

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-07-37-44

УДК 535.8

## Видеоспектрометр ближнего инфракрасного диапазона с использованием двойного акустооптического фильтра

Иван Алексеевич Баландин<sup>1</sup>, Милана Олеговна Шарикова<sup>2✉</sup>,  
Владислав Игоревич Батшев<sup>3</sup>, Диана Владимировна Варнавская<sup>4</sup>,  
Алексей Борисович Козлов<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup>Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>3</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>5</sup>Научно-исследовательский институт «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха, Москва, Россия

<sup>1</sup>balandin.ia@ntcup.ru <https://orcid.org/0000-0003-2120-0186>

<sup>2</sup>sharikova.mo@ntcup.ru <https://orcid.org/0000-0001-5593-6170>

<sup>3</sup>batshev.vi@ntcup.ru <https://orcid.org/0000-0002-7066-0106>

<sup>4</sup>varnavskaya.dv@ntcup.ru <https://orcid.org/0000-0003-1936-435X>

<sup>5</sup>kozlov@ntcup.ru <https://orcid.org/0000-0002-5378-2064>

### Аннотация

**Предмет исследования.** Методы расчета оптических схем акустооптических видеоспектрометров для прикладных задач. **Цель работы.** Разработка видеоспектрометра с двойной акустооптической фильтрацией излучения в ближнем инфракрасном диапазоне длин волн 0,85–1,6 мкм. **Метод.** Расчет оптической системы видеоспектрометра выполнен в системе автоматизированного проектирования ZEMAX с использованием оригинального программного модуля. Подтверждение результатов моделирования выполнено экспериментально. **Основные результаты.** Разработан и изготовлен акустооптический видеоспектрометр ближнего инфракрасного диапазона спектра (0,85–1,6 мкм). В приборе использован сенсор InGaAs и реализована двойная акустооптическая фильтрация с целью повышения пространственного и спектрального разрешений. Благодаря использованию афокальной оптической системы на входе угловое поле составляет  $8 \times 12^\circ$ . Прибор позволяет получать спектральные изображения объектов, расположенных на дистанции съемки от 1 м и более, и обеспечивает пространственное разрешение около  $200 \times 150$  разрешимых элементов в пределах поля зрения. Ширина спектральной полосы пропускания составляет 12 нм (на длине волны 1,06 мкм). **Практическая значимость.** Видеоспектрометр разработан для сельскохозяйственных приложений, однако данный класс приборов находит широкое применение во множестве других задач: в дистанционном зондировании, для биомедицинской диагностики, в неразрушающем контроле технических объектов.

**Ключевые слова:** акустооптика, акустооптический видеоспектрометр, двойная акустооптическая фильтрация, ближний инфракрасный диапазон

**Благодарность:** работа выполнена в рамках Государственного задания НТИЦ УП РАН (проект FFNS-2022-0010). Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования НТИЦ УП РАН.

**Ссылка для цитирования:** Баландин И.А., Шарикова М.О., Батшев В.И., Варнавская Д.В., Козлов А.Б. Видеоспектрометр ближнего инфракрасного диапазона с использованием двойного акустооптического фильтра // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 7. С. 37–44. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-07-37-44>

**Коды OCIS:** 130.3120, 230.1040, 120.6200, 110.4234

# Short-wave infrared imaging spectrometer based on tandem acousto-optical tunable filter

IVAN A. BALANDIN<sup>1</sup>, MILANA O. SHARIKOVA<sup>2✉</sup>, VLADISLAV I. BATSHEV<sup>3</sup>,  
DIANA V. VARNAVSKAYA<sup>4</sup>, ALEXEY B. KOZLOV<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup>Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>3, 4</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>5</sup>Stelmakh Polyus Research Institute, Moscow, Russia

<sup>1</sup>[balandin.ia@ntcup.ru](mailto:balandin.ia@ntcup.ru)

<https://orcid.org/0000-0003-2120-0186>

<sup>2</sup>[sharikova.mo@ntcup.ru](mailto:sharikova.mo@ntcup.ru)

<https://orcid.org/0000-0001-5593-6170>

<sup>3</sup>[batshev.vi@ntcup.ru](mailto:batshev.vi@ntcup.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-7066-0106>

<sup>4</sup>[varnavskaya.dv@ntcup.ru](mailto:varnavskaya.dv@ntcup.ru)

<https://orcid.org/0000-0003-1936-435X>

<sup>5</sup>[kozlov@ntcup.ru](mailto:kozlov@ntcup.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-5378-2064>

