

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-5-846-853

УДК 681.784

## Полихромный источник света для реализации многоспектрального метода обработки изображений кожных новообразований

Кирилл Вадимович Зайченко<sup>1</sup>, Борис Симхович Гуревич<sup>2</sup>✉,  
Виталия Игоревна Святкина<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург, 198095, Российская Федерация

<sup>1</sup> kvz235@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2881-4386>

<sup>2</sup> bgurevich48@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-7520-7087>

<sup>3</sup> svyatkina.vi@edu.spbstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6456-8776>

### Аннотация

**Предмет исследования.** При диагностике онкологических заболеваний кожи остается актуальной проблема несвоевременного выявления патологий. Современные диагностические методы имеют ряд недостатков, связанных с ограниченными возможностями человеческого зрения, высокими требованиями к неинвазивным исследованиям и к цифровому представлению полученных результатов для их передачи по каналам связи. Важнейшие задачи ранней бинарной диагностики кожных новообразований могут быть решены с использованием методов биорадиационной фотоники. **Метод.** В работе рассмотрен авторский многоспектральный метод обработки изображений участков кожи с использованием нового специализированного полихромного источника света с программным управлением длиной волны излучения. Проанализирован принцип действия такого источника и обосновано применение набора светодиодов со специальным расположением, что позволяет направлять пучок света любой длины волны в одном направлении. Подтвержден выбор используемых диапазонов длин волн светодиодов, описан первый вариант макета такого источника света, приведены его оптическая и структурная схемы. Показано, что оптимальным способом программного управления длиной волны является ее грубая настройка переключением светодиодов и тонкая настройка установленными на выходе источника акустооптическими перестраиваемыми фильтрами. **Основные результаты.** Приведен ряд тестовых снимков пигментного пятна на коже размером 40 × 30 мм с длинами волн в пределах от ближнего ультрафиолетового до ближнего инфракрасного диапазонов с использованием черно-белой камеры. При цифровой обработке полученных монохроматических изображений проведены гистограммная эквализация и медианная фильтрация снимков для расширения динамического диапазона уровней яркости и минимизации искажений, вызванных неравномерностью исследуемого участка кожи и наличием теневой засветки. Получены графики распределения амплитудной интенсивности в исходных и отфильтрованных снимках для выбранных длин волн светодиодов. Показано, что о наличии кожного новообразования можно судить по провалам кривой распределения интенсивности света. Обосновано радиальное расположение светодиодов на плате для минимизации теневой засветки при освещении кожи. **Практическая значимость.** Проведенные исследования многоспектральной обработки изображений с помощью реализованного полихромного источника света вносят вклад в развитие новых методов ранней диагностики кожных новообразований на основе фотоники и оптоэлектроники и могут найти практическое применение в медицинских технологиях.

### Ключевые слова

источник света, рак кожи, программное управление, набор светодиодов, акустооптические перестраиваемые фильтры, цифровая обработка изображений

### Благодарности

Работа поддержана Минобрнауки Российской Федерации, госзадание № 075-00761-22-00, тема № FZZM-2022-0011.

**Ссылка для цитирования:** Зайченко К.В., Гуревич Б.С., Святкина В.И. Полихромный источник света для реализации многоспектрального метода обработки изображений кожных новообразований // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 5. С. 846–853. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-5-846-853

© Зайченко К.В., Гуревич Б.С., Святкина В.И., 2022

## Polychromic light source for the realization of multispectral processing method of skin malignant lesions images

Kirill V. Zaichenko<sup>1</sup>, Boris S. Gurevich<sup>2</sup>✉, Vitaliya I. Svyatkina<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Institute for Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 198095, Russian Federation

<sup>1</sup> kvz235@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2881-4386>

<sup>2</sup> bgurevich48@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-7520-7087>

<sup>3</sup> svyatkina.vi@edu.spbstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6456-8776>

