



Научная статья

УДК 681.7

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=189156>

EDN: <https://www.elibrary.ru/LCNSID>

НАЗЕМНЫЙ ТЕРМИНАЛ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ЛАЗЕРНОЙ СВЯЗИ

Р.К. Лозов , М.В. Масловец, В.В. Мурашкин, Д.К. Макаров , Т.К. Говоров

Акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Системы
прецизионного приборостроения», г. Москва, Россия

 Dosiaich@yandex.ru

Цитирование: Лозов Р.К., Масловец М.В., Мурашкин В.В., Макаров Д.К., Говоров Т.К. Наземный терминал высокоскоростной космической лазерной связи // Труды МАИ: электрон. журнал. № 149. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=189156>

Аннотация. В статье рассматривается актуальная проблема высокоскоростной передачи данных между космическими аппаратами и наземными пунктами связи. Существующие радиочастотные системы сталкиваются с ограничениями по скорости передачи данных (1–2 Гбит/с) и высоким энергопотреблением, что делает перспективным развитие систем космической лазерной связи.

Однако особую сложность представляет стабилизация восходящих линий связи из-за атмосферных неоднородностей, вызывающих эффект «блуждания» пучка и его уширения. Для компенсации данных явлений авторы предлагают уникальное техническое решение, основанное на использовании когерентного многолучевого передатчика с оптимальным радиусом световых пучков и системой выравнивания фазы информационного канала. Данные технические решения легли в основу разработанного наземного терминала, который способен осуществлять полнодуплексный обмен данными на дистанциях от 400 до 2000 километров.

Экспериментальные исследования наземного терминала подтвердили эффективность предложенного технического решения.

Разработанная концепция наземного терминала на базе когерентного многолучевого передатчика открывает новые перспективы для организации

высокоскоростной космической связи и может стать основой для создания более совершенных систем передачи данных со скоростью от 10 Гбит/с и выше.

Ключевые слова: высокоскоростная космическая лазерная связь, наземный терминал; восходящая линии связи; нисходящая линии связи; атмосферная турбулентность.

GROUND TERMINAL FOR HIGH-SPEED SPACE LASER COMMUNICATION

R.K. Lozov , M.V. Maslovets, V.V. Murashkin, D.K. Makarov , T.K. Govorov

Joint-Stock Company "Scientific and Production Corporation "Systems of Precision Instrument Engineering", Moscow, Russia

 Dosiaich@yandex.ru

Citation: Lozov R.K., Maslovets M.V., Murashkin V.V., Makarov D.K., Govorov T.K. Ground terminal for high-speed space laser communication// Trudy MAI. 2026. No. 149. (In Russ.).

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=189156>

Abstract. The article addresses the current problem of high-speed data transmission between spacecraft and ground stations. Existing radio-frequency systems face limitations in data transmission rate (1–2 Gbit/s) and high power consumption, which makes the development of space laser communication systems a promising direction.

A particular challenge, however, is the stabilization of uplink communication channels due to atmospheric inhomogeneities causing beam wandering and beam broadening effects. To compensate for these phenomena, the authors propose a unique technical solution based on a coherent multi-beam transmitter with an optimal optical beam radius and a phase equalization system for the information channel. These technical solutions formed the basis for the developed ground terminal capable of full-duplex data exchange over distances ranging from 400 to 2000 kilometers.

Experimental studies of the ground terminal confirmed the effectiveness of the proposed technical solution.

The developed concept of a ground terminal based on a coherent multi-beam transmitter opens up new prospects for organizing high-speed space communication and can serve as a basis for creating more advanced data transmission systems with rates of 10 Gbit/s and higher.

Keywords: high-speed space laser communication; ground terminal; uplink; downlink; atmospheric turbulence.

Введение

В современных условиях развития космической отрасли особую актуальность приобретает проблема передачи больших объёмов информации между космическими аппаратами (КА) и наземными пунктами как по нисходящим, так и по восходящим линиям связи. Это обусловлено развитием спутников дистанционного зондирования Земли, а также необходимостью организации информационного обмена с труднодоступными локациями. Однако существующие радиочастотные решения сталкиваются с серьёзными ограничениями: текущие показатели скорости передачи в 1-2 Гбит/с достигаются исключительно благодаря применению сложных схем модуляции и кодирования. Более того, увеличение пропускной способности до 10 Гбит/с представляется практически недостижимым при использовании радиочастотных технологий, поскольку требует внедрения принципиально новых, крайне сложных алгоритмов обработки сигнала. Помимо этого, радиочастотные системы характеризуются высоким энергопотреблением (сотни киловатт) и массогабаритными характеристиками, не соответствующими требованиям большинства действующих и перспективных КА.

