

Труды МАИ. 2025. № 142
Trudy MAI. 2025. No. 142. (In Russ.)

Научная статья

УДК 629.78

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185122>

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

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И РАЗВИТИЮ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА НЕКАТАЛОГИЗИРУЕМОГО КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Игорь Вячеславович Усовик¹✉, Александр Андреевич Морозов²

^{1,2}Московский авиационный институт, (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

¹usovikiv@mail.ru✉

aamorozko@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены основные принципы мониторинга некаталогизируемого космического мусора с использованием космических и наземных средств. Представлены разработанные методики оценки эффективности системы на основе характеристик глобальности обзора и размера детектируемых частиц, космических средств мониторинга на основе моделирования потоков частиц и полей зрения, а также использования контактных поверхностей. Представлен рациональный вариант состава системы мониторинга некаталогизируемого космического мусора.

Ключевые слова: некаталогизируемый космический мусор, система мониторинга околоземного космического пространства, радиолокационные системы, телескопы, орбитальный сегмент

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01252, <https://rscf.ru/project/23-79-01252/>.

Для цитирования: Усовик И.В., Морозов А.А. Комплексный подход к оценке эффективности и развитию систем мониторинга некаталогизируемого космического мусора в околоземном пространстве // Труды МАИ. 2025. № 142. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185122>

Original article

INTEGRATED APPROACH TO EVALUATING THE EFFECTIVENESS AND DEVELOPMENT OF MONITORING SYSTEMS FOR UNCATALOGUED SPACE DEBRIS IN NEAR-EARTH SPACE

Igor V. Usovik¹, **Alexander A. Morozov²**

^{1,2}Moscow Aviation Institute (National Research University),

Moscow, Russia

¹usovikiv@mail.ru

aamorozko@mail.ru

Abstract. The intensity of global space activity is increasing. Every year, records are set for the number of launches and spacecraft deployed, and as a result, the amount of space debris inevitably rises. The greatest risks to space assets are posed by uncatalogued debris objects, whose size falls below the cataloging threshold but exceeds the size required for critical damage potential. For low Earth orbits, this size range is approximately 1 to 10 cm, while for higher orbits, the upper limit can increase to 50 cm or more. Monitoring such space debris is critical for model verification and situational awareness, which helps ensure the

safety of space operations. The use of both ground-based and space-based technologies maximizes the effectiveness of monitoring small-sized debris across all regions of near-Earth space.

A review of the scientific and technical literature has revealed several techniques for evaluating the effectiveness of ground-based and space-based monitoring tools, though they require further refinement.

This article presents the results of developing methods for assessing the effectiveness of monitoring tools for uncatalogued space debris, along with proposals for the composition of a monitoring system that includes both ground-based and space-based facilities.

The evaluation of monitoring effectiveness is based on calculating the coverage area served by various tools, as well as estimating the number of potential measurements that would be lost if monitoring were not performed on a global scale.

Proposals are made for the creation of a comprehensive monitoring system for uncatalogued space debris, consisting of three radar facilities distributed by latitude within the same region, three telescopes spaced evenly by longitude and as close as possible to the equator, three remote monitoring spacecraft, and one contact monitoring device that could be installed on the Russian Space Station in low Earth orbit.

Keywords: uncatalogued space debris, near-Earth space monitoring system, radar systems, telescopes, orbital segment.

Funding: The research was carried out at expense of the Russian Science Foundation grant № 23-79-01252, <https://rscf.ru/project/23-79-01252/>.

For citation: Usovik I.V., Morozov A.A. Integrated approach to evaluating the effectiveness and development of monitoring systems for uncatalogued space debris in near-

Введение

Интенсивность мировой космической деятельности продолжает расти. Каждый год ставятся рекорды по количеству пусков ракета-носителей космического назначения и выводимых ими космических аппаратов (КА). Как следствие, неизбежно увеличивается количество объектов космического мусора (КМ) [1-3]. Несмотря на развитие технологий ограничения образования, активного удаления и утилизации КМ [4-6], техногенное засорения становится одним из основных источников угроз в космосе. Наибольшие риски для космических средств (КСр) представляют некаталогизируемые объекты КМ, размеры которых меньше нижней границы каталогизации, но при этом превышают минимальный размер частиц, способных вызвать критический ущерб для подсистем. Для области низких околоземных орбит (НОО) этот диапазон составляет примерно от 0,5 до 10 см, а для более высоких орбит верхняя граница может увеличиваться до 50 см и более. Мониторинг такого КМ критически важен для верификации моделей и ситуационной осведомленности в околоземном пространстве, что в долгосрочной перспективе позволит обеспечить безопасность космических операций (БКО) [7-8].

Использование наземных и космических средств позволяет максимизировать эффективность мониторинга малоразмерного КМ во всех областях околоземного космического пространства (ОКП). К настоящему времени разработаны различные методики оценки эффективности средств мониторинга на основе технических

аспектов систем мониторинга [9-12], и различных методов моделирования КМ [13-18]. Как показано в работах [19-20], внедрение цифровизации и комплексный подход к оценке эффективности и развитию системы мониторинга некаталогизируемого КМ существенно повысит эффективность обеспечения безопасности космических полетов. В статье рассмотрены основные составляющие системы мониторинга некаталогизируемого КМ, состоящего из орбитального и наземного сегментов и основные разработанные методики оценки эффективности средств мониторинга.

1. Вклад некаталогизируемого космического мусора в безопасность космических полётов

В работах [1, 2, 12] обоснованы основные параметры рисков некаталогизированных КО для различных видов КСр на разных орбитах. На рисунке 1 представлена схематическая зависимость рисков от размера некаталогизируемого КМ. Как видно, наибольший риск представляют объекты от 5 мм для низких орбит и до 50 см для высоких орбит. Изменение размеров в большую сторону, в зависимости от высоты, связано как с пространственным распределением КМ, так и с возможностями средств мониторинга.