## Abstract

**Subject of study.** Methods for design optical schemes of acousto-optical hyperspectral devices for applied problems. **Goal of the work.** Development of hyperspectral device with tandem acousto-optical tunable filter for range of 0.85–1.6  $\mu\text{m}$ . **Method.** The design of the optical system of the hyperspectral device was performed in ZEMAX using the original software module. The simulation results were confirmed experimentally. **Main results.** Short-wave infrared hyperspectral device has been developed and manufactured. The device uses an InGaAs sensor and implements tandem acousto-optic filtration to improve the spatial and spectral resolution. Due to the use of an afocal optical system at the entrance, the angular field of view is  $8\times 12^\circ$ . The device allows to obtain spectral images of objects located at a shooting distance of 1 m or more, and provides a spatial resolution of about  $200\times 150$  resolvable elements within the field of view. The spectral bandwidth is 12 nm (at a wavelength of 1.06  $\mu\text{m}$ ). **Practical significance.** The hyperspectral device was developed for agricultural applications, but this class of devices is widely used in many other tasks: in remote sensing, for biomedical diagnostics, and in non-destructive testing of technical objects.

**Keywords:** acousto-optics, spectral imaging, tandem acousto-optical tunable filter, short-wave infrared range

**Acknowledgment:** the work was carried out within the framework of the State Assignment of the STC UP RAS (project FFNS-2022-0010). The results were obtained using the equipment of the Center for Collective Use of the STC UP RAS.

**For citation:** Balandin I.A., Sharikova M.O., Batshev V.I., Varnavskaya D.V., Kozlov A.B. Short-wave infrared imaging spectrometer based on tandem acousto-optical tunable filter [in Russian] // Opticheskiy Zhurnal. 2024. V. 91. № 1. P. 37–44. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-07-37-44>

**OCIS codes:** 130.3120, 230.1040, 120.6200, 110.4234

## ВВЕДЕНИЕ

Методы гиперспектральной съемки широко используются для дистанционного зондирования, экомониторинга, неразрушающего контроля и в решении других задач [1–3]. Одним из перспективных технических решений

для создания гиперспектральных приборов являются акустооптические (АО) перестраиваемые фильтры. Приборы на их основе обладают рядом важных особенностей, таких как, например, произвольная спектральная адресация и возможность управления функцией

пропускания, высокое пространственное разрешение, отсутствие подвижных элементов [4, 5]. Немалый интерес для биомедицинских и сельскохозяйственных приложений вызывает проведение гиперспектрального анализа в инфракрасной (ИК) области спектра [6, 7]. Поэтому целью данной работы является разработка видеоспектрометра с двойной АО фильтрацией излучения в ближнем ИК диапазоне длин волн 0,85–1,6 мкм

### ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

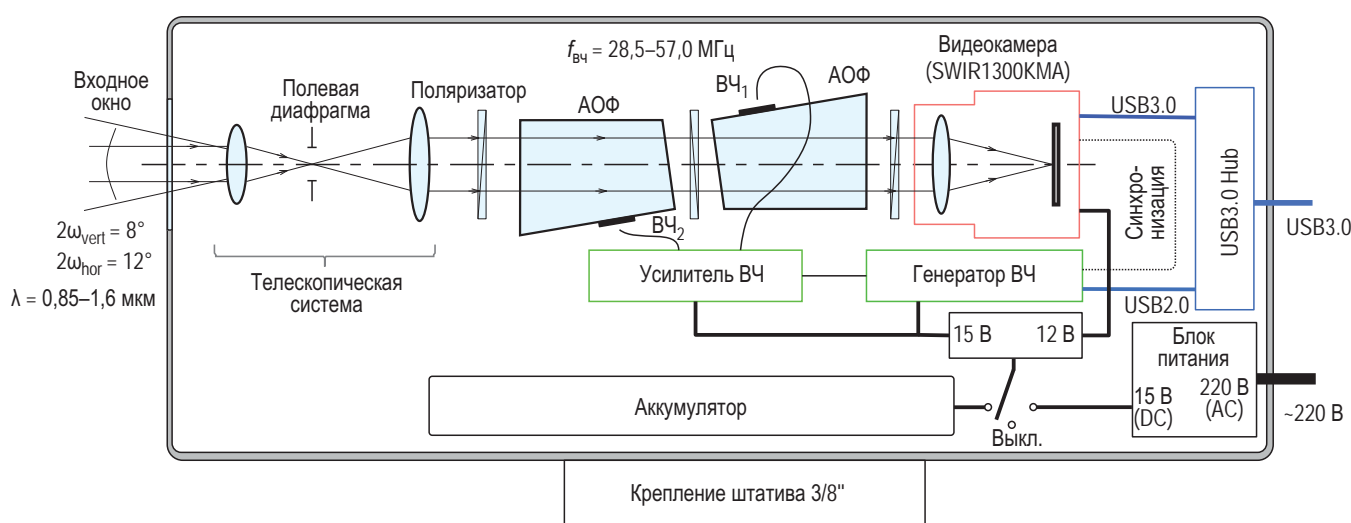
В данной работе рассматривается гиперспектрометр, предназначенный для работы в ближней ИК области спектра (0,85–1,6 мкм), разработанный на основе ранее проведенных теоретических и экспериментальных исследований, показавших эффективность использования АО фильтрации в этом диапазоне [8]. Для обеспечения высокого спектрального разрешения и устранения хроматических aberrаций, возникающих при АО дифракции и особо заметных в ИК диапазоне, в приборе использована двойная АО фильтрация. Функциональная схема прибора приведена на рис. 1.