В связи с этим актуальным направлением становится разработка систем высокоскоростной космической лазерной связи (ВКЛС), в которые входят как наземные терминалы (НТ), так и бортовые терминалы (БТ), предназначенные для размещения на борту КА. При этом системы ВКЛС обладают рядом существенных преимуществ перед радиочастотными аналогами, что делает их перспективным решением для современных задач космической связи:

- высокая скорость передачи данных (более 100 Гбит/с);
- меньшие массогабаритные характеристики;
- пониженное энергопотребление;
- электромагнитная совместимость с другими приборами.

Однако анализ мировой и отечественной литературы показал, что в системах ВКЛС имеется нерешенная на данный момент проблема по стабилизации восходящих высокоскоростных линий связи (в которых скорость передачи от 2 Гбит/с): в нижних слоях атмосферы имеются турбулентные неоднородности, которые располагаясь перед передающей апертурой НТ ВКЛС, приводят к уширению

светового пучка и его отклонению («блужданию») от заданной оси, а следовательно к исчезновению информационного сигнала в плоскости приемной апертуры БТ ВКЛС.

Для компенсации данных негативных атмосферных влияний и стабилизации восходящего канала связи в литературе предложен метод использования нескольких некогерентных передатчиков, проведены соответствующие расчетные и экспериментальные исследования [1-6]. Однако данный метод невозможно применить при скорости передачи выше 500 Мбит/с. По этой причине авторами данной работы предложена совокупность технических решений, которая ранее не была представлена ни в мировых разработках, ни в отечественных:

- использование от 6 передающих когерентных пучков от одного задающего генератора;
- выравнивание фазы информационного канала у каждого из 6 пучков;
- проектирования оптической системы с размером светового пучка меньше, чем размер неоднородности при сильной турбулентности (от 1 до 3 см).

Данную совокупность технических решений авторы реализовали в разработанном и изготовленном НТ ВКЛС, предназначенном для обмена информацией в полнодуплексном режиме как по восходящей, так и нисходящей линиям связи со скоростью от 2 Гбит/с.

Таким образом, целью данной работы является описание облика НТ ВКЛС, осуществляющего высокоскоростной обмен информацией с КА.

В работе описаны назначение и облик НТ ВКЛС и его составных частей, а также принятые конструктивные и технические решения. Приведены результаты экспериментальных исследований на испытательном стенде.

Облик наземного терминала ВКЛС

В процессе сеанса связи НТ ВКЛС должен осуществлять обнаружение, захват и сопровождение БТ ВКЛС, а также прием и передачу лазерных излучений информационного канала (ИНК) и маяка. Для этого терминал был спроектирован из двух частей: блока оптико-механического (БОМ), расположенного на опорно-поворотном устройстве (ОПУ), и блока управления терминала (БУТ).

Конструктивные облики БОМ, размещенного на ОПУ, и БУТ представлены на рисунках 1 и 2 соответственно.