### Abstract

When diagnosing oncological skin diseases, the problem of untimely detection of pathologies remains relevant. Modern diagnostic methods have a number of disadvantages associated with the limited capabilities of human vision, high requirements for non-invasive studies and digital representation of the results obtained for their transmission over communication channels. The most important tasks of early binary diagnostics of skin neoplasms can be solved using bioradiophotonics methods. The paper considers the author's multispectral method for processing images of skin areas using a new specialized polychrome light source with software control of the radiation wavelength. The principle of operation of such a source is analyzed and the use of a set of LEDs with a special arrangement is justified which makes it possible to direct a beam of light of any wavelength in one direction. The choice of the wavelength ranges used for LEDs is confirmed, the first version of the layout of such a light source is described, and its optical and structural diagrams are given. It is shown that the optimal way of the wavelength programmable control is its coarse tuning by switching LEDs and fine tuning by acousto-optic tunable filters installed at the source output. A number of test images of a pigment spot on the skin with a size of  $40 \times 30$  mm with wavelengths ranging from near ultraviolet to near infrared ranges using a black and white camera are presented. With digital processing, received monochromatic images, histogram equalization and median filtering of images were carried out to expand the dynamic range of brightness levels and minimize distortion caused by the unevenness of the skin area under study and the presence of shadow illumination. Graphs of the amplitude intensity distribution in the original and filtered images are obtained for the selected wavelengths of the LEDs. It is shown that the presence of a skin neoplasm can be judged by the dips in the light intensity distribution curve. The radial arrangement of LEDs on the board is justified to minimize shadow illumination when illuminating the skin. The conducted studies of multispectral image processing using a realized polychrome light source contribute to the development of new methods for the early diagnosis of skin neoplasms based on photonics and optoelectronics and can find practical application in medical technologies.

### Keywords

light source, skin cancer, programmable control, LEDs set, acousto-optic tunable filters, digital image processing

### Aknowledgements

The work has been supported by Education and Science Ministry of the Russian Federation, State task No. 075-00761-22-00, project No. FZZM-2022-0011.

**For citation:** Zaichenko K.V., Gurevich B.S., Svyatkina V.I. Polychromic light source for the realization of multispectral processing method of skin malignant lesions images. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 5, pp. 846–853 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-5-846-853

### Введение

Разработка методов ранней бинарной диагностики новообразований кожи чрезвычайно актуальная проблема. В общей структуре онкологических заболеваний в Российской Федерации рак кожи является лидирующим, что подтверждается существенным ростом числа таких пациентов в последнее время. Это вызвано, в частности, несвоевременным выявлением данных патологий [1, 2]. Существующие методы диагностики злокачественных новообразований кожи обладают рядом существенных недостатков и часто не могут обеспечить надежное выявление данных заболеваний на ранних стадиях развития [3]. Активное продвижение методов, основанных на принципах биорадиофотоники, предусматривает опто- и радиоэлектронную обработку биомедицинских данных. Решение данной задачи возможно при исключении неопределенности, возникающей в результате визуального осмотра новообразования. Появление неопределенности обусловлено ограниченными возможностями человеческого зрения, не способного отличать чистые спектральные цвета от составных. Наиболее часто применяют методы рама-

новской [4, 5] и автофлуоресцентной спектроскопии [6]. Оба метода обладают рядом недостатков. Один из недостатков — потеря части информации из-за ограниченного числа длин волн, в пределах которых проводятся измерения. Решением указанных проблем может стать разработка нового метода цифровой многоспектральной обработки изображений кожных новообразований [7]. Метод основан на преобразовании полихромного изображения в последовательность монохромных изображений, каждое из которых представляет собой распределение интенсивности света на выбранной длине волны. Работу метода обеспечивает применение специального полихромного источника света. Цель работы — разработка программно управляемого полихромного источника света и демонстрация возможностей использования источника для ранней диагностики кожных новообразований.

### Принцип работы полихромного источника света

В основу авторского метода многоспектральной обработки изображений кожных новообразований [8–10] заложено преобразование полихромного изображения

в последовательность монохромных субизображений, каждое из которых представляет собой распределение интенсивности света на выбранной длине волны. Чем больше число используемых длин волн, тем больший объем спектральной информации можно получить при исследовании новообразования в дополнение к имеющейся пространственной информации. Это реализуется, в первую очередь, за счет применения специально разработанного полихромного источника света с управляемыми длинами волн, выбранными для обеспечения бинарной диагностики рака кожи. Принцип работы прототипа источника рассмотрен в работах [11–13] для применения в биохимических анализаторах.

Полихромный источник света для реализации многоспектрального метода обработки изображений кожных новообразований должен программно переключать длины волн светового потока с помощью переключения светодиодов. Светодиоды расположены радиально относительно центра дифракционной решетки. На фокусном расстоянии от светодиодов находятся сегменты линзы, которые формируют пучки коллимированного света. Все пучки попадают в центр дифракционной

решетки под углами падения, выбранными таким образом, чтобы первые дифракционные порядки от каждого пучка распространялись в одном направлении. Переключение длины волны осуществляется подачей тока на выбранный светодиод. На рис. 1 приведена оптическая схема макета источника света.

Основной управляющий элемент источника света – микропроцессор, к которому подключены ключи, коммутирующие светодиоды. Управление источником света производится через модуль USB. Микропроцессор управляет также источниками тока светодиодов и осуществляет получение данных по порту USB. Структурная схема разработанного источника света представлена на рис. 2.

