

Приборы и техника физического эксперимента

Научная статья

УДК 53.098

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18108>

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ ЧАСТОТЫ БОРТОВЫХ РУБИДИЕВЫХ АТОМНЫХ ЧАСОВ С ПОМОЩЬЮ M_z -МАГНИТОМЕТРА

С. В. Ермак , В. В. Семенов, М. В. Сергеева

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Санкт-Петербург, Россия

 serge_ermak@mail.ru

Аннотация. В статье представлен разработанный авторами метод измерения направления геомагнитного поля с помощью квантового магнитометра M_z -типа, показания которого используются для коррекции частоты бортовых малогабаритных рубидиевых атомных часов. Метод испытан на специально созданной экспериментальной установке, реализующей квантовый магнитометр с оптической накачкой M_z -типа. Установлена высокая чувствительность метода к изменению угла между оптической осью магнитометра и направлением исследуемого геомагнитного поля для малых значений этого угла. Сделан вывод о применимости разработанного метода для различных углов, ограниченных по величине наличием «мертвых зон» квантового магнитометра.

Ключевые слова: магнитное поле, квантовый магнитометр с оптической накачкой, атомные часы, магнитный экран

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

Для цитирования: Ермак С. В., Семенов В. В., Сергеева М. В. Метод измерения направления геомагнитного поля для коррекции частоты бортовых рубидиевых атомных часов с помощью M_z -магнитометра // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2025. Т. 18. № 1. С. 94–102. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18108>

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.18108>

A METHOD FOR MEASURING THE DIRECTION OF THE GEOMAGNETIC FIELD TO CORRECT THE ONBOARD RUBIDIUM ATOMIC CLOCK FREQUENCY USING AN M_z -MAGNETOMETER

S. V. Ermak , V. V. Semenov, M. V. Sergeeva

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

 serge_ermak@mail.ru

Abstract. The article presents a method developed by the authors for measuring the direction of a magnetic field using an M_z -type quantum magnetometer, the readings of which are used to correct the frequency of an onboard small-sized rubidium atomic clock. The method was tested on a specially created experimental setup implementing an M_z -type quantum



magnetometer with optical pumping. High sensitivity of the method to a change in the angle between the optical axis of the magnetometer and the direction of the magnetic field under study for small angles was found. A conclusion was made about the applicability of the developed method for various angles limited in magnitude by the presence of "dead zones" of the quantum magnetometer.

Keywords: magnetic field, optically pumped quantum magnetometer, atomic clock, magnetic shield

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

For citation: Ermak S. V., Semenov V. V., Sergeeva M. V., A method for measuring the direction of the geomagnetic field to correct the onboard rubidium atomic clock frequency using an M_z -magnetometer, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 18 (1) (2025) 94–102. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18108>

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

Введение

В настоящее время интенсивно развиваются спутниковые навигационные системы, ошибки которых во многом зависят от параметров атомных часов, установленных на борту спутника [1, 2]. На частоту их сигнала влияют различные внешние факторы, например геомагнитное поле. При движении спутника меняется как направление, так и величина геомагнитного поля, влияющего на частоту атомных часов. При этом значения параметров геомагнитного поля зависят от спутниковой орбиты. В случае применения рубидиевых атомных часов (РАЧ), на борту малых спутников важными становятся массогабаритные требования, накладывающие ограничения на магнитные экраны, используемые в РАЧ [3 – 6]. Разработано несколько методов снижения воздействия геомагнитного поля на РАЧ:

увеличение коэффициента экранирования магнитного экрана,
использование усредненной частоты двух однотипных РАЧ,
применение бортового магнитометра для коррекции частоты РАЧ,
стабилизация рабочего магнитного поля РАЧ по магнитоинвариантному переходу [7 – 12] и др.

При использовании бортового магнитометра для компенсации частоты РАЧ должна быть обеспечена приемлемая стабильность его параметров. При этом на бортовой магнитометр налагаются требования его работоспособности в геомагнитном поле, близком по направлению к рабочему магнитному полю РАЧ, а также сохранения своих параметров в слабом геомагнитном поле при наличии градиента магнитного поля внутри спутника.

