

# Спектральная эндоскопия: технические средства и методы

\*Д.Д. ХОХЛОВ, В.Э. ПОЖАР

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

\*E-mail: khokhlov.dd@ntcup.ru

## Аннотация

Описано современное состояние спектральных эндоскопических методов. Сформулированы требования к техническим средствам и представлены способы их реализации. Проведена классификация спектральных эндоскопических устройств, отмечена перспективность использования перестраиваемых акустооптических фильтров как спектральных элементов в спектроэндоскопии. Приведены примеры использования методов спектральной эндоскопии на практике: в неразрушающем контроле и медицинской диагностике.

**Ключевые слова:** эндоскопическая диагностика, спектральная фильтрация, спектральная визуализация, изображающая спектрометрия, трёхмерная эндоскопическая визуализация

## Введение

С момента появления первого прообраза эндоскопа в начале XIX века [1, 2] оптическая эндоскопия получила широкое распространение среди методов медицинской неинвазивной диагностики и промышленного неразрушающего контроля, направленных на визуализацию внутренней структуры объекта без нарушения его целостности. Различные конструкции эндоскопических зондов в жёстком и гибком исполнении с широким выбором рабочей длины и диаметра обеспечивают доступ к труднодоступным объектам, а дополнительные каналы для специализированных инструментов, жидкостей и газов непосредственно к наблюдаемому участку объекта расширяют их функциональные возможности [3].

В современной практике чаще всего используются эндоскопы для визуального осмотра состояния полостей. Эндоскопические методы обеспечивают возможность неинвазивной визуальной диагностики внутренних органов человека [1, 4–6], позволяют проводить малотравматичные лапаро-

скопические хирургические операции [7–9], используются для инспекции труднодоступных полостей сложных промышленных объектов (турбин, авиационных и ракетных двигателей, котлов и теплообменников, трубопроводов, узлов и агрегатов автомобилей и т.д.) [10–11].

Как правило, эндоскопы оснащаются широкополосным источником белого света и трёхцветным матричным полупроводниковым приёмником излучения, в котором используются широкополосные светофильтры – красный, зелёный и синий (*RGB*). Определяемой ими пары цветовых координат не всегда достаточно для различения сходных по цвету, но отличных по составу и спектру элементов объекта. А потому для повышения информативности эндоскопических исследований необходимо использование мультиспектральных методов анализа, которые показали свою эффективность в самых разных задачах оптического анализа от дистанционного зондирования [12] до медицины [13]. Такие спектральные эндоскопические модули способны придать уже используемым эндоскопическим зондам дополнительные функциональные возможности. Ниже описаны общие принципы работы таких устройств, представлены различные виды их реализации, их особенности и функциональные возможности, а также современные и перспективные области применения.

## Принципы работы спектроэндоскопов

В основе методов спектральной оптической эндоскопической диагностики лежит анализ спектрального состава излучения после взаимодействия света с веществами, входящими в состав объекта наблюдения. Поскольку регистрируемое изображение представляет собой пространственное распределение интенсивности излучения  $I(x, y, \lambda_f)$  на длине волны  $\lambda_f$ , опре-

деляемой фильтром, то для получения спектральной информации необходимо последовательно снять весь спектр  $\lambda_{min} < \lambda_f < \lambda_{max}$ . Однако особенности многих спектров заключаются в одной или нескольких длинах волн, а потому регистрация спектрального снимка на одной из этих характеристических длин волн позволяет визуализировать распределение данного вещества по поверхности объекта. В таком случае для определения структуры объекта достаточно зарегистрировать несколько спектральных изображений объекта  $\lambda_f = \lambda_{1, \dots, N}$ .

Другой более простой подход основан на контрастной визуализации структуры объекта. В этом случае регистрация ведётся на одной из характеристических длин волн, а получаемое монохромное изображение отображает пространственное расположение отдельных элементов объекта или распределение одного из компонентов смеси веществ. Частный случай такого подхода – это флуоресцентная визуализация, в которой анализ производится по пространственному распределению яркости свечения веществ, флуоресцирующих при освещении объекта на соответствующих длинах волн.

## Структура спектральных эндоскопических устройств

Специфика работы эндоскопических зондов во внутренних полостях объекта предусматривает необходимость укомплектования их встроенной системой освещения, образующей канал подсветки. Соответственно, спектральный элемент может быть установлен либо в осветительном канале (рис. 1), либо в приёмном, где формируется изображение (рис. 2). Погружаемая рабочая часть зонда эндоскопа может быть как жёсткой, так и гибкой, но этот признак напрямую не имеет отношения к спектральной селекции.

Другое отличительное свойство схемы спектрального эндоскопического устройства – это способ регистрации изображения. Классические оптические эндоскопы, оснащённые окулярами для визуального наблюдения изображения, допускают размещение спектрального элемента как в осветительном, так и в приёмном канале. Видеоэндоскопы, в которых видеокамера, как правило, установлена на дистальном конце зонда, спектраль-

ный элемент можно разместить только в осветительном канале.

