

Труды МАИ. 2022. № 125

Trudy MAI, 2022, no. 125

## **МЕХАНИКА**

Научная статья

УДК 629.7.052; 608; 621.454.2; 539.4

DOI: [10.34759/trd-2022-125-01](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-01)

# **К ВОПРОСУ О ПОСТРОЕНИИ ТРАССЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА И ОБЪЕКТА КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА**

**Мария Евгеньевна Баркова**

Акционерное общество «Российские космические системы», АО «РКС»,

Москва, Россия

[Alttaira@yandex.ru](mailto:Alttaira@yandex.ru)

*Аннотация.* В данной статье представлена графическая оценка исследования сближения космического аппарата для утилизации космического мусора (далее СКМ – сборщик космического мусора) с объектом космического мусора, которому было положено начало в публикациях [1, 2]. Построена трасса сближения СКМ с объектом космического мусора и выполнена оценка точности.

*Ключевые слова:* космический мусор, космический аппарат, трасса космического аппарата, графическая оценка

*Для цитирования:* Баркова М.Е. К вопросу о построении трассы космического аппарата для утилизации космического мусора и объекта космического мусора // Труды МАИ. 2022. № 125. DOI: [10.34759/trd-2022-125-01](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-01)

## **MECHANICS**

Original article

### **ON THE ISSUE OF CONSTRUCTING A SPACECRAFT ROUTE FOR THE DISPOSAL OF SPACE DEBRIS AND A SPACE DEBRIS OBJECT**

**Mariya E. Barkova**

Joint Stock Company «Russian Space Systems», JSC «RSS»,

Moscow, Russia

[Alttaira@yandex.ru](mailto:Alttaira@yandex.ru)

*Abstract.* The article is a continuation of research published in issue No. 110 of the Proceedings of the MAI and AIP Conference Proceedings 2318, 020009 (2021). The research is devoted to the rendezvous of a space debris disposal spacecraft (hereinafter SDC – space debris collector) with a space debris object for the purpose of capture and processing into fuel.

The main problem of the article is a graphical evaluation of the study performed earlier.

The purpose of this work is a graphical assessment of the approach of the SCM and the selected space debris object by constructing their paths.

The relevance of this work is to increase the number of space debris objects that can damage spacecraft in a collision.

According to space debris data provided by the European Space Agency, the number of debris objects is as follows:

- 36,500 space debris objects larger than 10 cm;
- 1 million space debris objects ranging in size from more than 1 cm to 10 cm;
- 130 million space debris objects ranging in size from more than 1 mm to 1 cm.

The author concludes that the amount of space debris decreases slowly and only during periods when its formation is small and there is no particularly strong fragmentation.

The probability of a spacecraft colliding with space debris increases at orbital altitudes of 800 - 950 km.

In satellite orbit, you can see that the disturbing forces and additional masses from the collected space debris had little effect only in small periods.

**Keywords:** space debris, spacecraft, spacecraft path, graphical evaluation

**For citation:** Barkova M.E. On the issue of constructing a spacecraft route for the disposal of space debris and a space debris object. *Trudy MAI*, 2022, no. 125. DOI: [10.34759/trd-2022-125-01](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-01)

## Введение

Техногенный космический мусор разделяют на фракции: крупный <10 см, средний от 10 см до 1 см и мелкий >1 см.

Согласно данным по космическому мусору на 10.05.2022, предоставленным Европейским космическим агентством в ESOC (Дармштадт, Германия), количество

объектов мусора, оцененное на основе статистических моделей, которые будут находиться на орбите (MASTER-8, будущая популяция 2021 г.) следующее [3]:

- 36500 объектов космического мусора размером более 10 см;
- 1 млн. объектов космического мусора размером от более 1 см до 10 см;
- 130 миллионов объектов космического мусора размером от более 1 мм до 1 см.

Причем, количество объектов мусора регулярно отслеживается сетями космического наблюдения, пополняя каталог, и составляет около 31140 объектов. Расчетное количество разрушений, взрывов, столкновений или аномальных событий, приведших к фрагментации на данный момент, составило более 630 случаев.

