

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ BRIEF PAPERS

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-4-812-816

УДК 535.421

### Восстановление информации в зашумленном канале методом фантомной визуализации со спектральным мультиплексированием в оптическом диапазоне

Егор Николаевич Опарин<sup>1</sup>✉, Владимир Сергеевич Шумигай<sup>2</sup>,  
Азат Олфатович Исмагилов<sup>3</sup>, Антон Николаевич Цыпкин<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

<sup>1</sup> [en\\_oparin@itmo.ru](mailto:en_oparin@itmo.ru)✉, <https://orcid.org/0000-0002-4009-7594>

<sup>2</sup> [vshumigay@itmo.ru](mailto:vshumigay@itmo.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8597-1196>

<sup>3</sup> [ismagilov.azat@itmo.ru](mailto:ismagilov.azat@itmo.ru), <https://orcid.org/0000-0002-5844-2966>

<sup>4</sup> [tsyppkinan@itmo.ru](mailto:tsyppkinan@itmo.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9254-1116>

#### Аннотация

Техника фантомной визуализации позволяет получать информацию об объекте в условиях зашумленности каналов передачи, соизмеримой с интенсивностью задействованных в восстановлении спекл-структур. Одним из основных недостатков данной методики является сравнительно низкая скорость работы, что ограничивает ее применимость при работе с быстро протекающими процессами или движущимися объектами. Предложена модификация техники вычислительной фантомной визуализации, позволяющая снять это ограничение. Продемонстрировано, что спектральное мультиплексирование спекл-структур дает возможность ускорить процесс восстановления изображения. Например, при увеличении числа спектральных каналов с 4 до 10, происходит увеличение отношения сигнал-шум в шесть раз. В то же время использование классической монохромной фантомной визуализации не позволяет восстановить изображение в тех же условиях и с тем же количеством измерений. Предложенная методика привлекательна для таких требовательных к быстродействию приложений, как передача данных и дистанционное зондирование.

#### Ключевые слова

фантомная визуализация, спектральный суперконтинуум, пространственный модулятор света, передача информации, дистанционное зондирование

#### Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания (Паспорт № 2019-0903) и Физико-технического мегафакультета Университета ИТМО в рамках гранта НИРМА.

**Ссылка для цитирования:** Опарин Е.Н., Шумигай В.С., Исмагилов А.О., Цыпкин А.Н. Восстановление информации в зашумленном канале методом фантомной визуализации со спектральным мультиплексированием в оптическом диапазоне // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 4. С. 812–816. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-4-812-816

### Information reconstruction from noisy channel using ghost imaging method with spectral multiplexing in visible range

Egor N. Oparin<sup>1</sup>✉, Vladimir S. Shumigay<sup>2</sup>, Azat O. Ismagilov<sup>3</sup>, Anton N. Tsyppkin<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

<sup>1</sup> [en\\_oparin@itmo.ru](mailto:en_oparin@itmo.ru)✉, <https://orcid.org/0000-0002-4009-7594>

<sup>2</sup> [vshumigay@itmo.ru](mailto:vshumigay@itmo.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8597-1196>

<sup>3</sup> [ismagilov.azat@itmo.ru](mailto:ismagilov.azat@itmo.ru), <https://orcid.org/0000-0002-5844-2966>

<sup>4</sup> [tsyppkinan@itmo.ru](mailto:tsyppkinan@itmo.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9254-1116>

© Опарин Е.Н., Шумигай В.С., Исмагилов А.О., Цыпкин А.Н., 2022

**Abstract**

The ghost imaging technique allows us to recover information about an object in conditions of noisy transmission channels, commensurate with the intensity of the speckle structures involved in the reconstruction. One of the main disadvantages of this technique is relatively slow reconstruction speed. This limits its applicability for study of dynamic processes or fast-moving objects. In this paper, we propose a modification of the computational ghost imaging technique that allows us to overcome this limitation. It is shown that the spectral multiplexing of the speckle patterns speeds up the image reconstruction. Increase in the number of spectral channels from 4 to 10 leads to the increase of the signal-to-noise ratio by the factor of 6. Simultaneously, under the same conditions and with the same number of measurements classical monochrome ghost imaging does not reconstruct the picture at all. This makes the proposed technique attractive for high-speed demanding applications such as communications and remote sensing.