### Основные типы спектральных эндоскопических устройств

В спектроэндоскопах со спектральной подсветкой (I, здесь и далее на рис. 3) формирование спектра осуществляется либо селективным источником излучения, либо широкополосным излучателем с использованием фильтров (A, B). Осветители на основе узкополосных светодиодов [14] могут содержать как один источник с оптимально подобранным спектром, так и несколько, между которыми осуществляется либо механическое переключение, либо коммутация с использованием световода сложной конфигурации, объединяющего световой поток от нескольких светодиодов [14]. В этом случае необходимость оптического согласования нескольких источников света со световодом ведёт к снижению светоэнергетической эффективности системы в сравнении с отдельным светодиодом.

Использование схемы со светофильтрами (2) даёт больше возможностей для оптимизации спектра. В таких схемах роль широкополосного источника света в составе осветительной системы эндоскопического зонда выполняют галогенные, ксеноновые и металлогалоидные лампы, а также белые светодиоды [10, 15]. В качестве спектрального элемента используют одиночные абсорбционные или интерференционные фильтры с фиксированным положением полосы пропускания [4, 6, 16, 17] либо набор таких фильтров, сменяемых механически [18]. Использование таких фильтров может быть эффективно только для задач контрастной визуализации элементов объекта, что ограничивает область применения этого класса устройств.

Существенно большие возможности даёт использование перестраиваемых спектральных элементов (1), к которым относятся классические монохроматоры, жидкокристаллические (ЖК) и акустооптические (АО) фильтры, резонаторы Фабри-Перо (ФП). Монохроматоры на основе диспергирующих призм и дифракционных решёток не используются в составе эндоскопических источников света, поскольку их неотъемлемый функциональный элемент – это щелевая дифракта, которая снижает общую све-

Рис. 1. Эндоскопический зонд со спектральным элементом в осветительном канале

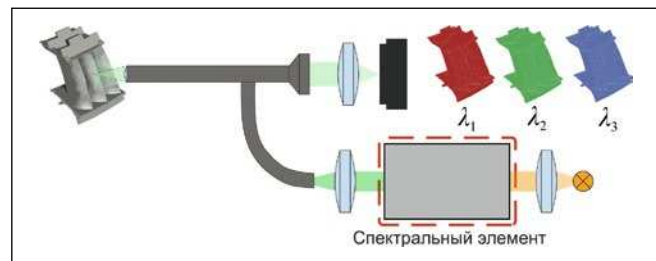


Рис. 2. Эндоскопический зонд со спектральным элементом в приёмном канале

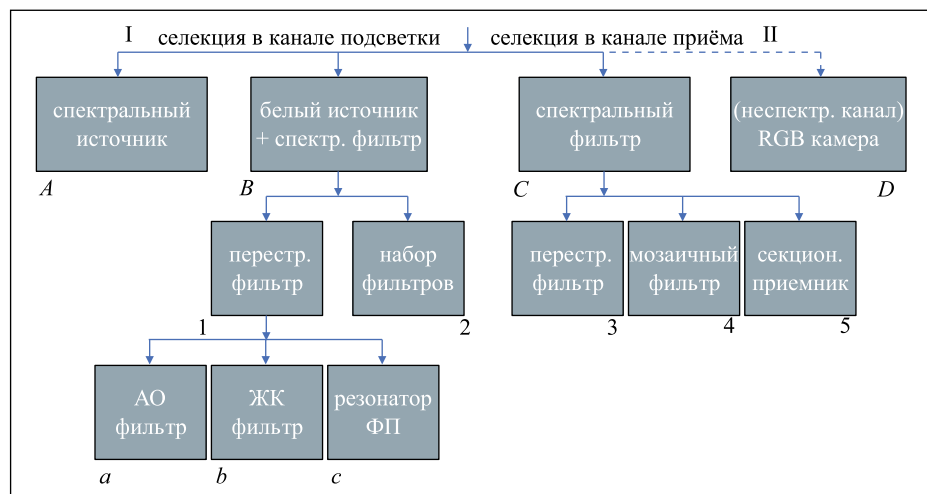
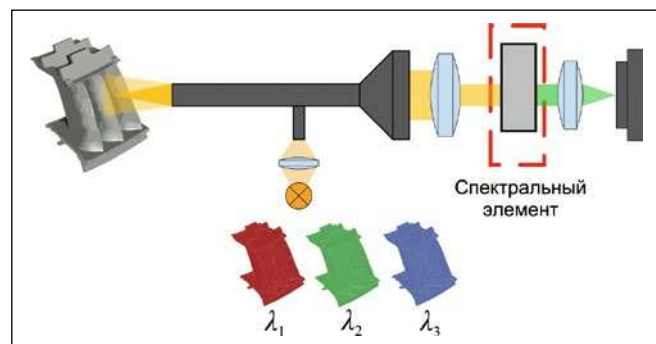


Рис. 3. Виды спектральных эндоскопов

тосилу устройств и затрудняет получение изображений.

