

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-07-45-50

УДК 535.8

## Разработка макета акустооптического стереоскопического видеоспектрометра

Владислав Игоревич Батшев<sup>1</sup>, Олег Алексеевич Кананыхин<sup>2✉</sup>,  
Витольд Эдуардович Пожар<sup>3</sup>, Павел Сергеевич Мартьянов<sup>4</sup>

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

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>1</sup>[batshev.vi@ntcup.ru](mailto:batshev.vi@ntcup.ru) <https://orcid.org/0000-0002-7066-0106>

<sup>2</sup>[kananykhin.oa@ntcup.ru](mailto:kananykhin.oa@ntcup.ru) <https://orcid.org/0009-0005-9723-3250>

<sup>3</sup>[vitold@ntcup.ru](mailto:vitold@ntcup.ru) <https://orcid.org/0000-0003-0553-5410>

<sup>4</sup>[la3232@mail.ru](mailto:la3232@mail.ru) <https://orcid.org/0000-0003-3262-3053>

### Аннотация

**Предмет исследования.** Устройство для стереоскопической визуализации объектов в различных спектральных интервалах. **Цель работы.** Разработка макета стереоскопического спектрометра на основе перестраиваемого акустооптического фильтра. **Метод.** Реализована оригинальная симметричная схема фильтрации двух световых пучков (стереопары) в одной акустооптической ячейке с разведением пучков в азимутальной плоскости. **Основные результаты.** Собран макет устройства в виде экспериментального стенда, содержащего акустооптический фильтр, призмочно-линзовую оптическую систему и видеокамеру с объективом. Получены изображения тест-объектов, демонстрирующие спектральную чувствительность устройства. **Практическая значимость.** Макет разработанного стереоспектрометра, способный одновременного получать пространственную и спектральную информацию об объекте, может стать прототипом прибора для решения разнообразных задач машинного зрения, в том числе во внелабораторной обстановке.

**Ключевые слова:** акустооптическая фильтрация, видеоспектрометрия, стереоскопия, широкоапертурная дифракция, двухканальная акустооптическая система

**Благодарность:** работа выполнена в рамках Государственного задания НТЦ УП РАН (проект FFNS-2022-0010). Эксперименты проводились на базе Центра коллективного пользования НТЦ УП РАН.

**Ссылка для цитирования:** Батшев В.И., Кананыхин О.А., Пожар В.Э., Мартьянов П.С. Разработка макета акустооптического стереоскопического видеоспектрометра // Оптический журнал. 2024 Т. 91 № 7 С. 45–50. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-07-45-50>

Коды OCIS: 170.1065, 300.0300, 300.6320

# Development of the prototype of an acousto-optical stereoscopic imaging spectrometer

VLADISLAV I. BATSHEV<sup>1</sup>, OLEG A. KANANYKHIN<sup>2</sup>✉,  
VITOLD E. POZHAR<sup>3</sup>, PAVEL S. MARTYANOV<sup>4</sup>

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

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>1</sup>batshev.vi@ntcup.ru <https://orcid.org/0000-0002-7066-0106>

<sup>2</sup>kananykhin.oa@ntcup.ru <https://orcid.org/0009-0005-9723-3250>

<sup>3</sup>vitold@ntcup.ru <https://orcid.org/0000-0003-0553-5410>

<sup>4</sup>la3232@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-3262-3053>

## Abstract

**Subject of study.** Device for stereoscopic visualization of objects in various spectral ranges. **Aim of study.** Development of a stereoscopic spectrometer layout based on a tunable acousto-optical filter. **Method.** An original symmetric scheme for filtering two light beams (stereo pairs) in one acousto-optical cell with beam separation in the azimuthal plane is implemented. **Main results.** A prototype device has been assembled in the form of an experimental stand containing an acousto-optical filter, a prism-lens optical system and a video camera with a lens. Images of test objects demonstrating the spectral sensitivity of the device were obtained. **Practical significance.** The layout of the developed stereo spectrometer, capable of simultaneously receiving spatial and spectral information about an object, can become a prototype device for solving various machine vision problems, including in an out-of-laboratory environment.

