

Приборы и техника физического эксперимента

Научная статья

УДК 53.098

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17106>

ВЛИЯНИЕ НАМАГНИЧИВАНИЯ ЭКРАНА НА ВАРИАЦИИ ЧАСТОТЫ БОРТОВЫХ АТОМНЫХ ЧАСОВ

С. В. Ермак ✉, **В. В. Семенов**, **А. А. Баранов**,

М. А. Рогатин, **М. В. Сергеева**

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Санкт-Петербург, Россия

✉ ermak_sv@spbstu.ru

Аннотация. В работе представлены результаты исследования влияния намагничивания магнитного экрана малогабаритных рубидиевых атомных часов на относительную нестабильность их частоты. Атомные часы размещались во вращающемся магнитном поле, имитирующем магнитную обстановку на орбите навигационного спутника, возникающую как при его орбитальном движении, так и в результате вращения спутника вокруг собственной оси. Показано, что намагничивание магнитного экрана атомных часов увеличивает его коэффициент экранирования, что позволяет существенно снизить влияние вариаций геомагнитного поля на стабильность частоты атомных часов бортового базирования.

Ключевые слова: атомные часы, магнитное поле, магнитный экран, девиация Аллана, навигационный спутник

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 20-19-00146, <https://rscf.ru/project/20-19-00146/>.

Для цитирования: Ермак С. В., Семенов В. В., Баранов А. А., Рогатин М. А., Сергеева М. В. Влияние намагничивания экрана на вариации частоты бортовых атомных часов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2024. Т. 17. № 1. С 56–63. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17106>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17106>

EFFECT OF SHIELD MAGNETIZATION ON VARIATIONS IN THE FREQUENCY OF ONBOARD RUBIDIUM ATOMIC CLOCKS

S. V. Ermak ✉, **V. V. Semenov**, **A. A. Baranov**,

M. A. Rogatin, **M. V. Sergeeva**

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

✉ ermak_sv@spbstu.ru

Abstract. In the paper, the results of a study of the influence of the magnetic shield magnetization on the relative frequency instability of small-sized rubidium atomic clocks have been presented. The atomic clock was placed in a rotating magnetic field, simulating the magnetic situation in the orbit of a navigation satellite, moving in orbit and rotating around its own axis.

The magnetization of the magnetic shield of the atomic clock was shown to increase its shielding factor. This result makes it possible to significantly reduce the influence of geomagnetic field variations on the frequency stability of onboard atomic clocks.

Keywords: atomic clock, magnetic field, magnetic shield, Allan deviation, navigation satellite

Funding: The reported study was funded by Russian Science Foundation (Grant No. 20-19-00146, <https://rscf.ru/en/project/20-19-00146/>).

For citation: Ermak S. V., Semenov V. V., Baranov A. A., Rogatin M. A., Sergeeva M. V., Effect of shield magnetization on variations in the frequency of onboard rubidium atomic clocks, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 17 (1) (2024) 56–63. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17106>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

При движении подвижного носителя в геомагнитном поле, например навигационного спутника на околоземной орбите, вектор геомагнитного поля изменяет свое направление относительно оптической оси бортовых рубидиевых атомных часов (АЧ), что порождает их ориентационную погрешность, обусловленную различием продольного и поперечного факторов экранирования магнитного экрана [1]. Величина этой погрешности определяется квадратичным членом в зависимости, выражающей связь между резонансной частотой атомов рабочего вещества ν и напряженностью рабочего магнитного поля H внутри экрана. Такая связь выражается как [2]:

$$\nu = \nu_0 + \beta H^2, \quad (1)$$

где ν_0 – частота атомного перехода, $\nu_0 = 6,835 \cdot 10^6$ Гц; β – масштабный коэффициент, для атомов рубидия-87 $\beta = 0,0905$ Гц·м²/А².

