

Научная статья
УДК 537.635, 535, 548.4
doi: 10.17223/29491665/8/3

Магниточувствительность фотолюминесценции N_2V^0 -центров в алмазе при различных температурах

Владимир Вениаминович Чашин¹, Ольга Игоревна Лыга²,
Михаил Александрович Шулепов³

^{1,2,3} *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

^{1,3} *Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

² *lloodia@yandex.ru*

Аннотация. Представлены результаты исследования изменения фотолюминесценции N_2V^0 -центров окраски алмаза в слабом ($\ll 1$ Тл) магнитном поле при возбуждении непрерывным лазером с длиной волны излучения $\lambda = 405$ нм. Приведены температурные зависимости влияния приложенного магнитного поля на фотолюминесценцию центров окраски.

Ключевые слова: алмаз, N_2V^0 -центры окраски, квантовый сенсор, магнитометрия

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Минобрнауки России в рамках Федерального проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности» государственной программы Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» при реализации «Программы Учебного центра коллективного проектирования электронной компонентной базы для систем беспроводной связи» (соглашение от 06.03.2024 г. № 075-02-2024-1524) в Томском государственном университете.

Для цитирования: Чашин В.В., Лыга О.И., Шулепов М.А. Магниточувствительность фотолюминесценции N_2V^0 -центров в алмазе при различных температурах // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2024. № 8. С. 22–27. doi: 10.17223/29491665/8/3

Original article
doi: 10.17223/29491665/8/3

Magnetosensitivity of N_2V^0 -photoluminescence centers in diamond at different temperatures

Vladimir V. Chashchin¹, Olga I. Lyga², Mikhail A. Shulepov³

^{1,2,3} *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

^{1,3} *Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russian Federation*

² *lloodia@yandex.ru*

Abstract. The article presents a study of changes in the photoluminescence N_2V^0 of diamond color centers in a weak ($\ll 1$ T) magnetic field when excited by a continuous laser with a radiation wavelength $\lambda = 405$ nm. The temperature dependences on the effect of the applied magnetic field on the photoluminescence of the color centers are given.

Keywords: diamond, N_2V^0 color centers, quantum sensor, magnetometry

Acknowledgments: The study was carried out with the support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the Federal Project «Personnel Training and scientific foundation for the electronic industry» of the State Program of the Russian Federation «Scientific and Technological Development of the Russian Federation» during the implementation of the Program «Training Center for Collective Design of electronic component Base for wireless communication systems» (Agreement No. 075-02-2024-1524 dated 03/06/2024) at Tomsk State University.

For citation: Chashchin, V.V., Lyga, O.I. & Shulepov, M.A. (2024) Magnetosensitivity of N_2V^0 -photoluminescence centers in diamond at different temperatures. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 8. pp. 22–27. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/8/3

Введение

Алмаз – перспективный материал для использования в квантовых технологиях, вычислительных системах и криптографии.

На основе центров окраски алмаза создаются высокотехнологичные устройства, в том числе лазеры,

кубиты и квантовые сенсоры [1–3]. Основными преимуществами алмаза по сравнению с другими используемыми в настоящее время материалами являются

- высокотемпературные характеристики;
- устойчивость к экстремальным условиям.

Цель работы и современное состояние вопроса

В настоящее время происходит активное развитие квантовых технологий, в том числе разработка новых типов сенсоров и датчиков. Перспективным материалом для этих устройств является алмаз, содержащий различные центры окраски. Центры окраски в алмазе представляют собой встроенные в решетку дефекты структуры, инородные атомы с примесно-дефектными комплексами, включающими вакансии [4]. На данный момент наиболее популярным и изученным центром окраски для использования в квантовых технологиях и создания устройств является центр NV^- [5–7]. На его основе уже созданы прототипы магнитометров. В данной работе предлагается использование менее изученного центра окраски N_2V° (N_3 -центр) в качестве платформы для создания магнитометра [8, 9]. Причины такого выбора – не только положительное влияние магнитного поля на интенсивность фотолюминесценции этого центра окраски, но и потенциальная возможность создания алмазного образца, не содержащего прочих азотсодержащих центров окраски, таких как NV° , NV^- и т.д.