**Keywords:** acousto-optic filtration, stereoscopy, imaging spectrometry, wide-aperture diffraction, two-channel acousto-optical system

**Acknowledgment:** the work was carried out within the framework of the State task of the STC UP RAS (FFNS-2022-0010 project). The experiments were conducted on the basis of the Center for Collective Use of the STCUP RAS.

**For citation:** Batshev V.I., Kananykhin O.A., Pozhar V.E., Martyanov P.S. Development of the prototype of an acousto-optical stereoscopic imaging spectrometer [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024 V. 91 № 7. P. 45–50. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-07-45-50>

**OCIS codes:** 170.1065, 300.0300, 300.6320

## ВВЕДЕНИЕ

Создание устройства для получения пространственных объемных и спектральных характеристик объектов представляет интерес во многих областях, в частности в микроскопии [1, 2], биологии и медицине [3–5]. Настоящая работа продолжает цикл исследований по созданию такой системы [6, 7].

Целью работы, результаты которой представлены в настоящей статье, является разработка макета стереоскопического спектрометра на основе перестраиваемого акустооптического (АО) фильтра.

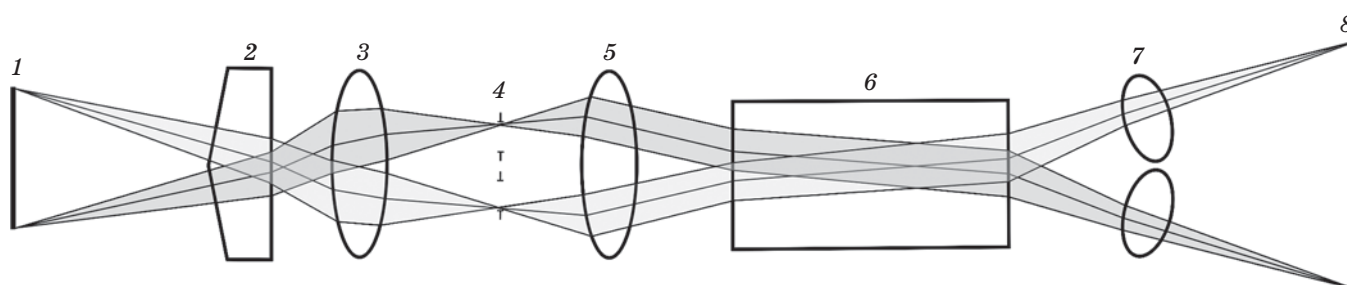
В рамках данного исследования был разработан макет такого устройства на основе единого АО фильтра для пары каналов [6] с быстрой скачкообразной спектральной пере-

стройкой, достаточно высоким спектральным и пространственным разрешением, небольшими размерами и энергопотреблением [8].

## ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА

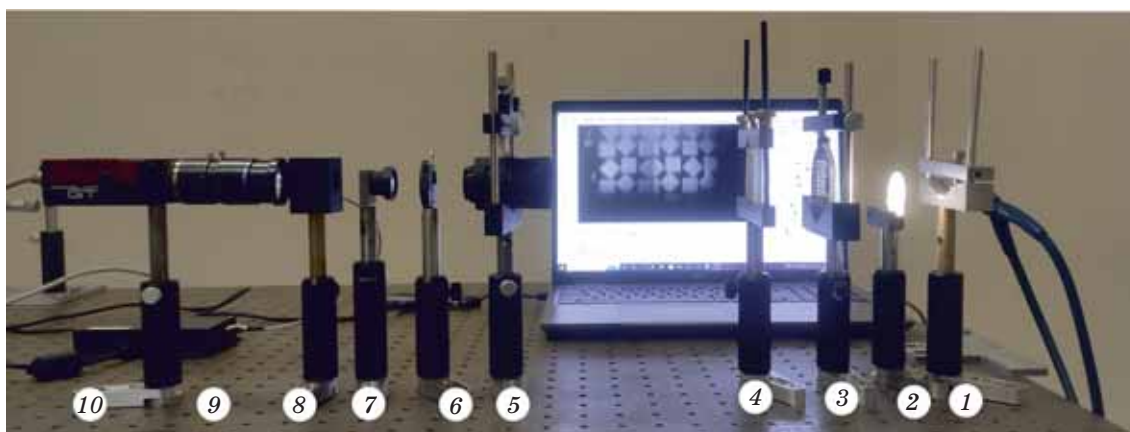
В предыдущих исследованиях было показано [7], что для создания стереоскопической системы, каналы которой формируют изображения одинакового качества, существует возможность развести пучки лучей в азимутальной плоскости. В работе такая геометрия хода лучей была реализована с помощью призмы.

