

Научная статья

УДК 629.78

URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=177621>

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА НЕКАТАЛОГИЗИРУЕМОГО КОСМИЧЕСОГО МУСОРА

Игорь Вячеславович Усовик^{1✉}, Александр Андреевич Морозов²

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

Москва, Россия

¹ usovikiv@mail.ru ✉

² aamorozko@mail.ru

Аннотация. Представлены текущее состояние мониторинга некаталогизируемого космического мусора, прогноз его количества в области низких околоземных орбит, оценка возможностей по активному удалению малоразмерного космического мусора, предложения по созданию и развитию системы его мониторинга.

Ключевые слова: безопасность космических полетов, космический мусор, мониторинг некаталогизируемого космического мусора, контактный мониторинг, дистанционный мониторинг, устойчивость космической деятельности

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта РНФ № 23-79-01252, <https://rscf.ru/project/23-79-01252/>

Для цитирования: Усовик И.В., Морозов А.А. Разработка системы мониторинга некаталогизируемого космического мусора // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 4. С. 202–209. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=177621>

Original article

MONITORING SYSTEM DEVELOPMENT FOR NON-CATALOGUED SPACE DEBRIS

Igor' V. Usovik^{1✉}, Aleksandr A. Morozov²

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

Moscow, Russia

¹ usovikiv@mail.ru ✉

² aamorozko@mail.ru

Abstract

The number of functioning spacecraft in orbits exceeds 7000, the number of manned flights is growing, and manned missions to the Moon are being planned as well. Space debris (SD) poses an increasing threat to the functioning spacecraft every year, greatest risks relate herewith to non-catalogued SD. The existing monitoring facilities are not enough for understanding the situation and verifying the SD models. To ensure the space flights safety, as well as comprehensive awareness of the near-Earth outer space (NES), it is necessary to. An integrated monitoring system development, which would ensure enough volume of information in both space and time to form actual SD models and understand the SD environment in the NES, is necessary to ensure the space flights safety, as well as comprehensive apprehension of the state of the near-Earth outer space (NES).

A review of literature has revealed that to date separate monitoring facilities for non-catalogued SD are being developed, though the task of the system development is not being solved herewith. Monitoring by the ground facilities allows estimating the SD flight altitude, inclination and size. Monitoring by remote-type space facilities allows assessing sizes and orbital parameters for the particle from the 5 cm size. Monitoring by contact-type space facilities allows estimating the stream of the SD particles and their size. As it can be seen from specifics of various types of the SD monitoring, application of all possible types will allow obtaining the most complete amount of data on the situation the in near-Earth space to verify the SD model.

The article presents the results of the small-sized SD forecasting, which demonstrate that the increase in number of non-catalogued SD exceeds growth of catalogued SD, and its change in local distribution in space herewith is less susceptible to changes due to inertia of the processes.

The model example shows that the solution of non-catalogued SD active removal problem is not feasible in near future. The estimated intensity of the NES cleaning from the SD is negligible. It does not ensure the NES protection from monotonous growth of objects, even from consequences of collisions.

The article presents proposals on developing comprehensive monitoring system for non-catalogued SD, consisting of ground-based monitoring facilities, remote and contact monitoring spacecraft, which provide together the maximum amount of information possible today.

Appropriate techniques development is necessary for determining ground-based facilities optimal placement, spacecraft orbits and their target equipment characteristics.

Keywords: space flight safety, space debris, non-catalogued space debris monitoring, contact monitoring, remote monitoring, space activities reliability

Funding: the study was performed at the exence of the Russian Science Foundation grant no. 23-79-01252, <https://rscf.ru/project/23-79-01252/>

For citation: Usovik I.V., Morozov A.A. Monitoring System Development for Non-Catalogued Space Debris. *Aerospace MAI Journal*, 2023, vol. 30, no. 4, pp. 202–209. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=177621>

Введение

Количество функционирующих космических аппаратов (КА) на орбитах превышает 7000, растет количество пилотируемых полетов, а также планируются пилотируемые миссии к Луне. Все большие риски для новых космических программ представляет космический мусор (КМ). Некаталогизируемые объекты КМ вносят наибольший вклад в эти риски (рис. 1), так как часть их способна привести к критическим отказам, а другая часть характеризуется большой частотой столкновений, в совокупности снижающих характеристики подсистем. Для обеспечения безопасности космических полетов, а также исчерпывающей осведомленности о состоянии околоземного космического пространства (ОКП) необходимо создание и развитие специализированных систем мониторинга, предоставляющих достаточный объем информации в пространстве и

времени для формирования актуальных моделей космического мусора.

