

Научная статья
УДК 629.78:621.382.2
DOI: [10.34759/trd-2022-127-19](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-19)

АНАЛИЗ НАЗЕМНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НАБЛЮДЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ МАЯКОВ НА БОРТУ ОКОЛОЗЕМНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

**Людмила Витальевна Вернигора^{1✉}, Павел Владимирович Казмерчук²,
Валентин Константинович Сысоев³**

^{1,2,3}АО "НПО Лавочкина", Химки, Московская область, Россия

¹VernigoraLV@laspace.ru✉

²pavel.kazmerchuk@gmail.com

³SysoevVK@laspace.ru

Аннотация. Применение оптических лазерных маяков, установленных на борту околоземных космических аппаратов (КА), в комплексе с наземными оптическими средствами наблюдения позволяет обеспечить оперативный контроль состояния КА (орбитальные параметры и параметры вращения, в том числе в отсутствии связи с ними).

В статье анализируются наземные оптические средства для наблюдения оптических лазерных маяков на борту околоземных КА.

Ключевые слова: космический аппарат, оптические средства наблюдения, оптические маяки

Для цитирования: Вернигора Л.В., Казмерчук П.В., Сысоев В.К. Анализ наземных оптических средств наблюдения лазерных маяков на борту околоземных космических аппаратов // Труды МАИ. 2022. № 127. DOI: [10.34759/trd-2022-127-19](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-19)

Original article

ANALYSIS OF GROUND-BASED OPTICAL MEANS OF OBSERVING LASER BEACONS ON BOARD NEAR-EARTH SPACECRAFT

Lyudmila V. Vernigora¹, **Pavel V. Kazmerchuk²**, **Valentin K. Sysoev³**

^{1,2,3}Lavochkin Association, Khimki, Moscow region, Russia

¹VernigoraLV@laspace.ru

²pavel.kazmerchuk@gmail.com

³SysoevVK@laspace.ru

Abstract. A critical issue in the spacecraft navigation consists in precise determination of the spacecraft position in space. The spacecraft navigation parameters measuring in the near-Earth space may be realized employing both onboard and ground-based measurement facilities, which include radio-technical and optical systems. In the low-orbit region with orbits altitude less than 5000 km radar measurement means are being employed as a rule. At the altitudes above 5000 km, a spacecraft is out of the radar stations visibility zone. In case absence of the onboard radio-technical means as a part of the spacecraft, ensuring current navigation parameters measuring, photometrical surveillance becomes the only susceptible possibility for the spacecraft monitoring and its technical state evaluation.

Optical measuring instruments are capable of ensuring higher accuracy than with the radio band application. However, optical means of observation have a number of disadvantages, which significantly limit their capabilities. Such disadvantages are as follows: their dependence on the time of day, illumination of the spacecraft, and weather conditions. Besides, a small-sized spacecraft has utterly low visible brightness, which aggravates their observation by optical means. These shortcomings can be partially overcome by installing optical laser beacons onboard the near-Earth spacecraft, which will allow ensuring operational monitoring of their condition (both orbital and rotation parameters, including the case of communication deficiency with them) by the ground-based optical means.

Ground-based optical observation stations of the Space Monitoring System perform monitoring of all objects located in the near-Earth space to maintain a catalog of orbital parameters for subsequent prediction of their position. Obtaining long photometric series for the tasks of the Space Monitoring System is possible, but only by suspending the main tasks execution. Besides its own standard optical ground-based observation facilities, the Space Monitoring System extensively employs of the observations results obtained at optical observation stations of scientific organizations, particularly, the Pulkovo Cooperation of Optical Observers (PulCON), the Russian Academy of Sciences (INASAN, SibIZMIR), the Roscosmos Research Institute and university observatories. All these optical observation stations are equipped with modern telescopes and photodetectors that will allow for confident registration of radiation from laser beacons installed onboard the near-Earth spacecraft, thereby increasing the reliability of the near-Earth spacecraft positioning regardless of their size and orbit type.

