

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Е. Е. Майоров^{1*}, В. В. Курлов¹, Ю. М. Бородинский², А. В. Дагаев³, И. С. Таюрская⁴¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия² Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Россия³ Ивангородский гуманитарно-технический институт (филиал) Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, Ивангород, Россия⁴ Санкт-Петербургский университет технологий управления и экономики, Санкт-Петербург, Россия
* majorov_ee@mail.ru

Аннотация. Методом спектрального анализа исследованы оптические параметры голографических носителей информации, полученных от разных производителей. В научной практике для голографии используют такие регистрирующие среды (фотопластинки и фотопленки), которые обеспечивают высокоточные информативные результаты экспериментов. Приведена оптическая схема автоматизированного спектрометра, представлены его технические характеристики. Получены спектральные зависимости коэффициента поглощения от длины световой волны. Проанализированы экспериментальные результаты и даны рекомендации по использованию данных фотоматериалов.

Ключевые слова: фотоматериал, спектральный анализ, длина световой волны, коэффициент поглощения, источник излучения, спектрометр, кювета, фотоэлектронный умножитель

Ссылка для цитирования: Майоров Е. Е., Курлов В. В., Бородинский Ю. М., Дагаев А. В., Таюрская И. С. Исследование голографических материалов методом спектрального анализа // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 6. С. 519–524. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-6-519-524.

STUDYING HOLOGRAPHIC MATERIALS BY SPECTRAL ANALYSIS METHOD

E. E. Maiorov^{1*}, V. V. Kurlov¹, Yu. M. Borodiansky², A. V. Dagaev³, I. S. Taiurskaya⁴¹ St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia² The Bonch-Bruevich St. Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, Russia³ Ivangorod Humanitarian and Technical Institute (branch of St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation), Ivangorod, Russia⁴ St. Petersburg University of Management Technologies and Economics, St. Petersburg, Russia
* majorov_ee@mail.ru

Abstract. The optical parameters of holographic storage media obtained from different manufacturers are studied using the method of spectral analysis. In scientific practice, recording media (photographic plates and films) are used for holography, which provide highly accurate informative results of experiments. An optical diagram of the automated spectrometer is presented, and its technical characteristics are presented. The spectral dependences of the absorption coefficient on the light wavelength are obtained. The experimental results are analyzed and recommendations for the use of these photographic materials are given.

Keywords: photographic material, spectral analysis, light wavelength, absorption coefficient, radiation source, spectrometer, cuvette, photomultiplier tube

For citation: Maiorov E. E., Kurlov V. V., Borodiansky Yu. M., Dagaev A. V., Taiurskaya I. S. Studying holographic materials by spectral analysis method. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 6. P. 519–524 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-6-519-524.

Введение. Разработчики оптических приборов при создании голографической техники уделяют большое внимание как источникам излучения, так и регистрирующим средам (фотопластинкам и фотопленкам) [1, 2]. В последние годы на российском рынке приборов неразрушающего контроля появляются новые средства измерений и материалы, также в широком ассортименте представлена элементная база [3, 4]. Инновационные технологии в оптическом приборостроении позволяют перейти на более качественный уровень измерений [5, 6]. В частности, спектральные приборы и комплексы активно используются в машиностроении, электро-

нике, оптике, медицине, текстильной и пищевой промышленности, а также при производстве строительных и оптических материалов [7, 8].

Российские ученые постоянно совершенствуют информационную и научную базы экспериментальных исследований, которые непосредственным образом связаны с оптическими измерениями [9, 10].

Методы спектрального анализа используются для выявления структуры и состава вещества в различных агрегатных состояниях, причем форма объекта и среда не подвергаются механическому воздействию [11, 12]. Работа этих средств основана на получении спектральных характеристик объекта или среды в исследуемой части оптического спектра [13, 14]. В процессе работы регистрируются переходные энергетические процессы и информация выводится в виде спектральных зависимостей $K(\lambda)$, $T(\lambda)$, $R(\lambda)$.

Методы голографической интерферометрии для записи и воспроизведения изображений, обеспечивающие получение результатов высокой точности измерений, требуют использования качественных высокоразрешающих регистрирующих сред [15, 16]. От того, какие фотопластинки или фотопленки используются, зависит достоверность эксперимента.