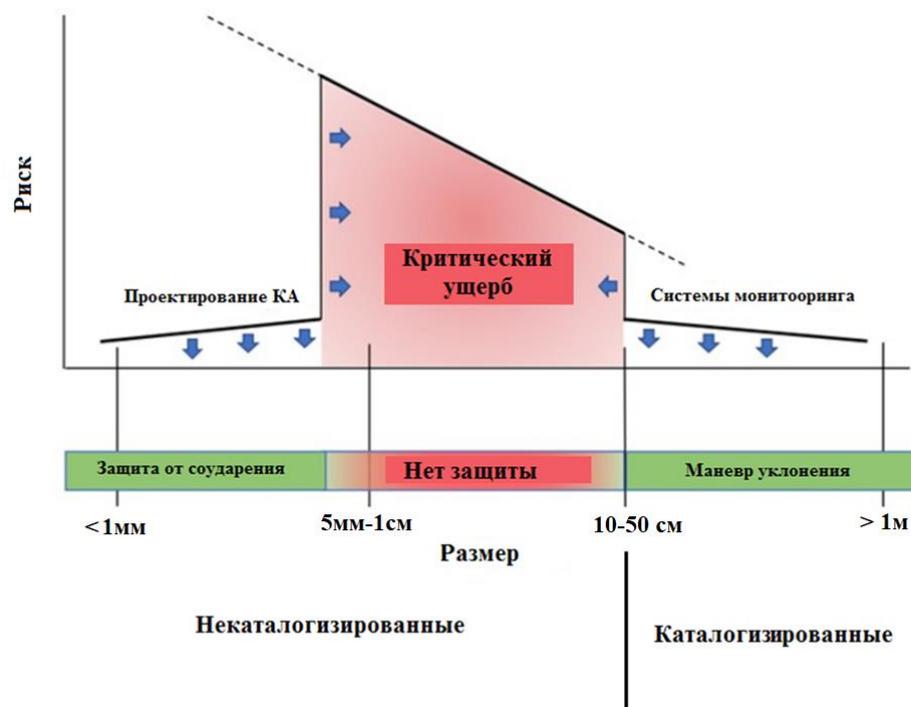


Рисунок 1 – Оценка рисков КМ от размера для различных типов КА и высот их функционирования [16]

Как показано в работе [2], вероятности критического столкновения на сроке активного существования полноразмерного КА могут составлять от единиц до десятков процентов. Основной вклад в эту вероятность вносят некаталогизируемые КО, от которых в настоящее время нет защиты и невозможно уклониться. Поэтому адекватная оценка ситуационной обстановки в ОКП необходима для принятия мер по парированию этих рисков, таких как выбор менее засоренных орбит, страхование и других

2. Особенности оценки эффективности средств мониторинга некаталогизируемого КМ

Представим идеальную систему мониторинга некаталогизируемого КМ. Она состоит из трех типов средств [4]:

- наземные радиолокационные станции и телескопы, отличающиеся от входящих в состав систем мониторинга повышенной чувствительностью и разрешающей способностью по размеру наблюдаемых объектов;
- космические аппараты дистанционного мониторинга;
- космические аппараты контактного мониторинга.

На рисунке 2 схематично представлены все средства, которые должны входить в состав системы мониторинга некаталогизируемого КМ. Средства мониторинга некаталогизируемого КМ привлекаются для определения характеристик потоков малоразмерных космических объектов (КО) в ОКП. При решении этой задачи проводится обработка измерений, результатом которой являются данные о плотности потока КО на различных высотах, среднесуточные данные о прохождении КО через поля зрения и оценочные характеристики размеров КО, а также некоторых параметров их орбит.