Keywords: spacecraft, optical means of observation, optical beacons

For citation: Vernigora L.V., Kazmerchuk P.V., Sysoev V.K. Analysis of ground-based optical means of observing laser beacons on board near-Earth spacecraft. *Trudy MAI*, 2022, no. 127. DOI: [10.34759/trd-2022-127-19](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-19)

Введение

Критическим вопросом в навигации космических аппаратов (КА) является точное определение местоположения КА в пространстве. В околоземном пространстве измерение навигационных параметров КА может быть реализовано с использованием бортовых и наземных средств измерений, которые включают в себя радиотехнические и оптические системы [1, 2]. В низкоорбитальной области с высотой орбит менее 5000 км как правило используются радиолокационные средства измерения. На орбитах выше 5000 км КА находятся вне зоны видимости радиолокационных станций, и в случае отсутствия в составе КА бортовых радиотехнических средств, обеспечивающих измерения текущих навигационных параметров, фотометрические наблюдения становится практически единственной доступной возможностью для наблюдения КА и оценки их технического состояния [3, 4]. Оптические средства измерения способны обеспечить точность более высокую, чем при использовании радиодиапазона. Точность позиционных измерений больших наземных телескопов (диаметр ~ 6 м) в околоземном пространстве находится вблизи величины $1'' \dots 2''$. У наземных телескопов с адаптивной оптикой угловое разрешение достигает $0,3''$, а точность угловых единичных измерений – $0,01''$ [5]. Точность

измерений положений КА на круговой орбите в зависимости от высоты представлена на рисунке 1. Однако оптические средства наблюдения имеют ряд недостатков, что значительно ограничивает их возможности. К таким недостаткам относятся: их зависимость от времени суток, освещенность КА, погодные условия [6]. Кроме того, малоразмерные КА имеют очень низкую видимую яркость, что затрудняет их наблюдение оптическими средствами. Частично нивелировать указанные недостатки можно с помощью установки оптических лазерных маяков на борту околоземных КА, что позволит обеспечить оперативный контроль их состояния (орбитальные параметры и параметры вращения, в том числе в отсутствии связи с ними) с помощью наземных оптических средств [7-12].