Так как угловое поле АО фильтра невелико и составляет порядка 4°, на входе спектрометра перед ним устанавливается телескопическая система, расширяющая угловое поле до 15°. Коллимированное излучение претерпевает

двойную АО фильтрацию и фокусируется объективом на матричный приемник излучения.

Акустооптический фильтр состоит из двух идентичных АО ячеек, однако из-за их конструктивных особенностей сложно сделать так, чтобы зависимости между ультразвуковой частотой и длиной волны максимума пропускания аппаратных функций АО ячеек были одинаковыми. В работе [9] описан способ решения этой проблемы на аппаратном уровне, в данной работе предлагается решение на программном уровне. Для этого драйвер АО фильтра, состоящий из двухканального генератора высокочастотного сигнала (30–60 МГц), управляемого по интерфейсу USB 2.0, и двухканального усилителя, позволяет подавать на разные АО ячейки разные по значению частоты.

Спектральные изображения формируются на матричном приемнике излучения. В качестве приемника используется охлаждаемый сенсор *Sony IMX 990-AABA-C*, работающий в диапазоне длин волн 0,4–1,7 мкм, входящий в состав видеокамеры SWIR1300KMA фирмы *TopTek*. Пространственное разрешение камеры составляет 1280×1024 пиксела, однако разрешение видеоспектрометра, определяемое принципиально не устранимыми дифракционными явлениями в его оптической системе (ОС), существенно ниже и составляет около 200×150 разрешимых элементов в пределах поля зрения прибора. В видеоспектрометре



**Рис. 1.** Структурная схема АО прибора. АОФ — акустооптический фильтр, ВЧ — высокочастотный,  $f$  — частота ультразвука,  $\lambda$  — длина волн излучения,  $2\omega$  — угловое поле

**Fig. 1.** Structural scheme of an acousto-optic device. АОФ is acousto-optic tunable filter, ВЧ is high-frequency,  $f$  is ultrasound frequency,  $\lambda$  is radiation wavelength,  $2\omega$  is angular field of view

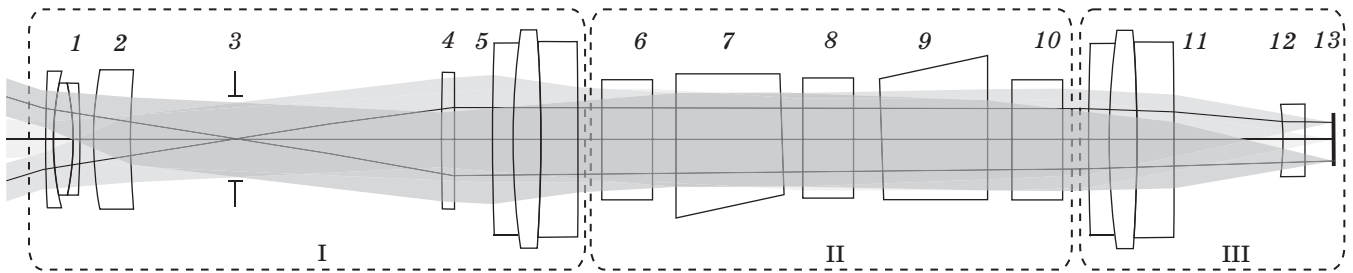
предусмотрена возможность извлечения видеокамеры с целью ее использования для других задач.

### Оптическая система прибора

Принципиальная оптическая схема прибора, представленная на рис. 2, состоит из телескопической системы Кеплера, обеспечивающей согласование углового поля системы с меньшим угловым полем АО фильтра, двойного АО фильтра и видеокамеры.