Из выражения (1) следует, что для обеспечения относительной нестабильности частоты АЧ на уровне 10^{-12} при $H = 8$ А/м и работе в геомагнитном поле на поверхности Земли ($H_E = 40$ А/м) коэффициент экранирования магнитного экрана для АЧ на изотопе рубидия-87 должен превышать значение 10^4 . Однако, как показывает прямой эксперимент, описанный в работе [3], продольный (направленный вдоль оптической оси АЧ) коэффициент экранирования магнитного экрана рубидиевых АЧ на порядки меньше указанного выше значения (это обусловлено наличием швов и отверстий в экранах). Так, например, по данным статьи [1], отношение продольного коэффициента экранирования к поперечному для миниатюрных АЧ объемом менее 3 см³ достигает значения 10^4 . При этом абсолютные значения этих коэффициентов определяются не только размерами и формой магнитного экрана, но и его магнитной проницаемостью. Значение этого параметра, в свою очередь, существенно зависит от внешнего магнитного поля, что предопределяет изменение экранирующих свойств магнитного экрана при его намагничивании.

Задачей настоящей работы являлось экспериментальное исследование влияния намагничивания магнитного экрана внешним магнитным полем на кратковременную относительную нестабильность частоты малогабаритных рубидиевых атомных часов в условиях действия переменного магнитного поля, имитирующего геомагнитную обстановку на орбите навигационных спутников.

Методика эксперимента и результаты исследований

Экспериментальная оценка сдвигов частоты АЧ с оптической накачкой паров рубидия проводилась во вращающемся магнитном поле на установке, подобной экспериментальной установке, блок-схема которой и методика проводимых измерений подробно описаны в работах [3, 4].

Установка содержала магнитную систему из трех пар колец Гельмгольца, в центре которой размещались малогабаритные рубидиевые АЧ (их линейные размеры составляли $75 \times 75 \times 35$ мм), подключенные к схеме регистрации частоты. Внутри магнитного экрана создавалось рабочее магнитное поле напряженностью порядка 8 А/м. В плоскости оптической оси АЧ создавалось вращающееся магнитное поле H_r , амплитуда которого выбиралась в диапазоне значений напряженности геомагнитного поля (единицы А/м) на орбите спутника навигационных систем. Относительные вариации частоты АЧ измерялись с помощью частотного компаратора; в качестве эталона использовался стационарный вариант рубидиевых АЧ в приборном исполнении, относительная нестабильность которого составляла 10^{-13} за 100 с. Помимо относительных вариаций частоты АЧ регистрировалась зависимость девиации Аллана от времени измерения τ .

На предварительном этапе работы была получена экспериментальная оценка продольного коэффициента экранирования магнитного экрана АЧ. Для этого с помощью магнитной системы была выполнена компенсация вертикальной компоненты магнитного поля Земли, составляющая примерно 36 А/м. Оценка продольного коэффициента экранирования АЧ проводилась в присутствии остаточной горизонтальной компоненты магнитного поля Земли путем измерений относительных сдвигов частоты АЧ при значениях внешнего магнитного поля 40 и 56 А/м вдоль оптической оси, а также при последовательной смене его полярности. Запись наблюдаемых относительных сдвигов частоты АЧ (разность $\Delta\nu$ частот между эталоном частоты и исследуемым АЧ) при наличии внешнего магнитного поля H приведена на рис. 1.

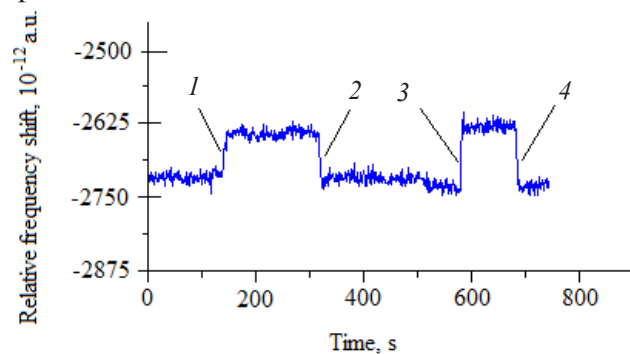


Рис. 1. Относительные сдвиги частоты $\Delta\nu$ атомных часов при наложении внешнего магнитного поля H , А/м: -40 (1), $+40$ (2), -56 (3), $+56$ (4).
Соответствующие сдвиги $\Delta\nu$, 10^{-11} : $+8$ (1), -8 (2), $+10$ (3), -10 (4)