**Макет полихромного источника света**

В макете в качестве источника света рассмотрены светодиоды с длинами волн в пределах от ближнего ультрафиолетового до ближнего инфракрасного диапазонов. Выбор светодиодов осуществлен оценкой их габаритных и оптических характеристик. Макет

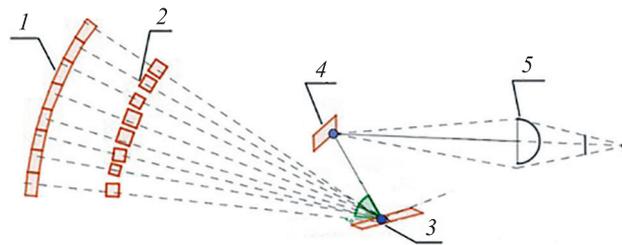


Рис. 1. Оптическая схема полихромного источника света.

1 — светодиоды; 2 — сегменты линзы; 3 — дифракционная решетка; 4 — зеркало; 5 — линза

Fig. 1. Optical scheme of the polychrome light source.

1 — LEDs; 2 — segments of lenses; 3 — diffraction grating; 4 — mirror; 5 — lens

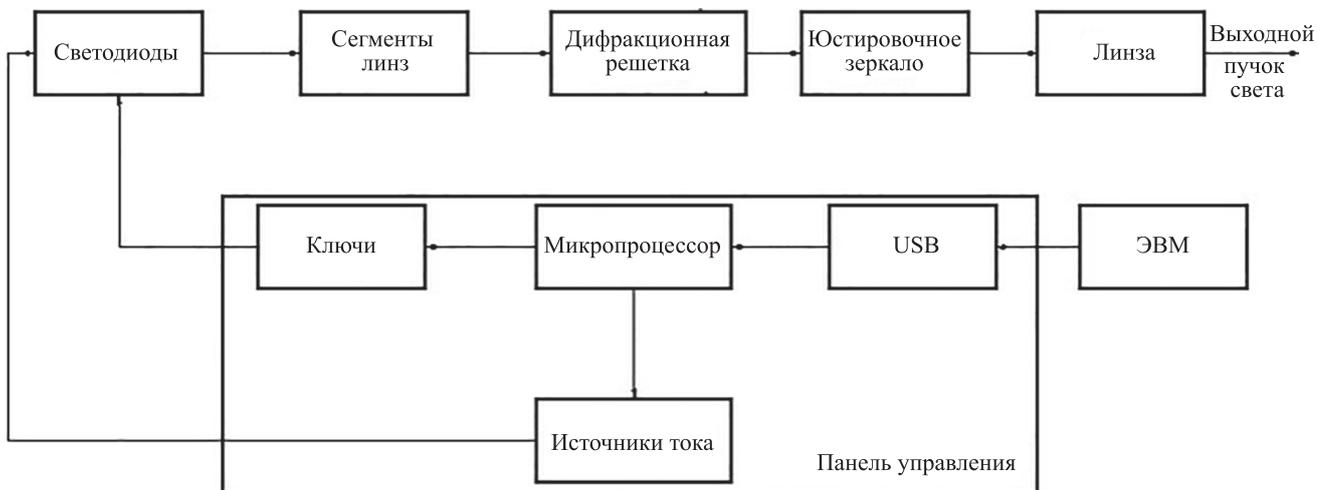


Рис. 2. Структурная схема полихромного источника света.

ЭВМ — электронная вычислительная машина

Fig. 2. Structural diagram of the polychrome light source layout

ЭВМ — Electronic Control Module

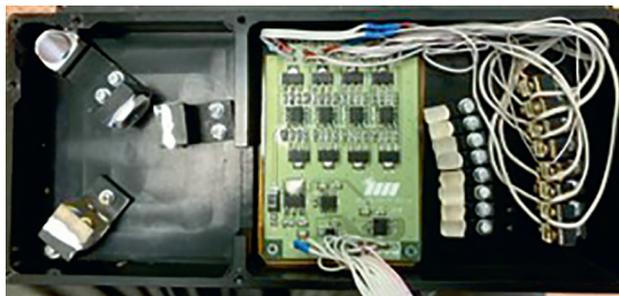


Рис. 3. Макет полихромного источника света

Fig. 3. The polychrome light source layout

источника света, реализованный по схеме рис. 2, производит программную грубую настройку длины волны света на 8 поддиапазонах. Более тонкую программную настройку длины волны выполняют установленные на выходе источника света акустооптические перестраиваемые фильтры на ячейках Брэгга [14, 15]. Точные значения длин волн в ячейках заданы программным путем с использованием частоты управляющего сигнала, подаваемого на пьезопреобразователь ячейки Брэгга. В результате возможно обеспечить освещение зоны новообразования светом с полосой пропускания порядка 10 нм. На рис. 3 приведена фотография собранного макета. Регистрация изображений на выходе осуществляется с помощью монохромной камеры Basler acA720–520um.