Материалы и методы исследования

Центры окраски в алмазе (NV^- , N_2V° и т.д.) характеризуются электронными переходами в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах, а также тонким расщеплением электронных уровней на спиновые подуровни, что позволяет использовать их при создании квантовых сенсоров. Как было сказано ранее, перспективным для использования N_2V° -центр делает не только его магниточувствительность, но и более удобная структура.

На рис. 1 представлены структуры NV^- и N_2V° -центров окраски алмаза. Для того чтобы NV -центр в алмазе находился в отрицательном зарядовом состоянии (NV^-), необходимо наличие высокой концентрации замещающего азота. N_2V° -центр обладает тем же количеством электронов, локализованных в вакансии, при этом в решетке кристалла не требуется замещающего азота. Это свойство делает N_2V° -центр более перспективным для использования, поскольку появляется возможность создания кристалла, не содержащего прочих центров окраски, создающих «спиновую ванну». В то же время создание кристалла, содержащего только центры NV^- , невозможно, поскольку обязательным условием является наличие атомов замещающего азота в решетке кристалла, что неизбежно приведет к возникновению NV° -центров.

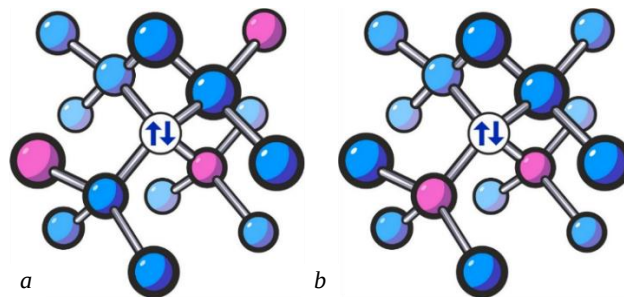


Рис. 1. Структуры NV^- -центров (a) и N_2V° -центров (b). Атомы углерода обозначены синим цветом, атомы азота в замещающей позиции – красным; две стрелки в белом круге указывают на два электрона, локализованных в вакансии

Fig. 1. Structures of a) NV^- and b) N_2V° centers. Carbon atoms are indicated in blue, nitrogen atoms in the replacement position are indicated in red, two arrows in a white circle indicate two electrons localized in the vacancy

Для создания магнитного поля с необходимыми параметрами могут подойти обычные постоянные магниты. Однако в этом случае индукция поля будет составлять ~ 1000 Гс при отсутствии возможности ее регулировки. Оптимальным вариантом для использования являются кольца Гельмгольца. Такое решение позволяет не только создавать поле с конкретным значением индукции в области образца, но и делать поле равномерным во всех направлениях. На рис. 2 представлен расчет одной пары колец Гельмгольца.

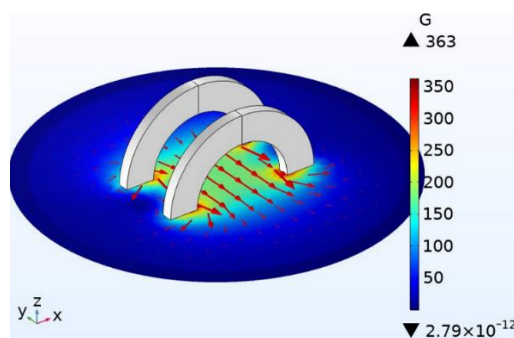


Рис. 2. Расчет пары колец Гельмгольца и распределения магнитного поля

Fig. 2. The calculation of a pair of Helmholtz coils and magnetic field distribution

Результаты

Впервые эффект положительного влияния магнитного поля на интенсивность фотолюминесценции N_2V° -центров окраски был обнаружен при использовании двух неодимовых магнитов с индукцией поля в области образца ~ 1300 Гс. На рис. 3 представлена зависимость интенсивности фотолюминесценции бесфоновой линии N_2V° -центра в алмазном образце, помещенном в поле постоянных магнитов, от температуры.