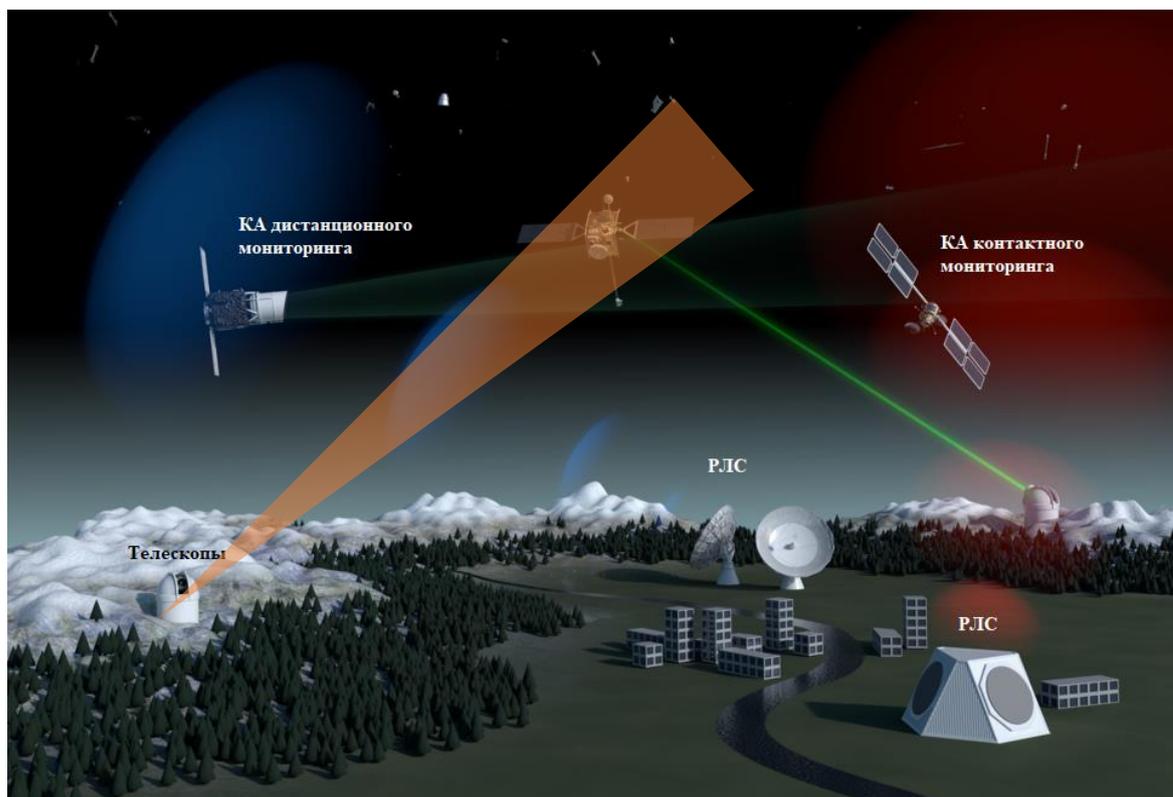


Рисунок 2 – Состав средств системы мониторинга некаталогизируемого КМ.

Система мониторинга некаталогизируемого КМ может оцениваться с использованием следующих показателей:

– диапазон наблюдаемых размеров КО - J_p , который полностью определяется техническими характеристиками средств мониторинга;

– полнота мониторинга ОКП - J_n , характеризует диапазон высот и широт, которые могут быть исследованы с использованием средств мониторинга;

– оценка количества наблюдаемых КО через поле зрения в единицу времени- J_N ;

Таким образом оценка эффективности функционирования средств мониторинга может осуществляться по этим трём основным показателям.

Методики оценки эффективности разрабатываются для проведения анализа эффективности введения средств мониторинга некаталогизированного КМ и определения рационального состава средств мониторинга в системе.

Основным критерием оценки эффективности системы мониторинга некаталогизируемого КМ является - полнота мониторинга, которая характеризует долю об общего объёма контролируемого пространства ОКП по высоте и широте. Если всё заданное пространство контролируется системой, то $J_n = 100 \%$.

Оценка средства мониторинга по данному показателю рассчитывается как сумма отношений контролируемого диапазона высот dH и широт $d\varphi$ к предельным величинам области мониторинга для РЛС:

$$J_n = \left(\frac{d\varphi}{90} + \frac{dH}{H_{max}} \right) * 100 \% \quad (1)$$

Для телескопов дополнительно определяется доля наблюдаемой дуги $d\lambda$ по геостационарной орбите.

$$J_{\Pi} = \left(\frac{d\varphi}{90} + \frac{dH}{H_{max}} + \frac{d\lambda}{360} \right) * 100 \% \quad (2)$$

Таким образом, идеальная система мониторинга некаталогизируемого КМ должна иметь возможность 100% контролировать высотно-широтные области низких околоземных орбит и полностью области СВО и ГСО.

3. Разработка методики оценки эффективности космических средств мониторинга некаталогизируемого космического мусора

Мониторинг некаталогизируемого КМ космическими средствами характерен следующими особенностями:

- мониторинг космическими средствами дистанционного типа позволяет оценить размер, параметры орбиты, размеры частиц от 5 см;
- мониторинг космическими средствами контактного типа позволяют оценить поток частиц и их размеры для частиц от 0,1 мм.

Оценку числа наблюдаемых КО через миделево сечение поверхности или поля зрения средств мониторинга перпендикулярно вектору скорости площадью S с КО заданного диапазона размеров на временном интервале $t - t_0$ можно вычислить с использованием величины плотности потока \bar{Q} [2, 16], рассчитанной для заданных параметров орбиты КА, можно рассчитать по формуле:

$$N = S \cdot \bar{Q} \cdot (t - t_0). \quad (3)$$

Для множества орбитальных средств мониторинга M на разных орбитах N , с средней площадью площади мониторинга \bar{S} , можно оценить среднее количество наблюдений как сумму, по формуле:

$$N_{\Sigma} = \sum_{i=1}^M N_i \bar{S}_i \sum_{j=1}^{N_i} \bar{Q}_j (t - t_0), \quad (4)$$

где N_i – количество КА выделенной группы, \bar{S}_i – характерная площадь мониторинга группы объектов, \bar{Q}_j – среднее значение потока для заданного типа орбит.

Космические средства контактного мониторинга целесообразно располагать на орбитах, пересекающих самые засоренные области ОКП и самые используемые, в особенности на орбитах пилотируемых орбитальных станций. Для обобщенного контроля состояния также возможно размещение КА на слабо эллиптической орбите, которая в процессе эволюции полностью бы пересекала всю область высот функционирующих КА на низких околоземных орбитах. Пример расположения орбит представлен на рисунке 3 [1].