Квантовый M_z -магнитометр с оптической накачкой (КМОН) отвечает таким требованиям и может быть создан с малыми массой и габаритами, а также с малым потреблением энергии [13 – 15]. Наличие у РАЧ экранирования магнитного поля снижает требования к параметрам точности и чувствительности КМОН; однако не снимает требования стабильности его параметров во времени.

Необходимо отметить, что геомагнитное поле проникает внутрь РАЧ в направлении его оптической оси (направление наименьшего коэффициента экранирования) [8].

У КМОНа M_z -типа амплитуда сигнала радио-оптического резонанса зависит от угла θ между направлениями геомагнитного поля и оптической оси КМОН: она пропорциональна функции $\cos^4\theta$ [13]. Кроме того, такой КМОН имеет «мертвые зоны», для которых характерно либо полное отсутствие сигнала резонанса при углах θ , равных примерно 90 или 270°, либо очень малая амплитуда сигнала при указанных условиях.

Однако эти особенности КМОНа данного типа оказываются не столь существенными для рассматриваемого случая его применения, что обусловлено, как отмечено выше, наличием магнитного экрана у РАЧ, имеющего значительный поперечный коэффициент

экранирования. В такой ситуации геомагнитное поле заметно проникает внутрь магнитного экрана РАЧ только под малыми углами к его оптической оси [6].

Еще одной характеристикой данного КМОНа, важной для рассматриваемого случая его применения, является полоса регистрации резонансного сигнала, составляющая около 1 Гц, что обеспечивает корректную регистрацию геомагнитного поля, изменяющегося по направлению и величине на спутниковой орбите.

В задачу работы входила разработка метода определения направления геомагнитного поля с помощью квантового M_Z -магнитометра с целью коррекции частоты бортовых рубидиевых атомных часов.

Лабораторная установка

Для экспериментальной проверки метода определения направления геомагнитного поля с использованием квантового M_Z -магнитометра была создана специальная лабораторная установка (рис. 1). Магнитная система этой установки располагалась на вращающейся платформе, которая обеспечивала поворот оптической оси магнитометра на заданный угол в плоскости $X'OZ'$ лабораторной системы координат (относительно Z' -компоненты геомагнитного поля). Погрешность установки угла поворота магнитной системы составила $\pm 0,25^\circ$ при максимальном угле поворота $\pm 10^\circ$. Внутри магнитной системы был размещен КМОН.

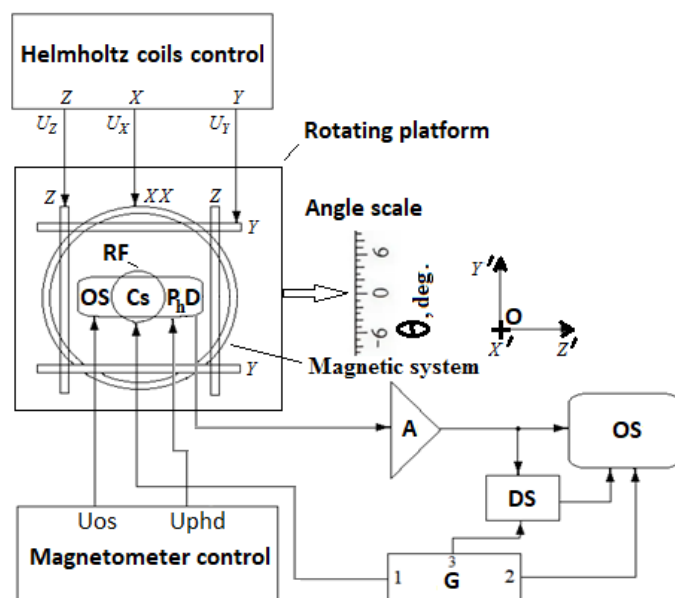


Рис. 1. Блок-схема созданной лабораторной установки:

OS – источник оптической накачки с источником питания U_{os} ; PhD – фотодиод с источником питания U_{phd} ; Cs – газовая ячейка с антирелаксационным покрытием стенок (содержит атомы цезия-133);