В последующих экспериментах в качестве источника магнитного поля использовалась рассчитанная ранее пара колец Гельмгольца с возможностью регулировки индукции поля (максимальная индукция ~ 320 Гс при токе на катушках ~ 10 А). Фотолюминесценция возбуждалась лазером с длиной волны 405 нм.

На рис. 4 представлена зависимость разницы интенсивности фотолюминесценции максимума фоновного крыла N_2V° -центра первого образца (условный номер C166) от температуры.

Максимальная разность в интенсивности фотолюминесценции наблюдается в области ~ 170 К. На

рис. 5 представлен спектр фотолюминесценции образца C166 с включенным и выключенным внешним магнитным полем.

Исходя из спектров фотолюминесценции, можно заметить, что образец C166 содержит большое количество центров N_2V° и NV° , в то время как центры NV^- практически не наблюдаются. При приложении магнитного поля наблюдается увеличение интенсивности фотолюминесценции в фоновном крыле центров N_2V° и NV° , при этом изменений интенсивности фотолюминесценции в фоновном крыле центра NV^- не наблюдается.

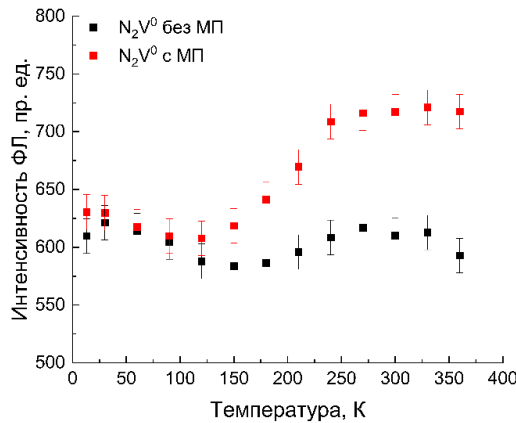


Рис. 3. Зависимость интенсивности фотолюминесценции бесфононной линии N_2V° -центра (черные точки – без магнитного поля, красные – при воздействии магнитного поля) от температуры

Fig. 3. Temperature dependence on the photoluminescence intensity of the zero-phonon line of the N_2V° center (black dots – without a magnetic field, red dots – when exposed to a magnetic field)

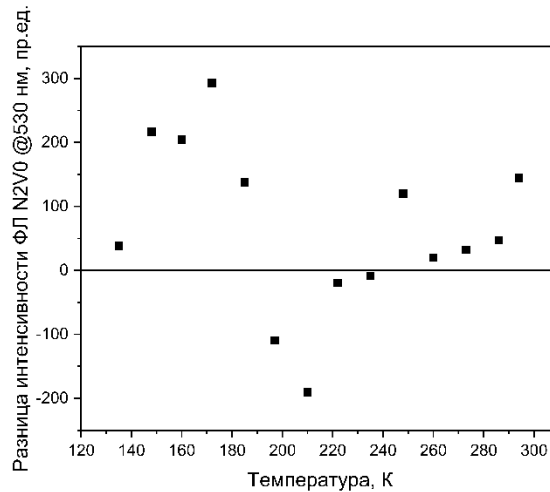


Рис. 4. Зависимость разницы интенсивности фотолюминесценции максимума фоновного крыла N_2V° -центра в образце C166 (разница определялась как $I_{PL(\text{магнит})} - I_{PL(\text{без магнита})}$) от температуры

Fig. 4. Temperature dependence on the difference in photoluminescence intensity of the maximum of the phonon wing N_2V° center in sample C166 (the difference was calculated as $I_{PL(\text{magnet})} - I_{PL(\text{without magnet})}$)

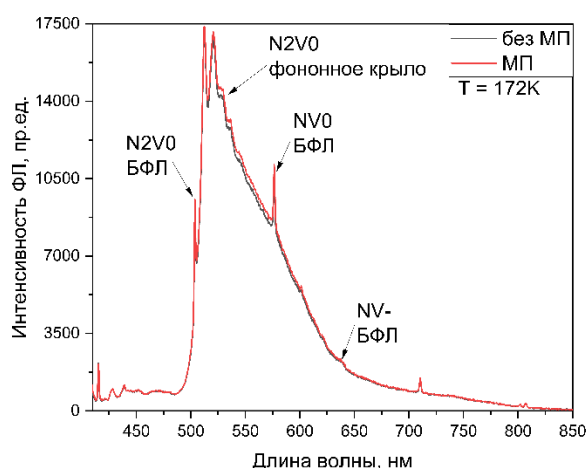


Рис. 5. Спектр фотолюминесценции образца C166 с учетом (красный) и без учета (черный) внешнего магнитного поля при температуре 172 K