#### Расчеты полихромного источника света

Ключевые параметры при выборе дифракционной решетки: дифракционная эффективность, угол дифракции и угловая дисперсия. Для выбранной решетки выполнен расчет углов дифракции:

$$d(\sin\varphi - \sin\varphi') = k\lambda,$$

где  $d$  — период дифракционной решетки;  $\varphi$  — угол падения света;  $\varphi'$  — угол дифракции;  $k$  — порядок дифракционного максимума;  $\lambda$  — длина волны излучения. Для описания светодиодов использована модель сферического ламбертовского излучателя, мощность которого в телесном угле получена из выражения:

$$P = 4\pi P_{\text{изл}} \sin^2(q/2),$$

где  $P$  — мощность в телесном угле излучателя;  $P_{\text{изл}}$  — мощность излучения источников света;  $q$  — телесный угол, в котором распределяется мощность излучения. Для телесного угла, равного  $8^\circ 30'$ , значение мощности приблизительно 7 % от общей мощности светодиода, которая имеет в среднем величину порядка нескольких

десятков милливольт. Применение акустооптических перестраиваемых фильтров уменьшает мощность пропорционально полосе выделяемого спектрального интервала по отношению к интервалу светодиода.

#### Результаты цифровой обработки тестовых изображений

Каждое тестовое изображение представлено в виде матрицы из восьмидесятибитных целых чисел, которые индексированы номером пиксела изображения и соответствуют коду цвета в градации от черного (0) к белому (255). В результате получены графики распределения интенсивности для каждого снимка. Для расширения динамического диапазона уровней яркости и минимизации искажений, вызванных неравномерностью исследуемого участка кожи и наличием теневой засветки предварительно выполнена гистограммная эквализация и медианная фильтрация снимков. На рис. 4 показаны изображения: исходное 1 и обработанные: эквализированное 2 и отфильтрованное 3 для снимков, полученных при освещении: оранжевом, зеленом, синем, глубоком синем и ближнем ультрафиолете.

#### Распределения интенсивности света

Для построения графиков распределения интенсивности используем выборку строки пикселей с явно выраженными участками поглощения. На рис. 5 приведены графики распределения интенсивности для изображений: исходного 1 и обработанных: эквализированного 2 и отфильтрованного 3. На месте участка кожи с ярко выраженным образованием наблюдается провал интенсивности яркости.

Получено процентное отношение провала интенсивности к его максимуму для изображений при засветках: оранжевым — 45,7 %; зеленым — 52,5 %; синем — 53,02 %; глубоком синем — 66,67 % и ближнем ультрафиолетом — 66,67 %.