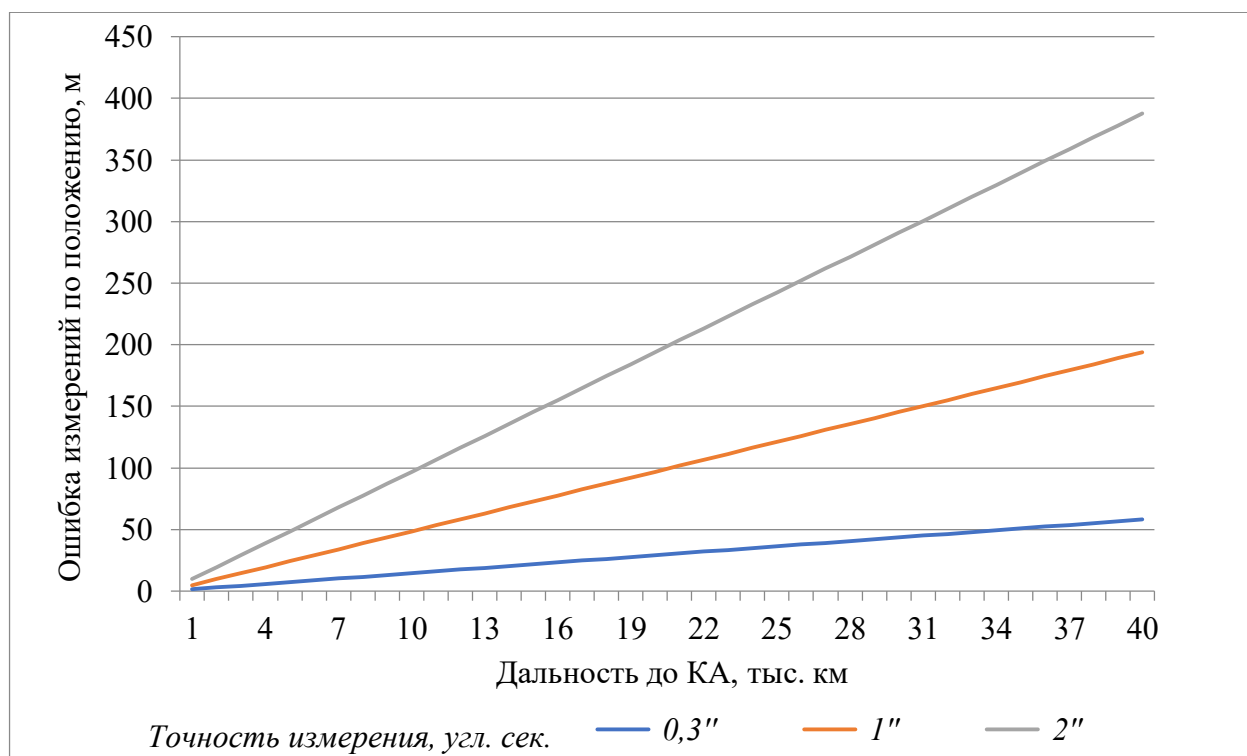


Рисунок 1. Точность измерений положений КА на круговой орбите в зависимости от высоты

Наземные оптические станции наблюдений Системы Контроля Космического пространства проводят мониторинг всех находящихся в околоземном космическом пространстве объектов с целью поддержания каталога орбитальных параметров для последующего прогнозирования их положения [13]. Получение длинных фотометрических рядов для задач Системы Контроля Космического пространства возможно, но лишь за счет приостановки выполнения основных задач. Кроме собственных штатных оптических наземных средств наблюдений, Система Контроля Космического пространства широко использует результаты наблюдений, получаемых на станциях оптических наблюдений научных организаций, в частности, Пулковской кооперации оптических наблюдателей (ПулКОН) [14], Российской Академии наук (ИНАСАН, СибИЗМИР) [15-17], НИИ ПП Роскосмоса [18] и университетских обсерваторий [19, 20]. Все эти станции оптических наблюдений обладают современными телескопами и фотоприемниками.

Оптические наземные обсерватории для регистрации сигналов лазерных маяков на борту высокоорбитальных КА.

В рамках проекта ПулКОН была создана сеть наземных оптических телескопов для выполнения координированных наблюдений с целью решения научных и прикладных задач. Существенная часть времени ПулКОН посвящена наблюдениям спутников и объектов космического мусора. Данные о параметрах телескопов обсерваторий, сотрудничающих с ПулКОН представлены в таблице 1 [14].

Таблица 1.