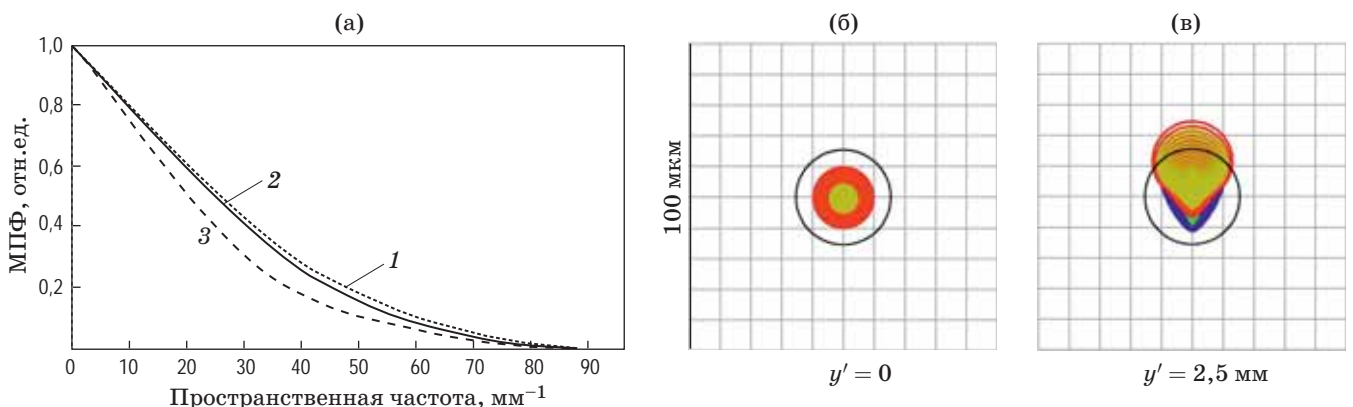
Поступающее на вход системы излучение попадает на объектив, состоящий из трехлинзового склеенного блока (поз. 1) и мениска (поз. 2). Объектив формирует промежуточное изображение в плоскости полевой диа-

фрагмы, которая установлена для ограничения поля зрения и уменьшения влияния паразитного (недифрагированного в АО фильтре) излучения на контраст изображения. Затем излучение коллимируется вторым объективом, состоящим из мениска (поз. 4) и трехлинзового склеенного блока (поз. 5), и поступает в АО фильтр, который выделяет узкую спектральную полосу из широкого спектра проходящего излучения. Далее излучение попадает в видеокамеру, где фокусируется объективом на матричный фотоприемник. Фокусирующий объектив состоит из двух компонентов: силовой компонент реализован в виде трехлинзового склеенного блока (поз. 11), а коррекционный представляет



**Рис. 2.** Принципиальная оптическая схема АО видеоспектрометра. Блок I: 1, 2, 4, 5 — линзы, 3 — диафрагма. Блок II: 6, 8, 10 — поляризаторы, 7, 9 — АО ячейки с двумя пьезопреобразователями. Блок III: 11, 12 — линзы, 13 — камера

**Fig. 2.** Basic optical scheme of an acousto-optical imaging spectrometer. Block I: 1, 2, 4, 5 are lenses, 3 is aperture. Block II: 6, 8, 10 are polarizers, 7, 9 are acousto-optical cells. Block III: 11, 12 are lenses, 13 is camera



**Рис. 3.** Графики, характеризующие качество изображения. Модуляционная передаточная функция (а) в центре поля изображения (2), на краю поля изображения (3), дифракционный предел (1). Пятна рассеяния точки в центре поля (б) и на краю (в). Черными контурами на пятнах рассеяния (б, в) обозначены кружки Эйри

**Fig. 3.** Graphs characterizing image quality. (a) Modulation transfer function (2) in the center of the image field, (3) at the edge of the image field, (1) diffraction limit. Point scattering spots (б) in the center of the field and (в) at the edge. The black lines on the spot diagrams (б, в) indicate Airy disc

собой линзу Смита. Компоненты 5 и 11 полностью идентичны.