Чтобы понять, как образовался космический мусор в подобных масштабах, приведем некоторую статистику. Количество запусков ракет, без учета отказов, с начала космической эры в 1957 г. составило около 6200 раз. Количество спутников, выведенных на околоземную орбиту этими запусками ракет - около 13100. Около 8410 из них все еще в космосе и около 5600 все еще функционируют.

Суммарная масса всех космических объектов на околоземной орбите составляет более 9900 тонн.

В ранних исследованиях была выбрана фракция космического мусора, подлежащего переработке в топливо с помощью СКМ (0.1-0.5 м).

Целью данного исследования представляется графическая оценка сближения СКМ и выбранного объекта космического мусора путем построения их трасс.

## Постановка задачи

Приведем данные в таблице 1 по событиям и объектам космического мусора, которые привели к их фрагментации, согласно выборке из каталога космического мусора DISCOS EКА.

Таблица 1 – Топ-20 событий фрагментации объектов космического мусора [3, 4, 5].

№	Название	Int. обозначение	Дата распада	Фрагменты
1	Fengyun 1C	1999-025A	11.01.2007	2809
2	Космос-2251	1993-036A	10.02.2009	1070
3	NOAA 16	2000-055A	25.11.2015	457
4	Кентавр-5 СЕК	2014-055B	30.08.2018	455
5	Космос-1275	1981-053A	24.07.1981	419
6	Iridium 33	1997-051C	10.02.2009	326
7	Agena D	1970-025C	17.10.1970	232
8	DMSP Блок 5D-2 F13	1995-015A	03.02.2015	218
9	DELTA P	1975-052B	01.05.1991	197
10	DSV-3H-4	1973-086B	28.12.1973	197
11	Зенит-2 второй ступени	1992-093B	26.12.1992	195
12	DELTA P	1976-077B	24.12.1977	173
13	Able-Star	1961-015C	29.06.1961	171
14	DELTA P	1974-089D	20.08.1975	159
15	Snapshot (NPP) + Atlas SLV-3 Agena D stage 2	1965-027A	01.11.1979	158

16	DELTA P	1978-026C	27.01.1981	152
17	L-14B (YF40B)	1999-057C	11.03.2000	148
18	Бриз-М	2008-011B	13.10.2010	114
19	Второй этап Cosmos 3 (S3)	1991-009J	05.03.1991	110
20	Titan Transtage	1965-108A	21.12.1965	101

Данные в таблице 1 охватывают эпохи с 1965 по 2018 годы и определяют основные источники фрагментированного космического мусора, который прежде всего представляет опасность для действующих космических аппаратов. Помимо таких случайных разрушений, в недавнем прошлом основную роль в этом сыграли перехваты спутников ракетами наземного базирования.

Только запуск китайского FengYun-1C в январе 2007 года увеличил количество отслеживаемых космических объектов на 25%.

Однако фрагментация крупного космического мусора происходит и сейчас, о чем свидетельствуют данные таблицы 2.

Таблица 2 - Фрагментация крупного космического мусора 2016-2019 гг.

Имя	Int. обозначение	Дата распада	Фрагменты
Microsat-R	2019-006A	27.03.2019	91
Orbcomm FM16	1998-046E	22.12.2018	12
Кентавр-5 СЕК	2014-055B	30.08.2018	455
Двигатель Протон-К/ДМ-2 (СОЗ)	2005-050F	24.08.2018	1
Двигатель Протон-М/ДМ-2 (СОЗ)	2010-007H	22.05.2018	4
Titan Transtage	1969-013B	28.02.2018	58

Двигатель уллажа Протон-М/ДМ-2 (СОЗ)	2010-041Г	03.09.2017	9
DMSP Блок 5D-2 F12	1994-057А	23.10.2016	4
Обломки Fengyun 1С	1999-025KF	06.10.2016	12
RISAT-1	2012-017А	30.09.2016	1

На основании данных таблиц 1 и 2, можно сделать вывод, что тенденция к фрагментации объектов крупного космического мусора в каждом годом будет расти.

Таким образом, в данной статье представлена графическая оценка орбитального сближения сборщика космического мусора и СКМ. Она выполнена на программном комплексе GMAT R2013a и Matlab.

Перейдем непосредственно к теоретическому обоснованию и графической оценке.