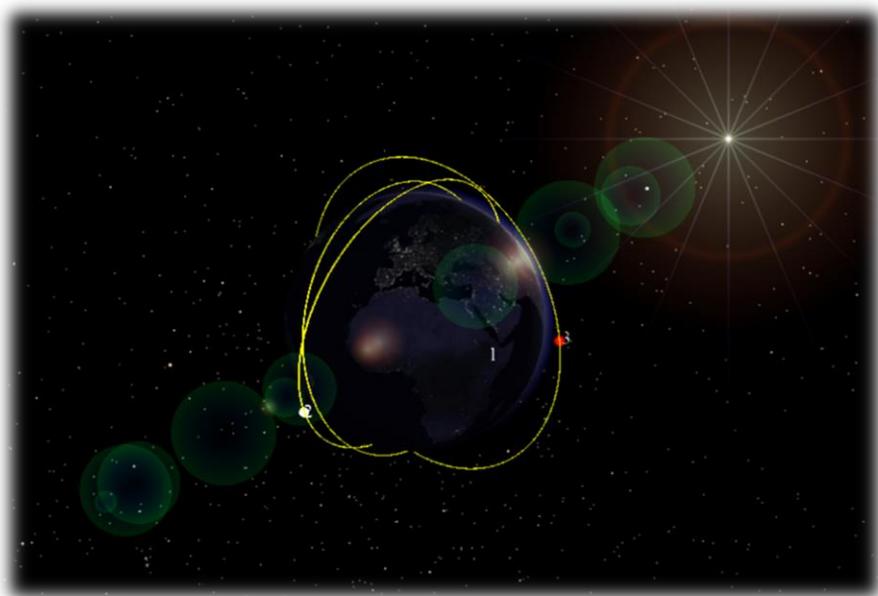


Рисунок 3 – Пример орбитальной группировки контактного мониторинга

Дистанционный мониторинг космическими средствами наиболее эффективен в областях функционирования глобальных навигационных систем (ГНСС) и геостационарной орбиты (ГСО), т.к. за счет существенного снижения расстояния наблюдения, появляется возможность наблюдать некаталогизируемые наземными средствами объекты, тем самым расширив область мониторинга. На рисунке 4 представлен вариант схемы мониторинга области ГСО.

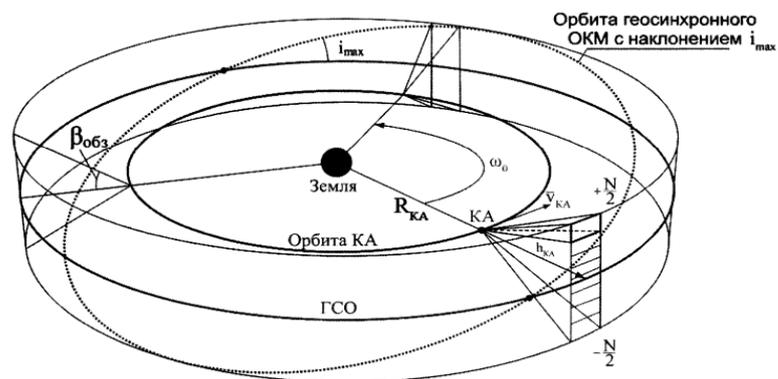


Рисунок 4 – Схема мониторинга КА в окрестности ГСО

С учетом развития проекта Российской орбитальной станции (РОС), целесообразным будет комплексирование контактных и дистанционных средств мониторинга на борту станции. В данном случае будут обеспечены необходимые условия для проведения соответствующих экспериментов и расширена область применения РОС в целом в направлении обеспечения безопасности космических полетов.

Оценка среднегодового количества детектируемых КО для типовых солнечно-синхронных (ССО) орбит представлено в таблице 1

Таблица 1.

Орбита/ Тип	Контактный $S=100 \text{ м}^2$ >1 мм [шт/год]	Дистанционный в зенит >1 см [шт/сут]	Дистанционный по скорости >1 см [шт/сут]
РОС 375 км	3	489	134
ССО 550 км	15	1798	494
ССО 800 км	50	14382	3953

4. Разработка методики оценки эффективности наземных средств мониторинга некаталогизируемого космического мусора

Наземные радиолокационные станции (РЛС) и телескопы должны обеспечить статистические измерения потоков космического мусора на низких и высоких орбитах соответственно.

Основные характеристики РЛС:

- поле зрения (покрываемая область, диапазон по дальности и углу места);
- точность (погрешность в определении параметров КО);
- потребляемая мощность;
- стоимость (капитальные и эксплуатационные затраты, логистика обслуживания).

Основные характеристики телескопов:

- светочувствительность (максимальная видимая звёздная величина);
- точность (погрешность в определении параметров КО);
- количество безоблачных ночей в году;
- стоимость (капитальные и эксплуатационные затраты, логистика обслуживания).

Основная характеристика некаталогизируемых КО, которая используется во всех моделях КМ это плотность потока частиц в зависимости от высоты и широты. Отличия данной зависимости по широте южного и северного полушарий имеются в области средневысоких орбит, где вклад в это отличие вносят высокоэллиптические КО. Однако, данное отличие не является большим и им можно пренебречь. Долготная зависимость имеет отличия также в области средневысоких и геостационарной орбит, соответственно её необходимо определять только для высоких КО. Мониторинг наземными средствами позволяет оценить высоту пролета КО, наклонение, размер, и ряд других параметров.

Оценка ожидаемого числа измерений для наземных средств с использованием модели КМ [16]. Для оценки необходимы: координаты средств, направление и размеры поля зрения. Данные о космическом мусоре заданного диапазона размеров: зависимость концентрации $\rho(h, \varphi)_d$ объектов размером в диапазоне $(d, d+\delta d)$ от высоты и широты; зависимость средней скорости частиц от высоты $\bar{V}(h)$. Расчетная схема представлена на рисунке 5.