Перестраиваемые спектральные элементы, используемые в эндоскопии, должны обеспечивать сохранение изображения объекта и немеханическую перестройку. Принцип действия АО фильтров (1a) основывается на явлении селективной дифракции оптического излучения на фазовой (брэгговской) решётке, создаваемой бегущей акустической волной в кристаллической среде [19]. Перестройка окна пропускания АО фильтра осуществляется посредством изменения частоты высокочастотного сигнала, подаваемого на его пьезоизлучатель.

Жидкокристаллические фильтры (1b) представляют собой компактную реализацию интерференционно-поляризационных фильтров, обеспечиваю-

щую электронное управление окном пропускания [20]. Выбор длины волны пропускания фильтра осуществляется за счёт изменения напряжения, подаваемого на ЖК ячейки. Перестраиваемые спектральные фильтры на основе резонаторов Фабри-Перо (1c) аналогичны по своему принципу действия [21, 22] интерференционным спектральным фильтрам с фиксированной полосой пропускания, а управление параметрами функции пропускания фильтра обеспечивается изменением толщины резонатора посредством микроэлектромеханических систем. Особенность перестраиваемых резонаторов Фабри-Перо – это многополосная функция пропускания, ограничивающая их рабочий спектральный диапазон интервалом между двумя соседними окнами.

Сравнение характеристик перестраиваемых элементов (табл. 1) показывает, что при одинаковом спектральном диапазоне наименьшее время перестройки и наилучшее спектральное разрешение обеспечивают АО фильтры. Кроме того, возможность управления формой функции пропускания и числом спектральных окон, свойство произвольной спектральной адресации и высокое пространственное разрешение, делают использование АО фильтров оптимальным решением в качестве перестраиваемых фильтров в составе спектральных эндоскопических устройств [23–25].

Отличительная особенность оптических эндоскопов со спектральной селекцией в приёмном канале (II) – это возможность разделения выходного потока света на два канала, в одном из которых проводится спектральная селекция (С), а во втором – регистрация обычного, цветного изображения объекта (D). Дополнительный, несекторальный канал позволяет осуществить пространственную привязку спектральных особенностей объекта к его визуальному изображению, что упрощает интеграцию новых спектральных методик исследования с уже существующими методиками эндоскопии. Наиболее важно это свойство в рамках поисковых исследований, когда априорных данных об объекте и его спектральных свойствах недостаточно.

В приёмном канале со спектральной селекцией используются как перестраиваемые спектральные элементы (3), так и фильтры с фиксированными полосами пропускания (4, 5). Последние как правило, размещаются в непосредственной близости от светочувствительной площадки матричного приёмника излучения, регистрирующего спектральное изображение [26–29]. При этом в целях одновременной регистрации спектральных изображений, соответствующих нескольким длинам волн, спектральные фильтры для разных длин волн либо наносятся на пиксели приёмника излучения в виде мозаичного растра (4), аналогичного фильтру Байера, применяемому для RGB-приёмников излучения [26–28], либо формируют протяжённые группы пикселей (секции), которые регистрируют предварительно разделённые в пространстве спектральные изображения (5) на рабочих длинах волн [26, 29]. В обо-

их случаях ограниченное число светочувствительных элементов матричного приёмника излучения неизбежно распределяется на каналы, предназначенные для регистрации нескольких изображений в отдельных спектральных интервалах. Таким образом, увеличение числа выделяемых в процессе регистрации спектральных интервалов одновременно ведёт к снижению пространственного разрешения – числа точек в спектральных изображениях.

В отличие от этого, при использовании в качестве спектрального элемента в приёмном канале перестраиваемых фильтров [19, 20, 30–34] максимально достижимое пространственное разрешение спектральных изображений определяется фотоприёмной матрицей. Поэтому в этой конфигурации (3) особо актуальна задача сохранения качества изображения при спектральной фильтрации. Она решается путём моделирования оптической схемы, образуемой эндоскопическим зондом, спектральным элементом и фоторегистрирующим элементом, с использованием систем автоматического проектирования. Следует отметить, что для таких элементов, как АО фильтры, дифракция в которых представляет собой распределённый по пространству процесс, проведение такого моделирования возможно только при построении адекватной приближённой модели [35, 36], описывающей такие элементы.

В то же время при использовании перестраиваемых фильтров (3) для получения изображений в нескольких спектральных интервалах необходима последовательная регистрация серии изображений, что требует затрат времени как на измерения, так и на перестройку по спектру. Таким образом, эти схемы характеризуются более низким быстродействием, что существенно при исследовании нестационарных объектов или при измерениях в движении. Особенность АО фильтров – это возможность быстрой скачкообразной перестройки по спектру, которая в задаче регистрации нескольких далеко расположенных спектральных линий даёт существенное преимущество в быстродействии в сравнении с другими перестраиваемыми спектральными элементами.

Описанное многообразие схем построения спектральных эндоскопических систем позволяет оптимизи-

ровать их с точки зрения решаемых задач.