### **Теоретическая часть на основе прошлых исследований**

На рисунке 1 представлено распределение скоростей в системе СКМ и космическом мусоре на основе.

Из рисунка 1 следует, что, считая известными параметры орбит СКМ и объекта космического мусора, для захвата можно провести сближение по методу свободных траекторий с помощью двух импульсов (1-й импульс – разгонный  $\Delta V^1$ , 2-й – тормозной  $\Delta V^2$ ) [1, 4],

$$V = V_{СКМ} + \Delta V_1 - V_{с.торм.} + V_{СКМ2} + \Delta V_2 + V_{КМ}, \quad (1)$$

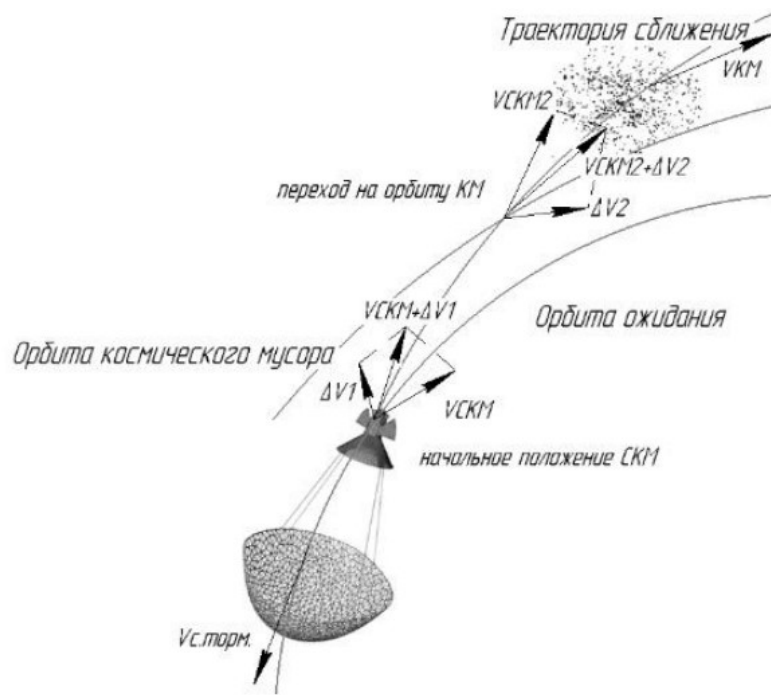


Рис. 1 – Распределение скоростей

где  $V_{СКМ}$  - скорость СКМ,  $V_{СКМ2}$  - скорость СКМ при переходе на другую орбиту  
 $V_{с.торм.}$  - скорость сети,  $V_{КМ}$  - скорость космического мусора.

Для равномерной подачи топлива, дозировку нужно разделить на три равные части с минимальной погрешностью деления. Для выполнения данного условия было принято решение осуществлять маневрирование КА в трех импульсном режиме для перехода на более высокую орбиту, согласно рисунку 2.

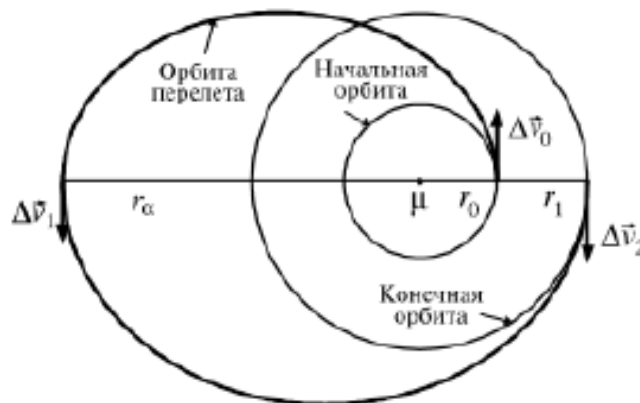


Рис. 2 – Трехимпульсный переход



Подкрепим рисунок 2 значениями параметров подачи и расхода топлива СКМ, значения которых приведены в таблице 3.