Оптическая схема акустооптического стереоскопического видеоспектрометра (рис. 1) работает следующим образом. Свет от объекта, подсвечиваемого осветителем, с помощью при-



**Рис. 1.** Оптическая схема АО стереоскопического видеоспектрометра. Объект — 1, призма — 2, объектив — 3, диафрагмы — 4, объектив — 5, АО фильтр — 6, объективы — 7, приемники излучения — 8

**Fig. 1.** Optical scheme of an acousto-optic stereoscopic imaging spectrometer. (1) Object, (2) prism, (3) lens, (4) apertures, (5) lens, (6) acousto-optic tunable filter, (7) lenses, (8) radiation receivers



**Рис. 2.** Макет прибора. Источник излучения — 1, рассеиватель — 2, тест-объект — 3, призма — 4, объектив — 5, диафрагма — 6, объектив — 7, АО фильтр — 8, объектив — 9, приемник излучения — 10

**Fig. 2.** Prototype of the device. (1) Lighting source, (2) diffuser, (3) test object, (4) prism, (5) lens, (6) aperture, (7) lens, (8) acousto-optic tunable filter, (9) lens, (10) radiation receiver

змы симметрично разделяется на два пучка, проходит систему, образованную софокусными входным и промежуточным объективами, в плоскости промежуточного изображения которых размещены две диафрагмы. Далее пучки направляются под небольшим углом на АО фильтр, а дифрагированные пучки посредством пары выходных объективов фокусируются на матричных фотодетекторах.

Для расчета хода лучей в системе, содержащей призму, было проведено моделирование системы в программе ZEMAX.

На основе этой схемы был собран макет прибора (рис. 2).

Разработанная схема содержит только одну АО ячейку со следующими характеристиками: материал — парателлури́т ( $\text{TeO}_2$ ), угол среза, определяющий направление рас-

пространения акустической волны,  $-7^\circ$ , угол падения света —  $74^\circ$ , рабочий интервал частот акустических волн — 60–120 МГц, что обеспечивает перестройку длины волны АО фильтра в диапазоне 450–800 нм. Для минимизации хроматического сдвига изображения выходная грань ячейки наклонена соответствующим образом по отношению к входной [9, 10]. В системе используется неполяризаторная схема АО фильтра [11], в которой дифрагированный и недифрагированный пучки разводятся по углу. Для разделения лучей на входе в систему и получения двух световых пучков с разных ракурсов используется бипризма с преломляющим углом  $10^\circ$  из стекла К8. Выходной объектив и приемник, используемые в макете, обеспечивают регистрацию изображения лишь в одном

канале. Для регистрации изображения во втором канале выходной объектив и приемник перемещают по горизонтали. Работа в стереоскопическом режиме имитируется путем регистрации изображений из обоих каналов за один кадр на двух половинах одной фотоприемной матрицы.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для тестирования макета использовалась радиальная оптическая мира. На рис. 3 представлены ее изображения в двух каналах на длине волны 600 нм.