RF – катушки радиочастотного поля; A – широкополосный усилитель; DS – синхронный детектор; OS – цифровой осциллограф; G – генератор низкой частоты;

оси X' , Y' , Z' лабораторной (неподвижной) системы координат совпадают с осями системы координат магнитной системы XYZ при угле $\theta = 0$

Для удобства измерений магнитной системы вертикальная компонента геомагнитного поля компенсировалась с помощью пары колец Гельмгольца (на рис. 1 кольца ориентированы вдоль оси Y)

Разработанный метод измерения направления магнитного поля

Чтобы определять направление геомагнитного поля с помощью КМОНа M_Z -типа, в этом исследовании был разработан метод измерения, подобный описанному в книге [13]. Суть его состоит в следующем.

Создаются переменные магнитные поля вдоль осей X , Y и Z с помощью системы колец Гельмгольца. Систему вместе с КМОН можно поворачивать на заданный угол относительно осей $X'Y'Z'$ лабораторной (неподвижной) координатной системы. Пример определения направления геомагнитного поля в плоскости $X'OZ'$ показан на рис. 2. Магнитное поле модулируется по направлению оси X (поле H_{mod}). При направлении Z' -компоненты геомагнитного поля вдоль оптической оси КМОНа (рис. 2,а), регистрируются равные по амплитуде компоненты сигнала на выходе синхронного детектора (точки A и C на рис. 2,д). При наличии ненулевого угла θ между проекцией вектора геомагнитного поля H_z и оптической осью КМОНа (рис. 2,б и в), амплитуды сигнала на выходе синхронного детектора в точках A и C становятся разными (рис. 2,е и ф). Их разница становится зависящей от угла между направлениями измеряемого магнитного поля и оптической оси КМОНа.

Представленный в работе метод определения направления геомагнитного поля был реализован с помощью лабораторной установки, представленной на рис. 1. КМОН вместе с магнитной системой поворачивался на заданный угол по отношению к Z' -компоненте геомагнитного поля и при этом одновременно регистрировался сигнал на выходе синхронного детектора. Частота сигнала модуляции в X -катушках была выбрана с учетом полосы регистрации синхронного детектора (диапазон – примерно 1 Гц) и составляла 240 мГц. Амплитуда сигнала модуляции выбиралась эмпирически, учитывалось наличие двух компонент сигнала синхронного детектора (точки A и C на рис. 2). Измерения проводились в диапазоне углов поворота магнитной системы θ от 0 до 6° . Такой узкий диапазон углов обусловлен конкретным применением измерителя направления геомагнитного поля на основе КМОНа M_z -типа, предназначенного для коррекции частоты бортовых РАЧ, расположенных в изменяющемся по направлению геомагнитном поле [11]. Как

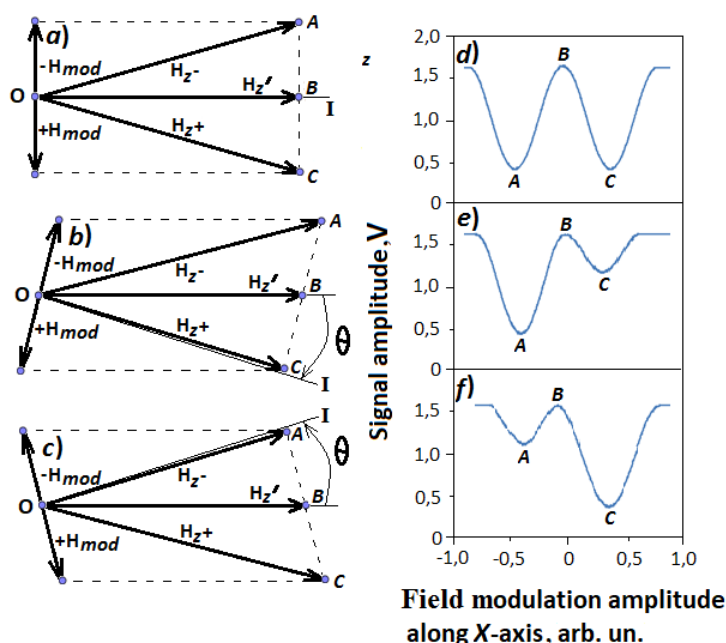


Рис. 2. Создаваемые магнитные поля (а – в) и формы соответствующих сигналов синхронного детектора (д – ф); представлены случаи поворота оптической оси I КМОНа относительно Z' -компоненты геомагнитного поля (GF) H_z по (b,e) и против (c,f) часовой стрелки, а также отсутствие этого поворота (a,d);