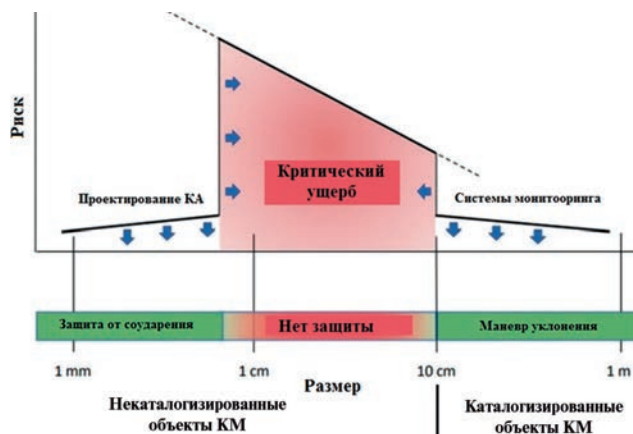


Рис. 1. Обобщенный график рисков для КА от КМ

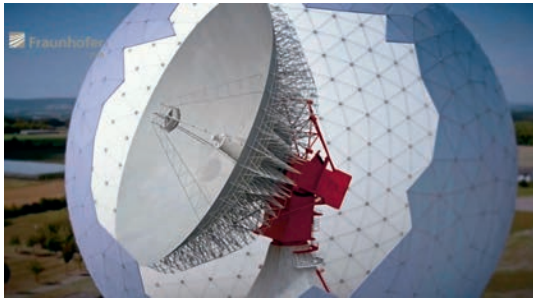


Рис. 2. Радар TIRA

Работы в данной предметной области ведутся с 80-х гг. XX в. [1–10]. Для решения поставленных задач мониторинга малоразмерных объектов КМ используются мощные радиолокационные станции (РЛС) и контактные датчики на космических аппаратах (КА). На рис. 2 представлен немецкий радар Tracking & Imaging Radar (TIRA) [2], регулярно проводящий измерения малоразмерного КМ.

Наибольший объем контактных измерений был получен на КА Long Duration Exposure Facility (LDEF) [2]. Он был выведен на орбиту в 1984 г. и находился к ОКП более 5 лет, после чего в 1990 г. был возвращен на Землю с помощью шаттла «Колумбия». На рис. 3 представлено фото этого КА.

Как видно из современных публикаций [11–14], базовые основы решения задач мониторинга



Рис. 3. Космический аппарат LDEF

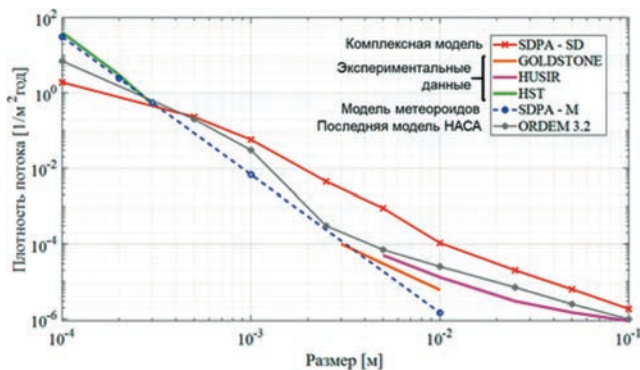


Рис. 4. Сравнение потоков КМ по актуальным на 2022 г. моделям и экспериментальным данным

остаются прежними, расширились возможности по применению КА мониторинга, оборудованных оптической и радиолокационной аппаратурой. Исследования по данной тематике показывают, что характеристики детектируемых объектов не изменяются, а потребности в объеме и периодичности наблюдения ОКП постоянно растут [8]. Отсутствие существенного наращивания количества средств мониторинга некаталогизируемого КМ объясняется их большой стоимостью. Развитие получали отдельные средства мониторинга наземного и комического базирования, на основе данных которых разработаны все существующие сегодня модели КМ (рис. 4).