Полученные значения относительного сдвига частоты АЧ (см. рис. 1) позволили оценить средневзвешенный коэффициент продольного экранирования, он составил значение около 600. Выбранный для исследований вариант малогабаритных рубидиевых АЧ, имевший, как показали измерения, невысокий продольный коэффициент экранирования, позволил более наглядно продемонстрировать влияние внешнего намагничивающего магнитного поля H_{ex} на экранирующие свойства магнитного экрана.

Как отмечено выше, влияние напряженности внешнего магнитного поля на экранирующие свойства магнитных экранов обусловлено изменением магнитной проницаемости их материала [5]. Поэтому выбор материала для слоев многослойных магнитных экранов (особенно материала внешнего слоя) АЧ должен учитывать магнитную обстановку, в которой предполагается использование АЧ. Так, напряженность магнитного поля на орбите навигационных спутников (высота составляет около 20 тыс. км) оказывается на порядок меньше напряженности магнитного поля на поверхности Земли [6].

При движении по орбите спутников навигационных систем, изменение ориентации вектора геомагнитного поля относительно оптической оси бортовых АЧ происходит автоматически каждые полпериода вращения спутника на орбите, т. е. в моменты, когда ориентационная погрешность атомных часов проявляется в наибольшей степени. Для различных спутниковых навигационных систем полупериод вращения спутника лежит в интервале значений от 5 до 7 ч, что не исключает инверсию вектора геомагнитного поля по отношению к оптической оси АЧ и в более короткие промежутки времени. Подобная

ситуация возникает в условиях вращения спутника относительно собственной оси, что обуславливает соответствующую ориентационную погрешность бортовых АЧ.

Именно такой вариант вращения был исследован в экспериментах с АЧ в условиях, имитирующих магнитную обстановку на орбите спутника при фиксированной угловой частоте вращения $f_m = 0,01$ Гц. Изменение поля, создаваемого магнитной системой, осуществлялось по синусоидальному закону с амплитудой $H_r = 2,5$ А/м в плоскости оптической оси АЧ. Определение степени влияния вращающегося магнитного поля на частоту АЧ осуществлялось благодаря свойству девиации Аллана, достигающей максимального значения за время измерения τ , равное половине периода вращающегося магнитного поля [1].

В случае отсутствия внешнего вращающегося магнитного поля ($H_r = 0$) девиация Аллана снижалась прямо пропорционально квадратному корню времени измерения (по закону $\tau^{1/2}$), что характерно для рубидиевых АЧ, размещенных стационарно.

На рис. 2 приведены зависимости значений девиации Аллана частоты атомных часов от времени измерения τ в диапазоне 1 – 100 с. Такой временной диапазон был выбран с целью снижения влияния фликкерных процессов на результаты измерений. В данном случае девиация Аллана при времени измерения 50 с составила $1,6 \cdot 10^{-12}$.

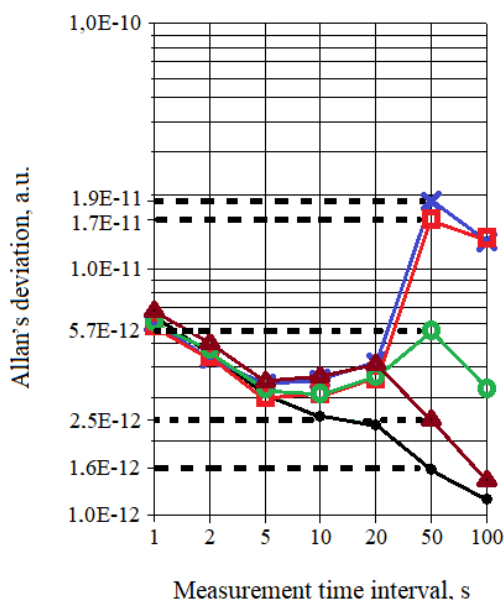


Рис. 2. Экспериментальные зависимости значений девиации Аллана (символы) от времени измерения, при варьировании значений внешнего вращающегося (H_r) и намагничивающего постоянного (H_{ex}) магнитных полей (в А/м):