Существует широкий класс фотопластинок, фотопленок для голографической интерферометрии, которые различаются по химическим, физическим и оптическим свойствам. На практике применяют фотопленки на основе диарилэтенон и фотопластинки — на основе кристаллов галогенида серебра.

Анализ литературных источников показал, что в технике голографии ведущее место заняли фотопластинки марок ПФГ-03М, U08М, а также фотопленки CGH [17, 18]. Эти материалы пригодны для исследования напряженно-деформированного состояния поверхности объекта, позволяют хранить длительное время данные о волновых фронтах, существовавших в различные моменты времени, а также восстанавливать трехмерные изображения объекта или среды.

Поэтому вопросы регистрации изображений на голографических носителях требуют внимательного изучения методами спектрального анализа.

Целью работы явилось изучение оптических параметров голографических носителей информации разных производителей.

Постановка задачи: с помощью автоматизированного спектрометра UV-3600i провести измерения оптических параметров голографических регистрирующих сред разных производителей в диапазоне длин волн от 185 нм до 900 нм; получить спектральные данные для каждого материала; проанализировать оптические параметры материалов и сравнить по полученные графические зависимости.

Метод и объект исследования. Исследованию подлежали фотоматериалы (ПФГ-03М, U08М, CGH).

Фотоматериалы ПФГ-03М и U08М используются в голографии (для регистрации гладких и возмущенных форм поверхности), а также для записи диффузно отражающих поверхностей. ПФГ-03М состоит из сенсibiliзирующего красителя, кристаллов галогенида серебра; основа — оптическое стекло толщиной 2,65 мм. U08М состоит из сенсibiliзирующего красителя, кристаллов галогенида серебра.

CGH — мономерная каландрированная пленка — обладает уникальными оптическими свойствами, что позволяет использовать ее в дизайне и рекламе для привлечения внимания потребителя или для маркировки различной продукции. Пленка может использоваться для сольвентной, экосольвентной, УФ- и латексной печати.

Для проведения экспериментальных исследований использовался автоматизированный спектрометр UV-3600i с оптической схемой, представленной на рис. 1 (W1 — галогенная лампа; D2 — дейтериевая лампа; M1–M15 — система зеркал; S1–S3 — система щелей; G1–G4 — система решеток; F — оптический отсекающий; С.Н. — затвор; W1–W3 — окошки диаметром 30 мм; W4 и W5 — окошки диаметром 40 мм; PMT — приемник излучения).

Световой пучок от источника света (W1, D2), пройдя систему отражающих зеркал (M5–M9), направляется в опорный и объектный каналы измерений. В этой схеме оба световых

пучка достигают фотоэлектронного умножителя (PMT), где в дальнейшем подвергаются обработке. Уникальность оптической схемы заключается в том, что нет необходимости направлять объектный и опорный световые пучки в один измерительный канал. Это позволяет увеличить пространство в кюветном отделении, а значит, проводить измерения с использованием мутных сред, размещая в непосредственной близости ос световыми окошками (W2, W3). Технические параметры спектрометра UV-3600i приведены в таблице.

Этот прибор предназначен для спектрального анализа веществ в различных агрегатных состояниях и мелкодисперсных сред. Спектрометр может автоматически изменять ширину щели, он имеет двойной монохроматор, фотоэлектронный умножитель, который обрабатывает световые сигналы в диапазоне от 185 до 3300 нм. Преимущество этого прибора состоит в том, что у него большой фотометрический диапазон, это позволяет исследовать образцы с высокой цветопередачей. Прибор комплектуется специальными приставками с большими кюветными отделениями, с зеркальными отражателями и поляризаторами, а также интегрирующими сферами. Спектрометр имеет хорошую сопряженность с дополнительным оборудованием ASX-280 b ASX 560, используется программа LabSolutions UV-Vis. Настройки можно корректировать для конкретного объекта или среды.