Большой разброс величин потоков КМ во многом связан с отсутствием достаточного объема экспериментальных данных мониторинга. Однако задача создания комплексной системы мониторинга некаталогизируемого КМ ранее не ставилась.

1. Прогноз концентрации некаталогизируемого космического мусора в области низких околоземных орбит

Одной из основных характеристик техногенного засорения ОКП является пространственная концентрация космических объектов (КО). Для каталогизируемых КО [15, 16] она вычисляется по данным каталога с использованием формулы

$$\rho(h, \varphi) = \frac{\Delta N(h, h + \Delta h, \varphi, \varphi + \Delta \varphi)}{2\pi \cdot (R + h)^2 \cdot \cos \varphi \cdot \Delta h \cdot \Delta \varphi}, \quad (1)$$

где $\Delta N(h, h + \Delta h)$ – количество объектов в пространстве, ограниченном высотами и широтами. Для расчета концентрации каталогизируемых объектов ΔN рассчитывается по всем объектам в каталоге с использованием модели движения, для некаталогизируемых объектов КМ используется формула

$$\Delta N(h, h + \Delta h, \varphi + \Delta \varphi) = N_{\Sigma} \int_i \int_{h_p} \int_e \Delta P p(h_p) p(e|h_p) p(i|h_p) dh_p dedi, \quad (2)$$

где N_{Σ} – оценка количества КО заданного диапазона на размеров; $p(h_p)$, $p(e|h_p)$, $p(i|h_p)$ – статистические плотности распределения величин трех элементов орбит: высоты перигея, эксцентриситета и наклона соответственно; ΔP – вероятность попадания КО в область $(h, h + \Delta h, \varphi, \varphi + \Delta \varphi)$, рассчитываемая с использованием законов небесной механики.

На рис. 5 представлена зависимость концентрации каталогизируемых КО от широты и высоты на 2022 г. Характерным отличием данной зависимости от зависимости 2017 г. [13] является наличие новых локальных максимумов по высоте и широте для

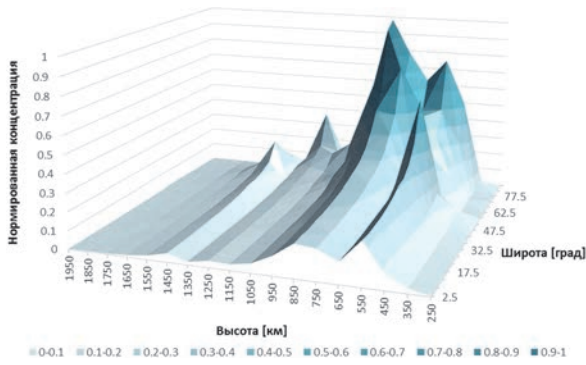


Рис. 5. Зависимость концентрации каталогизируемых КО на 2022 г. в области низких околоземных орбит (НОО) от высоты и широты. Максимальное значение $1.695 \cdot 10^{-07} [1/\text{км}^3]$

областей, куда запускаются малые космические аппараты (МКА), ОГ StarLink и OneWeb. По состоянию на 2022 г. общая картина существенно изменилась, глобальный максимум концентрации по высоте располагается в окрестности высоты 550 км, на высотах системы Starlink. Малоразмерные, некаталогизируемые фракции КМ не так быстро изменяются в результате резкого наращивания запусков МКА и больших орбитальных группировок (ОГ).

На рис. 6 представлена зависимость концентрации КО размером 0,01–0,025 см на 2022 г., рассчитанная по новой модели КМ. Зависимость концентрации не сильно отличается от аналогичной для каталогизируемых КО в 2017 г. [13]. Это связано с инерционностью процессов образования и накопления КМ малоразмерных фракций в результате воздействия различных факторов.