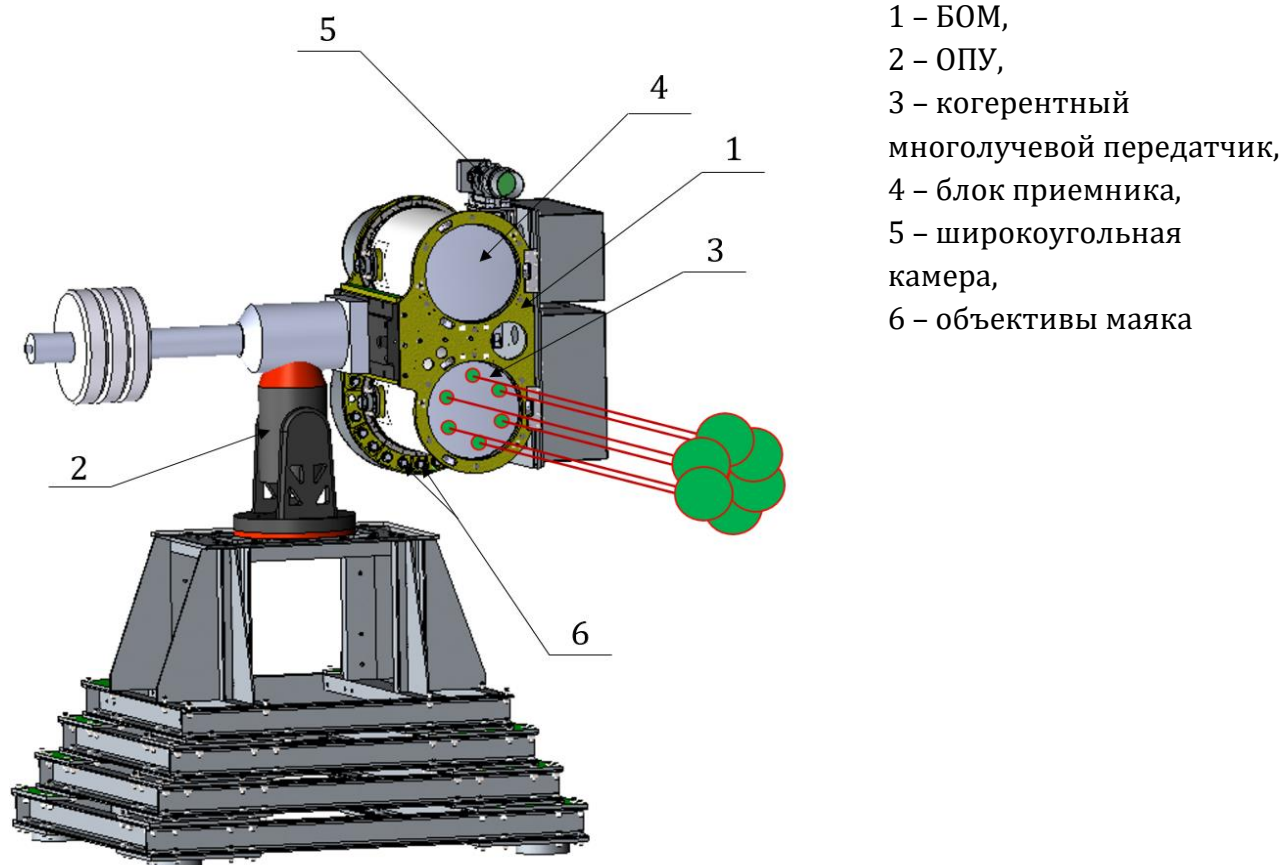


Рисунок 1 – Конструктивный облик БОМ, размещенного на ОПУ

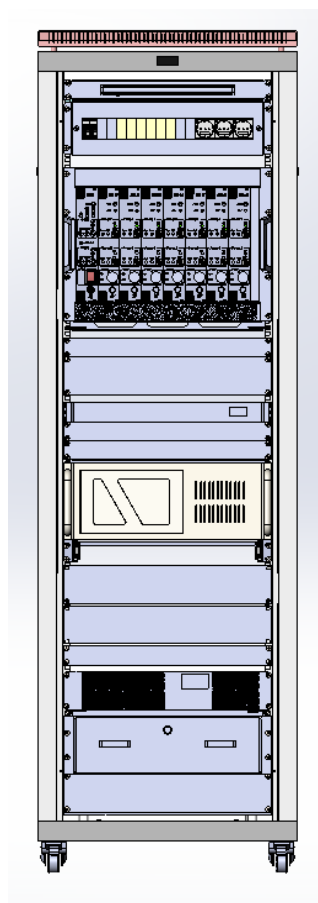


Рисунок 2 – Конструктивный облик БУТ

В состав БОМ (1) входят все оптические элементы, усилители и приемники оптических излучений ИНК и маяка. Конструкция БОМ имеет ряд решений для реализации высокоскоростного обмена информацией по восходящей и нисходящей линиям связи: разнесение передающего и приемного каналов, наличие независимой системы точного наведения на каждый канал и применение когерентного многолучевого передатчика (3), который формирует необходимые для передачи информации когерентные пучки с требуемым радиусом и расходимостью. Количество пучков получено путем математического моделирования, в основу которого легла задача по оптимальному понижению среднего уровня битовых ошибок BER для реализации высокой скорости передачи информации по восходящей линии связи. Радиус каждого пучка удовлетворяет следующему соотношению [6, 7]:

$$\frac{2\sqrt{2}W_0}{\left[0.42 \cdot \sec(\xi)k^2 \int_{h_0}^H C_n^2(h)dh\right]^{-3/5}} < 1 \quad (1)$$

где W_0 – радиус пучка по уровню e^{-2} на выходной апертуре телескопа; ξ – зенитный угол; k – волновое число; $C_n^2(h)$ – структурная характеристика показателя преломления атмосферы.