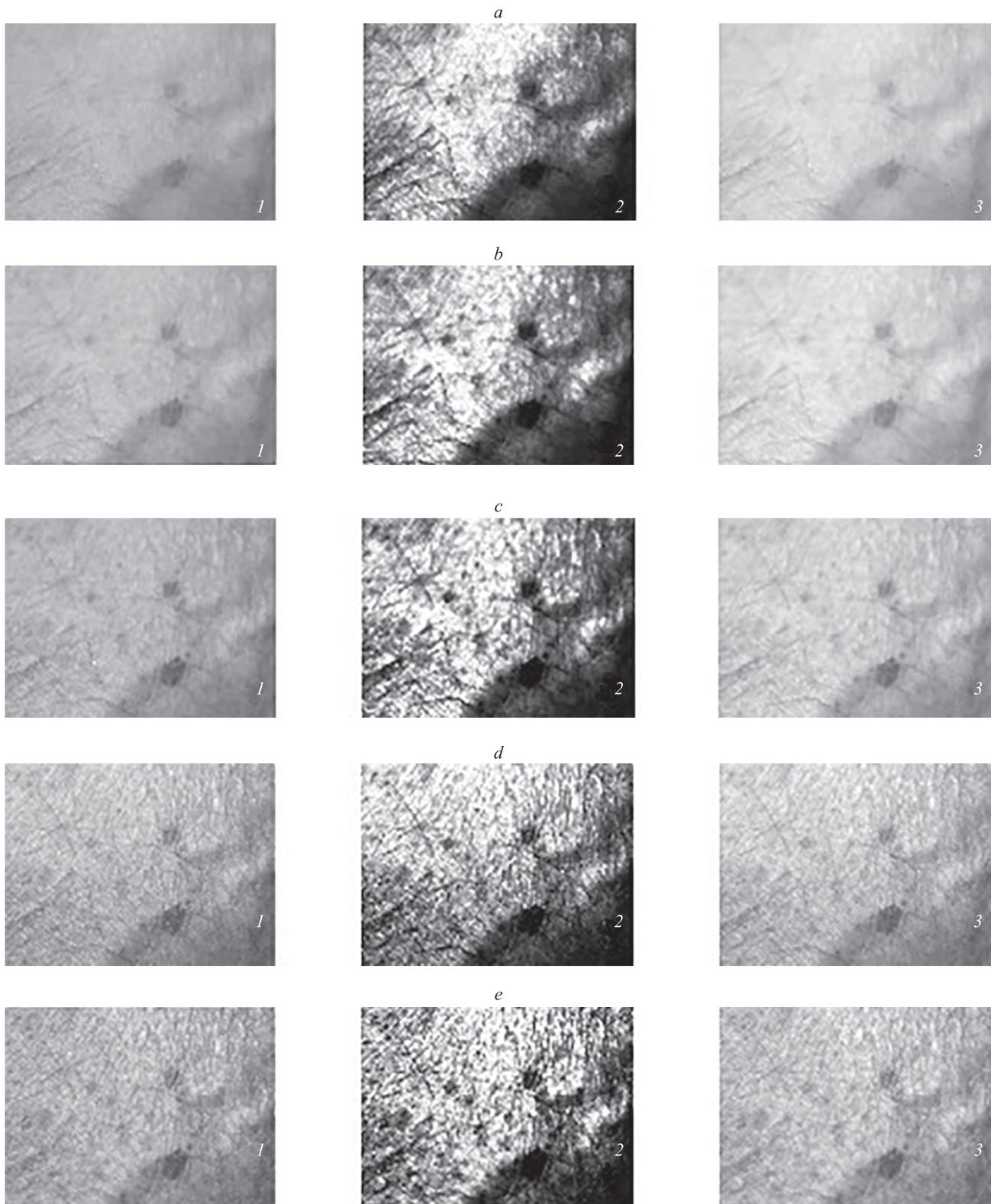


Рис. 4. Изображения, полученные при засветке: оранжевым (а); зеленым (b); синим (c); глубоким синим (d) и ближним ультрафиолетом (e). Размер изображений  $2,5 \times 10,97$  см.

1 — исходное; 2 — эквализированное и 3 — отфильтрованное

Fig. 4. Images taken when illuminated with orange (a); green (b); blue (c); deep blue (d); near-ultraviolet (e). Image size  $2,5 \times 10,97$  cm