### Применение спектральных эндоскопических устройств

Эндоскопические спектральные устройства реализуют две группы методов: контрастную визуализацию определённых элементов объекта по известным спектральным особенностям и определение спектральных свойств разных элементов объекта для выявления его состава и структуры.

В основе методов эндоскопической контрастной визуализации, которые характерны для варианта эндоскопов со спектральной подсветкой (I), как правило, лежит априорная информация о линиях поглощения отдельных элементов объекта, которые при этом выглядят более тёмными в абсорбционном и более яркими во флуоресцентном методе визуализации. В последнем методе узкополосное излучение подсветки возбуждает флуоресценцию красителей, вводимых в объект перед проведением эндоскопического осмотра [6, 16, 37–39]. В частности, промышленный флуоресцентный пенетрантный контроль [16] обеспечивает повышение вероятности обнаружения поверхностных дефектов за счёт создания значительного визуального контраста между дефектами, заполняющимися веществом-пенетрантом, и неповреждёнными участками рабочей поверхности. Аналогично, в лапароскопической хирургии флуоресцентные красители, вводимые в кровь, позволяют визуализировать кровеносные сосуды [6, 37, 38], а в флуоресцентной диагностике онкозаболеваний специфические флуоресцентные молекулярные агенты, соединяющиеся с опухолевыми тканями, применяются для очерчивания границ новообразований [39].

Флуоресцентная диагностика в медицине применяется и в неинвазивном варианте. Например, метод аутофлуоресцентной диагностики [17] основывается на флуоресценции коллагена, флавина, порфиринов и иных веществ, присутствующих в организме, при их возбуждении УФ-излучением. Изменение интенсивности аутофлуоресценции этих веществ в сравнении с нормой вместе с локальным изменением морфологии кровеносных сосудов указывает на патологические изменения тканей внутренних органов.

**Сравнительная характеристика наиболее распространённых типов перестраиваемых спектральных фильтров с электронным управлением**

	АО фильтр	ЖК фильтр	Резонатор ФП
Минимальная ширина окна	1–2 нм	5 нм	5 нм
Спектральный диапазон	1 октава	<1 октавы	1 октава
Минимальное время перестройки	10 мкс	100 мс	1 мс
Управление формой функции пропускания	да	нет	нет

Таблица 2

**Основные особенности спектральных эндоскопов**

Характеристика эндоскопов	Варианты реализации
Используемый физический эффект	абсорбция, флуоресценция
Способ спектральной селекции	в канале подсветки, в приёмном канале
Способ регистрации	визуальная, фотодетектирование (монохромное, RGB), 3D
Способ представления	спектральные снимки, гиперспектральные данные
Способ интерпретации	контрастная визуализация, спектральный анализ
Направления использования	неразрушающий контроль, медицинская диагностика

Неинвазивная диагностика существует в абсорбционном варианте визуализации. В частности, получили широкое распространение методы визуализации приповерхностных кровеносных сосудов внутренних органов без предварительного окрашивания, опирающиеся на данные о спектральном коэффициенте поглощения гемоглобина [4, 6, 40, 41]. В этом случае широкополосный источник света в совокупности со спектральным фильтром на максимум поглощения гемоглобина обеспечивают выделение структуры сосудистой сети, что даёт возможность анализа строения отдельных сосудов и определения плотности капиллярной сети.

В медицинской диагностике методы регистрации контрастных изображений развиваются в направлении разработки и внедрения алгоритмов автоматизированной обработки изображений, которые позволяют снизить влияние человеческого фактора на вероятность обнаружения и корректной классификации патологических изменений. Ещё одна актуальная проблема – обработка временной последовательности контрастированных снимков, например, в задаче видеоконноскопической для автоматизированной диагностики кожных онкопатологий и холодовой крапивницы [42–44].

Методы, основанные на регистрации спектральных свойств объекта и требующие измерений на разных длинах волн, реализуемые, как правило, с использованием спектральных элементов в приёмном канале (П) эндоскопического устройства, также находят своё применение как в медицинской диагностике, так и в задачах неразрушающего контроля в промышленности. Например, эндоскопические спектральные устройства на основе перестраиваемых АО фильтров используются для бесконтактной пирометрии и визуализации пространственного распределения температуры на поверхности труднодоступных полостей нагретых до высоких температур объектов [28, 45], а также в двигателях для обнаружения течей и мест загрязнения технологическими жидкостями [46, 47].

В медицине эндоскопы, позволяющие определить спектры отражения, обеспечивают дифференциацию тканей при лапароскопических операциях [20, 48], позволяют определять степень малигнизации тканей [33, 49]

или оксигенации и визуализировать их перфузию [18, 29]. Во многих случаях необходимо получать большое число спектральных снимков, так что образуемый трёхмерный массив данных  $I(x_i, y_j, \lambda_k)$ , называемый «гиперспектральный куб», требует значительных вычислительных средств, которые становятся частью эндоскопической системы. При этом вычисления могут быть связаны как с коррекцией аберраций системы, так и с анализом получаемых пространственно-спектральных характеристик. Для анализа больших массивов данных разрабатываются специализированные алгоритмы, направленные на ускорение и автоматизацию анализа, в том числе с использованием методов машинного обучения [50].