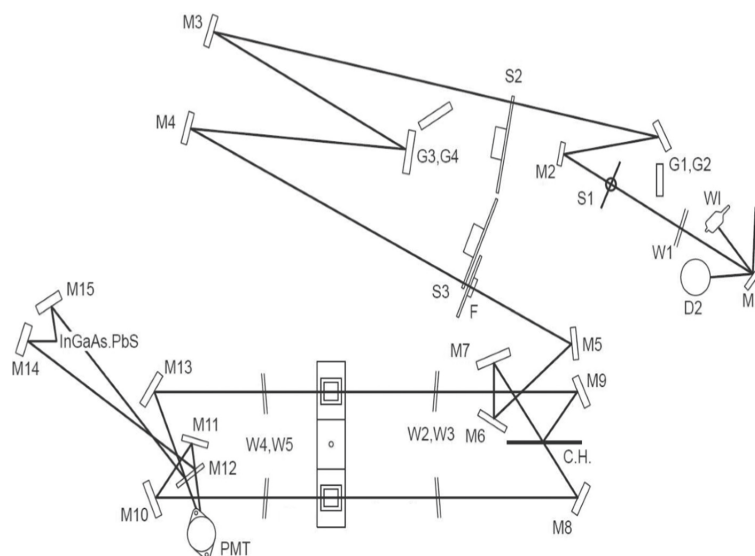


Рис. 1

Оптическая схема	Двулучевая
Монохроматор	Двойной (Черни–Тернера и предмонохроматор с вогнутой дифракционной решеткой)
Спектральный диапазон	185–3300 нм
Детектор	УФ/видимый диапазон: ФЭУ. Ближний/ИК-диапазон: InGaAs/ охлаждаемый PbS
Ширина щели	УФ/видимый диапазон: 8-ступенчатая от 0,1 до 8 нм. Ближний/ИК-диапазон: 10-ступенчатая от 0,2 до 32 нм
Скорость сканирования	4500 нм/мин (УФ/видимый диапазон); 9000 нм/мин (ближний/ИК-диапазон с ФЭУ/InGaAs); 4000 нм/мин (ближний/ИК-диапазон с PbS)
Погрешность установки длины волны	± 0,2 нм (УФ/вид); ± 0,8 нм (ближний/ИК-диапазон)
Погрешность воспроизводимости по шкале длин волн	± 0,08 нм (УФ/вид); ± 0,32 нм (ближний/ИК-диапазон)
Уровень рассеянного излучения	0,00008 % (220 нм, NaI); 0,00005 % (340 нм, NaNO ₂); 0,0005 % (1420 нм, H ₂ O); 0,005 % (2365 нм, CHCl ₃)
Размеры прибора	1020 × 660 × 270 мм
Масса	96 кг

Экспериментальные результаты. Голографические фотоматериалы (ПФГ-03М, U08М, CGH) были предоставлены компанией „Азимут Фотоникс“ (Москва).

Характеристики спектров поглощения фотоматериалов представлены на рис. 2. Наибольшее значение коэффициента поглощения зарегистрировано у ПФГ-03М (рис. 2, б): как видно, коэффициент поглощения достигает наибольшего значения ($K = 81,4\%$) при $\lambda = 633$ нм. Для фотоматериала CGH максимальное значение ($K = 75,2\%$) достигается при $\lambda = 632$ нм (рис. 2, а); для U08М (рис. 2, в) при $\lambda = 633$ нм — $K = 72,9\%$. Такие высокие значения коэффициентов поглощения могут быть обусловлены поглощением галогенидами серебра и диарилэтенем светового излучения в диапазоне длин волн от 620 до 640 нм.

