цвет освещения).

## Результаты

Исходя из данных, полученных с помощью спектрометрического анализа состава света операционной лампы в стационаре, с помощью управляемого полихромного светодиодного источника света был проведен синтез соответствующего спектра операционной лам-

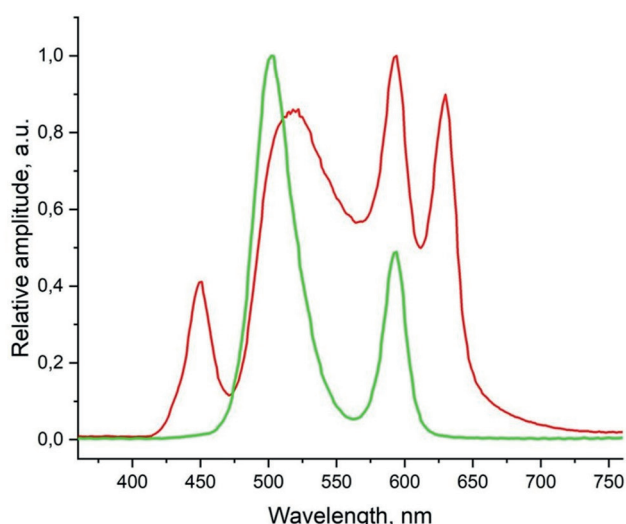


Рис. 3. Спектральные характеристики света операционной лампы (красная линия) и контрастной визуализации ишемических и некротических изменений кишечника (зеленая линия).

Fig. 3. Spectral characteristics of operating lamp light (red line) and contrast imaging of ischemic and necrotic intestinal changes (green line).

пы показанный на рис. 3. Подобное излучение представляет собой белый свет с цветовой температурой 4300K (координаты цветности на диаграмме МКО 1931:  $X=0.39$ ,  $Y=0.45$ ) и главным индексом передачи (CRI) 90. Освещенность операционного поля при этом составляла почти 10000 лк. На основе индивидуальной оценки каждого эксперта, а затем обсуждения и получения общего коллективного экспертного мнения было установлено, что, наиболее четкая визуализация некроза кишки достигается при освещении спектром излучения, показанном на рис. 3, при освещенности примерно 6000 лк. Данный спектр является суммарным и состоит из двух спектров с двумя центральными линиями:  $\lambda_{\text{peak}} = 503$  нм,  $\lambda_{\text{peak}} = 594$  нм и соотношением интенсивностей примерно 2:1. Его координаты цветности на диаграмме МКО 1931 составляли:  $X=0,27$ ,  $Y=0,51$ . Это цветное, то есть полихроматическое освещение. Следует отметить, что освещенность, которую создает белый свет, имитирующий хирургическую лампу на 4000 лк, выше по сравнению с такой же величиной оптимального освещения для контрастной визуализации. Это еще раз указывает на то, что при использовании акцентного освещения большую роль при визуализации биологических тканей играет цветовой контраст, то есть глаз хирурга в первую очередь чувствителен к изменению цвета, а уже во вторую – к интенсивности освещения [11].

Для объективизации оценки улучшения качества визуализации ишемических и некротических изменений в кишечной стенке с помощью подобранного экспертами спектрального состава света был проведен численный эксперимент. На основе работы модели компьютерного зрения архитектуры Unet [15], представляющей собой последовательность свёрточных слоёв скрытого пространства признаков, слоёв регуляризации и межслойных связей, и позволяющей сегментировать изображения, была проведена генерация серии из 20 моделей на выборке из 98 изображений, полученных в течение эксперимента. Выборки для тренировки моделей отбирались на основе случайного разбиения на тренировочную и тестовую подвыборки в пропорции 80/20 для каждой модели. В качестве объекта для сравнения использовались результаты исследования ишемии и некроза кишечника, полученные при имитации освещения операционного поля белым светом, соответствующим спектральной характеристике излучения стандартной хирургической лампы. На основании этого было также сгенерировано 20 моделей. Задача сегментации состояла в том, чтобы верно определить размеченные классы данных («ишемия», «здоровый кишечник», «фон») с наименьшим значением ложноположительных и ложноотрицательных срабатываний модели. При этом точность оценивалась специальной мерой, называемой IoU (Intersection over Unit) или коэффициентом Жаккарда [16], который показывает отношение перекрытия классов к их общей площади и является распространённой метрикой