Характеристики оптических телескопов ПулКОН

№	Организация	Наименование обсерватории	Координаты	Телескоп	Фотоприемник	Поле	Звездная величина
1	КрАО	Научный	44 43.580 34 00.963 585 м	60-см Цейсс-600	FLI IMG1001E 1024x1024, 24	18,2'x18,2'	17,5
				2,6-м ЗТШ		8,4' x 8,4'	21
				22-см SR-220		2,8° x 2,8°	14,5
				64-см АТ-64	FLI PL16803 4096x4096, 9	2,3° x 2,3°	18
		Симеиз		1-м Цейсс-1000	FLI IMG1001E 1024x1024, 24	30' x 30'	19,5
					60-см Цейсс-600	FLI PL1001E 1024x1024, 24	30' x 30'
2	ГАО РАН	Пулково	59° 46' 18.71" 30° 19' 38.4" 100 м	22-см SR-220	FLI PL09000 3000x3000, 12	4° x 4°	15
				32-см ЗА-320	FLI IMG1001E 1024x1024, 24	28' x 28'	14,5
				65-см рефрактор	FLI PL09000 3000x3000, 12	12' x 12'	17,5
3	УАФО	Уссурийск	43°41 ^m ,95 132°09 ^m ,95 200 м	40-см норм. астрограф	FLI IMG6303E 3000x2000, 9	35' x 25'	14,5
				22-см SR-220	FLI PL09000 3000x3000, 12	4° x 4°	15
4	ИСЗФ СО РАН	Монды	100° 55' 07.65" 51° 37' 18.10" 2000 м	48-см телескоп АЗТ-14	ЭОП+TV-CCD	10'x10'	14,5
				60-см Цейсс-600	Электрон 1000x1000, 15	7,5' x 7,5'	17,5
				АЗТ-33ИК	Электрон 1000x1000, 15	3' x 3'	20
5	АИ УзАН	Майданак	38.67332° 66.89641° 2593 м	60-см Цейсс-600	IMG1001E 1024x1024, 24	11,5' x 11,5'	18
				60-см Цейсс-600	FLI PL1001E 1024x1024, 24	30' x 30'	18
				1,5-м АЗТ-22	4000x4000, 15	16' x 16'	20,5
		Китаб		40-см норм. астрограф	FLI PL1001E 1024x1024, 24	28' x 28'	14,5
6	САО РАН	Зеленчук	43° 38' 55" 2 ^h 45 ^m 46 ^s 2070 м	1-м Цейсс-1000	E2V 4000x2000, 15	15' x 7,5'	19,5
				60-см Цейсс-600			
7	ААО ГрАН	Абастумани	41° 45' 16.5" 42° 49' 21.0" 1575.7m	40-см норм. астрограф	FLI IMG6303E 3000x2000, 9	35' x 25'	14,5
				70-см Максутов	FLI PL09000 3000x3000, 12		18,5
8	АО ОНУ	Маяки	46° 23' 50.54" 30° 16' 24.45" 90 м	60-см PK-600	IMG1001E 1024x1024, 24	20' x 20'	17,5
9	АО ХГУ	Чугуев	49°38m.6 +2 ^h 28 ^m 156m	70-см АЗТ-8	IMG47-10 1024x1024, 13	30' x 30'	17,5
10	НЦУИКС	Евпатория	45° 13' 10.25" 33° 09' 46.07" 41 м	70-см АЗТ-8	FLI PL1001E 1024x1024, 24	30' x 30'	17,5

№	Организация	Наименование обсерватории	Координаты	Телескоп	Фотоприемник	Поле	Звездная величина
11	НБО	Гариха	21° 35' 45.5" ю.ш. 64° 37' 24.9" з.д. 2000 м	60-см Цейсс-600	IMG1001E 1024x1024, 24	11,5' x 11,5'	18
				23-см астрограф	FLI PL1001E 1024x1024, 24	36' x 36'	14,5

Астрономическая обсерватория на Пике Терскол (самая высокая на территории РФ и Европы - 3150 метров над уровнем моря) обеспечивает уникальные условия наблюдения с низким содержанием водяных паров в атмосфере и высокой прозрачностью в ультрафиолетовом и инфракрасном диапазонах (диапазон возможных наблюдений от 300 нм до 1000 нм). Астрономический комплекс включает в себя телескопы: «Цейсс-2000», «Цейсс-600», горизонтальный солнечный телескоп. Телескоп «Цейсс-2000» с диаметром зеркала два метра - один из крупнейших по величине действующих на территории РФ телескоп. Большая входная апертура дает возможность для фотометрических измерений КА с точностью до $\sim 0,01''$ с привязкой данных наблюдений к фотометрическим системам посредством наблюдений в качестве стандартов звёзд 12-15-й звёздной величины из обзорных каталогов. [21]. Применение сменных светофильтров в данной системе для фотометрических измерений позволяет выделить интересующие наблюдателя объекты на фоне оптических помех. Высокая проникающая способность комплекса «Цейс-2000» и автоматизация процесса цифровой обработки ПЗС-изображений обеспечивают возможность наблюдения объектов и их фрагментов в реальном времени на переходных и геостационарных орбитах. Основные характеристики оптической системы телескопа «Цейсс-2000» приведены в таблице 2.