Fig. 5. The photoluminescence spectrum of sample C166 with (red) and without (black) external magnetic field at a temperature of 172 K

На рис. 6 представлена температурная зависимость разницы интенсивности фотолюминесценции максимума фононного крыла N_2V° и максимума фононного крыла центра NV^- второго образца (условный номер C167).

Здесь максимальная разность в интенсивности фотолюминесценции максимума фононного крыла N_2V° -центра наблюдается в области ~ 180 K. На рис. 7 представлен спектр фотолюминесценции образца C167 с учетом и без учета внешнего магнитного поля.

Исходя из спектров фотолюминесценции, можно заметить, что образец C167 содержит большое количество как центров N_2V° , так и центров NV^- , в то время как центров NV^0 практически не наблюдается. При приложении магнитного поля в этом образце отмечено увеличение интенсивности фотолюминесценции в фононном крыле центра N_2V° и уменьшение интенсивности фотолюминесценции в фононном крыле центра NV^- .

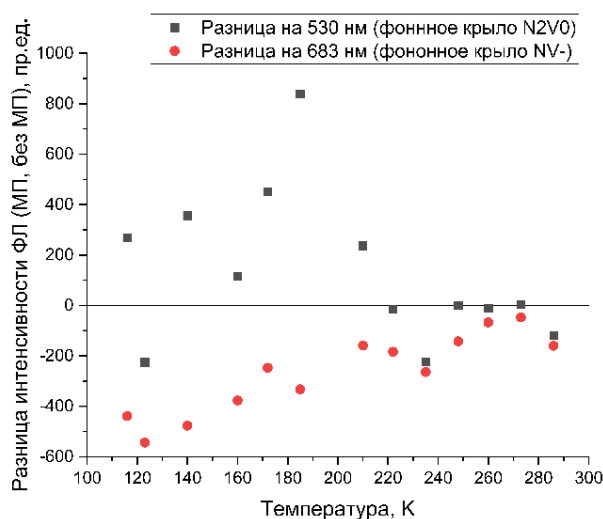


Рис. 6. Зависимость разницы интенсивности фотолюминесценции фононного крыла N_2V° -центра (черный) и фононного крыла центра NV^- (красный) в образце C167 (разница определялась как $I_{PL(\text{магнит})} - I_{PL(\text{без магнита})}$) от температуры

Fig. 6. The temperature dependence on the photoluminescence intensity difference between the phonon wing of the N_2V° center (black) and the phonon wing of the NV^- center (red) in sample C167 (the difference was calculated as $I_{PL(\text{magnet})} - I_{PL(\text{without magnet})}$)

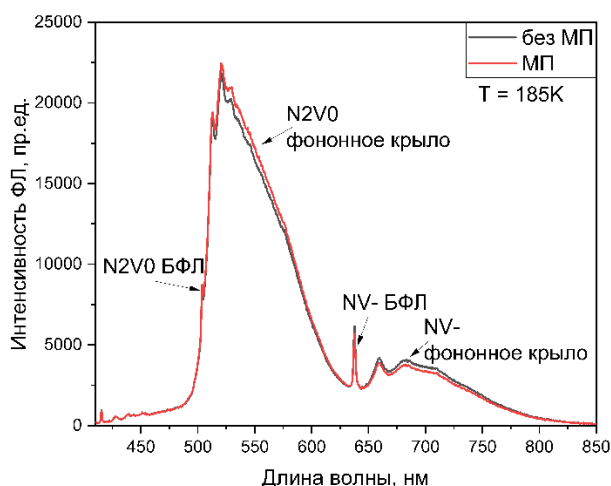


Рис. 7. Спектр фотолюминесценции образца C167 с включенным (красный) и выключенным (черный) внешним магнитным полем при температуре 185 K