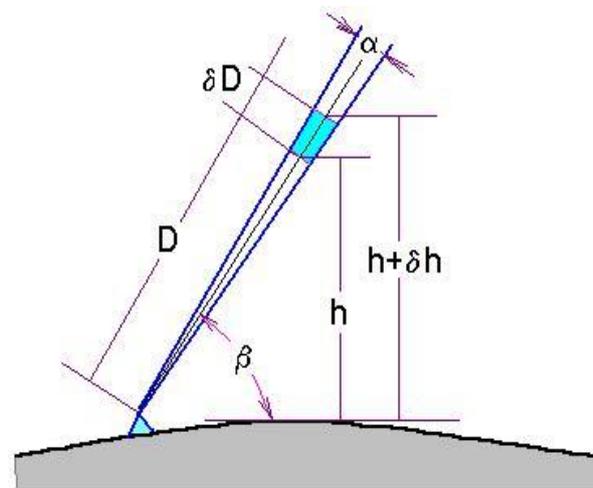


Рисунок 5 - Поле зрения наземного средства мониторинга КО

Поток объектов рассматриваемых размеров через элемент поля зрения рассчитывается по формуле:

$$\delta F(h) = Q(h) \cdot (D \cdot \alpha \cdot \delta D) \cdot C_N(A, \beta) \quad (5)$$

$$Q(h) = \rho[h, \varphi(h)]_d \cdot V(h),$$

$$D \approx h / \sin \beta,$$

$$\delta D \approx \delta h / \sin \beta.$$

Суммарный поток равен сумме потоков через элементы поля зрения

$$F_{\Sigma} = \sum_h \delta F(h) = \sum_h \delta F(h) \quad (6)$$

Изложенная постановка задачи не учитывает возможностей конкретных измерительных средств по обнаружению объектов разного размера и в различных условиях. С учетом этих обстоятельств задача существенно усложняется. Для решения данной задачи с учетом характеристик радиолокаторов и телескопов может использоваться – программа PROOF, в совокупности с моделью КМ MASTER, разработки Европейского космического агентства.

Соответственно, учитывая данные особенности, рациональным минимальным составом наземных средств мониторинга некаталогизируемых объектов в идеальных условиях будет 3 РЛС и 3 телескопа, поля зрения которых будут полностью покрывать области мониторинга ОКП. Схематично расположение наземных средств представлено на рисунках 6 и 7.

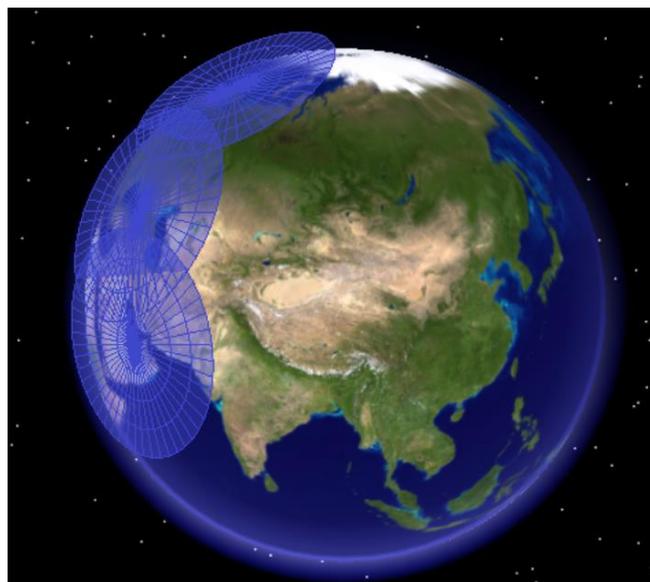


Рисунок 6 – Расположение рациональной наземной системы мониторинга некаталогизируемого КМ из РЛС в северном полушарии

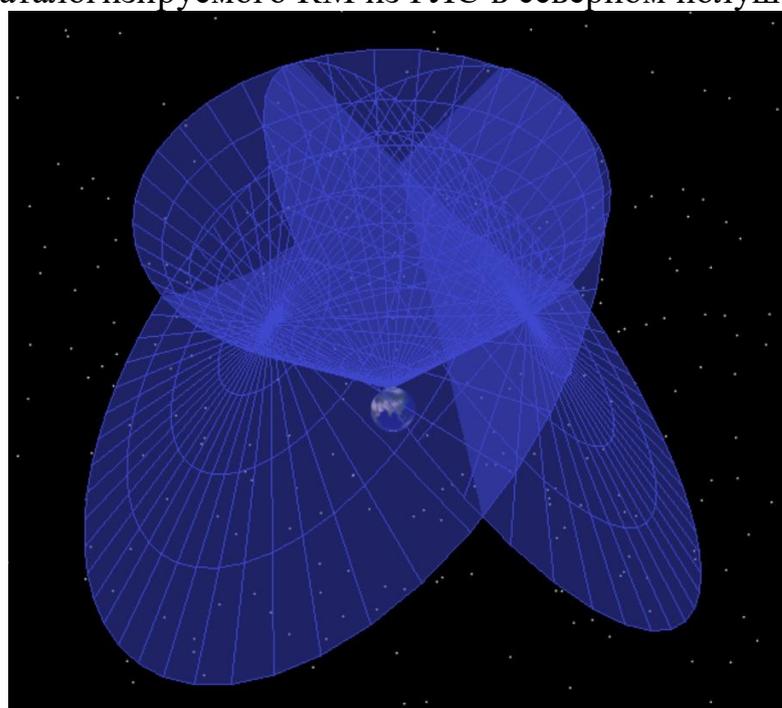


Рисунок 7 – Расположение рациональной наземной системы мониторинга некаталогизируемого КМ из высокочувствительных телескопов в северном полушарии

5. Разработка предложений по количественному и качественному составу средств мониторинга некаталогизируемого космического мусора

С учетом разработанных выше методик и проведенного анализа предлагается следующий состав глобальной системы мониторинга некаталогизированного КМ:

– РЛС, способные детектировать КМ размером более 1 см, которые своими суммарными полями зрения могут накрыть диапазон широт от 0 до 90 градусов и высот над поверхностью Земли до 2000 км;

– Телескопы с чувствительностью, позволяющей детектировать КМ размером 10 см на ГСО, наблюдающие всю дугу геостационарной орбиты и средневысокие орбиты;

– КА дистанционного мониторинга КМ в наиболее засоренных и используемых областях ОКП:

а) в НОО на солнечно-синхронной орбите;

б) в области функционирования ГНСС;

в) в окрестности ГСО;

– КА контактного мониторинга в окрестности орбит пилотируемых станций и наиболее используемых орбит для более полного контроля малоразмерной фракции КМ.