Основные характеристики оптической системы телескопа «Цейсс-2000»

Параметр	Значение
Апертура	2 м
Фокусное расстояние	16 м
Фотоприемник	ПЗС-камера FLI PL 4301 (система Ричи-Кретьена)
Размер ПЗС	2084 × 2084 пикселей
Размер пикселя	~ 12' × 12'
Быстродействие	2-5 с
Порог обнаружения на ГСО (проницающая)	до 22 ^m

Все вышеперечисленные оптические обсерватории имеют инструменты, которые могут быть использованы для наблюдения высокоорбитальных КА, медленно движущихся в поле зрения телескопа. Все эти инструменты позволяют регистрировать излучение точечных объектов слабее 15 звездной величины. Такие источники создают световой поток в плоскости входной апертуры на уровне 1 фотон/с·см² в видимом свете. Наблюдая в полосе 1000 Å, телескоп с апертурой 60 см соберет от такого источника $1,5 \cdot 10^6$ фотонов/сек. Для КА, находящихся на геостационарной орбите 40 тыс. км ($4 \cdot 10^9$ см), апертура телескопа будет видна под углом $3 \cdot 10^{-3}$ угл. сек. Для регистрации оптического сигнала маяка, рассматриваемым наземным телескопом, потребуется световой поток $1,5 \cdot 10^6 \cdot (3 \cdot 10^{-3})^{-2} \approx 1,5 \cdot 10^{11}$ фотонов/(угл.сек)². При энергии фотона видимого диапазона 3 эВ мощность светового излучения маяка на геостационарной орбите должна составлять $6 \cdot 10^{-7}$ Вт/(угл.сек)². Для практической реализации лазерного маяка на геостационарной орбите будет целесообразно увеличить угол излучения маяка до 1° (т.е. в $(3600)^2$ раз),

тем самым образуя световое пятно на поверхности Земли диаметром ~1000 км. Тогда мощность светового излучения лазерного маяка на геостационарной орбите должна составлять 4,5 Вт.

Оптические наземные обсерватории для регистрации сигналов лазерных маяков на борту низкоорбитальных КА.

Наблюдения низкоорбитальных КА в оптическом диапазоне имеют свою специфику и определяют особые требования к аппаратуре, такие как высокоточное сопровождение объектов по эфемериде в широком диапазоне угловых скоростей (до нескольких градусов в секунду), большой динамический диапазон фотоприемной аппаратуры, возможность получения коротких экспозиций (доли секунды) и быстрое считывание кадров.

Основная особенность и вместе с тем основная трудность наблюдения КА на низких орбитах связаны большими угловыми скоростями КА, из-за чего возникает необходимость, кроме направления на спутник, получать с очень высокой точностью и момент времени, соответствующий зафиксированному положению КА на снимке. Если учесть, что низкоорбитальные КА движутся со скоростью 8 км/с, то время, за которое КА пройдет расстояние, равное ошибке по положению на орбите, составит доли микросекунды. Время экспозиции астрономических приборов составляет от 0,04 сек до нескольких сек. Синхронизация часов камеры с эталонной системой времени, как правило, не превышает 1 мсек.

Ряд телескопов, установленных на «быстрых» монтировках, позволяет следить за спутниками на орбитах всех типов. К таким телескопам относятся камеры «SBG»

в Коуровской и Звенигородской обсерваториях, а также Ужгородского университета, телескоп АЗТ-33ИК Саянской солнечной обсерватории в Мондах, телескоп «ТТ-600» на станции оптических наблюдений «Архыз».

Особенностью этих инструментов является возможность оптических наблюдений самых низкоорбитальных КА с любыми значениями скорости.

Поскольку поле зрения у астрономических инструментов с высокой проникающей силой принципиально не может быть большим и составляет примерно 1° , хотя в камерах «SBG» оптика позволяет обеспечить поле зрения до 6° , то для работы по низколетящим объектам им необходима эфемеридная поддержка.