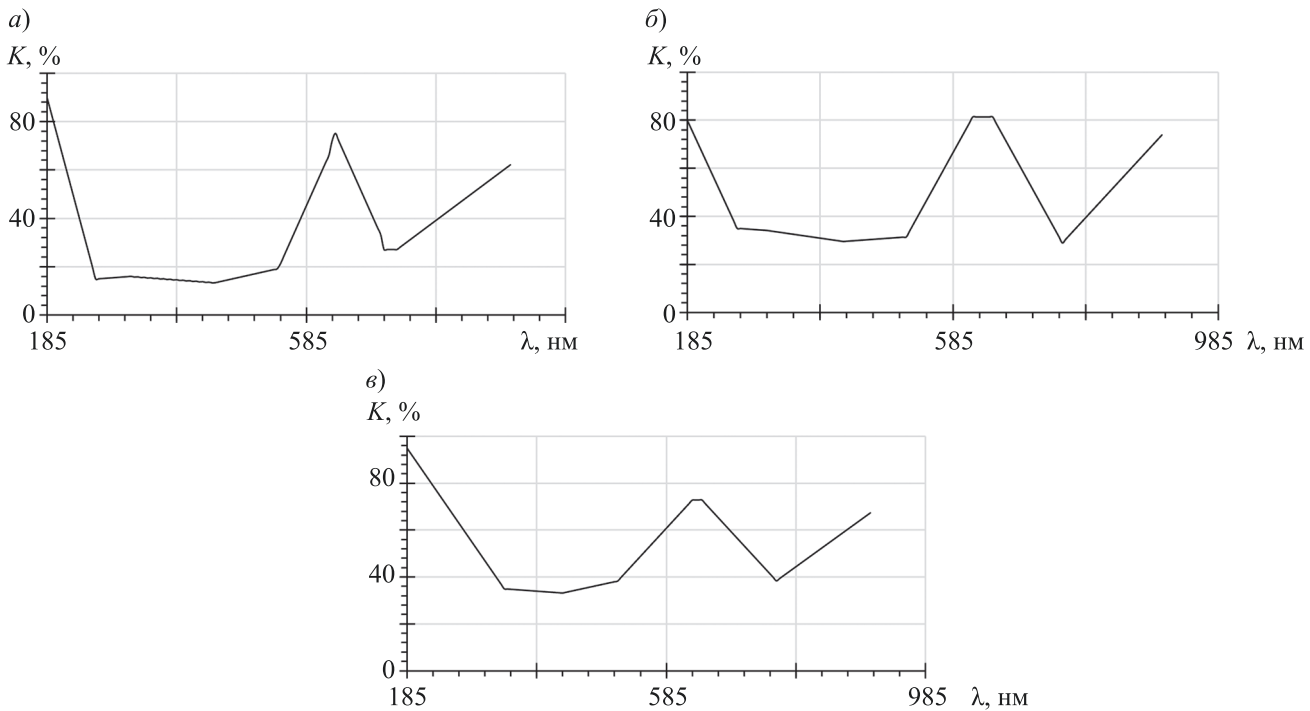


Рис. 2

Представленные зависимости схожи, но поглощение в диапазоне длин волн от 255 до 445 нм разное. Видимо, это связано с разной концентрацией поглотителей у голографических материалов.

Заключение. Полученные данные свидетельствуют о том, что целесообразно записывать и воспроизводить изображения в исследованных материалах на длине волны $\lambda = 633$ нм. Таким образом, анализ полученных данных подтверждает, что голографические материалы разных производителей пригодны для оптической обработки записанных интерферограмм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 855 с.
2. Афанасьев В. А. Оптические измерения. М.: Недра, 1968. 263 с.
3. Вест Ч. Голографическая интерферометрия. М.: Мир, 1982. 504 с.
4. Малакара Д. Оптический производственный контроль / Пер. с англ. под ред. А. Н. Соснова. М.: Машиностроение, 1985. 340 с.
5. Костин Г. А., Черняк Т. А., Майоров Е. Е., Курлов В. В., Таюрская И. С. Исследование оптических свойств авиационных гидравлических жидкостей методом оптической спектроскопии // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2022. Вып. 8. С. 80–85. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-80-85.
6. Костин Г. А., Черняк Т. А., Майоров Е. Е., Курлов В. В., Таюрская И. С. Спектрофотометрия углеводородного топлива для летательных аппаратов дозвуковой авиации // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2022. Вып. 8. С. 100–105. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-100-105.