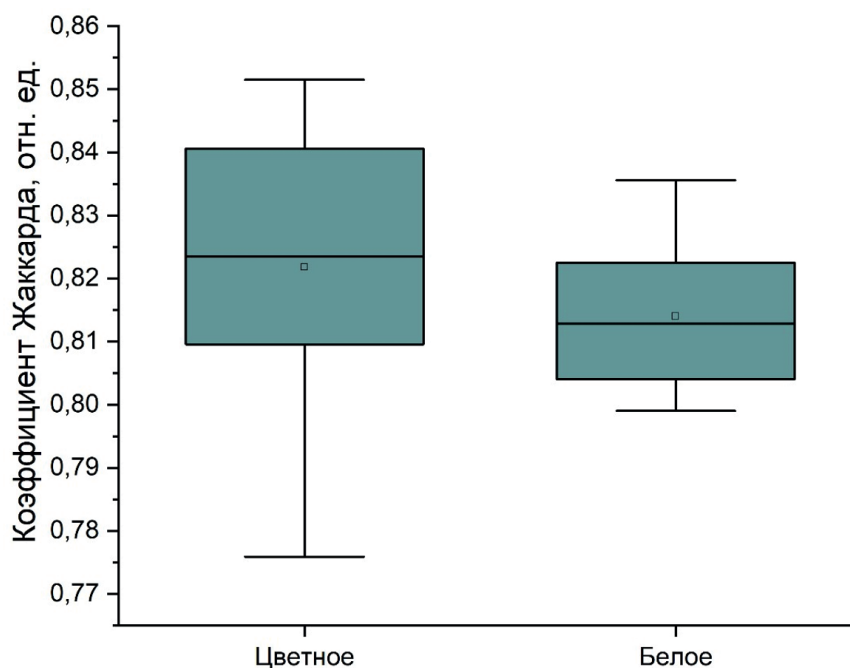


Рис. 4. Результаты обучения моделей спектрального излучения полупроводниковой лампы.  
Fig. 4. Results of training models of spectral radiation of a semiconductor lamp.

оценки качества сегментации. Обучение осуществлялось на основе свободно-распространяемых электронных библиотек для языка Python: «Segmentation models», «Keras», «numpy». Разметка производилась на три класса: «ишемия», «здоровый кишечник» и нулевой класс «фон». Средний коэффициент Жаккарда для света операционной лампы составил  $0,814 \pm 0,010$ , тогда как, для подобранного экспертами света –  $0,823 \pm 0,019$  (рис. 4). Таким образом, показан прирост средней точности распознавания на моделях, полученных для двух типов операционного освещения и случайного распределения на тренировочные и тестовые подвыборки. Данный результат был достигнут за счёт использования оптимального и более информативного освещения операционного поля, который позволяет лучше выявлять на изображении ишемию кишечника.

По результатам морфологического исследования было установлено, что значимые изменения, с точки зрения жизнеспособности стенки кишки, имели место от момента наложения лигатуры через 1, 6 и 12 часов. Через 1 час от момента создания ишемии, при морфологическом исследовании во фрагментах тонкой кишки обнаружена фокальная десквамация эпителия и выраженный отек ворсин. В собственной пластинке наблюдалась умеренная лимфогистиоцитарная инфильтрация, в подслизистой – отек и инъецированные сосуды. Описанные изменения соответствовали интестинальной ишемии Grade 2 по классификации Park Chiu. Морфологические изменения стенки тонкой кишки через 6 часов от момента моделирования ишемии были представлены диффузным коагуляционным некрозом ворсин с геморрагическим компонентом и фокальной деструкцией крипт. Подслизистая оболоч-

ка с признаками выраженного отека, с полиморфно-клеточной инфильтрацией, расширенными сосудами с наличием сладжа. Описанные изменения соответствовали интестинальной ишемии Grade 5-6 по классификации Park Chiu. Спустя 12 часов от момента создания ишемии стенка тонкой кишки была представлена некротизированной тканью с примесью крови.