Исходя из минимального размера апертуры вышеперечисленных инструментов в 40 см, проникающую силу их можно принять равной 14^m . Тогда видимая яркость лазерного маяка в полосе «V» будет соответствовать световому потоку 2.5 фотонов/сек·см². Для оценочного расчета положим, что угол излучения лазерного маяка составляет 30° . При расстоянии КА от наблюдателя в $2 \cdot 10^8$ см (2000 км) площадь светового пятна на поверхности Земли составит $\sim 10^{16}$ см², что требует полного светового потока от маяка $\sim 2.5 \cdot 10^{16}$ фотонов/сек. Принимая энергию одного фотона видимого диапазона в 3 эВ мощность светового излучения будет соответствовать $\sim 0,75 \cdot 10^{-3}$ Дж/сек, т.е. 0,75 милливатт. Приведенный расчет предполагает, что при дневных наблюдениях используется интерференционный фильтр с полосой пропускания, центрированной на длину волны излучения маяка, который снижает яркость дневного неба в 1000 раз. Для уверенного приема сигнала маяка во время дневных наблюдений, при которых атмосферная турбулентность

приводит к увеличению видимых размеров точечного источника до 10", его мощность следует повысить и принять равной 75 милливатт.

Заключение

Проведенный анализ показывает, что рассмотренные наземные оптические средства наблюдения позволят проводить уверенную регистрацию излучения от лазерных маяков, установленных на борту околоземных КА, тем самым повысив надежность позиционирования околоземных КА независимо от их размеров и типа орбиты.

Список источников

1. Иванов Н.М., Лысенко Л.Н. Баллистика и навигация космических аппаратов. – М.: Дрофа, 2004. - 544 с.
2. Разыграев А.П. Основы управления полетом космических аппаратов. - М.: Машиностроение, 1990. - 475 с.
3. Пинигин Г.И. Телескопы наземной оптической астрометрии. - Николаев: Атолл, 2000. - 108 с.
4. Зиновьев Ю.С., Мишина О.А., Глущенко А.А. Перспективы развития оптических телескопов наземного и космического базирования // Труды МАИ. 2018. № 101. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=96976>
5. Микиша А.М. Космические методы в геодезии. - М.: Знание, 1983. - 64 с.
6. Медвед Д.Б. Влияние погодных условий на беспроводную оптическую связь // Вестник связи. 2001. № 4. С. 154-157.

7. Дмитриев А.Л. Полупроводниковые источники света для систем передачи и обработки информации. - СПб: СПбГУИТМО, 2006. - 48 с.
8. Багров А.В., Вернигора Л.В., Вятлев П.А., Мартынов М.Б., Папченко Б.Н., Сысоев В.К. Создание светодиодных оптических маяков для космических аппаратов // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2011. № 4. С. 37-43.
9. Вернигора Л.В., Пичхадзе К.М., Сысоев В.К. Анализ параметров излучателя оптического маяка для системы навигации космических аппаратов // Труды МАИ. 2017. № 95. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=84553>
10. Багров А.В., Вернигора Л.В., Казмерчук П.В., Сысоев В.К. Методика вычисления времени видимости оптических лазерных маяков на борту околоземных КА с помощью наземных оптических средств наблюдения // Вестник НПО имени С.А. Лавочкина. 2019. № 3. С. 52-56. DOI: [10.26162/LS.2019.45.3.007](https://doi.org/10.26162/LS.2019.45.3.007)
11. Вернигора Л.В., Казмерчук П.В., Сысоев В.К., Дмитриев А.О. Методика измерения координат лунных посадочных станций с помощью оптических телевизионных средств космических аппаратов // Труды МАИ. 2020. № 114. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=118986>. DOI: [10.34759/trd-2020-114-12](https://doi.org/10.34759/trd-2020-114-12)
12. Старовойтов Е.И., Савчук Д.В. Программа «МИТРА» для моделирования характеристик бортовых лазерных локационных систем космических аппаратов // Труды МАИ. 2014. № 75. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=49709>
13. Шустов Б.М. О фундаментальных исследованиях по проблеме космического мусора // Всероссийская научная конференция с международным участием «Космический мусор: фундаментальные и космические аспекты угрозы» (Москва, 17-19 апреля): сборник трудов. - М.: Институт космических исследований РАН, 2019. С.