$\pm H_{mod}$ – векторы переменного магнитного поля, направленные по оси X ; H_{z+} и H_{z-} – суммарные векторы GF H_z и переменного поля вдоль оси X ; A, B, C – точки на сигнале DS;

θ – угол поворота магнитной системы

следует из данных статьи [8], значение поперечного коэффициента экранирования магнитного экрана таких РАЧ значительно выше продольного, который направлен вдоль оптической оси РАЧ, как и оптическая ось КМОНа M_z -типа.

Как следствие этого, на частоту таких РАЧ существенное влияние оказывает именно продольная компонента геомагнитного поля, соответствующая малым углам θ . Также рассматриваемое применение КМОНа M_z -типа исключает влияние его «мертвых зон» на результаты измерений (угол $\theta = \pm 90^\circ$).

На рис. 3 представлена экспериментальная зависимость разности амплитуд компонент сигнала синхронного детектора (точки A и C на рис. 2) от угла поворота магнитной системы в плоскости $X'OZ'$ относительно оси Z' лабораторной системы координат (см. рис. 1). Последовательность экспериментально полученных значений разности амплитуд, которые на рис. 3 представлены зелеными точками, аппроксимирована прямой линией (пунктир). Погрешность измерений (показана верти-

кальными отрезками), обусловлена в данном случае неточностью установки угла поворота магнитной системы (составляет $\pm 0,25^\circ$); она существенно превышает разницу между экспериментальными значениями и линейной аппроксимацией рассматриваемой зависимости. Это говорит о более высокой точности установки угла поворота магнитной системы (лучше, чем $\pm 0,25^\circ$) и потенциально высокой точности рассматриваемого метода.

Измеренная крутизна линейной аппроксимации была равна 0,0029 град/мВ. При среднеквадратичном значении шума на выходе синхронного детектора, равном 0,25 мВ, и полосе регистрации резонансного сигнала около 1 Гц, значение чувствительности разработанного метода к изменению угла поворота магнитной системы относительно лабораторной системы координат составило $7,3 \cdot 10^{-4}$ град.

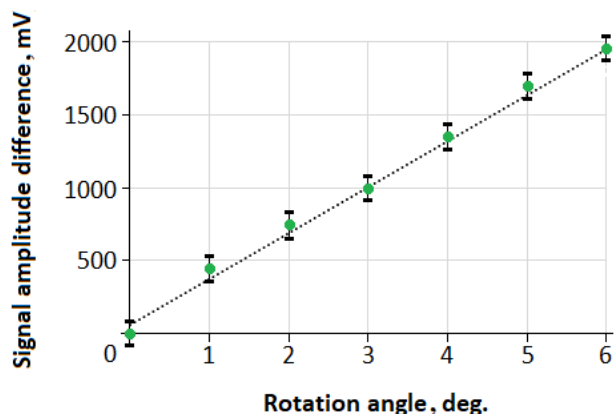


Рис. 3. Экспериментальная (символы) и аппроксимирующая (пунктир) зависимости разности амплитуд компонент сигнала синхронного детектора (точки *A* и *C* на рис. 2) от угла поворота магнитной системы в плоскости $X'OZ'$ относительно оси Z' лабораторной системы координат

ного 6° , снижение амплитуды резонансного сигнала составляло примерно 2,2 %. Полученную измерительную погрешность, обусловленную ориентационной зависимостью резонансного сигнала, можно исключить при определении угла поворота геомагнитного поля, используя режим автоподстройки под частоту резонанса частоты низкочастотного генератора КМОНа вместо сигнала на выходе синхронного детектора. В этом случае точность определения ориентации геомагнитного поля будет определяться соотношением амплитуд резонансного сигнала и шума.