Полученные изображения свидетельствуют о примерно одинаковом их качестве, что является важнейшим условием для разрабатываемого стереоскопического видеоспектрометра. Наблюдаемые небольшие различия в освещенности связаны в первую очередь с условиями эксперимента и с осветительной системой.

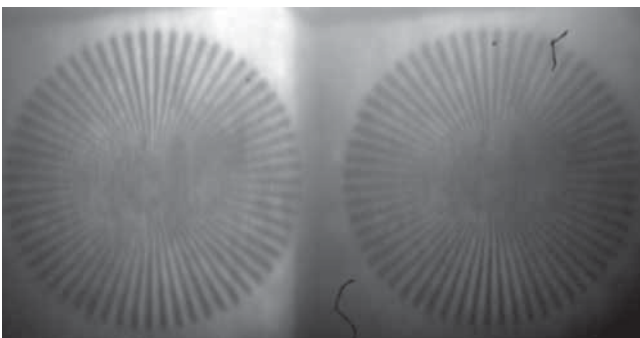
Разрешающая способность определялась стандартным образом в двух направлениях и на нескольких длинах волн

$$R_{\text{vert}} = N/(\pi D_{\text{vert}}), \quad R_{\text{hor}} = N/(\pi D_{\text{hor}}),$$

где  $N$  — число штрихов миры, а  $D_{\text{vert}}$ ,  $D_{\text{hor}}$  — диаметры кружков нерезкости по вертикали и горизонтали.

Как видно из данных таблицы, оба канала обладают примерно одинаковой разрешающей способностью, поэтому схема подходит для построения стереоизображений.

Полученные изображения специального многоцветного тест-объекта на разных дли-

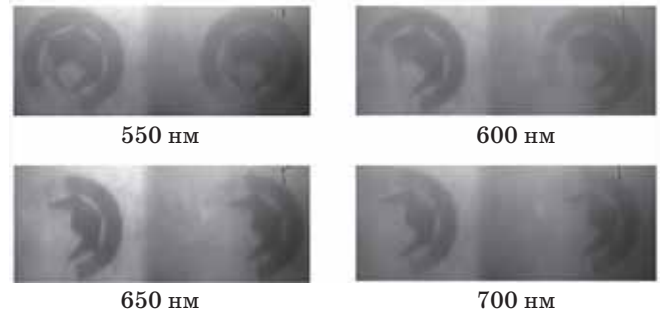


**Рис. 3.** Изображения в двух каналах, полученные на экспериментальном стенде

**Fig. 3.** Two-channel images obtained using the experimental prototype



Тест-объект



**Рис. 4.** Изображения многоцветного тест-объекта в двух каналах на разных длинах волн

**Fig. 4.** Images of a multicolored test object in two channels at different wavelengths

Разрешающая способность (результаты расчета)  
Resolution (calculation results)

Длина волны, нм	$R_{\text{hor}}$		$R_{\text{vert}}$	
	1 канал	2 канал	1 канал	2 канал
500	9,837	9,646	15,929	16,151
600	11,166	11,059	16,457	17,362
700	10,366	10,274	16,227	15,929

нах волн (рис. 4) демонстрируют спектральную фильтрацию отдельных спектральных компонент.

### ВЫВОДЫ

Разработан макет стереоскопического спектрометра на основе перестраиваемого АО фильтра. Устройство способно строить стереоизображение объекта на заданной длине волны по его спектральным снимкам с двух ракурсов и быстро перестраиваться по спектру, что позволяет получать оптический спектр объекта в каждой точке его поверхности.

Разработанный макет демонстрирует удовлетворительные, близкие по качеству стереопары тестовых изображений. Это важно, так как в более ранних прототипах спектральной АО стереосистемы характеристики каналов радикально различались, что затрудняло построение стереоизображения и не позволяло достичь высоких характеристик, так как достижимые характеристики всей системы ограничиваются «худшим» из двух каналов.