7-14. DOI: [10.21046/spacedebris2019-7-14](https://doi.org/10.21046/spacedebris2019-7-14)

14. Молотов И.Е., Агапов В.М., Куприянов В.В., Титенко В.В. и др. Научная сеть оптических инструментов для астрометрических и фотометрических наблюдений // Известия Главной астрономической обсерватории в Пулкове. 2009. № 219. Выпуск 1. С. 233-248.

15. Тарадий В.К. Решение задач геодинамики и навигации в околоземном пространстве по данным оптических наблюдений небесных объектов: Дисс. доктора физико-математ. наук. – Терскол: 2005. - 280 с.

16. Карпов Н.В., Сергеев А.В., Тарадий В.К. Наблюдения событий в околоземном пространстве на пике Терскол – 1997 – 2007гг. // Материалы Международной конференции «Околоземная астрономия 2007» (Терскол, 3-7 сентября 2007). - Нальчик: Изд-во М. и В. Котляровы, 2008. С. 299-305.

17. Попандопуло Н.А., Авдюшев В.А., Бордовицына Т.В., Галушина Т.Ю., Левкина П.А., Бахтигараев Н.С., Шеин А.В. Определение орбитальных параметров группы геосинхронных спутников по наблюдениям на пике Терскол // X Всероссийская научная конференция с международным участием «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики – 2020» (Томск, 18–20 ноября 2020): сборник трудов. – Томск: Изд-во Красное знамя, 2021. С. 229-232.

18. Гришин Е.А., Куимов К.В., Новиков С.Б., Семенцов В.Н., Шаргородский В.Д. Высокоточные наблюдения высокоорбитальных объектов // Материалы Международной конференции «Околоземная астрономия 2007» (Терскол, 3-7 сентября 2007). - Нальчик: Изд-во М. и В. Котляровы, 2008. С. 305-308.

19. Гламазда Д.В. Камера SBG Коуровской астрономической обсерватории //

Астрофизический бюллетень. 2012. Т. 67. № 2. С. 242-248.

20. Захарова П.Е., Кузнецов Э.Д., Гламазда Д.В., Горда С.Ю., Кайзер Г.Т. Система мониторинга геосинхронных объектов Коуровской астрономической обсерватории УрГУ // Материалы Международной конференции «Околосемная астрономия 2007» (Терскол, 3-7 сентября 2007). - Нальчик: Изд-во М. и В. Котляровы, 2008. С. 314-317.

21. Левкина П.А. Физические и орбитальные характеристики объектов космического мусора по данным оптических наблюдений: Дисс.....канд. физико-математ. наук. - М.: ИНАСАН, 2016. - 123 с.

References

1. Ivanov N.M., Lysenko L.N. *Ballistika i navigatsiya kosmicheskikh apparatov* (Ballistics and navigation of spacecraft), Moscow, Drofa, 2004, 544 p.
2. Razygraev A.P. *Osnovy upravleniya poletom kosmicheskikh apparatov* (Fundamentals of spacecraft flight control), Moscow, Mashinostroenie, 1990, 475 p.
3. Pinigin G.I. *Teleskopy nazemnoi opticheskoi astrometrii* (Ground-based optical astrometry telescopes), Nikolaev, Atoll, 2000, 108 p.
4. Zinov'ev Yu.S., Mishina O.A., Glushchenko A.A. *Trudy MAI*, 2018, no. 101. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=96976>
5. Mikisha A.M. *Kosmicheskie metody v geodezii* (Space methods in geodesy), Moscow, Znanie, 1983, 64 p.
6. Medved D.B. *Vestnik svyazi*, 2001, no. 4, pp. 154-157.