**Keywords**

ghost imaging, supercontinuum, spatial light modulator, data transmission, remote sensing

**Acknowledgements**

The study was partially funded by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Passport No. 2019-0903) and RPMA grant of School of Physics and Engineering of ITMO University.

**For citation:** Oparin E.N., Shumigay V.S., Ismagilov A.O., Tsyarkin A.N. Information reconstruction from noisy channel using ghost imaging method with spectral multiplexing in visible range. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 4, pp. 812–816 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-4-812-816

Интерес к передаче информации через открытое пространство существует давно. Работающие в радиодиапазоне системы широко внедрены в индустрию, однако разработка аналогичных оптических систем далека от завершения. В последние годы в данной области ведутся работы по кодированию информации в вихревых пучках [1], а также разработки алгоритмов для отслеживания положения абонентов таких сетей для снижения помех и ошибок в канале [2]. Точное позиционирование абонента необходимо, так как существующая концепция оптических коммуникаций через открытое пространство подразумевает использование сравнительно узконаправленных источников и приемников [3].

Наряду с применением адаптивной оптики и алгоритмов машинного обучения [4] решению задачи дистанционного отслеживания объектов в условиях высоких шумов может способствовать техника фантомной визуализации [5]. Данная техника основана на расчете значений корреляционной функции псевдослучайного спекл-поля, освещающего поверхность объекта, и интенсивности, регистрируемой одиночным детектором после взаимодействия излучения с объектом [6]. В ряде методик, называемых вычислительной фантомной визуализацией, для восстановления изображения объекта используется целый набор псевдослучайных спекл-структур, заданных с помощью пространственного модулятора света [7]. Таким образом, информация об объекте передается с помощью шума. Внешние влияния на канал с передаваемой информацией замедляют процесс восстановления фантомного изображения, но не делают его невозможным, т. е. такая система передачи данных — помехоустойчива.

Основное ограничение техники фантомной визуализации — сравнительно большое время восстановления информации. Это накладывает дополнительные ограничения на визуализацию быстро протекающих процессов или быстро движущихся объектов. Переход от последовательного освещения объекта спекл-структурами к параллельному может позволить обойти данный недостаток. При этом не избежать взаимной интерференции спекл-структур, сформированных монохроматическим

излучением. Решением может стать использование широкополосного источника — спектрального суперконтинуума. Это позволит одновременно детектировать несколько спеклов, разнесенных по спектру. Причем количество уникальных спеклов ограничено исключительно техническими возможностями задействованного пространственного модулятора света.

В настоящей работе предложена методика ускорения восстановления информации об объекте в присутствии шумов, по интенсивности сравнимых с задействованными спекл-структурами. Техника базируется на мультиспектральной фантомной визуализации. С ее использованием экспериментально показано восстановление изображения тестового объекта в условиях, при которых классическая фантомная визуализация не позволила восстановить информацию об объекте.

Схема экспериментальной реализации предложенной методики представлена на рис. 1. В качестве источника излучения использован суперконтинуум видимого диапазона частот, полученный при лазерной филиамен-

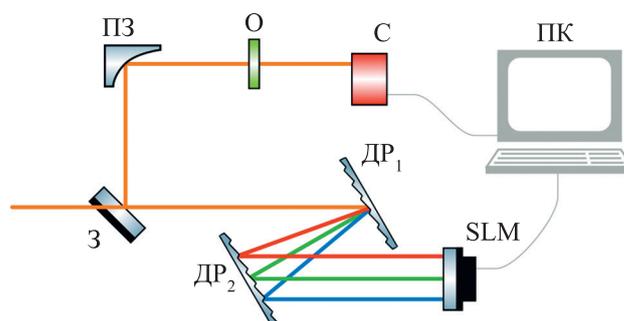


Рис. 1. Экспериментальная установка фантомной визуализации со спектральным мультиплексированием.