Прогнозирование осуществлялось с использованием модели в частных производных, описанной в [11]:

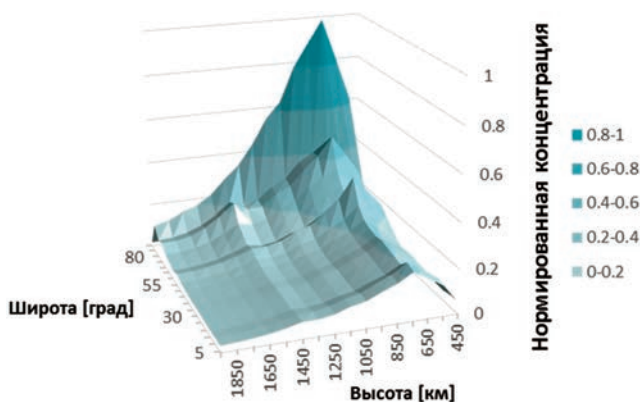


Рис. 6. Нормированная концентрация КО размером 0,01–0,025 см на 2022 г. Максимальное значение $4.074 [1/\text{км}^3]$

$$\frac{\partial p(h,t)}{\partial t} = V(h,t) \cdot \frac{\partial p(h,t)}{\partial h} + p(h,t) \cdot \frac{\partial V(h,t)}{\partial h} + p(h,t)_{new}, \tag{3}$$

где $V(h,t)$ – скорость уменьшения высоты перигея объектов с высотой h ; $p(h,t)$ – распределения КО по высоте перигея; $p(h,t)_{new}$ – распределения КО, образующихся в результате запусков, разрушений и др.

На рис. 7 представлены графики оценки и прогноза количества объектов КМ размером 0,1–1 см и 1–10 см. Прогнозы сделаны по умеренным сценариям, в соответствии с которыми рост количества некаталогизируемых объектов превышает рост количества каталогизируемых КО. В условиях существенного роста числа запусков КА этот рост становится еще большим [17].

2. Оценка возможности очистки ОКП от некаталогизируемого космического мусора

Представим себе, что существует некий материал, при использовании которого для покрытия внешней поверхности КА обеспечивается «прилипание» мелких частиц КМ к внешней поверхности (без образования новых фрагментов). Применение такого рода технологии позволит прекратить образование мелких частиц при столкновениях и уменьшить число существующих в ОКП частиц, которые после «прилипания» становятся частью КА.

Рассмотрим простейший модельный случай. Запущен КА, который движется по орбите с высотой h . Площадь поперечного (миделева) сечения КА равна S . Концентрацию мелких частиц КМ на высоте полета КА обозначим как ρ . Из принятого допущения следует, что при столкновении данного КА с мелкой частицей КМ она становится частью КА, т. е. исчезает как отдельный объект в ОКП, и что при этом новые мелкие фрагменты не образу-

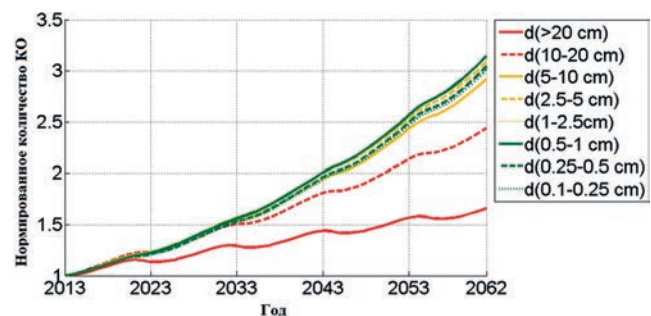


Рис. 7. Прогноз нормированного количества КМ различных размеров

ются. Тем самым обеспечивается двойной эффект: очистка ОКП от существующих объектов и прекращение образования новых частиц в результате данного столкновения.

Оценим число частиц N_{col} , с которыми столкнется данный КА на интервале времени t , и сравним эту оценку с общим числом частиц N_h в окрестности его траектории, с которыми он мог бы столкнуться на достаточно большом интервале времени.

Для определения первой оценки применим известную формулу

$$N_{col} = \rho \cdot V_{rel} \cdot S \cdot t. \quad (4)$$

Здесь V_{rel} — относительная скорость при столкновении.