7. Dmitriev A.L. *Poluprovodnikovye istochniki sveta dlya sistem peredachi i obrabotki informatsii* (Semiconductor light sources for the transmission and processing of information), Saint Petersburg, SPbGUITMO, 2006, 48 p.
8. Bagrov A.V., Vernigora L.V., Vyatlev P.A., Martynov M.B., Papchenko B.N., Sysoev V.K. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2011, no. 4, pp. 37-43.
9. Vernigora L.V., Pichkhadze K.M., Sysoev V.K. *Trudy MAI*, 2017, no. 95. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=84553>
10. Bagrov A.V., Vernigora L.V., Kazmerchuk P.V., Sysoev V.K. *Vestnik NPO imeni S.A. Lavochkina*, 2019, no. 3, pp. 52-56. DOI: [10.26162/LS.2019.45.3.007](https://doi.org/10.26162/LS.2019.45.3.007)
11. Vernigora L.V., Kazmerchuk P.V., Sysoev V.K., Dmitriev A.O. *Trudy MAI*, 2020, no. 114. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=118986>. DOI: [10.34759/trd-2020-114-12](https://doi.org/10.34759/trd-2020-114-12)
12. Starovoitov E.I., Savchuk D.V. *Trudy MAI*, 2014, no. 75. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=49709>
13. Shustov B.M. *Vserossiiskaya nauchnaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem «Kosmicheskii musor: fundamental'nye i kosmicheskie aspekty ugrozy»*, Moscow, Institut kosmicheskikh issledovaniy RAN, 2019, pp. 7-14. DOI: [10.21046/spacedebris2019-7-14](https://doi.org/10.21046/spacedebris2019-7-14)
14. Molotov I.E., Agapov V.M., Kupriyanov V.V., Titenko V.V. et al. *Izvestiya Glavnoi astronomicheskoi observatorii v Pulkove*, 2009, no. 219, issue 1, pp. 233-248.
15. Taradii V.K. *Reshenie zadach geodinamiki i navigatsii v okolozemnom prostranstve po dannym opticheskikh nablyudenii nebesnykh ob"ektov* (Solving problems of geodynamics and navigation in near-Earth space based on optical observations of celestial objects), Doctor's thesis, Terskol, 2005, 280 p.

16. Karpov N.V., Sergeev A.V., Taradii V.K. *Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii «Okolozemnaya astronomiya 2007»*, Nal'chik, Izd-vo M. i V. Kotlyarovy, 2008, pp. 299-305.
17. Popandopulo N.A., Avdyushev V.A., Bordovitsyna T.V., Galushina T.Yu., Levkina P.A., Bakhtigaraev N.S., Shein A.V. *X Vserossiiskaya nauchnaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem «Aktual'nye problemy sovremennoi mekhaniki sploshnykh sred i nebesnoi mekhaniki – 2020»*, Tomsk, Izd-vo Krasnoe znamya, 2021, pp. 229-232.
18. Grishin E.A., Kuimov K.V., Novikov S.B., Sementsov V.N., Shargorodskii V.D. *Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii «Okolozemnaya astronomiya 2007»*, Nal'chik, Izd-vo M. i V. Kotlyarovy, 2008, pp. 305-308.
19. Glamazda D.V. *Astrofizicheskii byulleten'*, 2012, vol. 67, no. 2, pp. 242-248.
20. Zakharova P.E., Kuznetsov E.D., Glamazda D.V., Gorda S.Yu., Kaizer G.T. *Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii «Okolozemnaya astronomiya 2007»*, Nal'chik, Izd-vo M. i V. Kotlyarovy, 2008, pp. 314-317.
21. Levkina P.A. *Fizicheskie i orbital'nye kharakteristiki ob"ektov kosmicheskogo musora po dannym opticheskikh nablyudenii* (Physical and orbital characteristics of space debris objects according to optical observations). Doctor's thesis. Moscow, INASAN, 2016, 123 p.

Статья поступила в редакцию 20.10.2022

Статья после доработки 30.10.2022

Одобрена после рецензирования 01.11.2022

Принята к публикации 26.12.2022

The article was submitted on 20.10.2022; approved after reviewing on 01.11.2022; accepted for publication on 26.12.2022