Двойной АО фильтр состоит из двух идентичных АО ячеек и трех скрещенных поляризаторов. Акустооптические ячейки изготовлены из кристалла  $\text{TeO}_2$  и имеют угол среза  $7^\circ$ . Пьезопреобразователи согласованы на диапазон звуковых частот 30–60 МГц, соответствующий диапазону длин волн 0,85–1,6 мкм. Угол падения оптического излучения по отношению к оси [110] первого кристалла (поз. 7) составляет  $73,85^\circ$ , а его выходная грань наклонена так, чтобы минимизировать хроматический сдвиг изображения [10, 11]. Вторая АО ячейка идентична первой, но развернута на  $180^\circ$ , за счет чего компенсируются дисторсия и хроматический сдвиг изображения. Вообще говоря, выходные грани АО ячеек могут иметь и другой наклон, главное, чтобы АО ячейки имели одинаковую геометрию [12, 13].

Элементы ОС видеоспектрометра (линзы, АО ячейки) рассчитаны с применением оригинального программного модуля [14] и изготовлены в НТЦ УП РАН.

Светосила прибора ограничена главным образом геометрическим фактором двойного АО фильтра, который не может быть увеличен ОС. Геометрический фактор представляет собой произведение угловой апертуры  $2w$  фильтра на его световой диаметр  $D$ . Их значения составляют  $D = 9$  мм,  $2w = 4^\circ$ , что обуславливает невысокое относительное отверстие системы в целом.

Рассчитанная ОС обладает следующими основными характеристиками:

- рабочий спектральный диапазон от 0,85 до 1,6 мкм,
- фокусное расстояние 17 мм,
- угловое поле  $15^\circ$ ,
- относительное отверстие 1:14,
- длина 280 мм.

На рис. 3 представлены графики, характеризующие качество получаемого изображения: график полихроматической модуляционной передаточной функции (МПФ) и диаграммы пятен рассеяния. В центре поля МПФ близка к дифракционному качеству. По виду пятен рассеяния можно сделать вывод, что в системе присутствуют кома и небольшой хроматизм увеличения, однако в целом качество изображения близко к дифракционному.

### Приборная реализация спектрометра

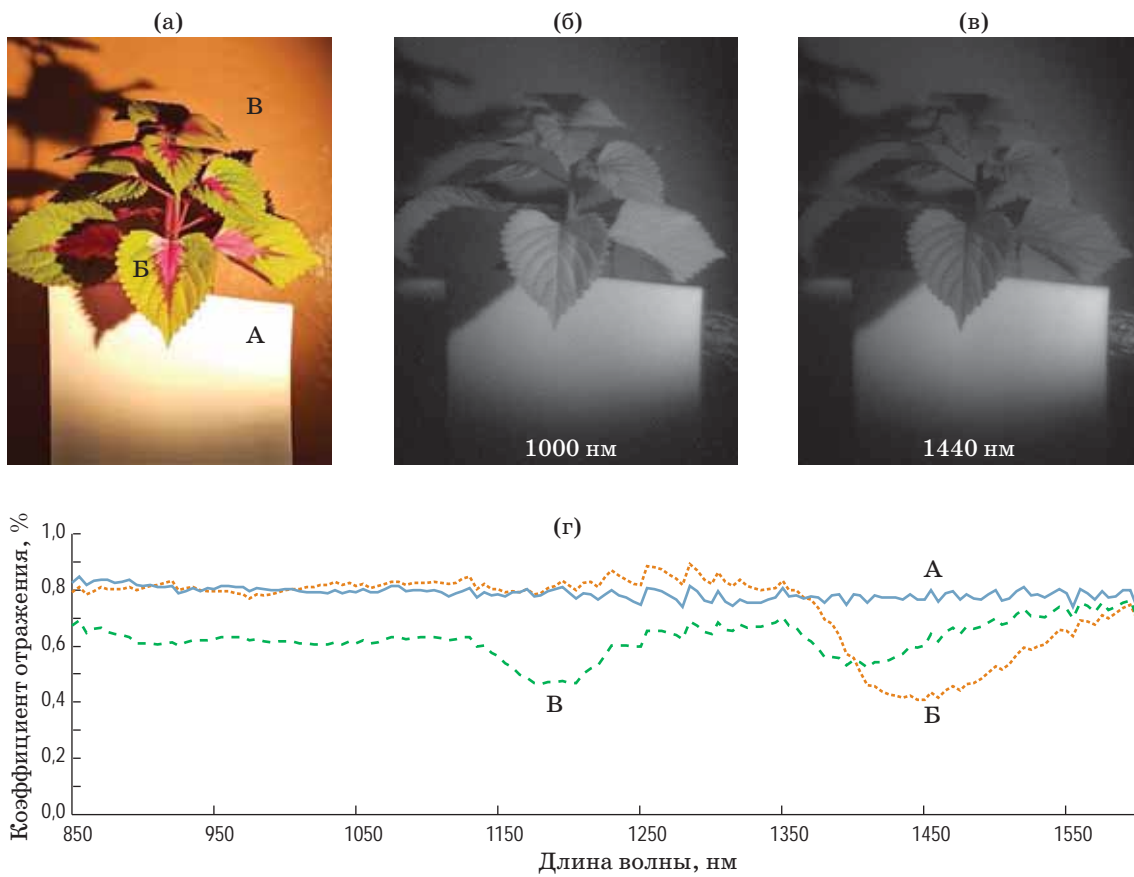
В соответствии с приведенными схемами и результатами моделирования был изготовлен прибор, предназначенный для исследования спектральных характеристик различных объектов в полевых условиях. Основным его назначением является мониторинг состояния сельскохозяйственных угодий (зерновых культур). Во время съемки прибор предполагается устанавливать на неподвижный штатив или другую стационарную опору. Внешний вид видеоспектрометра, установленного на штатив, демонстрирует рис. 4.