### Обсуждение

В данной статье рассмотрены вопросы улучшения визуального определения *in vivo* ишемических и некротических изменений кишечника. На сегодняшний день не существует стандартизированного и широкодоступного метода оценки жизнеспособности кишечника во время проведения оперативного вмешательства. Традиционная интраоперационная визуальная оценка состояния кишечной стенки имеет низкую прогностическую ценность относительно развития некротических изменений [6]. Стандартные визуальные критерии жизнеспособности кишечника не обладают необходимой чувствительностью и специфичностью и зачастую могут приводить к ложноположительным и ложноотрицательным интерпретациям видимых изменений кишечной стенки.

Описаны многочисленные методы объективной инструментальной оценки различных параметров жизнеспособности кишечника, однако единого мнения об их клиническом применении нет [5, 17]. Многообразие предложенных методик свидетельствует о необходимости дальнейших поисков оптимального метода оценки жизнеспособности кишечника, обладающего такими параметрами как доступность, возможность применения в условиях ургентной хирургии, удобство

использования и экономическая эффективность. Применение светодиодных излучателей с вариативными спектрально-цветовыми характеристиками улучшает визуальную интерпретацию ишемических и некротических изменений кишечной стенки. В то же время метод не решает проблему объективного определения признаков ишемии и некроза, однако его преимуществами является интуитивная доступность, простота в применении и возможность встраивания в стандартные операционные лампы. Предложенная методика позволяет неинвазивно оценивать жизнеспособность кишечника в режиме реального времени и не подвержена влиянию таких факторов как перистальтика и пульсация магистральных сосудов.

### Заключение

В исследовании была предложена технология оптимизации хирургического освещения для улуч-

шения контрастной визуализации ишемических и некротических изменений кишечника. На основе мнения группы хирургов-экспертов был подобран оптимальный спектр освещения, который позволил более четко определять набор визуализационных признаков жизнеспособности кишки методом Керте. Это было подтверждено более высоким коэффициентом качества сегментации изображений тканей кишечника с помощью нейросети при цветном освещении (полихроматический источник света) в сравнении с белым (стандартная операционная лампа).

### Дополнительная информация

#### Конфликт интересов

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

#### Источник финансирования

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта №21-15-00325.

### Список литературы

- Zachariah SK. Adult necrotizing enterocolitis and non occlusive mesenteric ischemia. *J. Emergencies, Trauma Shock*. 2011; 4(3): 430-432. <http://doi.org/10.4103/0974-2700.83881>
- Клюйко Д.А., Корик В.Е. Лечебно-диагностическая тактика при спаечной тонкокишечной непроходимости: обзор литературы. *Хирургия. Восточная Европа*. 2021; 10(2): 220-227. <http://doi.org/10.1002/ams2.587>
- Urbanavičius L, Pattyn P, Putte DV, Venskutonis D. How to assess intestinal viability during surgery: A review of techniques. *World J Gastrointest Surg*. 2011; 3(5): 59-69. <http://doi.org/10.4240/wjgs.v3.i5.59>
- Bryski MG, Frenzel Sulyok LG, Kaplan L, Singhal S, Keating JJ. Techniques for intraoperative evaluation of bowel viability in mesenteric ischemia: A review. *Am. J. Surg*. 2020; 220(2): 309-315. <http://doi.org/10.1016/j.amjsurg.2020.01.042>
- Захаренко А.А., Беляев М.А., Трушин А.А., Зайцев Д.А., Курсенко Р.В. Интраоперационная оценка жизнеспособности стенки кишки (обзор литературы). *Вестник хирургии имени И.И. Грекова*. 2020; 179(1): 82-88. <http://doi.org/10.24884/0042-4625-2020-179-1-82-88>
- Karliczek A, Harlaar NJ, Zeebregts CJ, Wiggers T, Baas PC, Van Dam GM. Surgeons lack predictive accuracy for anastomotic leakage in gastrointestinal surgery. *Int J Colorectal Dis*. 2009; 24: 569-576. <http://doi.org/10.1007/s00384-009-0658-6>
- Руководство по неотложной хирургии органов брюшной полости. Руководство для врачей. 2-е издание. Под ред. Савельева В.С. М.: МИА. 2020; 544.
- Ермолов А.С., Лебедев А.Г., Титова Г.П., Ярцев П.А., Селина И.Е., Резницкий П.А., Алексеечкина О.А., Калоева О.Х., Шаврина Н.В., Евдокимова О.Л., Жигалкин Р.Г. Трудности диагностики и возможности лечения неокклюзионных нарушений мезентериального кровообращения. *Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова*. 2015; 12: 24-32. <http://doi.org/10.17116/hirurgia20151224-32>
- Ito K, Higashi H, Hietanen A, Fält P, Hine K, Hauta-Kasari M, Nakauchi S. The Optimization of the Light-Source Spectrum Utilizing Neural Networks for Detecting Oral Lesions. *J. imaging*. 2022; 9(1): 7. <http://doi.org/10.3390/jimaging9010007>
- Мамошин А.В., Серегина Е.С., Потапова Е.В., Шепелева А.И., Дунаев А.В., Альянов А.Л., Иванов А.Е., Аладов А.В. Оптимизация освещения операционного поля с помощью динамически управляемых полупроводниковых источников света. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2018; 6(332): 119-125.
- Аладов А.В., Валухов В.П., Закгейм А.Л., Купцов В.Д., Мамошин А.В., Потапова Е.В., Черняков А.Е., Фотиади А.Э. Оптимизация освещения операционного поля с целью получения максимального контраста при визуализации биологических объектов. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. 2019; 12(4): 79-88. <http://doi.org/10.18721/JPM.12408>
- Kurabuchi Y, Nakano K, Ohnishi T, Nakahuchi T, Hauta-Kasari M, Haneishi H. Optimization of Surgical Illuminant Spectra for Organ Microstructure Visualization. *IEEE Access*. 2019; 7: 70733-70741. <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2919451>