Fig. 7. The photoluminescence spectrum of sample C167 with (red) and without (black) external magnetic field at a temperature of 185 K

Закключение

Нами было впервые обнаружено аномальное поведение N_2V° -центра окраски алмаза в присутствии внешнего магнитного поля: интенсивность фотолюминесценции этого центра возрастает в присутствии поля, что позволяет использовать кристаллы с этим центром окраски для создания принципиально нового типа магнитометров. Несмотря на то, что впервые этот эффект был обнаружен при использовании магнитного поля с индукцией в области образца ~ 1300 Гс, результат был воспроизведен и подтвержден и при меньшей индукции поля (~ 320 Гс). На данный мо-

мент пороговое значение индукции поля, при котором эффект не наблюдается, не установлено, но продолжается активная работа в этом направлении.

Помимо эффекта положительного влияния магнитного поля на интенсивность фотолюминесценции, N_2V° -центр окраски представляет интерес для исследователей также ввиду возможности создания кристалла, не содержащего в своем составе прочих центров окраски.

Авторами данного сообщения получено два патента на изобретение по тематике квантовых сенсоров на основе центров NV^{-} и N_2V° окраски алмаза [8, 9].

Список источников

1. Savvin A., Dormidonov A., Smetanina E., Mitrokhin V., Lipatov E., Genin D., Potanin S., Yelisseyev A., Vins V. NV^{-} diamond laser // Nature communications. 2021. Vol. 12. Art. no. 7118. P. 1–8. doi: 10.1038/s41467-021-27470-7
2. Ruf M., Wan N.H., Choi H., Englund D., Hanson R. Quantum networks based on color centers in diamond // Journal of Applied Physics. 2021. Vol. 130, № 7. Art. no. 070901. P. 1–20. doi: 10.1063/5.0056534
3. Chouaieb S., Martínez L.J., Akhtar W., Robert-Philip I., Dréau A., Brinza O., Achard J., Tallaie A., Jacques V. Optimizing synthetic diamond samples for quantum sensing technologies by tuning the growth temperature // Diamond and Related Materials. 2019. Vol. 96. P. 85–89. doi: 10.1016/j.diamond.2019.04.022
4. Thiering G., Gali A. Color centers in diamond for quantum applications // Semiconductors and semimetals. 2020. Vol. 103. P. 1–36. doi: 10.1016/bs.semsem.2020.03.001
5. Liu G.Q., Liu R.B., Li Q. Nanothermometry with enhanced sensitivity and enlarged working range using diamond sensors // Accounts of Chemical Research. 2023. Vol. 56, № 2. P. 95–105. doi: 10.1021/acs.accounts.2c00576
6. Barry J.F., Schloss J.M., Bauch E., Turner M.J., Hart C.A., Pham L.M., Walsworth R.L. Sensitivity optimization for NV-diamond magnetometry // Reviews of Modern Physics. 2020. Vol. 92, № 1. Art. no. 015004. P. 1–68. doi: 10.1103/RevModPhys.92.015004
7. Wu Y., Jelezko F., Plenio M.B., Weil T. Diamond quantum devices in biology // Angewandte Chemie International Edition. 2016. Vol. 55, № 23. P. 6586–6598. doi: 10.1002/anie.201506556
8. Патент № 2816560 Российская Федерация. Квантовый магнитометр на основе N_2V -центров в алмазе / Бураченко А.Г., Винс В.Г., Генин Д.Е. и др. № 2023136053, заявл. 29.12.2023, опубл. 02.04.2024. Бюл. № 10. 10 с.
9. Патент № 2825078 Российская Федерация. Квантовый магнитометр на основе алмазного лазера / Бураченко А.Г., Винс В.Г., Генин Д.Е. и др. № 2023136092, заявл. 29.12.2023, опубл. 19.08.2024. Бюл. № 23. 5 с.