Блок приемника (4) предназначен для приема модулированного излучения с БТ ВКЛС, несущего в себе целевую информацию. При этом поле зрения приемного канала покрывает сумму ошибок системы наведения в размере трех сигм.

Блоки передатчика и приемника в своем составе содержат узкоугольные камеры и пьезозеркала, которые образуют систему точного наведения. Система точного наведения отрабатывает ошибку поворота ОПУ, возможные высокочастотные механические колебания, воздействующие на конструкцию НТ ВКЛС, а также высокочастотные возмущения атмосферной турбулентности. Работы системы осуществляется по излучению маяка с БТ ВКЛС и внутреннего маркера.

Широкоугольная камера (5), ОПУ (2) и объективы маяка (6) образуют систему грубого наведения, которая предназначена для поиска БТ ВКЛС,

отработки низкочастотных атмосферных воздействий и механических колебаний, воздействующих на конструкцию НТ ВКЛС.

В таблице 1 представлены тактико-технические характеристики НТ ВКЛС.

Таблица 1

Тактико-технические характеристики НТ ВКЛС

№	Наименование характеристики	Значение
1	Дистанция связи, км	от 400 до 2000
2	Скорость передачи информации по восходящей линии связи, Гб/с	не менее 2
3	Скорость приема информации по нисходящей линии связи, Гб/с	не менее 2
4	Уровень битовой ошибки BER	не хуже 10^{-6}
5	Количество пучков на выходной апертуре телескопа передающего канала, шт.	6
6	Диаметр пучков на выходной апертуре телескопа передающего канала, мм	от 15 до 25

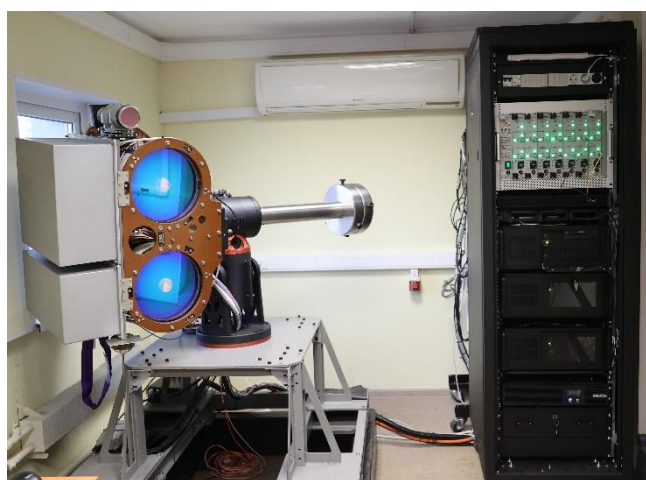
В связи с высокой скоростью передачи в НТ ВКЛС выравнены волновые фронты передающего сигнала в каждом пучке. При этом у всех пучков один задающий генератор.

Изготовленный НТ ВКЛС

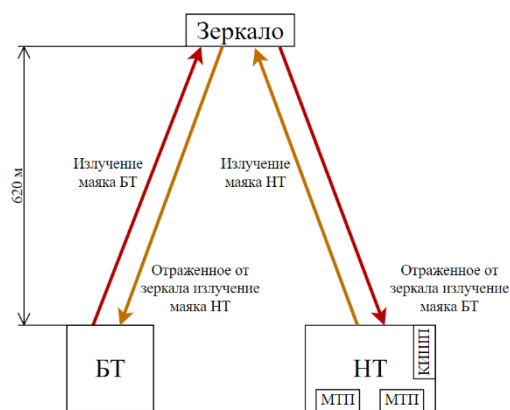
На рисунке 3А представлен изготовленный и экспериментально исследованный НТ ВКЛС, расположенный на испытательном стенде. Принципиальная схема испытательного стенда приведена на рисунке 3Б. Экспериментальная отработка линий связи происходила через зеркало, находящееся на расстоянии не менее 620 м от БТ ВКЛС и НТ ВКЛС. БТ ВКЛС находится на неподвижной платформе и имеет зафиксированное положение ОПУ.

На испытательном стенде проводились следующие исследования НТ ВКЛС:

- измерение скорости передачи ЦИ;
- измерение вероятности битовой ошибки при приеме;
- измерение времени вхождения в связь;
- измерение времени восстановления связи после прерывания на 5 с.