Для определения второй оценки (N_h) используем соотношение между числом частиц, их концентрацией и объемом области пространства U :

$$N_h = \rho \cdot U. \quad (5)$$

В качестве объема области пространства используем объем «бублика» с площадью сечения S . Это тот объем, в котором находился спутник при его движении на интервале времени одного витка:

$$U_1 = 2\pi \cdot (R+h) \cdot S. \quad (6)$$

В результате получаем

$$N_{h_1} = \rho \cdot 2\pi \cdot (R+h) \cdot S. \quad (7)$$

Приравнивание оценок (4) и (7) приводит к уравнению

$$\rho \cdot V_{rel} \cdot S \cdot t_1 = \rho \cdot 2\pi \cdot (R+h) \cdot S,$$

из которого легко определяется время

$$t_1 = \frac{2\pi \cdot (R+h)}{V_{rel}}. \quad (8)$$

Это интервал времени, в течение которого спутник с рассматриваемым покрытием очищает область пространства объемом (6) от частиц космического мусора. Важной особенностью оценки (8) является то, что она не зависит от концентрации КМ ρ и площади миделевого сечения спутника S . Формула пригодна для оценки последствий тех столкновений, при которых спутник не разрушается (не катастрофические столкновения).

При расчете по формуле (8) примем: $(R+h) = 7000$ км, $V_{rel} = 12,2$ км/с. Получим

$$t_1 \approx 3600 \text{ с} = 1 \text{ ч} = 0,042 \text{ сут.} \quad (9)$$

Объем области пространства (6) является относительно небольшим. Он намного меньше объема некоторого сферического слоя с высотами h

и $h + \Delta h$. Объем этого сферического слоя равен

$$U_{\Delta h} \approx 4\pi \cdot (R+h)^2 \cdot \Delta h. \quad (10)$$

Очистка от КМ именно такой области ОКП представляет практический интерес. Оценим соотношение объемов (10) и (6). При расчетах примем площадь миделевого сечения спутника $S = 0,25$ м² и толщину сферического слоя $\Delta h = 100$ км. Получим

$$k = \frac{U_{\Delta h}}{U_1} \approx \frac{4\pi \cdot (R+h)^2 \cdot \Delta h}{2\pi \cdot (R+h) \cdot S} = \frac{2 \cdot (R+h) \cdot \Delta h}{S} = \frac{2 \cdot 7000 \cdot 100}{0,25 \cdot 10^{-6}} = 5,6 \cdot 10^{12}. \quad (11)$$

Физический смысл этого коэффициента в том, что именно на эту величину надо умножить интервал времени (9), чтобы определить минимальное время, в течение которого один спутник может очистить от КМ область пространства объемом (10). Если в указанном сферическом слое летает $n = 100$ таких спутников с рассматриваемым покрытием, то время полной очистки этого слоя от КМ уменьшится в n раз. Таким образом, время очистки от КМ рассматриваемого сферического слоя составляет не менее

$$t_2 = \frac{t_1 \cdot k}{n} \approx \frac{0,042 \cdot 5,6 \cdot 10^{12}}{100} = 0,235 \cdot 10^9 \text{ суток} = 640 \cdot 10^3 \text{ лет.} \quad (12)$$

Такая интенсивность очистки ОКП от космического мусора является ничтожно малой. Она не обеспечивает защиту ОКП от монотонного роста числа объектов даже в результате столкновений.

Такой упрощенный расчет говорит о том факте, что искусственное очищение ОКП от некаталогизируемого КМ сегодня нереализуемо, актуальным в ближайшей перспективе является активное удаление крупногабаритного КМ [18, 19], поэтому один из основных путей снижения риска от некаталогизируемого КМ — создание комплексной системы его мониторинга и верификация моделей КМ.

3. Предложения по созданию и развитию систем мониторинга

Для мониторинга некаталогизируемого КМ используются различные средства:

- мониторинг наземными средствами позволяет оценить высоту пролета КО, наклонение, размер;
- 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.

Как видно из вышесказанного, применение всех средств мониторинга некаталогизируемого КМ предоставит возможность получить наиболее полный объем данных о ситуации в ОКП для уточнения модели КМ.