В данной работе был опробован разработанный метод определения направления геомагнитного поля в плоскости $Z'OX'$ для случая использования модулирующего магнитного поля вдоль оси X . Для проведения измерений ориентации геомагнитного поля в плоскости $Z'OY'$ требуется создание модулирующего поля вдоль оси Y .

При измерении нужного направления с помощью рассматриваемого метода возникла проблема определения знака проекции вектора геомагнитного поля на ось Z . Это было связано с особенностью КМОНа измерять модуль вектора магнитного поля. Чтобы решить проблему, мы использовали модулирующее магнитное поле вдоль этой оси (см. рис. 1). Частота модулирующего поля составляла 240 мГц, а амплитуду выбрали такую, чтобы видимость сигнала синхронного детектора была достаточной на фоне шума. После регистрации указанного сигнала при частоте модуляции магнитного поля Z -катушками магнитной системы, направление исследуемого магнитного поля изменяли на противоположное. При этом регистрировали фазу сигнала на выходе синхронного детектора. Ее изменение составило 180° . Сигнал синхронного детектора, зарегистрированный при смене направления магнитного поля приведен на рис. 4.

Одновременно с измерением направления геомагнитного поля для коррекции частоты бортовых РАЧ требуется измерять его величину. При использовании для этих целей

Необходимо отметить, что на точность разработанного метода определения направления геомагнитного поля (точность метода оказалась значительно ниже его чувствительности), влияет ориентационная погрешность КМОНа, незначительная по величине при малых углах поворота геомагнитного поля. Эта ориентационная погрешность обусловлена многокомпонентностью резонансной линии и световыми сдвигами, влияющими на частоту резонанса [13].

На точность определения направления геомагнитного поля разработанным методом также влияет упомянутая ранее ориентационная зависимость сигнала радио-оптического резонанса. Если учесть пропорциональность амплитуды резонансного сигнала значению $\cos^4\theta$, то можно получить оценку погрешности определения угла. Для максимального значения измеренного нами угла, рав-

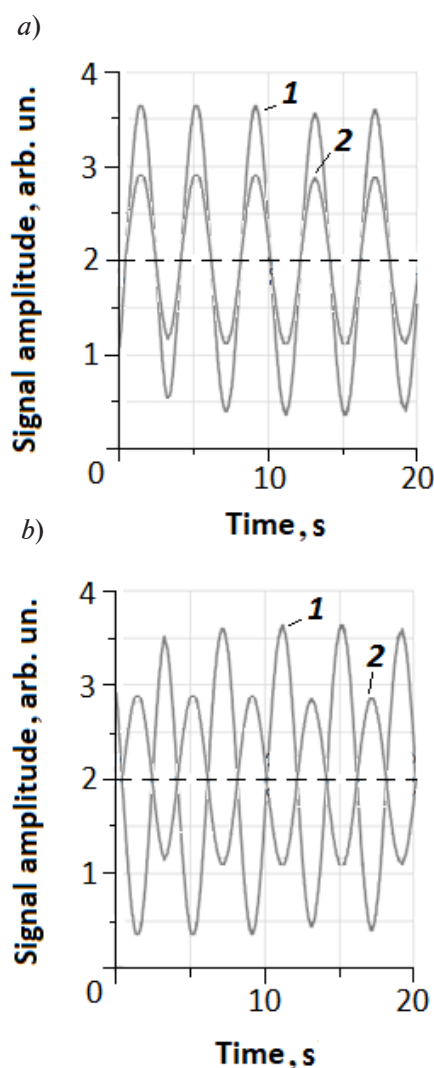


Рис. 4. Осциллограммы наблюдаемых сигналов при нулевом (а) и 180-градусном (б) значениях сдвига фаз между ними в опыте смены направления магнитного поля на противоположное.

Наблюдали переменный сигнал синхронного детектора (1) и сигнал, модулирующий магнитное поле вдоль оси Z (2)

но устранить, если ввести автоподстройку частоты низкочастотного генератора КМОНа под частоту радио-оптического резонанса.