Взаимодействие оператора с видеоспектрометром происходит через оригинальное специализированное программное обеспечение. Для корректного отображения и измерения спектральных характеристик объектов используется пространственно-спектральная калибровка [15], учитывающая основные факторы, влияющие на параметры регистрируемых изображений, в частности на спектральную зависимость эффективности АО дифракции, спектральный дрейф изображения, виньетирование ОС, чувствительность и шумы приемника излучения.

Примеры зарегистрированных спектральных изображений, а также построенные по ним спектры отражения, приведены на рис. 5.



Рис. 4. Внешний вид прибора  
Fig. 4. Appearance of the device



**Рис. 5.** Изображение комнатного растения *Coleus*, зарегистрированное RGB камерой (а), примеры спектральных изображений растения на длинах волн 1000 (б) и 1440 нм (в), спектры отражения (г), построенные в точках А, Б и В объекта

**Fig. 5.** (a) Image of a houseplant *Coleus* registered by RGB camera, (б) examples of spectral images of the plant at wavelengths of 1000 and (в) 1440 nm, and (г) reflectance spectra plotted for points A, B and B of the object

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный видеоспектрометр с двойной акустооптической фильтрацией излучения в ближнем ИК диапазоне спектра позволяет получать спектральные изображения объектов, расположенных на расстояниях от 1 м до бесконечности, в пределах углового поля  $15^\circ$  с пространственным разрешением  $200 \times 150$  элементов. По полученным спектральным изображениям (рис. 3) можно сделать вывод, что спектральные изображения, полученные с помощью разработанного спек-

трометра, имеют высокое качество, достаточное для проведения спектральных измерений. Параметры ОС прибора могут быть оптимизированы, например, для изменения поля зрения или дистанции съемки. Конструктивная реализация видеоспектрометра также может быть модифицирована при необходимости.

Прибор может быть использован в различных приложениях, в частности, для сельского хозяйства, экомониторинга, в биомедицинских исследованиях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chang C.-I. Hyperspectral data exploitation: Theory and applications. Wiley-Interscience, 2007. 440 p.
2. Пустовойт В.И., Пожар В.Э., Отливанчик Е.А. и др. Современные средства и методы акустооптической спектроскопии // Успехи современной радиоэлектроники. 2007. № 8. С. 48–56.

## REFERENCES

1. Chang C.-I. Hyperspectral data exploitation: Theory and applications. Wiley-Interscience, 2007. 440 p.
2. Pustovoyt V.I., Pozhar V.E., Otlivanchik E.A., et al. Modern means and methods of acousto-optical spectrometry [in Russian] // Advances in Modern Radio Electronics. 2007. № 8. P. 48–56.