7. Кузьмина Д. А., Майоров Е. Е., Шаламай Л. И., Мендоса Е. Ю., Нарушак Н. С. Использование метода спектроскопии отражения для распознавания подлинности стоматологических реставрационных материалов // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 1. С. 63–70. DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-1-63-70.
8. Майоров Е. Е., Афанасьева О. В., Соколовская М. В. Исследование оптических свойств продуктов косметологии спектрофотометром, работающим в дальнем ультрафиолетовом диапазоне длин волн // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2022. Вып. 8. С. 128–133. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-128-133.
9. Майоров Е. Е., Туровская М. С., Литвиненко А. Н., Черняк Т. А., Дагаев А. В., Пономарев С. Е., Курлов В. В., Катунин Б. Д. Исследование разработанного спектрофотометра для ультрафиолетовой области спектра и его технико-экономическое обоснование // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2018. № 7. С. 38–43.
10. Майоров Е. Е., Арефьев А. В., Хохлова М. В., Дагаев А. В., Гулиев Р. Б., Таюрская И. С. Экспериментальное определение элементарного смещения в разработанной оптико-электронной системе контроля голографических объектов // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2022. Вып. 12. С. 200–205. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-12-200-205.
11. Майоров Е. Е., Пушкина В. П., Арефьев А. В., Бородянский Ю. М., Дагаев А. В., Гулиев Р. Б. Исследование медицинских жидкофазных сред с использованием спектрофотометра с диапазоном длин волн 200...780 нм // Медицинская техника. 2023. № 1. С. 53–55.
12. Майоров Е. Е., Костин Г. А., Черняк Т. А. Исследование оптических свойств авиационных технических моющих жидкостей в ультрафиолетовом диапазоне длин волн // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 3. С. 234–240. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-3-234-240.
13. Майоров Е. Е., Костин Г. А., Черняк Т. А. Исследование оптических клиньев для оптических и оптико-электронных приборов и комплексов спектральным методом // Приборы. 2023. № 4(274). С. 41–44.
14. Шаламай Л. И., Оксас Н. С., Лампусова В. Б., Мендоса Е. Ю., Майоров Е. Е. Спектральный анализ новейших стоматологических материалов для эстетики и реставраций на твердых тканях зуба // Dental Forum. 2023. № 2(89). С. 29–33.
15. Майоров Е. Е., Черняк Т. А., Костин Г. А. Применение высокочувствительных фотоматериалов на основе галогенидов серебра для исследования влияния отклонений подложек спеклограмм на результаты измерений // Приборы. 2023. № 5(275). С. 51–54.
16. Майоров Е. Е., Шаламай Л. И., Мендоса Е. Ю., Лампусова В. Б., Оксас Н. С. Применение спектрофотометрии для сравнительного анализа контрольной фиксации композитных вкладок к дентину человека // Медицинская техника. 2023. № 3. С. 10–13.
17. Майоров Е. Е., Афанасьева О. В., Курлов В. В., Таюрская И. С., Соколовская М. В. Применение спектрофотометрического метода для исследования содержания этилового спирта в жидкофазных средах // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 6. С. 501–508. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-6-501-508.
18. Шаламай Л. И., Майоров Е. Е., Мендоса Е. Ю., Лампусова В. Б., Оксас Н. С. Абсорбционный спектральный анализ светоотверждаемых рентгеноконтрастных материалов „Омнихрома“ // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 9. С. 781–788. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-9-781-788.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Евгений Евгеньевич Майоров** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра прикладной математики; доцент; E-mail: majorov_ee@mail.ru
- Виктор Валентинович Курлов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра инноватики и интегрированных систем качества; доцент; E-mail: vitek543@rambler.ru
- Юрий Михайлович Бородянский** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, кафедра безопасности информационных систем; доцент; E-mail: borodyanskyum@gmail.com
- Александр Владимирович Дагаев** — канд. техн. наук; Ивангородский гуманитарно-технический институт (филиал) Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, кафедра математики, информатики и информационных таможенных технологий; E-mail: adagaev@list.ru
- Ирина Соломоновна Таюрская** — канд. экон. наук, доцент; Санкт-Петербургский университет технологий управления и экономики, кафедра информационных технологий и математики; доцент; E-mail: tis_ivesep@mail.ru

Поступила в редакцию 02.11.2023; одобрена после рецензирования 22.11.2023; принята к публикации 16.04.2024.