### References

- Zachariah SK. Adult necrotizing enterocolitis and non occlusive mesenteric ischemia. *J. Emergencies, Trauma Shock*. 2011; 4(3): 430-432. <http://doi.org/10.4103/0974-2700.83881>
- Kluiko D, Korik V. Therapeutic and Diagnostic Tactics for Adhesive Small Bowel Obstruction: Literature Review. *Surg. East. Eur*. 2021; 10(2): 220-227. <http://doi.org/10.1002/ams2.587> (in Russ.)
- Urbanavičius L, Pattyn P, Putte DV, Venskutonis D. How to assess intestinal viability during surgery: A review of techniques. *World J Gastrointest Surg*. 2011; 3(5): 59-69. <http://doi.org/10.4240/wjgs.v3.i5.59>
- Bryski MG, Frenzel Sulyok LG, Kaplan L, Singhal S, Keating JJ. Techniques for intraoperative evaluation of bowel viability in mesenteric ischemia: A review. *Am. J. Surg*. 2020; 220(2): 309-315. <http://doi.org/10.1016/j.amjsurg.2020.01.042>
- Zakharenko AA, Belyaev MA, Trushin AA, Zaitsev DA, Kursenko RV. Intraoperative assessment of intestinal wall viability (literature review). *Vestnik hirurgii imeni I.I. Grekova*. 2020; 179(1): 82-88. <http://doi.org/10.24884/0042-4625-2020-179-1-82-88>
- Karliczek A, Harlaar NJ, Zeebregts CJ, Wiggers T, Baas PC, Van Dam GM. Surgeons lack predictive accuracy for anastomotic leakage in gastrointestinal surgery. *Int J Colorectal Dis*. 2009; 24: 569-576. <http://doi.org/10.1007/s00384-009-0658-6>
- Rukovodstvo po neotlozhnoj hirurgii organov bryushnoj polosti. Rukovodstvo dlya vrachej. 2-e izdanie. Pod red. Savelyeva VS. M.: MIA. 2020; 544. (in Russ.)
- Ermolov AS, Lebedev AG, Titova GP, Yartsev PA, Selina IE, Reznitsky PA, Alekseechikina OA, Kaloeva OH, Shavrina NV, Evdokimova OL, Zhigalkin RG. The difficulties of diagnosis and treatment of non-occlusive mesenteric circulatory disorders. *Khirurgiya. Zhurnal im. N.I. Pirogova*. 2015; 12:24-32. (in Russ.) <https://doi.org/10.17116/hirurgia20151224-32>
- Ito K, Higashi H, Hietanen A, Fält P, Hine K, Hauta-Kasari M, Nakauchi S. The Optimization of the Light-Source Spectrum Utilizing Neural Networks for Detecting Oral Lesions. *J. imaging*. 2022; 9(1): 7. <http://doi.org/10.3390/jimaging9010007>
- Mamoshin AV, Seragina ES, Potapova EV, Shepeleva AI, Dunaev AV, Alyanov AL, Ivanov AE, Aladov AV. Optimization of operating field lighting using dynamically controlled semiconductor light sources. *Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tehnologii*. 2018; 6(332): 119-125. (in Russ.)
- Aladov AV, Valyukhov VP, Zakheim AL, Kuptsov VD, Mamoshin AV, Potapova EV, Chernyakov AE, Fotiadi AE. Optimization of surgical field illumination to maximize the contrast when biological objects being visualized. *St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics*. 2009; 12(4): 79-88. <http://doi.org/10.18721/JPM.12408> (in Russ.)
- Kurabuchi Y, Nakano K, Ohnishi T, Nakahuchi T, Hauta-Kasari M, Haneishi H. Optimization of Surgical Illuminant Spectra for Organ Microstructure Visualization. *IEEE Access*. 2019; 7: 70733-70741. <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2919451>
- Aladov AV, Zakheim AL, Semyashkina JV, Chernyakov AE. Dynamically Controlled LED Luminaire for Contrast Visualisation of