ДР<sub>1</sub> и ДР<sub>2</sub> — дифракционные решетки; SLM — пространственный модулятор света; З — выходное зеркало; ПЗ — параболическое зеркало; О — объект; С — спектрометр

Fig. 1. Experimental setup for ghost imaging with spectral multiplexing. Here, ДР<sub>1</sub> and ДР<sub>2</sub> are diffraction gratings; SLM is a spatial light modulator; З is an output mirror; ПЗ is a parabolic mirror; О is an object; and С is a spectrometer

тации в воде [8]. Псевдослучайные спекл-картины в плоскости объекта заданы с помощью пространственного модулятора света HOLOEYE LETO-2 (с разрешением  $1920 \times 1080$  и размером пиксела  $6,4 \times 6,4$  мкм). Детектирование излучения, прошедшего через объект, осуществлено с помощью спектрометра ASP-100 производства Avesta.

Мультиплексирование выполнено за счет разложения спектра суперконтинуума в пространстве таким образом, чтобы каждый участок SLM (Spatial Light Modulator) был освещен отдельным диапазоном. Сделано это было с помощью двух дифракционных решеток: первая раскладывает излучение в спектр, а вторая коллимировала формируемый пучок, обеспечивая тем самым освещение поверхности SLM плоским волновым фронтом. Восстановление фантомного изображения требует все спектральные диапазоны с закодированными в них псевдослучайными спекл-структурами вновь собрать в один пучок. Для этого излучение было пропущено через пару решеток в обратном направлении, после чего сформированный пучок направлялся на выходное зеркало, расположенное ниже входного пучка суперконтинуума.

Количество спектральных каналов, по которым возможно мультиплексирование, в предлагаемой методике

ограничено в первую очередь разрешением SLM. Чем больше используется поддиапазонов, тем меньше количество пикселей отводится на модуляцию каждого из них, и тем ниже качество и разрешение итогового изображения. При этом нижнюю границу ограничивает строгая зависимость вносимого SLM фазового сдвига от длины волны излучения [9]. При модуляции широкополосного излучения меньшее число спектральных каналов говорит о большем диапазоне длин волн, охватываемом каждым участком SLM, что также приводит к некорректному восстановлению изображения. В качестве компромиссного варианта, а также для демонстрации работоспособности методики, выполним мультиплексирование по десяти спектральным каналам. Выбранное количество является условным и зависит от параметров конкретного эксперимента.

Сгенерированный при лазерной филаментации суперконтинуум охватывает диапазон от 450 до 1200 нм, но в настоящей работе он был ограничен 550–650 нм. Данное сужение диапазона связано с тем, что при разделении изначального спектра суперконтинуума на десять каналов, изменение фазовых сдвигов в пределах одного канала должно достигать 16 %. Сужение диапазона позволило ограничить фазовый сдвиг одним процентом. При большем уменьшении диапазона фа-