А)



Б)

Рисунок 3 – Изготовленный НТ ВКЛС, расположенный на испытательном стенде

Рассмотрим принцип проведения исследований на испытательном стенде. ОПУ НТ ВКЛС движется по целеуказаниям до момента, пока широкоугольная камера не захватит излучение маяка БТ ВКЛС. В данном случае ОПУ вращалось до момента, пока телескопы не окажутся напротив окна, через которое заходит излучение маяка БТ ВКЛС. Широкоугольная камера захватывает излучение маяка, и ОПУ останавливается на месте, удерживая положения пятна в центре матрицы. Маяк от БТ ВКЛС появляется на пеленгаторах, включаются маркеры. Запись с матрицы узкоугольной камеры представлена на рисунке 4.



Рисунок 4 – Запись с матрицы узкоугольной камеры

На рисунке 4 в центре матрицы пеленгатора НТ ВКЛС пятно маяка с БТ ВКЛС, а по бокам от него – пятна маркера. Пятно маяка имеет спекловую структуру и далеко от дифракционного качества, связано это с тем, что расстояние между терминалами около 1200 м, а телескопическая система совместно с объективами пеленгаторов рассчитана и съюстирована на бесконечность.

На рисунке 5 представлены результаты измерения скорости передачи информации и уровня битовых ошибок.

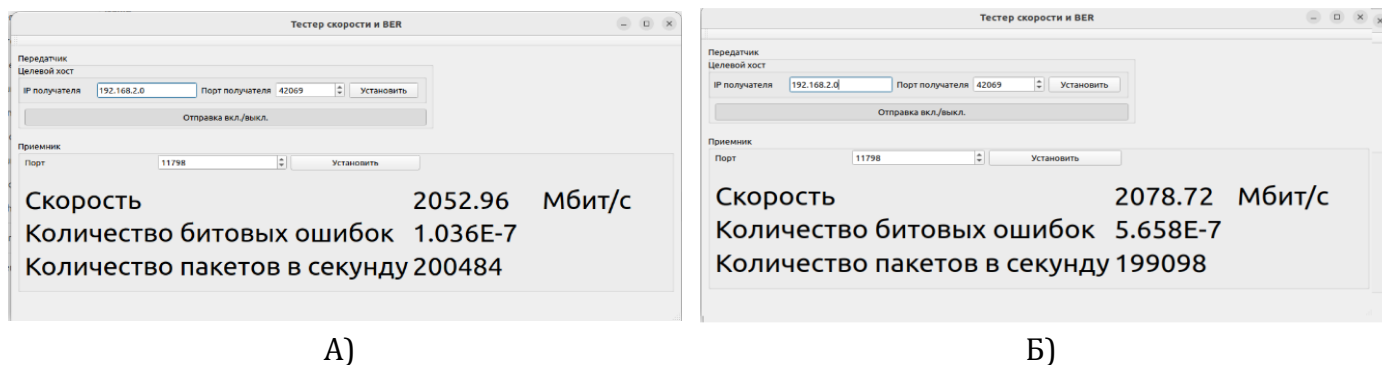


Рисунок 5 – Результаты измерений скорости передачи информации и уровня битовых ошибок:
А) с БТ ВКЛС на НТ ВКЛС; Б) с НТ ВКЛС на БТ ВКЛС

На рисунке 5 видно, что скорость передачи данных в полнодуплексном режиме составила не менее 2 Гбит/с, а количество битовых ошибок не хуже, чем 10^{-6} . При этом мощности излучения передатчиков задавались таким образом, чтобы моделировать космические расстояния и мощности на приемниках терминалов. Время вхождения в связь и время восстановления связи при ее обрывании (перекрытие апертуры терминалов) составило не более 1 секунды. Точность наведения НТ ВКЛС на БТ ВКЛС составила не хуже 0,1" (три сигмы).

Заключение

В результате проведенных исследований и разработок был создан наземный терминал высокоскоростной космической лазерной связи, способный осуществлять полнодуплексный высокоскоростной обмен информацией с космическим аппаратом.

Основой разработки стала оригинальная концепция применения когерентного многолучевого передатчика, оснащенного системой выравнивания фазы информационного канала для каждого из шести пучков. При этом оптическая система передатчика спроектирована с учетом оптимизации размера светового пучка под условия атмосферной турбулентности. Данные технические решения позволили скомпенсировать эффект «блуждания» пучка, а также его уширения, что привело к повышению стабильности восходящей линии связи.