Таблица 3 – параметры подачи и расхода топлива СКМ

Параметры	Значения
Средняя скорость СКМ на орбите, м/с	8000-11000
Средняя скорость сонаправленного космического мусора, м/с (согласно каталогу космического мусора NORAD)	7800 - 11000
Расход топлива, кг/с	4.15
Теоретическая скорость истечения топлива по Зенгеру, м/с	5640 / 5210

В последние годы промышленный интерес вызывает растущий интерес, это будет «швейцарский армейский нож» спутника с маневренностью, возможностями и автономностью для выполнения всех видов сложных задач в космосе, таких как дозаправка дорогостоящих спутников, достигших конца своего жизненного цикла, добавляя к ним новое оборудование или прикрепляя к ним для перемещения на новые орбиты.

Активное удаление мусора считается особенно ценным для приближающейся эры мегасозвездий, когда сотни или даже тысячи спутников будут летать на низких орбитах, чтобы обеспечить телекоммуникации с малой задержкой или глобальное покрытие Земли с высокой повторяемостью.

Любой неисправный спутник, выходящий из строя, может угрожать всему созвездию вокруг него, поэтому специальные космические аппараты, специально

предназначенные для этой роли, вполне могут играть важную роль «овчарки» в мегасозвездиях.

### **Графическая оценка орбитального сближения СКМ с объектом космического мусора**

Спутники, запущенные на низкую околоземную орбиту, постоянно подвергаются воздействию аэродинамических сил из разреженных верхних слоев атмосферы Земли.

В зависимости от высоты через несколько недель, лет или даже столетий это сопротивление замедляет скорость спутника настолько, что он снова входит в атмосферу. На больших высотах, выше 800 км, сопротивление воздуха становится менее эффективным, и объекты, как правило, остаются на орбите в течение многих десятилетий.

На любой заданной высоте образованию мусора в результате обычных операций запуска, разрушения и других событий выброса противодействуют естественные механизмы очистки, такие как сопротивление воздуха и лунно-солнечное гравитационное притяжение. Результатом этих уравнивающих эффектов является зависящая от высоты и широты концентрация (пространственная плотность) объектов космического мусора.

Максимальные концентрации мусора можно отметить на высотах 800-1000 км и около 1400 км. Пространственные плотности на ГСО и вблизи орбит группировок навигационных спутников на два-три порядка меньше.

При сегодняшней ежегодной частоте запусков около 110 и при том, что будущие разрушения будут происходить со средней исторической скоростью от 10 до 11 в год, количество объектов мусора в космосе будет неуклонно расти.

На виртуальном глобусе космический мусор представлен белыми треугольниками с траекториями, показанными белыми линиями. Большинство генерируемых объектов мусора находятся на орбитах с высокими углами наклона, близкими к  $80^\circ$  (рисунок 3 а).

Траектории нанесены в координатах ECEF, и поэтому вся траектория вращается на запад из-за вращения Земли. После нескольких периодов орбиты весь космический мусор проходит через лучи наблюдения радаров (рисунок 3 б).

В качестве станцию наблюдения выбраны обсерватории, разнесенные по всей территории России и выбранные таким образом, чтобы из зоны радиовидимости не совпадали.

Использованы координаты следующих станций:

- 084 - Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН (ГАО РАН);
- ГАИШ - Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга (ГАИШ);
- 115 - Специальная астрофизическая обсерватория РАН (САО, Зеленчукская);
- Иркутская обсерватория - Астрономическая обсерватория Иркутского государственного университета;
- С06 - обсерватория Сибирского государственного аэрокосмического университета;
- С15 - уссурийская астрофизическая обсерватория.