3. Предложенный в работе метод измерения направления магнитного поля можно применять в задачах, где требуется измерение углов в диапазоне, ограниченном только «мертвыми зонами» КМОНа.

КМОНа M_z -типа может оказаться необходимым осуществлять настройку частоты низкочастотного генератора КМОН на частоту радио-оптического резонанса в моменты времени, соответствующие точке В на сигнале синхронного детектора (см. рис. 2).

Заключение

В результате проведенного исследования разработан метод измерения направления магнитного поля с помощью квантового M_z -магнитометра с оптической накачкой (КМОН). Показания этого магнитометра используются для коррекции частоты бортовых малогабаритных рубидиевых атомных часов (РАЧ).

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. Квантовый M_z -магнитометр может быть использован для коррекции частоты указанных малогабаритных часов, подвергающихся воздействию изменяющегося по направлению и величине геомагнитного поля.

2. Экспериментальное тестирование предложенного в работе метода измерения направления магнитного поля показало высокую чувствительность величины разности амплитуд компонент сигнала синхронного детектора (см. рис. 2, точки А и С) к изменению угла между оптической осью КМОНа и исследуемым магнитным полем, составившую $7,3 \cdot 10^{-4}$ град в диапазоне углов $0-6^\circ$. При этом установлено, что полученная в эксперименте точность измерения углов ограничивается точностью установки угла поворота КМОНа относительно неподвижной лабораторной системы координат. Ее значение оказалось лучше $\pm 0,25^\circ$. Влияние ориентационной зависимости амплитуды сигнала резонанса на точность метода мож-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куршин А. В. Повышение точности определения местоположения потребителей ГЛОНАСС путем увеличения частоты закладок временной информации на спутники // Труды МАИ. 2012. № 57. Статья № 10.
2. Бандура А. С. Оценка точности данных навигационных сообщений космических аппаратов спутниковых радионавигационных систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2006. Т. 6. № 6. С. 215–221.

3. **Formichella V.** Space rubidium clocks and light-shift effect // Proceedings of the 32nd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS), 19–26 August, 2017. Montreal, Canada. P. 8105341.
4. **Camparo J. S., Hagerman J. O., McClelland T.** Long-term behavior of rubidium clocks in space // Proceedings of the European Frequency and Time Forum (EFTF), 23–27 April, 2012. Gothenburg, Sweden, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Curran Associates, Inc. July 2013. Pp. 501–508.
5. **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.
6. **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. № 12-2. С. 32–37.
7. **Риле Ф.** Стандарты частоты. Принципы и приложения. Пер. с англ. М.: Физматлит, 2009. 512 с.
8. **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.
9. **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.
10. **Ermak S. V., Semenov S. V.** Orientation error compensation of two rubidium atomic clocks system placed into varying in direction magnetic field // Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). 14–15 October, 2021. St. Petersburg. Pp. 269–272.
11. **Rogatin M., Sergeeva M., Ermak S., Semenov V., Ermak O.** Modeling the correction of small-sized rubidium atomic clock by a quantum magnetometer under conditions of geomagnetic field variations // Proceedings of the 2023 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). IEEE, 19–20 October, 2023. St. Petersburg. Pp. 377–380.
12. **Петров А. А., Кильговатов В. П., Григорьев В. И., Залетов Д. В., Шабанов В. Е., Шаповалов Д. В.** Некоторые направления модернизации квантовых стандартов частоты на атомах цезия-133 // Сборник тезисов IX Международного симпозиума «Метрология времени и пространства». 12–14 сентября, 2018. Менделеево Московской области, Россия, ВНИИФТРИ. 2018. С. 39–42.
13. **Померанцев Н. М., Рыжков В. М., Скроцкий Г. В.** Физические основы квантовой магнитометрии. М.: Наука, 1972. 448 с.
14. **Александров Е. Б., Вершовский А. К.** Современные радиооптические методы квантовой магнитометрии // Успехи физических наук. 2009. Т. 179. № 6. С. 605–637.
15. **Mhaskar R., Knappe S., Kitching J.** A low power, high-sensitivity micromachined optical magnetometer // Applied Physics Letters. 2012. Vol. 101. No. 24. P. 241105.