13. Аладов А.В., Закгейм А.Л., Семьяшкова Ю.В., Черняков А.Е. Динамически управляемый светильник со светодиодами для контрастной визуализации биологических тканей при хирургических операциях. *Светотехника*. 2021; 5: 53-57. <http://doi.org/10.33383/2021-059>
14. Bertacco A, Dehner CA, Caturegli G, D'Amico F, Morotti R, Rodriguez MI, Mulligan DC, Kriegel MA, Geibel JP. Modulation of Intestinal Microbiome Prevents Intestinal Ischemic Injury. *Front. Physiol.* 2017; 8: 1064. <http://doi.org/10.3389/fphys.2017.01064>
15. Siddique N, Sidike P, Elkin C, Devabhaktuni V. U-net and its variants for medical image segmentation: A review of theory and applications. *IEEE Access.* 2021; 9: 82031-82057. <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3086020>
16. Егоров А.А., Лысенкова С.А., Мазайшвили К.В. Свёрточные сети для сегментации изображений крупных вен. *Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки*. 2020; 31(2): 117-128. <http://doi.org/10.26117/2079-6641-2020-31-2-117-128>
17. Ведьянская Д.А., Краморов Е.С., Ратников В.А., Кашченко В.А. Современные методы интраоперационной оценки перфузии тканей. *Клиническая больница*. 2022; 2(34): 42-54. [http://doi.org/10.56547/22263071\\_2022\\_2\\_42](http://doi.org/10.56547/22263071_2022_2_42)
- Biological Tissues During Surgical Procedures. *Svetotekhnika*. 2021; 29(6): 144-150. <http://doi.org/10.33383/2021-059> (in Russ.)
14. Bertacco A, Dehner CA, Caturegli G, D'Amico F, Morotti R, Rodriguez MI, Mulligan DC, Kriegel MA, Geibel JP. Modulation of Intestinal Microbiome Prevents Intestinal Ischemic Injury. *Front. Physiol.* 2017; 8: 1064. <http://doi.org/10.3389/fphys.2017.01064>
15. Siddique N, Sidike P, Elkin C, Devabhaktuni V. U-net and its variants for medical image segmentation: A review of theory and applications. *IEEE Access.* 2021; 9: 82031-82057. <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3086020>
16. Egorov AA, Lysenkova SA, Mazaishvili KV. Convolutional networks for segmentation of large vein images. *Vestnik KRAUNCz. Fiziko-matematicheskie nauki*. 2020; 31(2): 117-128. (in Russ.) <http://doi.org/10.26117/2079-6641-2020-31-2-117-128>
17. Vedyanskaya DA, Kramorov ES, Ratnikov VA, Kashchenko VA. Current methods of intraoperative assessment of tissue perfusion. *Clinical Hospital*. 2022; 2(34): 42-54. (in Russ.)