1 — initial; 2 — equalize; and 3 — filtered

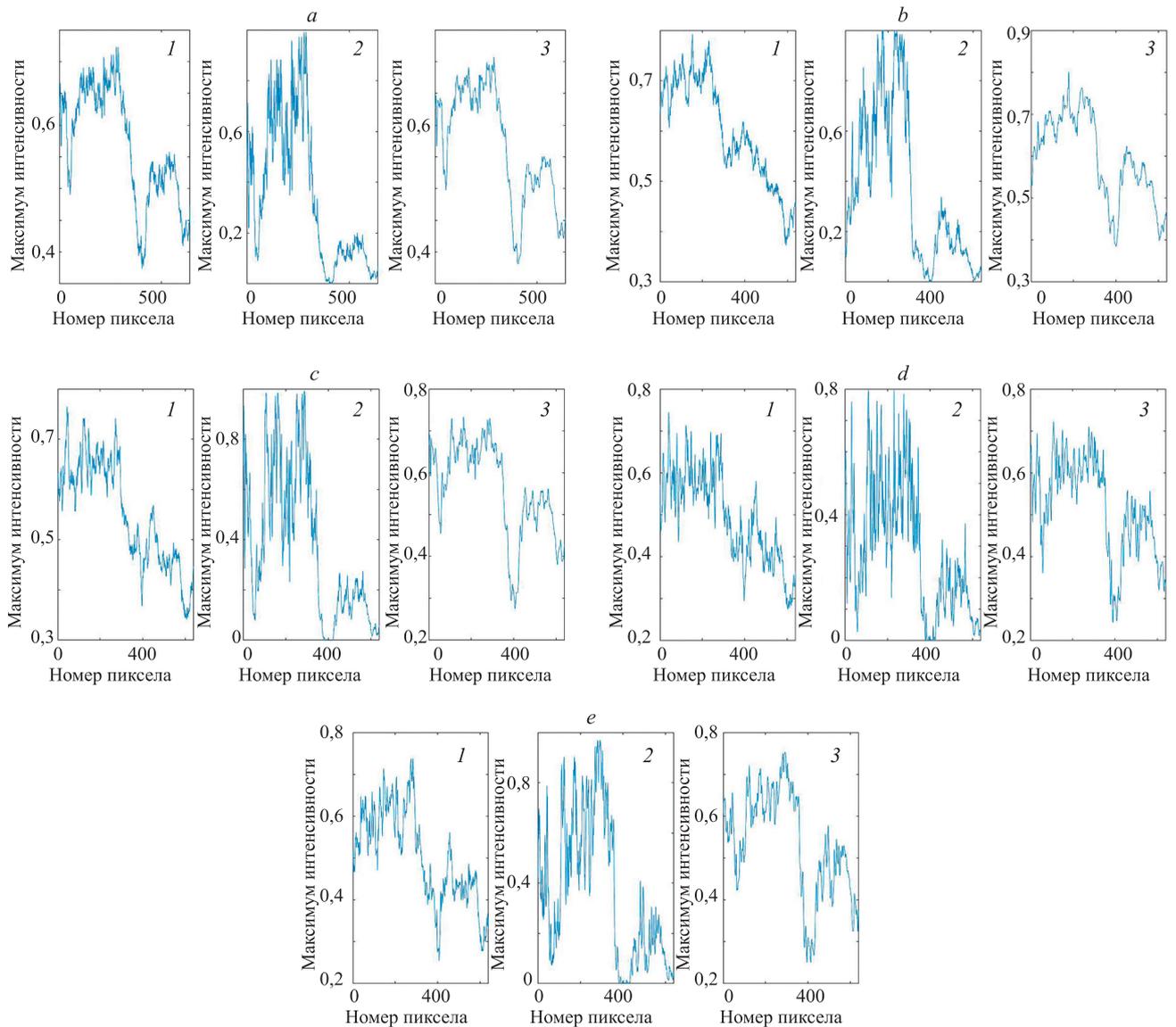


Рис. 5. Распределения интенсивности, полученные при засветке: оранжевым (а); зеленым (b); синим (c); глубоким синим (d) и ближним ультрафиолетом (e).  
 1 — исходное; 2 — эквализированное и 3 — отфильтрованное

Fig. 5. Intensity distribution when illuminated with orange (a); green (b); blue (c); deep blue (d); near-ultraviolet (e).  
 1 — initial; 2 — equalize; and 3 — filtered

### Заключение

Разработанный полихромный источник света позволил сформировать субизображения на нескольких десятках длин волн и получить значительно больший объем спектральной информации, чем это обеспечивают другие спектрометрические методы. В результате полученная максимально возможная спектральная информация, совместно с имеющейся пространственной информацией, позволяют более точно определить характер новообразования и его конфигурацию на коже человека. Построены графики распределения интенсивности в зависимости от длины волны, которые позволяют определить наличие новообразования по провалам кривой. В дальнейшем планируется усовершенствовать

методику многоспектральной обработки для выявления бинарной диагностики поражений кожи на ранних стадиях их развития. При снятии серии изображений возник ряд трудностей, связанных с появлением тени на объекте, искажающей графики интенсивности. В настоящее время ведется проектирование усовершенствованной системы светодиодных плат для устранения этой проблемы, а также для обеспечения возможности подсвечивать кожу изнутри. Кроме того, проводится экспериментальное окрашивание снимков в различные цвета с последующим наложением их друг на друга во время обработки изображений с целью бинарной диагностики новообразований, недоступной человеческому зрению.