Важным результатом является и освоение относительно новой геометрии дифракции, в которой световые пучки отклонены от хорошо

изученной и повсеместно используемой, «классической» плоскости (110) АО кристалла  $\text{TeO}_2$ .

В целом, полученные результаты демонстрируют возможность и эффективность осуществления одновременной симметричной фильтрации двух оптических пучков (стереопары) для последующего восстановления трехмерной структуры объекта. Полученный угол разведения стереопары ( $20^\circ$ ) достаточно велик для восприятия «глубины» трехмерного изображения объекта и сравним с углом визуального наблюдения объекта на расстоянии наилучшего зрения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dong X., Jakobi M., Wang S., et al. A review of hyperspectral imaging for nanoscale materials research // *Appl. Spectrosc. Rev.* 2019. № 54(4). P. 285–305. <http://dx.doi.org/10.1080/05704928.2018.1463235>
2. Roth G.A., Tahiliani S., Neu-Baker N.M., et al. Hyperspectral microscopy as an analytical tool for nanomaterials // *Wiley Interdiscip. Rev.: Nanomed. Nanobiotechnol.* 2015. № 7(4). P. 565–579. <https://doi.org/10.1002/wnan.1330>
3. Lu G., Fei B. Medical hyperspectral imaging: a review // *J. Biomed. Opt.* 2014. № 19(1). P. 010901. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.19.1.010901>
4. Gutiérrez-Gutiérrez J.A., Pardo A., Real E., et al. Custom scanning hyperspectral imaging system for biomedical applications: Modeling, benchmarking, and specifications // *Sensors.* 2019. V. 19. № 7. P. 1692. <https://doi.org/10.3390/s19071692>
5. Halicek M., Fabelo H., Ortega S., et al. In-vivo and ex-vivo tissue analysis through hyperspectral imaging techniques: Revealing the invisible features of cancer // *Cancers.* 2019. V. 11. № 6. P. 756. <https://doi.org/10.3390/cancers11060756>
6. Пожар В.Э., Мачихин А.С. Спектрально-поляризационные системы трёхмерного технического зрения на основе акустооптической фильтрации // *Светотехника.* 2022. № 5. С. 32–35.
7. Батшев В.И., Пожар В.Э., Кананыхин О.А. Исследование качества передачи стереоскопического изображения при акустооптической дифракции в кристалле парателлурифта // *Оптический журнал.* 2023. Т. 90. № 11. С. 29–38. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-11-29-38>
8. Chang C.I. *Hyperspectral imaging: Techniques for spectral detection and classification.* N.Y.: Springer New York, 2003. 370 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9170-6>
9. Епихин В.М., Калинин Ю.К. Компенсация спектрального дрейфа угла дифракции неколлинеарного акустооптического фильтра // *ЖТФ.* 1989. № 59(2). С. 160–163.
10. Machikhin A., Batshev V., Pozhar V. Aberration analysis of AOTF-based spectral imaging systems // *JOSA A.* 2017. № 34(7). P. 1109–1113. <https://doi.org/10.1364/JOSA.A.34.001109>
11. Волюшинов В.Б., Молчанов В.Я., Бабкина Т.М. Акустооптический фильтр неполяризованного электромагнитного излучения // *ЖТФ.* 2000. Т. 70 № 9. С. 93–98.