### Информация об авторах

1. Адаменков Никита Алексеевич - аспирант кафедры специализированных хирургических дисциплин, Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева; врач-хирург, больница скорой медицинской помощи им. Н.А. Семашко, e-mail: nikita-ad@mail.ru
2. Козлов Игорь Олегович - стажёр-исследователь научно-технологического центра биомедицинской фотоники, Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, e-mail: igor57\_orel@mail.ru
3. Палалов Александр Александрович - стажер-исследователь лаборатории клеточной физиологии и патологии научно-технологического центра биомедицинской фотоники, ассистент кафедры гистологии, цитологии и эмбриологии, Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, e-mail: d.alexanderpalalov@yandex.ru
4. Аладов Андрей Вальменович - к.т.н, старший научный сотрудник научно-технологического центра микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук, e-mail: aladov@mail.ioffe.ru
5. Черняков Антон Евгеньевич - к.ф.-м.н., старший научный сотрудник научно-технологического центра микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук, e-mail: chernyakov.anton@yandex.ru
6. Потапова Елена Владимировна - к.т.н, доцент, старший научный сотрудник научно-технологического центра биомедицинской фотоники, Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, e-mail: potapova\_ev\_ogu@mail.ru
7. Мамошин Андриан Валерьевич - д.м.н, доцент, старший научный сотрудник научно-технологического центра биомедицинской фотоники, профессор кафедры специализированных хирургических дисциплин, Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева; врач-хирург, Орловская областная клиническая больница, e-mail: dr.mamoshin@mail.ru
8. Дунаев Андрей Валерьевич - д.т.н, доцент, ведущий научный сотрудник научно-технологического центра биомедицинской фотоники, Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, e-mail: dunaev@bmccenter.ru

### Information about the Authors

1. Nikita Alexeyevich Adamenkov - postgraduate student of the Department of Specialized Surgical Disciplines of the Orel State University named after I.S. Turgenev; surgeon of the N.A. Semashko Emergency Hospital, e-mail: nikita-ad@mail.ru
2. Igor Olegovich Kozlov - research intern at the Scientific Research Center of Biomedical Photonics of the Orel State University named after I.S. Turgenev, e-mail: igor57\_orel@mail.ru
3. Alexander Alexandrovich Palalov - trainee researcher at the Laboratory of Cellular Physiology and Pathology of the Biomedical Photonics Research Center, assistant of the Department of Histology, Cytology and Embryology of the Orel State University named after I.S. Turgenev, e-mail: d.alexanderpalalov@yandex.ru
4. Andrey Valmenovich Aladov - Ph.D., Senior Researcher at the Scientific and Technological Center for Microelectronics and Submicron Heterostructures of the Russian Academy of Sciences, e-mail: aladov@mail.ioffe.ru
5. Anton Evgenievich Chernyakov - Ph.D., Senior Researcher at the Scientific and Technological Center for Microelectronics and Submicron Heterostructures of the Russian Academy of Sciences, e-mail: chernyakov.anton@yandex.ru
6. Elena Vladimirovna Potapova - Ph.D., Associate Professor, Senior Researcher at the Scientific and Technological Center for Biomedical Photonics of the Orel State University named after I.S. Turgenev, e-mail: potapova\_ev\_ogu@mail.ru
7. Andrian Valeryevich Mamoshin - M.D., Associate Professor, Senior Researcher at the Scientific and Technological Center of Biomedical Photonics, Professor of the Department of Specialized Surgical Disciplines, Orel State University named after I.S. Turgenev; surgeon of the Orel Regional Clinical Hospital, e-mail: dr.mamoshin@mail.ru
8. Andrey Valerievich Dunaev - M.D., Associate Professor, Leading Researcher, Scientific and Technological Center of Biomedical Photonics, Orel State University named after I.S. Turgenev, e-mail: dunaev@bmccenter.ru

### Цитировать:

Адаменков Н.А., Козлов И.О., Палалов А.А., Аладов А.В., Черняков А.Е., Потапова Е.В., Мамошин А.В., А.В. Дунаев Методика интраоперационной оценки жизнеспособности кишечника с применением управляемого полихромного светодиодного источника света для контрастной визуализации биологических тканей. *Вестник экспериментальной и клинической хирургии* 2023; 16: 3: 222-229. DOI: 10.18499/2070-478X-2023-16-3-222-229.

### To cite this article:

Adamenkov N.A., Kozlov I.O., Palalov A.A., Aladov A.V., Chernyakov A.E., Potapova E.V., Mamoshin A.V., Dunaev A.V. Method of Objective Assessment of Intestinal Viability Using "Smart Light" Polychrome LED Light Source for Contrast Imaging of Biological Tissues during Surgical Operations. *Journal of experimental and clinical surgery* 2023; 16: 3: 222-229. DOI: 10.18499/2070-478X-2023-16-3-222-229.