Экспериментальные исследования на испытательном стенде подтвердили высокую эффективность разработанного решения. Терминал продемонстрировал

способность обеспечивать скорость передачи данных по восходящей и нисходящей линиям связи не менее 2 Гбит/с при уровне битовых ошибок не хуже 10^{-6} . Особое внимание заслуживает время вхождения в связь и восстановления после прерывания, которое не превышает одной секунды, а также точность наведения терминала, достигающая 0,1".

Разработанный наземный терминал высокоскоростной космической лазерной связи способен эффективно функционировать на дистанциях от 400 до 2000 км, что открывает широкие перспективы для его практического применения. Дальнейшее развитие терминала предполагает увеличение пропускной способности системы до 10 Гбит/с и выше, а также совершенствование алгоритмов компенсации атмосферных искажений.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о создании работоспособного и эффективного решения в области космической лазерной связи, которое способно удовлетворить современные требования к передаче больших объемов информации между космическими аппаратами и наземными пунктами.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Список источников / References

1. Kuzmin I.V. et al. Free-Space Laser Communication Terminals // 2024 International Conference Laser Optics (ICLO). – IEEE, 2024. – P. 459.
2. Meng X. et al. Accurate Real-time Laser Spot Locating Based on Template Correlation in Intersatellite Laser Communications // IEEE Photonics Journal. – 2024. – Vol. 16, No. 1. – P. 1–9. DOI: 10.1109/JPHOT.2023.3335234.
3. Baltaci A., Shortt K. Investigation of the Influence of LEO Constellation Dynamics on Optical Inter-satellite Links // 2023 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS). – IEEE, 2023. – P. 121–127.

4. Knappek M. et al. Development of a laser communication terminal for large LEO constellations // 2017 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS). – IEEE, 2017. – P. 53–58.
5. Gavrilenko M., Akbulatov R., Lozov R. Free-space laser communication terminal for LEO constellation // 2022 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). – IEEE, 2022. – P. 383–387.
6. Kaushal H., Jain V.K., Kar S. Free Space Optical Communication. – New Delhi: Springer India, 2017. – 209 p. DOI: 10.1007/978-81-322-3691-7.
7. Hemmati H. Near-Earth Laser Communications // Near-Earth Laser Communications, Second Edition. – CRC Press, 2020. – P. 1–40.
8. Andrews L.C., Beason M.K. Laser Beam Propagation in Random Media: New and Advanced Topics. – SPIE Press, 2023. – 422 p. DOI: 10.1117/3.2643989.

Информация об авторах

Роман Константинович Лозов, главный специалист, Акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения», Москва Россия; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2866-5314>; e-mail: rk@lozov.ru

Маргарита Вячеславовна Масловец, инженер-исследователь, Акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения», Москва, Россия; e-mail: lilweeny.7@yandex.ru

Вячеслав Владимирович Мурашкин, кандидат технических наук, заместитель начальника НТЦ 01, Акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения», Москва, Россия; e-mail: mvv@npk-spp.ru

Дмитрий Константинович Макаров, инженер-конструктор 3 категории, Акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения», Москва, Россия; e-mail: Dosiaich@yandex.ru

Тимофей Кириллович Говоров, техник, Акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения», Москва, Россия; e-mail: t-govorov@mail.ru

Information about the authors

Roman K. Lozov, Chief Specialist, Joint-Stock Company "Scientific and Production Corporation "Systems of Precision Instrument Engineering", Moscow, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2866-5314>; e-mail: rk@lozov.ru

Margarita V. Maslovets, Research Engineer, Joint-Stock Company "Scientific and Production Corporation "Systems of Precision Instrument Engineering", Moscow, Russia; e-mail: lilweeny.7@yandex.ru

Vyacheslav V. Murashkin, Ph.D. (Engineering), Deputy Head of R&D Center 01, Joint-Stock Company "Scientific and Production Corporation "Systems of Precision Instrument Engineering", Moscow, Russia; e-mail: mvv@npg-spp.ru

Dmitriy K. Makarov, Design Engineer of 3rd Category, Joint-Stock Company "Scientific and Production Corporation "Systems of Precision Instrument Engineering", Moscow, Russia; e-mail: Dosiaich@yandex.ru

Timofey K. Govorov, Technician, Joint-Stock Company "Scientific and Production Corporation "Systems of Precision Instrument Engineering", Moscow, Russia; e-mail: t-govorov@mail.ru

Получено 16 января 2026 ● Принято к публикации 29 мая 2026 ● Опубликовано 31 августа 2026
Received 16 January 2026 ● Accepted 29 May 2026 ● Published 31 August 2026