3. Мартынов Г.Н., Гапонов М.И., Фомин Д.С. и др. Изображающий спектрометр на базе перестраиваемого акустооптического фильтра для полевой съемки // Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации. Сб. тр. МНТК. 2019. С. 156–158.
4. Пожар В.Э., Пустовойт В.И. Возможности создания новых систем видения на основе акустооптических видеоспектрометров // Радиотехника и электроника. 1996. Т. 41. № 10. С. 1272–1278.
5. Мазур М.М., Судденюк Ю.А., Шорин В.Н. Двойной акустооптический монохроматор изображений с перестраиваемой шириной аппаратной функции // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. № 4. С. 56–62.
6. Golovynskiy S., Golovynska I., Stepanova L.I., et al. Optical windows for head tissues in near-infrared and short-wave infrared regions: Approaching transcranial light applications // J. Biophotonics. 2018. V. 11. № 12. P. e201800141. <https://doi.org/10.1002/jbio.201800141>
7. Hennessy A., Clarke K., Lewis M. Hyperspectral classification of plants: A review of waveband selection generalisability // Remote Sens. 2020. № 12. P. 113. <https://doi.org/10.3390/rs12010113>
8. Batshev V., Machikhin A., Martynov G., et al. Polarizer-free AOTF-based SWIR hyperspectral imaging for biomedical applications // Sensors. 2020. V. 20. P. 4439. <https://doi.org/10.3390/s20164439>
9. Мазур М.М. Критерий одинаковости АО ячеек для двойных монохроматоров // Сб. науч. тр. ВНИИФТРИ-М. 2005. С. 48–52.
10. Епихин В.М., Визен Ф.Л., Никитин Н.В. и др. Неколлинеарный акустооптический фильтр с оптимальными угловыми характеристиками // ЖТФ. 1982. Т. 52. № 12. С. 2405–2410.
11. Мачихин А.С., Батшев В.И., Пожар В.Э. и др. Минимизация аберраций акустооптического видеоспектрометра ближнего инфракрасного диапазон путем оптимизации параметров перестраиваемого фильтра // Оптический журнал. 2019. Т. 86. № 12. С. 59–64. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2019-86-12-59-64>
12. Пожар В.Э., Пустовойт В.И., Мазур М.М. и др. Акустооптический видеомонохроматор для фильтрации оптических изображений // Патент РФ № RU2258206C1. Бюл. 2005. № 22.
13. Епихин В.М., Кияченко Ю.Ф., Мазур М.М. и др. Акустооптические спектрометры изображений видимого и ближнего ИК диапазонов // Физические основы приборостроения. 2013. Т. 2. № 4. С. 116–125. <https://doi.org/10.25210/jfop-1304-116125>
14. Machikhin A., Batshev V., Pozhar V. Aberration analysis of AOTF-based spectral imaging systems // JOSA. A. 2017. V. 34. № 7. P. 1109–1113. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.34.001109>
15. Шарикова М.О., Баландин И.А., Батшев В.И. и др. Пространственно-спектральная коррекция акустооптического видеоспектрометра // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 11. С. 79–89. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-11-79-89>
3. Martynov G.N., Gaponov M.I., Fomin D.S., et al. Imaging spectrometer based on a tunable acousto-optical filter for field surveys [in Russian] // Acousto-optical and Radar Methods of Measurements and Information Processing. Collection of works of MNTK. 2019. P. 156–158.
4. Pozhar V.E., Pustovoit V.I. Possibilities of new imaging systems development on the base of acousto-optical imaging spectrometers // J. Communications Technology and Electronics. 1996. V. 41. № 10. P. 1272–1278.
5. Mazur M.M., Suddenok Y.A., Shorin V.N. Double acousto-optic monochromator of images with tunable width of the transmission function // Technical Physics Letters. 2014. V. 40 № 2. P. 167–169. <https://doi.org/10.1134/S1063785014020254>
6. Golovynskiy S., Golovynska I., Stepanova L.I., et al. Optical windows for head tissues in near-infrared and short-wave infrared regions: Approaching transcranial light applications // J. Biophotonics. 2018. V. 11. № 12. P. e201800141. <https://doi.org/10.1002/jbio.201800141>
7. Hennessy A., Clarke K., Lewis M. Hyperspectral classification of plants: A review of waveband selection generalisability // Remote Sens. 2020. № 12. P. 113. <https://doi.org/10.3390/rs12010113>
8. Batshev V., Machikhin A., Martynov G., et al. Polarizer-free AOTF-based SWIR hyperspectral imaging for biomedical applications // Sensors. 2020. V. 20. P. 4439. <https://doi.org/10.3390/s20164439>
9. Mazur M.M. Criterion for the sameness of AO cells for double monochromators [in Russian] // Proc. Sci. Works of VNIIFTRI-M. 2005. P. 48–52.
10. Epikhin V.M., Vizen F.L., Nikitin N.V., et al. Non-collinear acousto-optic filter with optimal angular characteristics [in Russian] // J. Technical Physics. 1982. T. 52. № 12. P. 2405–2410.
11. Machikhin A.S., Batshev V.I., Pozhar V.E., et al. Minimizing aberrations of a near-infrared acousto-optic video spectrometer by optimizing the tunable filter parameters // J. Opt. Technol. 2019. V. 86. № 12. P. 794–798. <https://doi.org/10.1364/JOT.86.000794>
12. Pozhar V.E., Pustovoit V.I., Mazur M.M., et al. Acousto-optical video monochromator for filtering optical images // RF Patent № RU2258206C1. Bull. 2005. № 22.
13. Epikhin V.M., Kiyachenko Yu.F., Mazur M.M., et al. Acousto-optical imaging spectrometers in the visible and near-IR ranges [in Russian] // Physical Foundations of Instrumentation. 2013. V. 2. № 4. P. 116–125. <https://doi.org/10.25210/jfop-1304-116125>
14. Machikhin A., Batshev V., Pozhar V. Aberration analysis of AOTF-based spectral imaging systems // JOSA. A. 2017. V. 34. № 7. P. 1109–1113. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.34.001109>
15. Sharikova M.O., Balandin I.A., Batshev V.I., et al. Spatial and spectral correction of acousto-optical imaging spectrometer // J. Opt. Technol. 2023. V. 90. № 11. P. 684–690. <http://doi.org/10.1364/JOT.90.000684>