В идеальных условиях минимальное количество средств составляет:

– 3 РЛС, равномерно распределенные по широте;

– 3 телескопа, равномерно распределенные по долготе, на минимально возможных широтах;

– 3 КА дистанционного мониторинга в областях НОО, ГНСС и ГСО;

– КА контактного мониторинга на орбитах РОС, ССО и слабоэллиптической орбите. Минимально одно средство, совмещенное с КА дистанционного мониторинга в области НОО на ССО.

На рисунке 8 представлено рациональное расположение наземных средств мониторинга на территории Российской Федерации и стран БРИКС. Для практически полного мониторинга необходимо расположить один телескоп в Южной Америке для полного контроля геостационарной орбиты и одну РЛС в окрестности экватора, на Ближнем Востоке.

На рисунке 9 представлены орбиты минимально необходимых космических средств мониторинга дистанционного и контактного типов. На низкой орбите рациональным будет размещение их на РОС с возможностью отработки и создания в дальнейшем специализированных КА. Для областей ГНСС и ГСО необходимы специализированные КА, при этом наиболее приоритетным является мониторинг области ГСО.

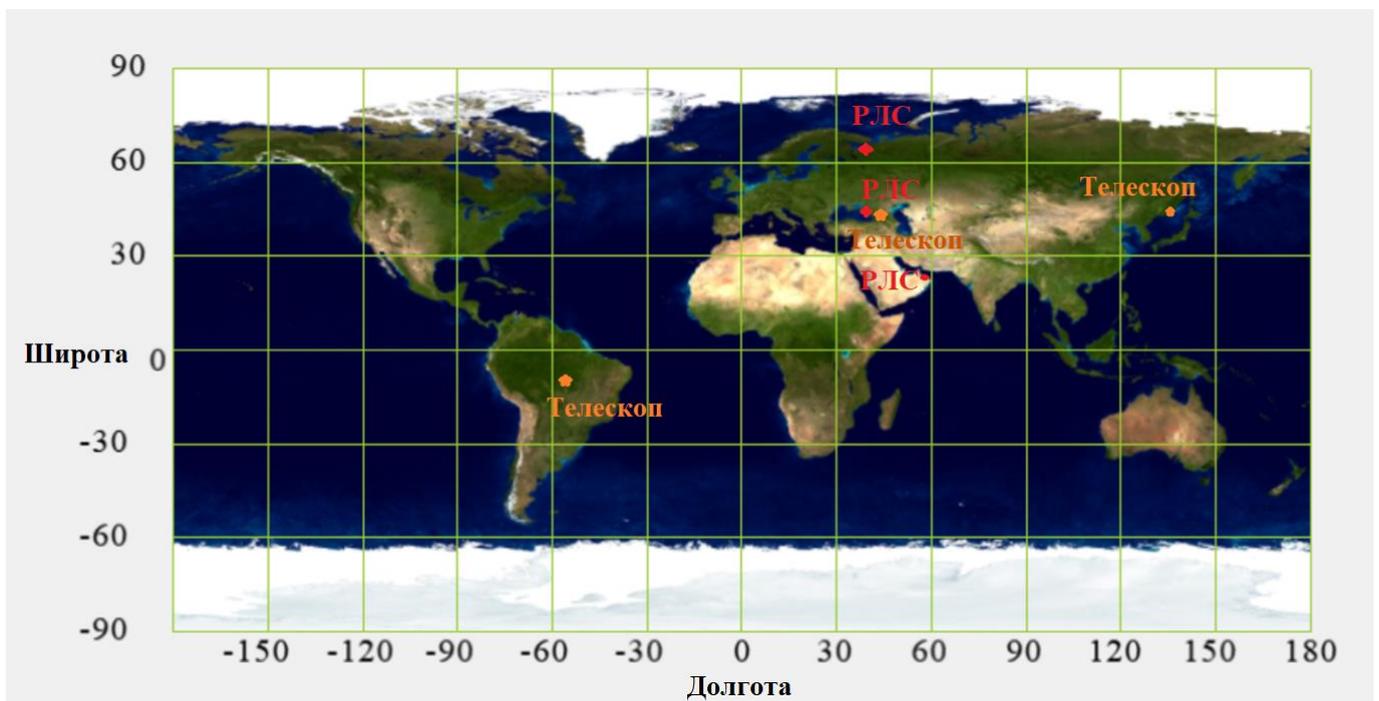


Рисунок 8 – Расположение наземных средств мониторинга некаталогизируемого КМ

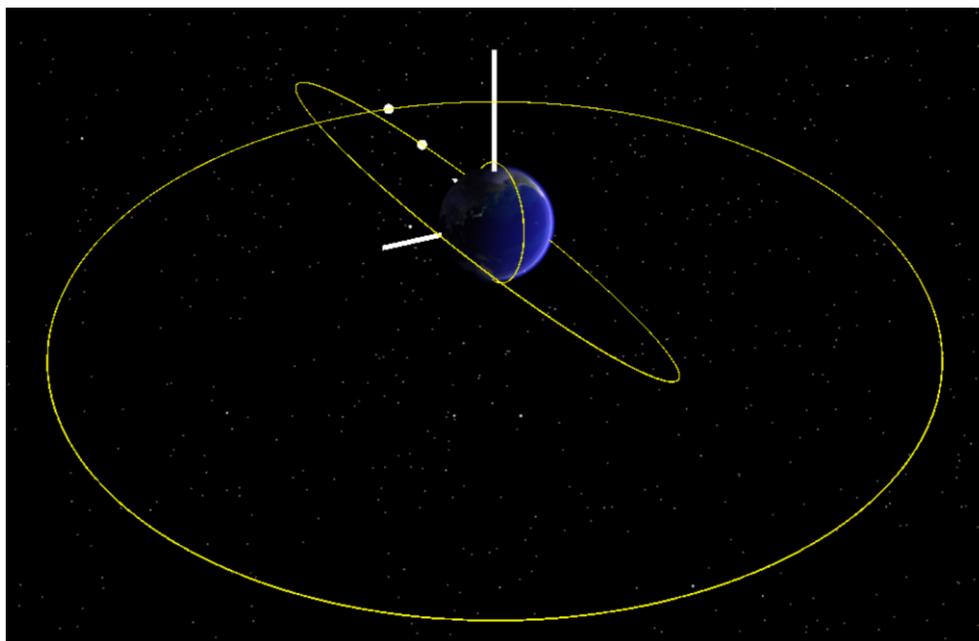


Рисунок 9 – Орбиты КА космических средств системы мониторинга некаталогизированного КМ

Выводы

– Разработаны методики оценки эффективности средств мониторинга некаталогизированного КМ и системы в целом, учитывающие специфику некаталогизируемого КМ, технические особенности средств, а также их размещение.

– Показано, что комплексное применение наземных и космических средств существенно повышает полноту мониторинга некаталогизированного КМ.

– Представлены предложения по созданию комплексной системы мониторинга некаталогизируемого КМ, состоящей из 6 наземных средств наблюдения, 3 космических аппаратов дистанционного мониторинга и нескольких КА контактного мониторинга на орбитах интереса.

Работа является теоретической базой и вносит вклад в развитие методов оценки эффективности средств мониторинга некаталогизированного КМ с учётом множества факторов.

Перспективы дальнейших исследований состоят в использовании больших данных и распределённых вычислительных систем для имитационного моделирования функционирования системы.

Список источников

1. Усовик И.В. Системный анализ проблем космического мусора. - М: Изд-во МАИ, 2023. - 86 с.