#### REFERENCES

1. Dong X., Jakobi M., Wang S., et al. A review of hyperspectral imaging for nanoscale materials research // *Appl. Spectrosc. Rev.* 2019. № 54(4). P. 285–305. <http://dx.doi.org/10.1080/05704928.2018.1463235>
2. Roth G.A., Tahiliani S., Neu-Baker N.M., et al. Hyperspectral microscopy as an analytical tool for nanomaterials // *Wiley Interdiscip. Rev.: Nanomed. Nanobiotechnol.* 2015. № 7(4). P. 565–579. <https://doi.org/10.1002/wnan.1330>
3. Lu G., Fei B. Medical hyperspectral imaging: a review // *J. Biomed. Opt.* 2014. № 19(1). P. 010901. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.19.1.010901>
4. Gutiérrez-Gutiérrez J.A., Pardo A., Real E., et al. Custom scanning hyperspectral imaging system for biomedical applications: Modeling, benchmarking, and specifications // *Sensors.* 2019. V. 19. № 7. P. 1692. <https://doi.org/10.3390/s19071692>
5. Halicek M., Fabelo H., Ortega S., et al. In-vivo and ex-vivo tissue analysis through hyperspectral imaging techniques: Revealing the invisible features of cancer // *Cancers.* 2019. V. 11. № 6. P. 756. <https://doi.org/10.3390/cancers11060756>
6. Pozhar V.E., Machikhin A.S. Spectral-polarization systems of three-dimensional technical vision based on acousto-optic filtering // *Light and Eng.* 2022. V. 30. № 5. P. 37–42. <https://doi.org/10.33383/2022-088>
7. Batshev V.I., Pozhar V.E., Kananykhin O.A. Quality assessments of stereoscopic images under acousto-optic diffraction in paratellurite crystal // *J. Opt. Technol.* 2023. V. 90. № 11. P. 00–00. <http://doi.org/10.1364/JOT.90.000000>
8. Chang C.I. *Hyperspectral imaging: Techniques for spectral detection and classification.* N.Y.: Springer New York, 2003. 370 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9170-6>
9. Epikhin V.M., Kalinnikov Yu.K. Compensation of the diffraction angle spectral drift for non-collinear acousto-optical filter // *Soviet Technical Physics.* 1989. V. 34(2).
10. Machikhin A., Batshev V., Pozhar V. Aberration analysis of AOTF-based spectral imaging systems // *JOSA A.* 2017. № 34(7). P. 1109–1113. <https://doi.org/10.1364/JOSA.A.34.001109>
11. Voloshinov V.B., Molchanov V.Y., Babkina T.M. Acousto-optic filter of nonpolarized electromagnetic radiation // *Technical Physics.* 2000. V. 45. P. 1186–1191. <https://doi.org/10.1134/1.1318107>

**АВТОРЫ**

**Владислав Игоревич Батшев** — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Научно-технологический центр уникального приборостроения 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)

**Олег Алексеевич Кананыхин** — инженер-исследователь, Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, 117342, Россия; Scopus ID: 57222349624; <https://orcid.org/0009-0005-9723-3250>; [kananykhin.oa@ntcup.ru](mailto:kananykhin.oa@ntcup.ru)

**Витольд Эдуардович Пожар** — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом, Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, 117342, Россия; Scopus ID: 6603147714; <https://orcid.org/0000-0003-0553-5410>; [vitold@ntcup.ru](mailto:vitold@ntcup.ru)

**Павел Сергеевич Мартьянов** — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, 117342, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-3262-3053>; [la3232@mail.ru](mailto:la3232@mail.ru)

*Статья поступила в редакцию 22.01.2024  
Одобрена после рецензирования 04.04.2024  
Принята к печати 30.05.2024*

**AUTHORS**

**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)

**Oleg A. Kananykhin** — Research Engineer, Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow, 117342, Russia; Scopus ID: 57222349624; <https://orcid.org/0009-0005-9723-3250>; [kananykhin.oa@ntcup.ru](mailto:kananykhin.oa@ntcup.ru)

**Vitold E. Pozhar** — Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Full Professor, Department Head, Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow, 117342, Russia; Scopus ID: 6603147714; <https://orcid.org/0000-0003-0553-5410>; [vitold@ntcup.ru](mailto:vitold@ntcup.ru)

**Pavel S. Martyanov** — PhD (Engineering), Senior Researcher, Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow, 117342, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-3262-3053>; [la3232@mail.ru](mailto:la3232@mail.ru)

*The article was submitted to the editorial office 22.01.2024  
Approved after review 04.04.2024  
Accepted for publication 30.05.2024*