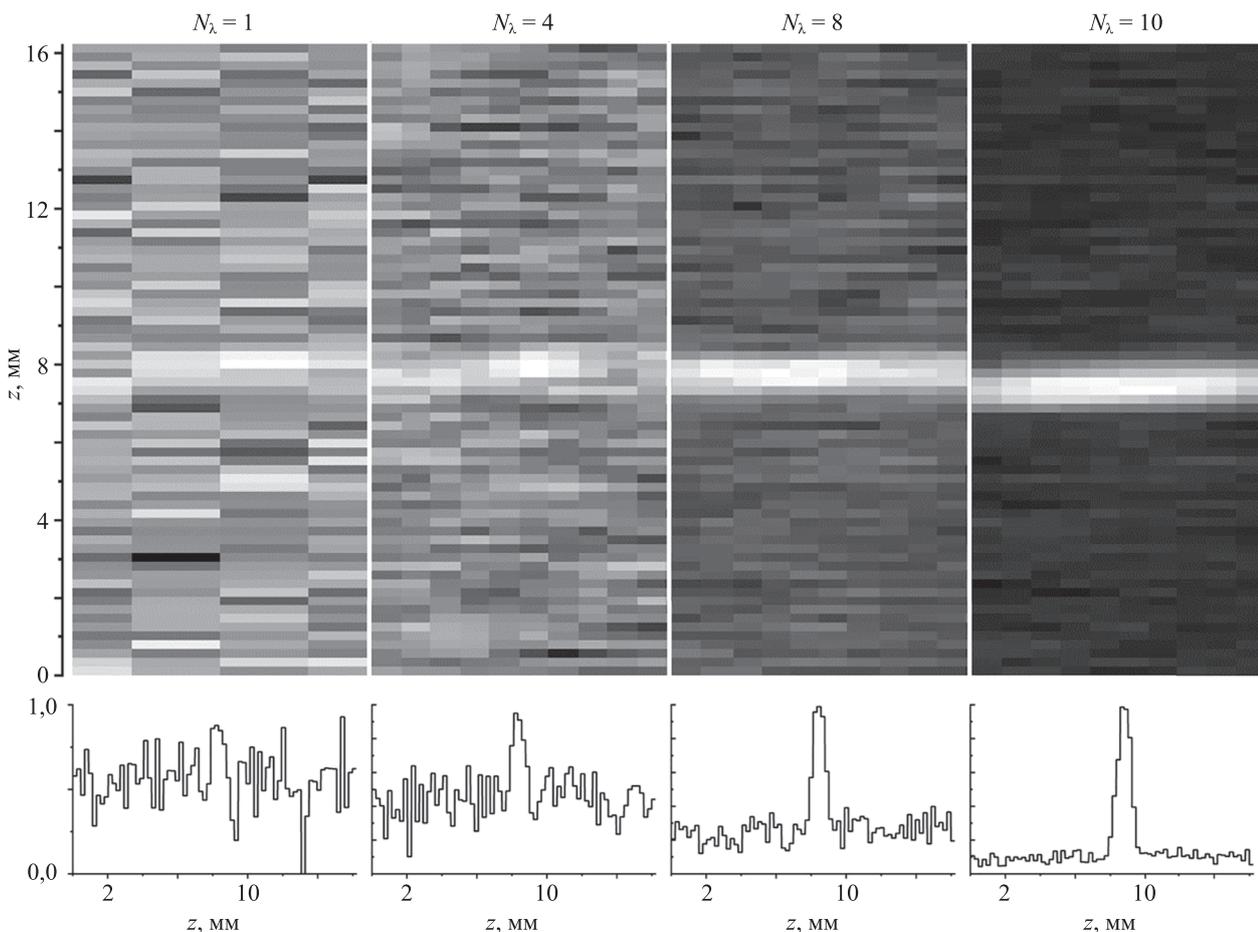


Рис. 2. Фантомные изображения щели, восстановленные с использованием различного количества спектральных каналов  $N_\lambda$ . Вертикальные сечения полученных изображений показаны на вставке ниже, где  $z$  — высота изображения

Fig. 2. Ghost images of the slit reconstructed using a different number of spectral channels  $N_\lambda$ . Vertical cross-sections of the obtained images are shown on the insert below with  $z$  is image height

зовый сдвиг еще больше уменьшился, но вместе с тем стало бы невозможным надежное разделение каналов на спектрометре.

Для подтверждения работоспособности предлагаемой методики и возможности восстановления информации об объекте в условиях высоких шумов, выполнено восстановление фантомного изображения щели шириной 1,5 мм. Для наглядности эксперимента выбраны такие условия, чтобы фантомная визуализация на основе монохроматического излучения не позволила наблюдать изображение объекта. Во всех проведенных экспериментах задействовано 5000 псевдослучайных спекл-структур. На рис. 2 видно, что с ростом количества задействованных спектральных каналов  $N_\lambda$  растет и качество изображения.