Для мониторинга радиолокационными средствами в первом приближении целесообразно иметь средства на экваторе, чтобы осуществлять мониторинг всех наклонений орбит, и максимально высоко по широте, чтобы наблюдать объекты в областях с максимальной концентрацией КМ, что позволит наиболее точно оценивать ситуацию в самых засоренных областях ОКП (рис. 8).

Космические средства контактного мониторинга целесообразно расположить на орбитах, пересекающих самые засоренные и самые используемые области ОКП, в особенности на орбитах пилотируемых орбитальных станций (рис. 9). Для обобщенного контроля состояния также возможно размещение КА на слабоэллиптической орбите, которая в процессе эволюции полностью бы пересекала всю область высот функционирующих КА на низких околоземных орбитах.

Дистанционный мониторинг космическими средствами наиболее эффективен в области геостационарной орбиты (ГСО), так как за счет существенного уменьшения расстояния наблюдения появляется возможность наблюдать некаталогизируемые наземными средствами объекты (рис. 10).

Создание методик оценки эффективности и оптимизации [20] средств мониторинга некаталогизируемого КМ позволит более конкретно определить его расположение и орбиты, а также характеристики средств мониторинга, с учетом имеющихся ограничений.

Выводы

1. Представлен обзор исследований в области

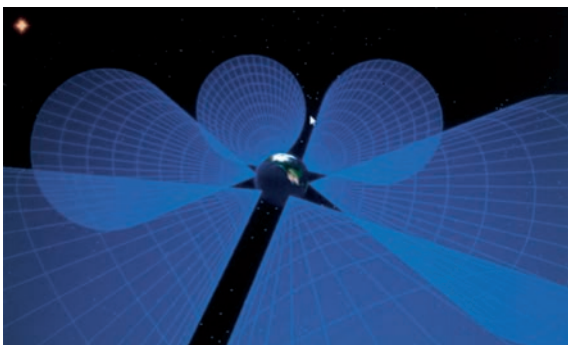


Рис. 8. Пример расположения радиолокационных средств мониторинга

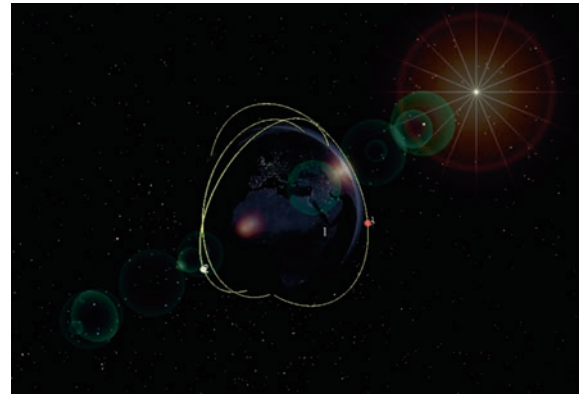


Рис. 9. Пример орбитальной группировки контактного мониторинга

мониторинга некаталогизируемого космического мусора.

2. Приводятся обобщенные сведения о рисках, создаваемых некаталогизируемым космическим мусором, о системах его мониторинга.

3. Оценены возможности активной очистки ОКП от некаталогизируемого КМ, сделан вывод о ее нереализуемости в ближайшем будущем.

4. Сформулированы предложения по созданию комплексной системы мониторинга некаталогизируемого КМ, состоящей из наземных средств наблюдения и космических аппаратов дистанционного и контактного мониторинга.

Список источников

1. Kessler D.J., Cour-Palais B.G. Collision Frequency of Artificial Satellites: The Creation of Debris Belt // Journal of Geophysical Research. 1978. Vol. 83. No. A6, pp. 2637-2646. DOI: 10.1029/JA083iA06p02637
2. Kessler D.J. Collisional cascading: The limits of population growth in low Earth orbit // Advances in Space Research. 1991. Vol.11. No. 12, pp. 63-66. DOI: 10.1016/0273-1177(91)90543-S