Следует отметить развитие ещё одного направления эндоскопии – стереоскопического, которое нацелено на анализ участков поверхности сложного рельефа, где в основном используется режим визуального наблюдения объекта с помощью двухканального, стереоскопического эндоскопа и бинокулярной насадки. Такие эндоскопы используются при стандартных лапа-

роскопических операциях, что обеспечивает восприятие хирургом глубины поля зрения, упрощает навигацию в полостях организма и позволяет реализовать автоматизированные алгоритмы контроля положения хирургических инструментов в операционном пространстве [51–54]. Использование спектральной визуализации структуры объекта имеет для стереоэндоскопов такое же важное значение, как было описано выше для обычных эндоскопических устройств.

Другая функция стереоэндоскопов – проведение бесконтактных геометрических измерений размеров дефектов в целях повышения объективности неразрушающего контроля [55, 56]. Эти манипуляции требуют определённого времени, эффективных интерактивных процедур и вычислительных ресурсов и реализуются в виде видеоэндоскопов. Следует отметить, что сложная оптическая схема эндоскопов приводит к значимым хроматическим аберрациям изображения, что может сказываться на точности этих методов. Одно из решений этой проблемы заключается в использовании узкополосной спектральной подсвет-

ки, другое – в проведении моделирования пространственно-спектральных искажений на этапе проектирования с целью её коррекции вычислительными средствами, третье – пространственно-спектральная калибровка стереоэндоскопической системы [57–59].

Таким образом, развитие стереоэндоскопических технологий стимулирует разработку для них специализированных спектральных методов и средств.

## Заключение

Вышеописанные отличительные свойства эндоскопов представлены в табл. 2.

Разнообразие методов реализации спектральных эндоскопических устройств и систем, представленных в обзоре, показывает широкие возможности оптимизации аппаратуры под конкретные решаемые задачи. Хотя обзор не претендует на исчерпывающую полноту, он демонстрирует особую перспективность использования перестраиваемых АО фильтров в качестве спектральных устройств.

## Благодарности

Работа выполнена в рамках Государственного задания НТЦ УП РАН (проект FFNS-2022–0010).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Berci, G., Forde, K.A.* History of endoscopy // *Surgical Endoscopy*, 2000, Vol. 14, #1, pp. 5–15.
2. Эндоскопия – взгляд изнутри: Пособие для практикующих врачей. / Анищук А.А. – Москва: ООО «Медицинское информационное агентство», 2008. – 240 с.
3. *Kohli, D. R., Baillie, J.* How Endoscopes Work // *Clinical Gastrointestinal Endoscopy* (Third Edition) / Chandrasekhara V. и др. – Philadelphia: Elsevier, 2019, pp. 24–31.e2.
4. *East, J., Vleugels, J., Roelandt, P., Bhandari, P., Bisschops, R., Dekker, E., Hassan, C., Horgan, G., Kiesslich, R., Longcroft-Wheaton, G., Wilson, A., Dumonceau, J.-M.* Advanced endoscopic imaging: European Society of Gastrointestinal Endoscopy (ESGE) Technology Review // *Endoscopy*, 2016 Vol. 48, #11, pp. 1029–1045.
5. *Tassi, G. F., Tschopp, J.M.* The centenary of medical thoracoscopy // *European Respiratory Journal*, 2010, Vol. 36, #6, pp. 1229–1231.
6. *Cho, W. Y., Jang, J. Y., Lee, D.H.* Recent Advances in Image-enhanced Endoscopy // *Clinical Endoscopy*, 2011, Vol. 44, #2, 65 p.

7. *Kusano, T., Inomata, M., Hiratsuka, T., Akiagi, T., Ueda, Y., Tojigamori, M., Shiroshita, H., Etoh, T., Shiraishi, N., Kitano, S.* A Comparison of Laparoscopic and Open Surgery Following Pre-operative Chemoradiation Therapy for Locally Advanced Lower Rectal Cancer // *Japanese Journal of Clinical Oncology*, 2014, Vol. 44, #4, pp. 305–310.

8. *Noguera, J., Dolz, C., Cuadrado, A., Olea, J., Vilella, A., Morales, R.* Hybrid transvaginal cholecystectomy, NOTES, and mini-laparoscopy: analysis of a prospective clinical series // *Surg Endosc*, 2009, Vol. 23, #4, pp. 876–81.

9. *Wang, Y.-W., Huang, L.-Y., Song, C.-L., Zhuo, C.-H., Shi, D.-B., Cai, G.-X., Xu, Y., Cai, S.-J., Li, X.-X.* Laparoscopic vs open abdominoperineal resection in the multimodality management of low rectal cancers // *World Journal of Gastroenterology*, 2015, Vol. 21, #35, pp. 10174–10183.