Предложена модификация методики вычислительной фантомной визуализации, основанная на

спектральном мультиплексировании задействованных в восстановлении фантомных изображений спекл-структур. Результат восстановления достигнут за счет использования широкополосного источника излучения — суперконтинуума видимого диапазона. Проведен эксперимент с использованием предложенной методики по восстановлению изображения щели. Продемонстрировано, что в условиях, при которых восстановление информации об объекте методом классической фантомной визуализации невозможно, предложенная методика позволяет получить изображение объекта. Показан рост качества изображения с увеличением числа спектральных каналов. Например, при увеличении количества каналов с 4 до 10, соотношение сигнал-шум выросло в шесть раз.

### Литература

1. Willner A.E., Zhao Z., Liu C., Zhang R., Song H., Pang K., Manukyan K., Song H., Su X., Xie G., Ren Y., Yan Y., Tur M., Molisch A.F., Boyd R.W., Zhou H., Hu N., Minoofar A., Huang H. Perspectives on advances in high-capacity, free-space communications using multiplexing of orbital-angular-momentum beams // *APL Photonics*. 2021. V. 6. N 3. P. 030901. <https://doi.org/10.1063/5.0031230>
2. Kaymak Y., Rojas-Cessa R., Feng J., Ansari N., Zhou M., Zhang T. A survey on acquisition, tracking, and pointing mechanisms for mobile free-space optical communications // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2018. V. 20. N 2. P. 1104–1123. <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2804323>
3. Chan V.W.S. Free-space optical communications // *Journal of Lightwave Technology*. 2006. V. 24. N 12. P. 4750–4762. <https://doi.org/10.1109/JLT.2006.885252>
4. Na Y., Ko D.K. Deep-learning-based high-resolution recognition of fractional-spatial-mode-encoded data for free-space optical communications // *Scientific Reports*. 2021. V. 11. N 1. P. 2678. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82239-8>
5. Clemente P., Durán V., Torres-Company V., Tajahuerce E., Lancis J. Optical encryption based on computational ghost imaging // *Optics Letters*. 2010. V. 35. N 14. P. 2391–2393. <https://doi.org/10.1364/OL.35.002391>
6. Shapiro J.H. Computational ghost imaging // *Physical Review A*. 2008. V. 78. N 6. P. 061802. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.78.061802>
7. Zhang D.-J., Li H.-G., Zhao Q.-L., Wang S., Wang H.-B., Xiong J., Wang K. Wavelength-multiplexing ghost imaging // *Physical Review A*. 2015. V. 92. N 1. P. 013823. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.92.013823>
8. Тсупкин А.Н., Путилин С.Е., Мелник М.В., Макаров Е.А., Беспалов В.Г., Козлов С.А. Generation of high-intensity spectral supercontinuum of more than two octaves in a water jet // *Applied Optics*. 2016. V. 55. N 29. P. 8390–8394. <https://doi.org/10.1364/AO.55.008390>
9. Harm W., Jesacher A., Thalhammer G., Bernet S., Ritsch-Marte M. How to use a phase-only spatial light modulator as a color display // *Optics Letters*. 2015. V. 40. N 4. P. 581–584. <https://doi.org/10.1364/OL.40.000581>

### Авторы

**Опарин Егор Николаевич** — лаборант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [orcid.org/0000-0002-4009-7594](https://orcid.org/0000-0002-4009-7594), [en\\_oparin@itmo.ru](mailto:en_oparin@itmo.ru)

**Шумигой Владимир Сергеевич** — лаборант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-8597-1196>, [vshumigay@itmo.ru](mailto:vshumigay@itmo.ru)