2. Усовик И.В. Разработка методов и алгоритмов моделирования потоков космического мусора и метеороидов для решения прикладных задач ограничения техногенного засорения околоземного космического пространства: дис. ... доктора техн. наук. Москва, 2024. – 213 с.
3. ESA's Annual Space Environment Report. Produced with the DISCOS Database. Available at: https://www.sdo.esoc.esa.int/environment_report/Space_Environment_Report_latest.pdf
4. Smirnov N.N., Kiselev A.B., Nikitin V.F. et al. Space traffic hazards from orbital debris mitigation strategies // Acta Astronautica. 2015. V. 109, P. 144-152. DOI: [10.1016/j.actaastro.2014.09.014](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2014.09.014)
5. Пикалов Р.С., Юдинцев В.В. Обзор и выбор средств увода крупногабаритного космического мусора // Труды МАИ. 2018. № 100. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=93299>
6. Баркова М.Е. Переработка техногенного космического мусора в топливо на низких орбитах // Труды МАИ. 2020. № 110. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=112927>. DOI: [10.34759/trd-2020-110-17](https://doi.org/10.34759/trd-2020-110-17)

7. Райкунов Г.Г. Космический мусор. Кн. 2. Предупреждение образования космического мусора. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 188 с.
8. Carmen Pardini, Luciano Anselmo, Using the space debris flux to assess the criticality of the environment in low Earth orbit // Acta Astronautica. 2022. V. 198, P. 756-760. DOI: [10.1016/j.actaastro.2022.05.045](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.05.045)
9. Капелетти Ш., Гуадуччи Ф., Паолилло Ф., Ридолфи Л., Баттаглиере М.Л., Грациани Ф., Пьержентили Ф., Сантони Ф. Группировка микроспутников для обнаружения космического мусора // Труды МАИ. 2009. № 34. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=8237>
10. Вениаминов С.С., Червонов А.М. Космический мусор – угроза человечеству. – М.: Изд-во ИКИ РАН, 2012. – 192 с.
11. Соколов Н.Л. Метод определения орбитальных параметров космического мусора бортовыми средствами космического аппарата // Труды МАИ. 2014. № 77. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=52950>
12. Макаров Ю.Н. Мониторинг техногенного засорения околоземного пространства и предупреждение об опасных ситуациях, создаваемых космическим мусором. - М.: ЦНИИмаш, 2015. – 244 с.
13. Вениаминов С.С. Космический мусор. Техногенное засорение космоса и его последствия. - М.: ИКИ РАН, 2023. - 204 с.
14. Смирнов Н.Н. Эволюция «Космического мусора» в околоземном космическом пространстве // Успехи механики. 2002. Т. 1, № 2. С. 13-104.
15. Klinkrad H. Space Debris Models and Risk Analysis. Chichester, UK: Praxis Publishing, 2006. P. 430.