## Литература

## References

- Sung H., Ferlay J., Siegel R.L., Laversanne M., Soerjomataram I., Jemal A., Bray F. Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries // *CA: A Cancer Journal for Clinicians*. 2021. V. 71. N 3. P. 209–249. <https://doi.org/10.3322/caac.21660>
- Злокачественные новообразования в России в 2020 году (заболеваемость и смертность) / под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, А.О. Шахзадовой. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена — филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2021. С. 4–8.
- Солодянкина Т.Н., Апанасевич В.И., Гурина Л.Н. Дерматоскопия как метод диагностики меланомы кожи // *Сибирский онкологический журнал*. 2009. № 5. С. 63–66.
- Zhao J., Lui H., Kalia S., Zeng H. Real-time Raman spectroscopy for automatic in vivo skin cancer detection: an independent validation // *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2015. V. 407. N 27. P. 8373–8379. <https://doi.org/10.1007/s00216-015-8914-9>
- Bratchenko I., Artemyev D., Myakinin O., Khristoforova Y.A., Moryatov A.A., Kozlov S.V., Zakharov V.P. Combined Raman and autofluorescence ex vivo diagnostics of skin cancer in near infrared and visible regions // *Journal of Biomedical Optics*. 2017. V. 22. N 2. P. 027005. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.22.2.027005>
- Borisova E., Ivanov D., Kolev B., Genova T., Mircheva V., Ilyov S., Zaharieva L., Lihachova I., Lihachovs A., Spigulis J., Troyanova P. Autofluorescence spectroscopy of cutaneous neoplasia under ultraviolet, visible and near infrared excitation // *Proceedings of SPIE*. 2020. V. 11363. P. 113630Z-1. <https://doi.org/10.1117/12.2555982>
- Зайченко К.В., Гуревич Б.С., Киселева К.Р. Экспериментальное обоснование спектрофотометрического метода анализа характера кожных новообразований // Труды Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и инновационные технологии в области естественных наук». Т. 2. Ташкент, 2020. С. 520–524.
- Zaichenko K.V., Gurevich B.S. Spectral selection using acousto-optic tunable filters for the skin lesions diagnostics // *Proceedings of SPIE*. 2021. V. 11922. P. 119221C. <https://doi.org/10.1117/12.2615808>
- Zaichenko K.V., Gurevich B.S. Application of acousto-optic tunable filters in the devices of skin cancer diagnostics // *Proceedings of SPIE*. 2020. V. 11585. P. 115850K. <https://doi.org/10.1117/12.2581750>
- Zaichenko K.V., Gurevich B.S. Development of images multispectral processing for the skin cancer early diagnostics // *Proceedings of SPIE*. 2022. V. 12144. P. 121440E. <https://doi.org/10.1117/12.2624329>
- Шаповалов В.В., Гуревич Б.С., Колесов И.А., Андреев С.В., Беляев А.А. Источник света с произвольно регулируемым спектральным составом для биомедицинских спектральных анализаторов // *Биомедицинская электроника*. 2009. № 11. С. 16–20.
- Андреев С.В., Беляев А.В., Гуревич Б.С., Колесов И.А., Челак В.Н., Шаповалов В.В. Источник полихромного излучения с управляемым спектром. Патент RU 2478871. Бюл. 2013. № 10.
- Зайченко К.В., Гуревич Б.С. Многоспектральная обработка изображений биологических объектов с помощью акустооптических устройств // *Биомедицинская радиоэлектроника*. 2013. № 9. С. 70–76.
- Zaichenko K.V., Gurevich B.S. Information productivity of the systems intended for biological objects images multispectral processing using acousto-optic tunable filters // *AIP Conference Proceedings*. 2019. V. 2140. P. 0200081. <https://doi.org/10.1063/1.5122006>
- Zaichenko K.V., Gurevich B.S. Efficiency increasing of medical diagnostic systems which use multispectral processing method // *Proceedings of SPIE*. 2022. V. 12146. P. 121460E. <https://doi.org/10.1117/12.2624445>
- Sung H., Ferlay J., Siegel R.L., Laversanne M., Soerjomataram I., Jemal A., Bray F. Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, 2021, vol. 71, no. 3, pp. 209–249. <https://doi.org/10.3322/caac.21660>
- Malignant Neoplasms in Russia in 2020 (Morbidity and Mortality)*. Ed. by A.D. Kaprin, V.V. Starinskii A.O. Shakhzadova. Moscow, National Medical Research Radiological Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation Publ., 2021, pp. 4–8. (in Russian)
- Solodyankina T.N., Apanasevich V.I., Gurina L.I. Dermatoscopy as a method of skin melanoma diagnosis. *Siberian Journal of Oncology*, 2009, no. 5, pp. 63–66. (in Russian)
- Zhao J., Lui H., Kalia S., Zeng H. Real-time Raman spectroscopy for automatic in vivo skin cancer detection: an independent validation. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2015, vol. 407, no. 27, pp. 8373–8379. <https://doi.org/10.1007/s00216-015-8914-9>
- Bratchenko I., Artemyev D., Myakinin O., Khristoforova Y.A., Moryatov A.A., Kozlov S.V., Zakharov V.P. Combined Raman and autofluorescence ex vivo diagnostics of skin cancer in near infrared and visible regions. *Journal of Biomedical Optics*, 2017, vol. 22, no. 2, pp. 027005. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.22.2.027005>
- Borisova E., Ivanov D., Kolev B., Genova T., Mircheva V., Ilyov S., Zaharieva L., Lihachova I., Lihachovs A., Spigulis J., Troyanova P. Autofluorescence spectroscopy of cutaneous neoplasia under ultraviolet, visible and near infrared excitation. *Proceedings of SPIE*, 2020, vol. 11363, pp. 113630Z-1. <https://doi.org/10.1117/12.2555982>
- Zaichenko K.V., Gurevich B.S., Kiseleva K.R. Experimental substantiation of the spectrophotometric method for analyzing the nature of skin neoplasms. *Proc. of the International scientific & practical conference "Current topics and innovative technologies in the field of natural sciences"*. V. 2. Tashkent, 2020, pp. 520–524. (in Russian)
- Zaichenko K.V., Gurevich B.S. Spectral selection using acousto-optic tunable filters for the skin lesions diagnostics. *Proceedings of SPIE*, 2021, vol. 11922, pp. 119221C. <https://doi.org/10.1117/12.2615808>
- Zaichenko K.V., Gurevich B.S. Application of acousto-optic tunable filters in the devices of skin cancer diagnostics. *Proceedings of SPIE*, 2020, vol. 11585, pp. 115850K. <https://doi.org/10.1117/12.2581750>
- Zaichenko K.V., Gurevich B.S. Development of images multispectral processing for the skin cancer early diagnostics. *Proceedings of SPIE*, 2022, vol. 12144, pp. 121440E. <https://doi.org/10.1117/12.2624329>
- Shapovalov V.V., Gurevich B.S., Kolesov I.A., Andreev S.V., Beliaev A.A. Light source with an arbitrarily adjustable spectral content for biomedical spectrum analyzers. *Journal Biomedical Radioelectronics*, 2009, no. 11, pp. 16–20. (in Russian)
- Andreev S.V., Beljaev A.V., Gurevich B.S., Kolesov I.A., Chelak V.N., Shapovalov V.V. Controlled spectrum polychromatic radiation source. *Patent RU 2478871*. 2013. (in Russian)
- Zaichenko K.V., Gurevich B.S. Multispectral processing of the biological objects imaging by means of acousto-optic devices. *Journal Biomedical Radioelectronics*, 2013, no. 9, pp. 70–76. (in Russian)
- Zaichenko K.V., Gurevich B.S. Information productivity of the systems intended for biological objects images multispectral processing using acousto-optic tunable filters. *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2140, pp. 0200081. <https://doi.org/10.1063/1.5122006>
- Zaichenko K.V., Gurevich B.S. Efficiency increasing of medical diagnostic systems which use multispectral processing method. *Proceedings of SPIE*, 2022, vol. 12146, pp. 121460E. <https://doi.org/10.1117/12.2624445>