### References

1. Willner A.E., Zhao Z., Liu C., Zhang R., Song H., Pang K., Manukyan K., Song H., Su X., Xie G., Ren Y., Yan Y., Tur M., Molisch A.F., Boyd R.W., Zhou H., Hu N., Minoofar A., Huang H. Perspectives on advances in high-capacity, free-space communications using multiplexing of orbital-angular-momentum beams. *APL Photonics*, 2021, vol. 6, no. 3, pp. 030901. <https://doi.org/10.1063/5.0031230>
2. Kaymak Y., Rojas-Cessa R., Feng J., Ansari N., Zhou M., Zhang T. A survey on acquisition, tracking, and pointing mechanisms for mobile free-space optical communications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, vol. 20, no. 2, pp. 1104–1123. <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2804323>
3. Chan V.W.S. Free-space optical communications. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, vol. 24, no. 12, pp. 4750–4762. <https://doi.org/10.1109/JLT.2006.885252>
4. Na Y., Ko D.K. Deep-learning-based high-resolution recognition of fractional-spatial-mode-encoded data for free-space optical communications. *Scientific Reports*, 2021, vol. 11, no. 1, pp. 2678. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82239-8>
5. Clemente P., Durán V., Torres-Company V., Tajahuerce E., Lancis J. Optical encryption based on computational ghost imaging. *Optics Letters*, 2010, vol. 35, no. 14, pp. 2391–2393. <https://doi.org/10.1364/OL.35.002391>
6. Shapiro J.H. Computational ghost imaging. *Physical Review A*, 2008, vol. 78, no. 6, pp. 061802. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.78.061802>
7. Zhang D.-J., Li H.-G., Zhao Q.-L., Wang S., Wang H.-B., Xiong J., Wang K. Wavelength-multiplexing ghost imaging. *Physical Review A*, 2015, vol. 92, no. 1, pp. 013823. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.92.013823>
8. Тсупкин А.Н., Путилин С.Е., Мелник М.В., Макаров Е.А., Беспалов В.Г., Козлов С.А. Generation of high-intensity spectral supercontinuum of more than two octaves in a water jet. *Applied Optics*, 2016, vol. 55, no. 29, pp. 8390–8394. <https://doi.org/10.1364/AO.55.008390>
9. Harm W., Jesacher A., Thalhammer G., Bernet S., Ritsch-Marte M. How to use a phase-only spatial light modulator as a color display. *Optics Letters*, 2015, vol. 40, no. 4, pp. 581–584. <https://doi.org/10.1364/OL.40.000581>

### Authors

**Egor N. Oparin** — Laboratory Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [orcid.org/0000-0002-4009-7594](https://orcid.org/0000-0002-4009-7594), [en\\_oparin@itmo.ru](mailto:en_oparin@itmo.ru)

**Vladimir S. Shumigay** — Laboratory Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-8597-1196>, [vshumigay@itmo.ru](mailto:vshumigay@itmo.ru)

**Исмагилов Азат Олфатович** — научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57195673891](https://orcid.org/0000-0002-5844-2966), <https://orcid.org/0000-0002-5844-2966>, [ismagilov.azat@itmo.ru](mailto:ismagilov.azat@itmo.ru)

**Цыпкин Антон Николаевич** — доктор физико-математических наук, научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 56366230300](https://orcid.org/0000-0002-9254-1116), <https://orcid.org/0000-0002-9254-1116>, [tsyppkinan@itmo.ru](mailto:tsyppkinan@itmo.ru)

**Azat O. Ismagilov** — Scientific Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57195673891](https://orcid.org/0000-0002-5844-2966), <https://orcid.org/0000-0002-5844-2966>, [ismagilov.azat@itmo.ru](mailto:ismagilov.azat@itmo.ru)

**Anton N. Tsyppkin** — D. Sc. (Physics & Mathematics), Scientific Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 56366230300](https://orcid.org/0000-0002-9254-1116), <https://orcid.org/0000-0002-9254-1116>, [tsyppkinan@itmo.ru](mailto:tsyppkinan@itmo.ru)

*Статья поступила в редакцию 26.05.2022*  
*Одобрена после рецензирования 25.06.2022*  
*Принята к печати 30.07.2022*

*Received 26.05.2022*  
*Approved after reviewing 25.06.2022*  
*Accepted 30.07.2022*



Работа доступна по лицензии  
Creative Commons  
«Attribution-NonCommercial»