References

1. Savvin, A., Dormidonov, A., Smetanina, E., Mitrokhin, V., Lipatov, E., Genin, D., Potanin, S., Yelissev, A. & Vins, V. (2021) NV⁻ diamond laser. *Nature communications*. 12. Art. no. 7118. pp. 1–8. doi: 10.1038/s41467-021-27470-7
2. Ruf, M., Wan, N.H., Choi, H., Englund, D. & Hanson, R. (2021) Quantum networks based on color centers in diamond. *Journal of Applied Physics*. 130 (7). Art. no. 070901. pp. 1–20. doi: 10.1063/5.0056534
3. Chouaieb, S., Martinez, L.J., Akhtar, W., Robert-Philip, I., Dréau, A., Brinza, O., Achard, J., Tallaire, A. & Jacques, V. (2019) Optimizing synthetic diamond samples for quantum sensing technologies by tuning the growth temperature. *Diamond and Related Materials*. 96. pp. 85–89. doi: 10.1016/j.diamond.2019.04.022
4. Thiering, G. & Gali, A. (2020) Color centers in diamond for quantum applications. *Semiconductors and semimetals*. 103. pp. 1–36. doi: 10.1016/bs.semsem.2020.03.001
5. Liu, G.Q., Liu, R.B. & Li, Q. (2023) Nanothermometry with enhanced sensitivity and enlarged working range using diamond sensors. *Accounts of Chemical Research*. 56 (2). pp. 95–105. doi: 10.1021/acs.accounts.2c00576
6. Barry, J.F., Schloss, J.M., Bauch, E., Turner, M.J., Hart, C.A., Pham, L.M. & Walsworth, R.L. (2020) Sensitivity optimization for NV-diamond magnetometry. *Reviews of Modern Physics*. 92 (1). Art. no. 015004. pp. 1–68. doi: 10.1103/RevModPhys.92.015004
7. Wu, Y., Jelezko, F., Plenio, M.B. & Weil, T. (2016) Diamond quantum devices in biology. *Angewandte Chemie International Edition*. 55 (23). pp. 6586–6598. doi: 10.1002/anie.201506556
8. Burachenko, A.G., Vins, V.G., Genin, D.E. [et al.] (2024) *Kvantovyy magnitometr na osnove N2V-centrov v almaze* [Quantum magnetometer based on N2V centers in diamond] Patent No 2816560 Russian Federation. № 2023136053, appl. 29.12.2023, publication date 02.04.2024, Bul. no. 10.
9. Burachenko, A.G., Vins, V.G., Genin, D.E. [et al.] (2024) *Kvantovyy magnitometr na osnove almaznogo lazera* [A quantum magnetometer based on a diamond laser] Patent No 2825078 Russian Federation. № 2023136092, appl. 29.12.2023, publication date 19.08.2024, Bul. no. 23.

Информация об авторах:

Чащин Владимир Вениаминович – младший научный сотрудник лаборатории квантовых информационных технологий Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия); инженер лаборатории оптических излучений Института сильноточной электроники СО РАН (Томск, Россия). E-mail: lloodia@yandex.ru. ORCID ID: 0009-0002-2558-8130. SPIN-код: 3345-3640

Лыга Ольга Игоревна – лаборант лаборатории квантовых информационных технологий Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия).

Шулепов Михаил Александрович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории квантовых информационных технологий Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия); научный сотрудник лаборатории оптических излучений Института сильноточной электроники СО РАН (Томск, Россия). SPIN-код: 4917-2804

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Chashchin Vladimir V., Junior researcher, laboratory of quantum information technologies, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation); engineer of the laboratory of optical radiation, Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: lloodia@yandex.ru. ORCID ID: 0009-0002-2558-8130. SPIN-code: 3345-3640

Lyga Olga I., Laboratory assistant, laboratory of quantum information technologies, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation).

Shulepov Mikhail A., Cand. Sc. (Physics and Mathematics), senior researcher, laboratory of quantum information technologies, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation); researcher of the laboratory of optical radiation, Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). SPIN-code: 4917-2804

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 22.11.2024; одобрена после рецензирования 23.12.2024; принята к публикации 26.12.2024

The article was submitted 22.11.2024; approved after reviewing 23.12.2024; accepted for publication 26.12.2024