10. *The Science of Remote Visual Inspection (RVI): Technology, Applications, Equipment / Lorenz P.G.* – Lake Success (NY): Olympus Corporation, 1990. – 347 p.

11. *Zhu, Y.-K., Tian, G.-Y., Lu, R.-S., Zhang, H.* A Review of Optical NDT Technologies // *Sensors*, 2011, Vol. 11, #8, pp. 7773–7798.

12. *Белов М. Л., Белов А.М., Городничев В.А., Альков С.В.* Многоспектральный оптический рефлектометрический метод мониторинга лесных ресурсов // *Светотехника*. – 2021. – № 6. – СС. 57–63.

13. *Аладов А.В., Закейм А.Л., Семьякина Ю.В., Черняков А.Е.* Динамически управляемый светильник со светодиодами для контрастной визуализации биологических тканей при хирургических операциях // *Светотехника*. – 2021. – № 5. – С. 53–57.

14. *Browning, C. M., Mayes, S., Rich, T. C., Leavesley, S.J.* Design of a modified endoscope illuminator for spectral imaging of colorectal tissues // *Proceedings of SPIE – the International Society for Optical Engineering*, 2017, Vol. 10060, 1006015 p.

15. Эндоскопы: учебное пособие. 2-е изд., доп. и расш. / Хацевич Т.Н., Михайлов И.О. – Новосибирск: СГГА, 2012. – 260 с.

16. *Lemoal, J. C. G., A.* Endoscopic Fluorescent Penetrant Inspection (FPI) // 11th European Conference on Non-Destructive Testing (EC-NDT 2014). – Prague, Czech Republic, 2014. –.

17. *Song, L. M., Banerjee, S., Desilets, D., Diehl, D. L., Farraye, F. A., Kaul, V., Kethu, S. R., Kwon, R. S., Mamula, P., Pedrosa, M. C., Rodriguez, S. A., Tierney, W.M.* Autofluorescence imaging // *Gastrointest Endosc*, 2011, Vol. 73, #4, pp. 647–50.

18. *Fawzy, Y., Lam, S., Zeng, H.* Rapid multispectral endoscopic imaging system for near real-time mapping of the mucosa blood supply in the lung // *Biomedical Optics Express*, 2015, Vol. 6, #8, 2980 p.

19. *Machikhin, A., Pozhar, V., Batshev, V.* Double-AOTF-based aberration-free spec-

tral imaging endoscopic system for biomedical applications // *Journal of Innovative Optical Health Sciences*, 2015, Vol. 08, #03, 1541009 p.

20. *Zuzak, K. J., Naik, S. C., Alexandrakis, G., Hawkins, D., Behbehani, K., Livingston, E.H.* Characterization of a near-infrared laparoscopic hyperspectral imaging system for minimally invasive surgery // *Analytical chemistry*, 2007, Vol. 79, #12, pp. 4709–15.

21. *Dohi, T., Matsumoto, K., Shimoyama, I.* The micro Fabry-Perot interferometer for the spectral endoscope // 18th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2005. MEMS2005. 10.1109/MEMSYS.2005.1454058, 2005, pp. 830–833.

22. *Schwarze, C., Rentz, J., Carlson, D., Vaillancourt, R., Genetti, G., Engel, J.* Tunable Fabry-Perot filter for imaging spectroscopy in the infrared // *Proceedings of SPIE*, 2002, Vol. 4574, #4574OE.

23. *Machikhin, A. S., Batshev, V. I., Polschikova, O. V., Khokhlov, D. D., Pozhar, V. E., Gorevoy, A. V.* Conjugation of fiber-coupled wideband light sources and acoustooptical spectral elements // *Proceedings of SPIE*, 2017, Vol. 10592, #10592OI.

24. *Machikhin, A. S., Khokhlov, D. D., Pozhar, V. E., Kozlov, A. B., Batshev, V. I., Gorevoy, A. V.* Acousto-optical tunable filter for a swept light source with variable transmission function // *Proceedings of SPIE*, 2018, Vol. 10815, #10815OL.

25. *Machikhin, A. S., Kozlov, A. B., Khokhlov, D. D., Pozhar, V. E., Batshev, V. I.* Spectrally tunable illumination system based on acousto-optic diffraction of light // *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, Vol. 1092, #012081.

26. *Hagen, N., Kudenov, M.* Review of snapshot spectral imaging technologies // *Optical Engineering*, 2013, Vol. 52, #9, 090901 p.

27. *Kester, R. T., Bedard, N., Gao, L., Tkaczyk, T.S.* Real-time snapshot hyperspectral imaging endoscope // *Journal of Biomedical Optics*, 2011, Vol. 16, #5, 056005 p.

28. *Bykov, A. A., Khokhlov, D. D., Gorevoy, A. V., Volkov, M. V.* Thermography of inner surfaces of high-temperature industrial facilities // *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, Vol. 1636, #1, 012031 p.