## Авторы

## Authors

**Зайченко Кирилл Вадимович** — доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией, Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург, 198095, Российская Федерация, [orcid.org/0000-0002-2881-4386](https://orcid.org/0000-0002-2881-4386), [kvz235@mail.ru](mailto:kvz235@mail.ru)  
**Гуревич Борис Симхович** — доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург, 198095, Российская Федерация, [orcid.org/0000-0002-7520-7087](https://orcid.org/0000-0002-7520-7087), [bgurevich48@gmail.com](mailto:bgurevich48@gmail.com)

**Kirill V. Zaichenko** — D. Sc. (Technology), Professor, Head of Laboratory, Institute for Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 198095, Russian Federation, [orcid.org/0000-0002-2881-4386](https://orcid.org/0000-0002-2881-4386), [kvz235@mail.ru](mailto:kvz235@mail.ru)  
**Boris S. Gurevich** — D. Sc. (Technology), Chief Researcher, (Institute for Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 198095, Russian Federation, [orcid.org/0000-0002-7520-7087](https://orcid.org/0000-0002-7520-7087), [bgurevich48@gmail.com](mailto:bgurevich48@gmail.com)

**Святкина Виталия Игоревна** — студент, техник, Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург, 198095, Российская Федерация,  57303379400, <https://orcid.org/0000-0002-6456-8776>, [svyatkina.vi@edu.spbstu.ru](mailto:svyatkina.vi@edu.spbstu.ru)

**Vitaliya I. Svyatkina** — Student, Technologist, Institute for Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 198095, Russian Federation,  57303379400, <https://orcid.org/0000-0002-6456-8776>, [svyatkina.vi@edu.spbstu.ru](mailto:svyatkina.vi@edu.spbstu.ru)

*Статья поступила в редакцию 12.07.2022*  
*Одобрена после рецензирования 22.08.2022*  
*Принята к печати 28.09.2022*

*Received 12.07.2022*  
*Approved after reviewing 22.08.2022*  
*Accepted 28.09.2022*



Работа доступна по лицензии  
Creative Commons  
«Attribution-NonCommercial»