$H_r = H_{ex} = 0$ (черная кривая); $H_r = 2,5$ (все остальные кривые); $H_{ex} = 0$ (черная и синяя кривые), 4,2 (красная кривая), 8,5 (зеленая), 12,8 (коричневая). См. также таблицу

Введение вращающегося внешнего магнитного поля приводило к значительному изменению характера зависимости девиации Аллана от времени измерения: девиация возрастала до уровня $1,9 \cdot 10^{-11}$ при $\tau = 50$ с. Для обеспечения чистоты эксперимента были предварительно скомпенсированы все три компонента магнитного поля Земли. В первом эксперименте накладывалось вращающееся поле H_r и отсутствовало намагничивающее постоянное магнитное поле H_{ex} , ориентированное вдоль оптической оси АЧ (см. рис. 2, символы-крестики и соединяющие линии синего цвета).

На рис. 2 приведены также результаты последующих экспериментов: зависимости девиации Аллана частоты АЧ от времени измерения при наличии двух магнитных полей: H_r и H_{ex} при значениях последнего 4,2, 8,5 и 12,8 А/м, отмеченные разными символами и линиями разного цвета. При этом значение девиации Аллана для времени усреднения 50 с составило соответственно (10^{-12}): 17,0, 5,7 и 2,5. Некоторый подъем величины девиации Аллана при времени измерения 20 с обусловлен особенностями работы термостата АЧ.

Таблица

Зависимости значения девиации Аллана от интервала времени измерения τ при фиксированной амплитуде вращающегося внешнего магнитного поля и разных значениях постоянного магнитного поля намагничивания H_{ex} (см. рис. 2)

τ , с	Девиация Аллана, 10^{-12} , при значении H_{ex} (в А/м)			
	0,0	4,2	8,5	12,8
1	6,0	5,9	6,1	6,8
2	4,3	4,5	4,8	5,0
5	3,4	3,0	3,3	3,5
10	3,5	3,2	3,2	3,7
20	4,2	3,6	3,7	4,1
50	19,0	17,0	5,7	2,5
100	13,0	14,0	3,3	1,4

Примечание. Амплитуда вращающегося внешнего магнитного поля $H_r = 2,5$ А/м.

В таблице для сравнения результатов приведены полученные значения девиации Аллана для зависимостей, представленных на рис. 2.

Как следует из приведенных экспериментальных данных, использование намагничивания магнитного экрана позволяет существенно повысить коэффициент магнитного экранирования АЧ, причем подавление магнитных вариаций проявляется в большей степени при снижении напряженности переменного магнитного поля H_r , имитирующего магнитную обстановку на орбите навигационного спутника. Согласно данным таблицы, в намагниченном экране малогабаритных рубидиевых АЧ при времени усреднения 50 с и при $H_r = 2,5$ А/м удалось примерно в 8 раз подавить вариации внешнего магнитного поля.

При ориентации поля намагничивания перпендикулярно оптической оси АЧ, порядок значений девиации Аллана и динамика их изменения с ростом времени усреднения аналогичны случаю продольной ориентации намагничивающего поля.

Примечательной особенностью зависимости девиации Аллана от напряженности намагничивающего поля H_{ex} является ее сходство с начальным участком кривой, выражающей зависимость магнитной проницаемости μ ферромагнитного материала (пермаллоя) магнитного экрана от величины H_{ex} [5]. Интересно, что напряженность магнитного поля $H_{ex} = 12,8$ А/м, при которой удается примерно в 8 раз увеличить стабильность АЧ, соответствует области, где магнитная проницаемость μ существенно (на порядки) выше своего начального значения, соответствующего нулевому магнитному полю H_{ex} .