29. *Luthman, A. S., Waterhouse, D. J., Ansel-Bollepalli, L., Yoon, J., Gordon, G. S. D., Joseph, J., di Pietro, M., Januszewicz, W., Bohndiek, S.E.* Bimodal reflectance and fluorescence multispectral endoscopy based on spectrally resolving detector arrays // *Journal of biomedical optics*, 2018, Vol. 24, #3, pp. 1–14.

30. *Khokhlov, D. D., Machikhin, A. S., Batshev, V. I., Gorevoy, A. V., Pozhar, V.E.* Endoscopic spectral imagers based on acousto-optic filtration of light // *Proceedings of SPIE*, 2019, Vol. 11210, #11210OD.

31. *Bouhifd, M., Whelan, M., Arahamian, M.* Use of acousto-optic tuneable filters for imaging fluorescence spectroscopy applications in vivo and in vitro // *Proceedings of SPIE*, 2005, Vol. 5692.

32. Arnold, T., De Biasio, M., Leitner, R. Hyper-spectral video endoscopy system for intra-surgery tissue classification // 2013 Seventh International Conference on Sensing Technology (ICST) 10.1109/ICSensT.2013.6727632, 2013, pp. 145–150.

33. Leitner, R., Biasio, M. D., Arnold, T., Dinh, C. V., Loog, M., Duin, R. P.W. Multi-spectral video endoscopy system for the detection of cancerous tissue // Pattern Recognition Letters, 2013, Vol. 34, #1, pp. 85–93.

34. Martin, M. E., Wabuyele, M., Panjehpour, M., Overholt, B., DeNovo, R., Kennel, S., Cunningham, G., Vo-Dinh, T. An AOTF-based dual-modality hyperspectral imaging system (DM-HSI) capable of simultaneous fluorescence and reflectance imaging // Medical Engineering & Physics, 2006, Vol. 28, #2, pp. 149–55.

35. Machikhin, A., Batshev, V., Pozhar, V. Aberration analysis of AOTF-based spectral imaging systems // Journal of the Optical Society of America A, 2017, Vol. 34, #7, pp. 1109–1113.

36. Gorevoy, A. V., Machikhin, A. S., Martynov, G. N., Pozhar, V.E. Spatiospectral transformation of noncollimated light beams diffracted by ultrasound in birefringent crystals // Photonics Research, 2021, Vol. 9, #5, 687 p.

37. Alander, J. T., Kaartinen, I., Laakso, A., Pättilä, T., Spillmann, T., Tuchin, V. V., Venermo, M., Väiläsu, P. A Review of Indocyanine Green Fluorescent Imaging in Surgery // International Journal of Biomedical Imaging, 2012, Vol. 2012, pp. 1–26.

38. Boni, L., David, G., Mangano, A., Dionigi, G., Rauseri, S., Spampatti, S., Cassinotti, E., Fingerhut, A. Clinical applications of indocyanine green (ICG) enhanced fluorescence in laparoscopic surgery // Surgical Endoscopy, 2015, Vol. 29, #7, pp. 2046–2055.

39. Joshi, B. P., Wang, T.D. Targeted Optical Imaging Agents in Cancer: Focus on Clinical Applications // Contrast Media & Molecular Imaging, 2018, Vol. 2018, pp. 1–19.

40. Kikuchi, O., Ezo, Y., Morita, S., Horimatsu, T., Muto, M. Narrow-band Imaging for the Head and Neck Region and the Upper Gastrointestinal Tract // Japanese Journal of Clinical Oncology, 2013, Vol. 43, #5, pp. 458–465.

41. Fedeli, P., Gasbarrini, A., Cammarota, G. Spectral endoscopic imaging: the multiband system for enhancing the endoscopic surface visualization // Journal of clinical gastroenterology, 2011, Vol. 45, #1, pp. 6–15.

42. Machikhin, A. S., Volkov, M. V., Khokhlov, D. D., Lovchikova, E. D., Potemkin A.V., Danilycheva, I. V., Dorofeeva, I. V., Shulzhenko, A.E. Exoscope-based videocapillaroscopy system for in vivo skin microcirculation imaging of various body areas // Biomedical Optics Express, 2021, Vol. 12, #8, pp. 4627–4636.

43. Volkov, M. V., Machikhin, A. S., Lovchikova, E. D., Khokhlov, D. D., Balandin, I. A., Potemkin, A. V., Galanova, V. S., Danilycheva, I. V., Dorofeeva, I.V. Study of The Cold Test Effect on Microcirculation by Video Capillaroscopy // Scientific Visualization, 2021, Vol. 13, #3.

44. Feasibility of videocapillaroscopy for characterization of microvascular patterns in skin lesions. SPIE Photonics Europe. / Guryleva A., Machikhin A., Khokhlov D., Volkov M., Bukova V., Sharikova M., Orlova E., Smirnova L.: SPIE, 2022. SPIE Photonics Europe.

45. Bykov, A. A., Khokhlov, D. D., Machikhin, A. S., Zinin, P.V. Temperature Measurement Using Endoscopic Acousto-Optical Spectral Imaging System // 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF) 10.1109/WECONF.2018.8604397. St. Petersburg, Russia, 2018, pp. 1–4.