#### АВТОРЫ

Иван Алексеевич Баландин — аспирант, младший научный сотрудник, НТЦ УП РАН, Москва, 117342, Россия; Scopus ID: 57195684462; <https://orcid.org/0000-0003-2120-0186>; [balandin.ia@ntcup.ru](mailto:balandin.ia@ntcup.ru)

Милана Олеговна Шарикова — аспирант, младший научный сотрудник, НТЦ УП РАН, Москва, 117342, Россия; Scopus ID: 57195684462; <https://orcid.org/0000-0003-2120-0186>; [balandin.ia@ntcup.ru](mailto:balandin.ia@ntcup.ru)

#### AUTHORS

Ivan A. Balandin — PhD Student, Junior Researcher, Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow, 117342, Russia; Scopus ID: 57195684462; <https://orcid.org/0000-0003-2120-0186>; [balandin.ia@ntcup.ru](mailto:balandin.ia@ntcup.ru)

Milana O. Sharikova — PhD Student, Junior Researcher, Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow, 117342, Russia; Scopus ID: 57195684462; <https://orcid.org/0000-0003-2120-0186>; [balandin.ia@ntcup.ru](mailto:balandin.ia@ntcup.ru)

pus ID: 57218281289; <https://orcid.org/0000-0001-5593-6170>; [sharikova.mo@ntcup.ru](mailto:sharikova.mo@ntcup.ru)

**Владислав Игоревич Батшев** — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, НТИЦ УП РАН, Москва, 117342, Россия; доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия; Scopus ID: 26325278700; <https://orcid.org/0000-0002-7066-0106>; [batshev.vi@ntcup.ru](mailto:batshev.vi@ntcup.ru)

**Диана Владимировна Варнавская** — стажер-исследователь, НТИЦ УП РАН, Москва, 117342, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-1936-435X>; [varnavskaya.dv@ntcup.ru](mailto:varnavskaya.dv@ntcup.ru)

**Алексей Борисович Козлов** — научный сотрудник, НТИЦ УП РАН, Москва, 117342, Россия; начальник лаборатории, НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха, Москва, 117342, Россия; Scopus ID: 57209523302; <https://orcid.org/0000-0002-5378-2064>; [kozlov@ntcup.ru](mailto:kozlov@ntcup.ru)

RAS, Moscow, 117342, Russia; Scopus ID: 57218281289; <https://orcid.org/0000-0001-5593-6170>; [sharikova.mo@ntcup.ru](mailto:sharikova.mo@ntcup.ru)

**Vladislav I. Batshev** — PhD (Engineering), Senior Researcher, Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow, 117342, Russia; Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia; Scopus ID: 26325278700; <https://orcid.org/0000-0002-7066-0106>; [batshev.vi@ntcup.ru](mailto:batshev.vi@ntcup.ru)

**Diana V. Varnavskaya** — Research Intern, Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow, 117342, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-1936-435X>; [varnavskaya.dv@ntcup.ru](mailto:varnavskaya.dv@ntcup.ru)

**Alexey B. Kozlov** — Researcher, Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow, 117342, Russia; Head of laboratory, Stelmakh Polyus Research Institute, Moscow, 117342, Russia; Scopus ID: 57209523302; <https://orcid.org/0000-0002-5378-2064>; [kozlov@ntcup.ru](mailto:kozlov@ntcup.ru)

*Статья поступила в редакцию 01.06.2023  
Одобрена после рецензирования 07.11.2023  
Принята к печати 30.05.2024*

*The article was submitted to the editorial office 01.06.2023  
Approved after review 07.11.2023  
Accepted for publication 30.05.2024*