16. Назаренко А.И. Моделирование космического мусора. - М.: ИКИ РАН, 2013. – 216 с.
17. Nazarenko A.I. Prediction of the space debris spatial distribution on the basis of the evolution equations // Acta Astronautica. 2014, V. 100 (1), P. 47-56. DOI: [10.1016/j.actaastro.2014.07.004](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2014.07.004)
18. Назаренко А.И. Задачи стохастической космодинамики. - М.: Леонард, 2018. – 352 с.
19. Малышев В.В., Разумов Д.А. Методика многокритериальной оптимизации портфеля проектов больших сложных систем // Автоматизация в промышленности. 2023. Т. 5, С. 36-43.
20. Кузнецова С.В., Семенов А.С. Цифровые двойники в аэрокосмической промышленности: объектно-ориентированный подход // Труды МАИ. 2023. № 131. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=175930>. DOI: [10.34759/trd-2023-131-24](https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-24)

References

1. Usovik I.V. *Sistemnyi analiz problem kosmicheskogo musora* (System analysis of space debris problems). Moscow: Izd-vo MAI Publ., 2023. 86 p.
2. Usovik I.V. *Razrabotka metodov i algoritmov modelirovaniya potokov kosmicheskogo musora i meteoroidov dlya resheniya prikladnykh zadach ogranicheniya tekhnogenogo zasoreniya okolozemnogo kosmicheskogo prostranstva* (Development of methods and algorithms for modeling flows of space debris and meteoroids to solve applied problems of limiting man-made pollution of near-Earth space): Doctor's thesis. Moscow, 2024. 213 p.

3. *ESA's Annual Space Environment Report. Produced with the DISCOS Database.*
Available at: https://www.sdo.esoc.esa.int/environment_report/Space_Environment_Report_latest.pdf
4. Smirnov N.N., Kiselev A.B., Nikitin V.F. et al. Space traffic hazards from orbital debris mitigation strategies. *Acta Astronautica*. 2015. V. 109, P. 144-152. DOI: [10.1016/j.actaastro.2014.09.014](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2014.09.014)
5. Pikalov R.S., Yudintsev V.V. Bulky space debris removal means review and selection. *Trudy MAI*. 2018. No. 100. (In Russ.). URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=93299>
6. Barkova M.E. Technogenic space debris reprocessing into fuel on low orbits. *Trudy MAI*. 2020. No. 110. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=112927>. DOI: [10.34759/trd-2020-110-17](https://doi.org/10.34759/trd-2020-110-17)
7. Raikunov G.G. *Kosmicheskii musor. Kn. 2. Preduprezhdenie obrazovaniya kosmicheskogo musora* (Space debris. Book 2. Space debris prevention). Moscow: Fizmatlit Publ., 2014. 188 p.
8. Carmen Pardini, Luciano Anselmo, Using the space debris flux to assess the criticality of the environment in low Earth orbit. *Acta Astronautica*. 2022. V. 198, P. 756-760. DOI: [10.1016/j.actaastro.2022.05.045](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.05.045)
9. Kapeletti Sh., Guaduchchi F., Paolillo F., Ridolfi L., Battagliere M.L., Gratsiani F., P'erzhentili F., Santoni F. Microsatellites Formation Flying for In-Situ Space Debris Detection. *Trudy MAI*. 2009. No. 34. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=8237>

10. Veniaminov S.S., Chervonov A.M. *Kosmicheskii musor – ugroza chelovechestvu* (Space debris is a threat to humanity). Moscow: Izd-vo IKI RAN Publ., 2012. 192 p.
11. Sokolov N.L. Space debris orbit determination method with the use of onboard facilities of a spacecraft. *Trudy MAI*. 2014. No. 77. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=52950>
12. Makarov Yu.N. *Monitoring tekhnogenogo zasoreniya okolozemnogo prostranstva i preduprezhdenie ob opasnykh situatsiyakh, sozdavaemykh kosmicheskimi musorom* (Monitoring of technogenic contamination of near-Earth space and warning about dangerous situations created by space debris). Moscow: TsNIIImash Publ., 2015. 244 p.
13. Veniaminov S.S. *Kosmicheskii musor. Tekhnogennoe zasorenie kosmosa i ego posledstviya* (Space Debris. Man-Made Space Pollution and Its Consequences). Moscow: IKI RAN Publ., 2023. 204 p.
14. Smirnov N.N. Evolution of "Cosmic Waste" in Near-Earth Cosmic Space Transport. *Uspekhi mekhaniki*. 2002. V. 1, No 2. P. 13-104. (In Russ.)
15. Klinkrad H. *Space Debris Models and Risk Analysis*. Chichester, UK: Praxis Publishing, 2006. P. 430.
16. Nazarenko A.I. *Modelirovanie kosmicheskogo musora* (Modeling of space debris), Moscow: IKI RAN Publ., 2013. 216 p.
17. Nazarenko A.I. Prediction of the space debris spatial distribution on the basis of the evolution equations. *Acta Astronautica*. 2014, V. 100 (1), P. 47-56. DOI: [10.1016/j.actaastro.2014.07.004](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2014.07.004)
18. Nazarenko A.I. *Zadachi stokhasticheskoi kosmodinamiki* (Problems of stochastic cosmodynamics). Moscow: Leonard Publ., 2018. 352 p.

19. Malyshev V.V., Razumov D.A. A procedure for multicriteria optimization of project portfolio of large complex systems. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*. 2023. V. 5, P. 36-43. (In Russ.)
20. Kuznetsova S.V., Semenov A.S. Digital twins in the aerospace industry: an object-oriented approach. *Trudy MAI*. 2023. No. 131. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=175930>. DOI: [10.34759/trd-2023-131-24](https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-24)

Статья поступила в редакцию 20.01.2025

Одобрена после рецензирования 25.01.2025

Принята к публикации 25.06.2025

The article was submitted on 20.01.2025; approved after reviewing on 25.01.2025; accepted for publication on 25.06.2025