Заключение

Анализ результатов, полученных при экспериментальном исследовании, позволяет сделать следующие выводы:

1. Коэффициент экранирования магнитного экрана существенно зависит от величины внешнего магнитного поля, в котором расположены малогабаритные рубидиевые АЧ. При этом полученное значение коэффициента продольного экранирования возросло примерно в 8 раз для напряженности намагничивающего поля 12,8 А/м и амплитуде внешнего вращающегося магнитного поля 2,5 А/м, соответствующего значению геомагнитного поля на орбите навигационного спутника.

2. Эффект увеличения коэффициента экранирования магнитного экрана практически не зависит от направления приложенного постоянного намагничивающего поля H_{ex} (относительно оптической оси АЧ), что свидетельствует об изотропном характере влияния этого поля на стабильность измеряемой частоты.



3. Превышение порогового значения напряженности внешнего магнитного поля (единицы – десятки А/м), соответствующего максимальному значению магнитной проницаемости материала магнитного экрана, может привести к падению фактора его экранирования, а, следовательно, и к ухудшению стабильности частоты АЧ.

Опыт проведенных экспериментов с промышленными малогабаритными рубидиевыми АЧ может быть востребован при разработке рубидиевых АЧ малых спутников [7], а также широкого класса АЧ, где используется магнитное экранирование от внешнего магнитного поля. К числу подобных устройств относятся малогабаритные водородные лазеры [8], миниатюрные АЧ на эффекте когерентного пленения населенностей [9], а также квантовые стандарты частоты на пучке атомов [10].

Прогнозирование оптимального значения напряженности поля намагничивания в этих устройствах представляет довольно сложную задачу, в связи с необходимостью учета целого ряда факторов (тип АЧ, рабочее магнитное поле, материал, форма и размеры экрана).

Следовательно, подбор напряженности постоянного магнитного поля намагничивания H_{ex} для каждого конкретного случая целесообразно проводить эмпирическим путем, как это было сделано и продемонстрировано в настоящей работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Donley E. A., Hodby E., Hollberg L., Kitching J. Demonstration of high-performance compact magnetic shields for chip-scale atomic devices // Review of Scientific Instruments. 2007. Vol. 78. No. 8. P. 083102.
2. Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и приложения. Пер. с англ. М.: Физматлит, 2009. 512 с.
3. Лозов Р. К., Ермак С. В., Семенов В. В., Ермак О. В. Моделирование влияния геомагнитного поля на точность атомных часов бортовой аппаратуры систем спутниковой навигации // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 12 (20). С. 32–37.
4. Ermak S., Semenov V. The influence of the operation magnetic field modulation on the short-term frequency stability of rubidium atomic clock at magnetic gradient // Proceedings of 2022 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), 20–21 October, 2022. St. Petersburg. Pp. 347–350.
5. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения. М.: Мир, 1987. 420 с.
6. World magnetic model 2020 calculator. Режим доступа: http://www.geomag.bgs.ac.uk/data_service/models_compass/wmm_calc.html (Дата обращения: 16.05.2023).
7. Dinkelaker A. N., Kaparthy A., Reher S. E., Krutzik M. Optical quantum technologies for compact rubidium vapor-cell frequency standards in space using small satellites // Journal of the British Interplanetary Society. 2019. Vol. 72. No. 3. Pp. 74–82.
8. Сысоев В. П., Самохвалов Ю. С., Васильев В. И., Нагирный В. П., Нестеров Н. И., Парехин Д. А., Овчинников С. Н. Малогабаритный активный водородный стандарт частоты // Альманах современной метрологии. 2022. № 4 (32). С. 8–17.
9. Пальчиков В. Г. Сверхминиатюрный квантовый стандарт частоты на КПН-эффекте // Тезисы докладов Десятой всероссийской конференции с международным участием: «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2023), 17–21 апреля 2023 г., Санкт-Петербург. С. 141–142.
10. Xie W., Wang Q., He X., Chen N., Xiong Z., Fang S., Qi X., Chen X. Frequency instability of a miniature optically pumped cesium-beam atomic frequency standard // Review of Scientific Instruments. 2020. Vol. 91. No. 7. P. 074705.