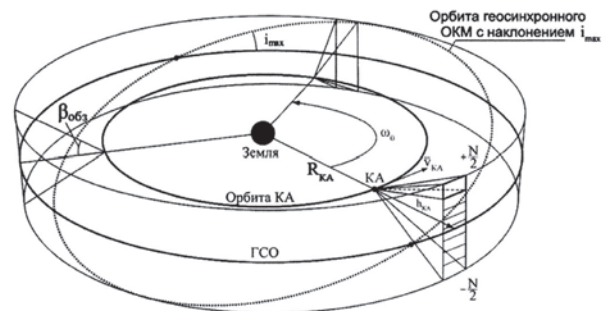


Рис. 10. Схема мониторинга КМ в окрестности ГСО

3. McDonell J.A.M. The LEO microparticulate environment: LDEF's 5.75 year perspective on orbital space debris and meteoroids // 1st European Conference on Space Debris (ESA SD-01, 05-07 March 1993; Darmstadt).
4. Смирнов Н.Н. Эволюция «Космического мусора» в околоземном космическом пространстве // Успехи механики. 2002. Т. 1. № 2. С. 37–104.
5. Klinkrad H. Space Debris: Models and Risk Analysis. - Chichester, UK: Springer Praxis Publishing, 2006, 430 p. DOI: 10.1007/3-540-37674-7
6. Вениаминов С.С., Червонов А.М. Космический мусор — угроза человечеству. — М.: ИКИ РАН, 2013. — 207 с.
7. Назаренко А.И. Моделирование космического мусора. — М.: ИКИ РАН, 2013. 213 с.
8. Агапов В.М., Головкин А.В., Емельянов В.А. и др. Космический мусор: В 2-х кн. — М.: Физматлит, 2014. — (245+188) с.
9. Назаренко А.И. Погрешности прогнозирования движения спутников в гравитационном поле Земли. — М.: ИКИ РАН, 2010. — 225 с.
10. Smirnov N.N., Kiselev A.B., Smirnova M.N., Nikitin V.F. Space traffic hazards from orbital debris mitigation strategies // Acta Astronautica. 2015. Vol. 109, pp. 144-152. DOI: 10.1016/j.actaastro.2014.09.014
11. Назаренко А.И. Задачи стохастической космодинамики: математические методы и алгоритмы решения. — М.: URSS: Ленанд, 2018. — 349 с.
12. Макаров Ю.Н. (ред.) Мониторинг техногенного засорения околоземного пространства и предупреждение об опасных ситуациях, создаваемых космическим мусором: Монография. — М.: ЦНИИмаш, 2015. — 244 с.
13. Миронов В.В., Муртазов А.К., Усовик И.В. Системные методы мониторинга околоземного космического пространства. — Рязань: Коняхин А. В. (Book Jet), 2018. — 310 с.
14. Усовик И.В. Системный анализ проблем космического мусора. — М: Изд-во МАИ, 2023. — 86 с.
15. Space-track, space-track.org
16. ESA'S Annual space environment report. 2023, <http://sdup.esa.int>
17. NASA Orbital Debris Program Office. Quarterly News, <http://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/newsletter/newsletter.html>
18. Усовик И.В., Дарных В.В., Малышев В.В. Методика оценки эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит с учетом взаимных столкновений и активного удаления космического мусора // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22. № 3. С. 54–62.
19. Усовик И.В., Назаренко А.И., Морозов А.А. Оптимальная фильтрация измерений — перспективный метод повышения точности оценок времени падения и вероятности столкновения космических объектов // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 3. С. 191–199. DOI: 10.34759/vst-2022-3-191-199
20. Разумов Д.А., Малышев В.В. Методика многокритериальной оптимизации портфеля проектов больших сложных систем // Автоматизация в промышленности. 2023. № 5. С. 36–43. DOI: 10.25728/avtprom.2023.05.09