REFERENCES

1. **Kurshin A. V.**, Improving the accuracy of GLONASS positioning consumers by increasing the refresh rate of satellite clock information, Trudy MAI. (57) (2012) 10 (in Russian).
2. **Bandura A. S.**, Evaluation of the accuracy of the data of navigation messages of spacecraft of satellite radio navigation systems, Sci. Tech. J. Inf. Technol. Mech. Opt. 6 (6) (2006) 215–221.
3. **Formichella V.**, Space rubidium clocks and light-shift effect, Proc. 32nd General Assembly and Sci. Simp. Int. Union Radio Sci. (URSI GASS), 19–26 Aug., 2017. Montreal, Canada (2017) 8105341.
4. **Camparo J. S., Hagerman J. O., McClelland T.**, Long-term behavior of rubidium clocks in space, Proc. Eur. Frequency & Time Forum (EFTF), 23–27 Apr, 2012. Gothenburg, Sweden, IEEE. Curran Associates, Inc. Jul. (2013) 501–508.
5. **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.



6. **Lozov R. K., Yermak S. V., Semenov V. V., Yermak O. V.**, Modeling the geomagnetic field influence on the atomic clock accuracy of the satellite navigation systems on-board equipment, *J. Radioeng.* 83 (12-2) (2019) 32–37 (in Russian).
7. **Riehle F.**, Frequency standards: Basics and applications, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., Weinheim, Germany, 2004.
8. **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.
9. **Yermak S. V., Semenov V. V., Baranov A. A., et al.**, 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 (in Russian).
10. **Ermak S. V., Semenov S. V.**, Orientation error compensation of two rubidium atomic clocks system placed into varying in direction magnetic field, *Proc. 2021 IEEE Int. Conf. on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech)*, 14–15 Oct., 2021. St. Petersburg (2021) 269–272.
11. **Rogatin M., Sergeeva M., Ermak S., et al.**, Modeling the correction of small-sized rubidium atomic clock by a quantum magnetometer under conditions of geomagnetic field variations, *Proc. 2023 IEEE Int. Conf. on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech)*, 19–20 Oct., 2023. St. Petersburg (2023) 377–380.
12. **Petrov A. A., Kilgovatov V. P., Grigoriev V. I., et al.**, Some directions of improving metrological characteristics of the quantum frequency standard on the atoms of cesium-133, In book: Scientific abstracts of the 9-th Int. Simp. “Metrology of Time & Space”, Sept. 12–14, 2018. Mendeleevo Village of Moscow Reg., Russia, VNIIFTRI (2018) 39–42 (in Russian).
13. **Pomerantsev N. M., Ryzhkov V. M., Skrotskiy G. V.**, *Fizicheskiye osnovy kvantovoy magnitometrii* [Physical fundamentals of quantum magnetometry], Nauka, Moscow, 1972 (in Russian).
14. **Aleksandrov E. B., Vershovskii A. K.**, Modern radio-optical methods in quantum magnetometry, *Phys. Usp.* 52 (6) (2009) 573–601.
15. **Mhaskar R., Knappe S., Kitching J.**, A low power, high-sensitivity micromachined optical magnetometer, *Appl. Phys. Lett.* 101 (24) (2012) 241105.

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
serge_ermak@mail.ru
ORCID: 0000-0002-6210-4003

СЕМЕНОВ Владимир Васильевич — 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
vladimir_semenov@mail.ru
ORCID: 0000-0003-0346-8349

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
mamavel2001@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
serge_ermak@mail.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

SERGEEVA Maria V.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
mamavel2001@mail.ru
ORCID: 0009-0005-8838-6845

*Статья поступила в редакцию 31.10.2024. Одобрена после рецензирования 25.11.2024.
Принята 25.11.2024.
Received 31.10.2024. Approved after reviewing 25.11.2024. Accepted 25.11.2024.*