46. Мачихин А. С., Батиев В.И., Хохлов Д.Д., Перфилов А.М., Калошин В.А. Акустооптический модуль для визуального и спектрометрического эндоскопического контроля // Труды НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко. – 2016. – Т. 33. – С. 227–238.

47. Мачихин А. С., Хохлов Д.Д., Батиев В.И., Пожар В.Э. Акустооптический эндоскопический модуль для неразрушающего контроля // Известия РАН. Серия физическая. – 2018. – Т. 82, № 11. – С. 1540–1542.

48. Arnold, T., De Biasio, M., Leitner, R. Hyperspectral video endoscope for intra-surgery tissue classification using auto-fluorescence and reflectance spectroscopy // European Conference on Biomedical Optics, Vol. 8087, SPIE, 2011.

49. Yoon, J., Joseph, J., Waterhouse, D. J., Luthman, A. S., Gordon, G. S. D., Di Pietro, M., Januszewicz, W., Fitzgerald, R. C., Bohndiek, S. E. A clinically translatable hyperspectral endoscopy (HySE) system for imaging the gastrointestinal tract // Nature Communications, 2019, Vol. 10, #1.

50. Grigoriou, A., Yoon, J., Bohndiek, S.E. Deep learning applied to hyperspectral endoscopy for online spectral classification // Scientific Reports, 2020, Vol. 10, #1.

51. Sørensen, S. M. D., Savran, M. M., Konge, L., Bjerrum, F. Three-dimensional versus two-dimensional vision in laparoscopy: a systematic review // Surgical Endoscopy, 2016, Vol. 30, #1, pp. 11–23.

52. Nomura, K., Kaise, M., Kikuchi, D., Izuka, T., Fukuma, Y., Kuribayashi, Y., Tanaka, M., Toba, T., Furuhashi, T., Yamashita, S., Matsui, A., Mitani, T., Hoteya, S. Recognition Accuracy Using 3D Endoscopic Images for Superficial Gastrointestinal Cancer: A Crossover Study // Gastroenterology Research and Practice, 2016, Vol. 2016, pp. 1–6.

53. Nomura, K., Kaise, M., Kikuchi, D., Izuka, T., Fukuma, Y., Kuribayashi, Y., Tanaka, M., Toba, T., Furuhashi, T., Yamashita, S., Matsui, A., Mitani, T., Hoteya, S. Recognition accuracy of tumor extent using a prototype 3D endoscope for superficial gastric tumor: an ex vivo crossover study // Endoscopy International Open, 2018, Vol. 06, #06, pp. E652–E658.

54. Albrecht, T., Baumann, I., Plinkert, P. K., Simon, C., Sertel S. Three-dimensional endoscopic visualization in functional endoscopic

sinus surgery // European Archives of Oto-Rhino-Laryngology, 2016, Vol. 273, #11, pp. 3753–3758.

55. Батиев В. И., Мачихин А.С., Горевой А.В., Хохлов Д.Д., Наумов А.А., Перфилов А.М., Калошин В.А. Методы и средства визуально-измерительного контроля труднодоступных узлов ракетной техники // Главный механик. – 2022. № 3. – С. 168–177.

56. Горевой А. В., Мачихин А.С., Хохлов Д.Д., Батиев В.И., Калошин В.А., Перфилов А.М. Применение трассировочной модели оптико-электронной системы для повышения точности стереоскопических эндоскопических измерений // Дефектоскопия. – 2017. № 9. – С. 44–53.

57. Gorevoy, A. V., Machikhin, A. S., Khokhlov, D. D., Batshev, V.I. Optimization of prism-based stereoscopic imaging systems at the optical design stage with respect to required 3D measurement accuracy // Optics Express, 2020, Vol. 28, #17, pp. 24418–24430.

58. Machikhin, A., Gorevoy, A., Khokhlov, D., Kuznetsov, A. Modification of calibration and image processing procedures for precise 3-D measurements in arbitrary spectral bands by means of a stereoscopic prism-based imager // Optical Engineering, 2019, Vol. 58, #3, 033104 p.

59. Khokhlov, D. D., Machikhin, A. S., Gorevoy, A. V., Batshev, V.I. Endoscopic probe for multispectral 3D measurements and imaging // Proceedings of SPIE, 2020, Vol. 11351, #113511J.



**Хохлов Демид Денисович.** Окончил в 2017 г. Факультет радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Работает младшим научным сотрудником Учреждения РАН

«Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН»



**Пожар Витольд Эдуардович,** доктор физ.-мат. наук. Окончил МФТИ в 1981 г., работает руководителем отдела акустооптических информационных систем НТЦ УП РАН, профессор МГТУ им.

Н.Э. Баумана и НИЯУ «МИФИ». Область научных интересов: акустооптика, спектрометрия, дифференциальная, модуляционная, адаптивная спектроскопия, гиперспектрометрия, дистанционное зондирование, спектральное приборостроение