References

1. Kessler D.J., Cour-Palais B.G. Collision Frequency of Artificial Satellites: The Creation of Debris Belt. *Journal of Geophysical Research*, 1978, vol. 83, no. A6, pp. 2637-2646. DOI: 10.1029/JA083iA06p02637
2. Kessler D.J. Collisional cascading: The limits of population growth in low Earth orbit. *Advances in Space Research*, 1991, vol.11, no. 12, pp. 63-66. DOI: 10.1016/0273-1177(91)90543-S
3. McDonell J.A.M. The LEO microparticulate environment: LDEF's 5.75 year perspective on orbital space debris and meteoroids. *1st European Conference on Space Debris (ESA SD-01, 05-07 March 1993; Darmstadt)*.
4. Smirnov N.N. *Uspekhi mekhaniki* (Successes of mechanics), 2002, vol. 1, no. 2, pp. 37-104.
5. Klinkrad H. *Space Debris: Models and Risk Analysis*. Chichester, UK, Springer Praxis Publishing, 2006, 430 p. DOI:10.1007/3-540-37674-7
6. Veniaminov S.S., Chervonov A.M. *Kosmicheskii musor — ugroza chelovechestvu* (Space debris is a threat to humanity), Moscow, IKI RAN, 2013, 207 p.
7. Nazarenko A.I. *Modelirovanie kosmicheskogo musora* (Modeling of space debris), Moscow, IKI RAN, 2013, 213 p.
8. Agapov V.M., Golovko A.V., Emel'yanov V.A. et al. *Kosmicheskii musor. V 2 knigakh* (Space debris. In 2 books), Moscow, Fizmatlit, 2014, (245 +188) p.
9. Nazarenko A.I. *Pogreshnosti prognozirovaniya dvizheniya sputnikov v gravitatsionnom pole Zemli* (Errors in predicting the movement of satellites in the gravitational field of the Earth), Moscow, IKI RAN, 2010, 225 p.
10. Smirnov N.N., Kiselev A.B., Smirnova M.N., Nikitin V.F. Space traffic hazards from orbital debris mitigation strategies. *Acta Astronautica*, 2015, vol. 109, pp. 144-152. DOI: 10.1016/j.actaastro.2014.09.014
11. Nazarenko A.I. *Zadachi stokhasticheskoi kosmodinamiki: matematicheskie metody i algoritmy resheniya* (Problems of stochastic cosmodynamics: mathematical methods and algorithms of solution), Moscow, URSS, Lenand, 2018, 349 p.
12. Makarov Yu.N. (ed) *Monitoring tekhnogennogo zasoreniya okolozemnogo prostranstva i preduprezhdenie ob opasnykh situatsiyakh, sozdavaemykh kosmicheskim musorom* (Monitoring of technogenic contamination of near-Earth space and warning about dangerous situations created by space debris), Moscow, TsNIIImash, 2015, 244 p.

13. Mironov V.V., Murtazov A.K., Usovik I.V. *Sistemnye metody monitoringa okolozemnogo kosmicheskogo prostranstva* (System methods of monitoring near-Earth space), Ryazan, Konyakhin A.V. (Book Jet), 2018, 310 p
14. Usovik I.V. *Sistemnyi analiz problem kosmicheskogo musora* (System analysis of space debris problems), Moscow, MAI, 2023, 86 p.
15. *Space-track*, space-track.org
16. *ESA'S Annual space environment report*. 2023, <http://sdup.esa.int>
17. NASA Orbital Debris Program Office. *Quarterly News*, <http://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/newsletter/newsletter.html>
18. Usovik I.V., Darnopykh V.V., Malyshev V.V. Methodology of evolution of technogenic pollution assessment of low Earth orbits with regard to mutual collisions and active space debris removal. *Aerospace MAI Journal*, 2015, vol. 22, no. 3, pp. 54-62.
19. Usovik I.V., Nazarenko A.I., Morozov A.A. Optimal measurements filtering is a promising method for estimation accuracy improving of re-entry time and collision probability of space. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 3, pp. 191-199. DOI: 10.34759/vst-2022-3-191-199
20. Razumov D.A., Malyshev V.V. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, 2023, no. 5, pp. 36-43. DOI: 10.25728/avtprom.2023.05.09

Статья поступила в редакцию 04.10.2023; одобрена после рецензирования 19.10.2023; принята к публикации 20.10.2023.

The article was submitted on 04.10.2023; approved after reviewing on 19.10.2023; accepted for publication on 20.10.2023.