REFERENCES

1. Born M., Wolf E. *Principles of Optics*, Pergamon Press, 1970.
2. Afanas'yev V. A. *Opticheskiye izmereniya* (Optical Measurements), Moscow, 1968, 263 p. (in Russ.)
3. Vest Ch. M. *Holographic Interferometry*, NY, Wiley, 1979.
4. Malacara D., ed., *Optical Shop Testing*, Wiley-Interscience, A John Wiley & Sons, Inc., 2007.
5. Kostin G. A., Chernyak T. A., Maiorov E. E., Kurlov V. V., Tayurskaya I. S. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2022, no. 8, pp. 80–85, DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-80-85. (in Russ.)
6. Kostin G. A., Chernyak T. A., Maiorov E. E., Kurlov V. V., Tayurskaya I. S. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2022, no. 8, pp. 100–105, DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-100-105. (in Russ.)
7. Kuzmina D. A., Maiorov E. E., Shalamay L. I., Mendoza E. Yu., Narushak N. S. *Journal of Instrument Engineering*, 2021, no. 1(64), pp. 63–70, DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-1-63-70. (in Russ.)
8. Maiorov E. E., Afanasyeva O. V., Sokolovskaya M. V. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2022, no. 8, pp. 128–133, DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-128-133. (in Russ.)
9. Maiorov E. E., Turovskaya M. S., Litvinenko A. N., Chernyak T. A., Dagaev A. V., Ponomarev S. E., Kurlov V. V., Katunin B. D. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2018, no. 7, pp. 38–43. (in Russ.)
10. Maiorov E. E., Arefiev A. V., Khokhlova M. V., Dagaev A. V., Guliyev R. B., Tayurskaya I. S. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2022, no. 12, pp. 200–205. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-12-200-205.
11. Mayorov E. E., Pushkina V. P., Arefiev A. V., Borodyansky Yu. M., Dagaev A. V., Guliev R. B. *Biomedical Engineering*, 2023, no. 1, pp. 53–55. (in Russ.)
12. Maiorov E. E., Kostin G. A., Chernyak T. A. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, no. 3(66), pp. 234–240, DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-3-234-240. (in Russ.)
13. Maiorov E. E., Kostin G. A., Chernyak T. A. *Devices*, 2023, no. 4(274), pp. 41–44. (in Russ.)
14. Shalamay L. I., Oksas N. S., Lampusova V. B., Mendoza E. Yu., Maiorov E. E. *Dental Forum*, 2023, no. 2(89), pp. 29–33. (in Russ.)
15. Maiorov E. E., Chernyak T. A., Kostin G. A. *Devices*, 2023, no. 5(275), pp. 51–54 (in Russ.)
16. Maiorov E. E., Shalamay L. I., Mendoza E. Yu., Lampusova V. B., Oksas N. S. *Biomedical Engineering*, 2023, no. 3, pp. 10–13. (in Russ.)
17. Maiorov E. E., Afanaseva O. V., Kurlov V. V., Tayurskaya I. S., Sokolovskaya M. V. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, no. 6(66), pp. 501–508, DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-6-501-508. (in Russ.)
18. Shalamay L. I., Maiorov E. E., Mendoza E. Yu., Lampusova V. B., Oksas N. S. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, no. 9(66), pp. 781–788, DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-9-781-788. (in Russ.)

DATA ON AUTHOR

- Eugeny E. Maiorov** — PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Applied Mathematics; Associate Professor; E-mail: majorov_ee@mail.ru
- Viktor V. Kruglov** — PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Innovation and Integrated Quality Systems; Associate Professor; E-mail: vitek543@rambler.ru
- Yury M. Borodiansky** — PhD; The Bonch-Bruевич St. Petersburg State University of Telecommunications, Department of Information Systems Security; Associate Professor; E-mail: borodyanskyum@gmail.com
- Alexander V. Dagaev** — PhD; Ivangorod Humanitarian and Technical Institute (branch of St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation), Department of Mathematics, Informatics and Information Customs; E-mail: adagaev@list.ru
- Irina S. Taiurskaya** — PhD, Associate Professor; St. Petersburg University of Management Technologies and Economics, Department of Information Technologies and Mathematics; Associate Professor; E-mail: tis_ivesep@mail.ru

Received 02.11.2023; approved after reviewing 22.11.2023; accepted for publication 16.04.2024