REFERENCES

1. Donley E. A., Hodby E., Hollberg L., Kitching J., Demonstration of high-performance compact magnetic shields for chip-scale atomic devices, Rev. Sci. Instrum. 78 (8) (2007) 083102.
2. Riehle F., Frequency standards: Basics and applications, Wiley-VCH, Weinheim, 2005.

3. **Lozov R. K., Ermak S. V., Semenov V. V., Ermak O. V.**, Modeling the geomagnetic field influence on the atomic clock accuracy of the satellite navigation systems on-board equipment, *Journal Radioengineering*. 83 (12 (20)) (2019) 32–37 (in Russian).
4. **Ermak S., Semenov V.**, The influence of the operation magnetic field modulation on the short-term frequency stability of rubidium atomic clock at magnetic gradient, *Proc. 2022 Int. Conf. on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech)*, 20–21 Oct., St. Petersburg (2022) 347–350.
5. **Chikazumi S.**, *Physics of ferromagnetism*, Oxford University Press, Inc., Int. Series of monographs in Physics, Vol. 94. New York, 1997.
6. World magnetic model 2020 calculator, URL: http://www.geomag.bgs.ac.uk/data_service/models_compass/wmm_calc.html (Access data: 16.05.2023).
7. **Dinkelaker A. N., Kaparthy A., Reher S. E., Krutzik M.**, Optical quantum technologies for compact rubidium vapor-cell frequency standards in space using small satellites, *J. Br. Interplanet. Soc.* 72 (3) (2019) 74–82.
8. **Sysoyev V. P., Samokhvalov Yu. S., Vasiliev V. I., et al.**, Compact active hydrogen frequency standard, *Al'manac of Modern Metrology*. 4 (32) (2022) 8–17 (in Russian).
9. **Palchikov V. G.**, Sverkh-miniaturnyy kvantovyy standart chastoty na KPN effekte [Subminiature quantum frequency standard based on the CPT effect], Abstracts of the Tenth All-Russian Conference with International Participation: “Fundamental and Applied Coordinate-Time and Navigation Support” (CTNS-2023), Apr. 17–21, 2023, St. Petersburg (2023) 141–142 (in Russian).
10. **Xie W., Wang Q., He X., et al.**, Frequency instability of a miniature optically pumped cesium-beam atomic frequency standard, *Rev. Sci. Instrum.* 91 (7) (2020) 074705.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЕРМАК Сергей Викторович – доктор физико-математических наук, профессор Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
ermak_sv@spbstu.ru
ORCID: 0000-0002-6210-4003

СЕМЕНОВ Владимир Васильевич – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
vladimir_semenov@mail.ru
ORCID: 0000-0003-0346-8349

БАРАНОВ Алексей Анатольевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
79111700994@ya.ru
ORCID: 0000-0001-7095-7981

РОГАТИН Максим Александрович – инженер Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
maxim228rog@mail.ru
ORCID: 0009-0009-6180-6538



СЕРГЕЕВА Мария Вячеславовна – инженер Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
mamarvel2001@mail.ru
ORCID: 0009-0005-8838-6845

THE AUTHORS

ERMAK Sergey V.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
ermak_sv@spbstu.ru
ORCID: 0000-0002-6210-4003

SEMENOV Vladimir V.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
vladimir_semenov@mail.ru
ORCID: 0000-0003-0346-8349

BARANOV Alexey A.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
79111700994@ya.ru
ORCID: 0000-0001-7095-7981

ROGATIN Maxim A.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
maxim228rog@mail.ru
ORCID: 0009-0009-6180-6538

SERGEEVA Maria V.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
mamarvel2001@mail.ru
ORCID: 0009-0005-8838-6845

Статья поступила в редакцию 07.12.2023. Одобрена после рецензирования 12.12.2023. Принята 12.12.2023.

Received 07.12.2023. Approved after reviewing 12.12.2023. Accepted 12.12.2023.