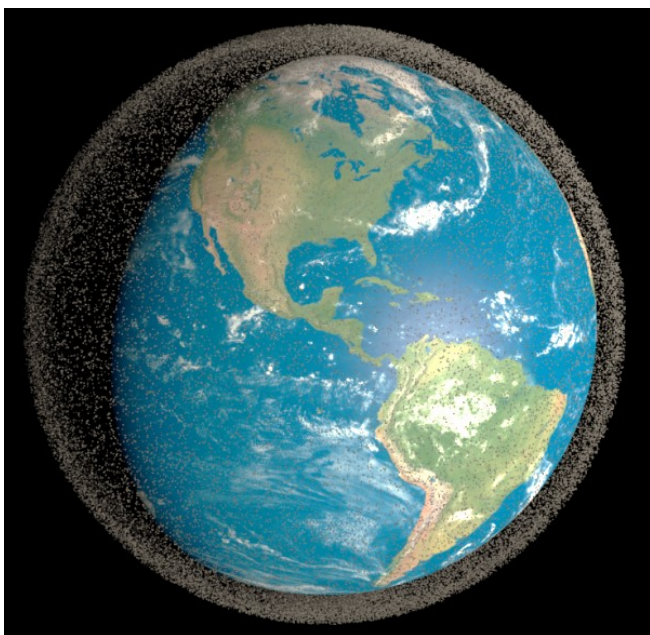


Рис. 3 а - Иллюстрация космического мусора на низкой околоземной орбите

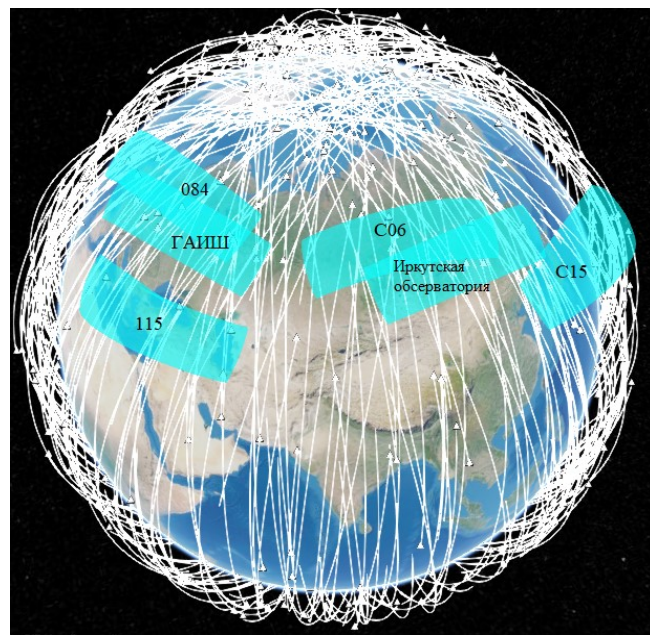


Рис. 3 б - Траектории космического мусора

[5]

Данная модель подтверждается исследованием коллектива ученых Subhadr Gupta, Raj Khismatrao, Suvigya Gupta и Harsh Singh из «Университета нефти и энергетики» в Дубае [6] и отражена на рисунке 4.

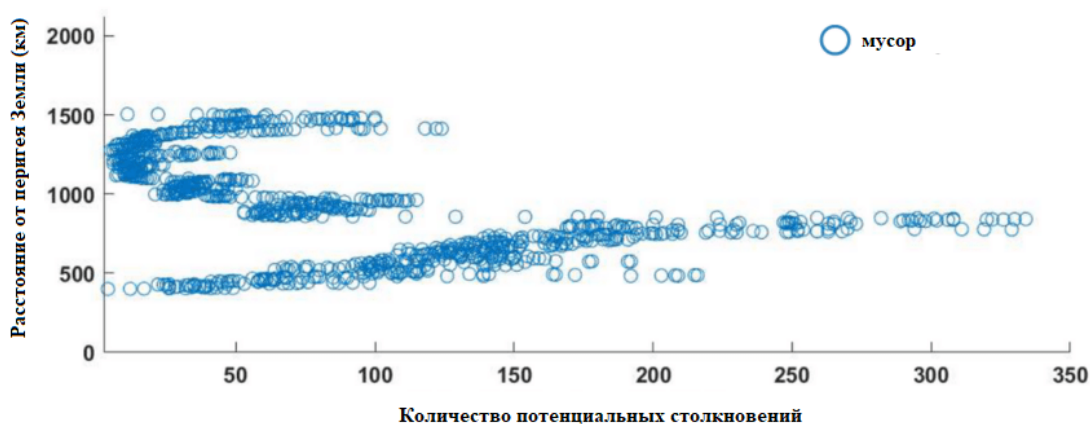


Рис. 4 – Зависимость потенциальных столкновений от расстояния до перигея [6]

Развитие технологий обеспечило человечеству скачок в области космических технологий и исследований, который привел к множеству значительных открытий благодаря различным миссиям на просторах космоса. Спутники, вращающиеся вокруг планеты, обеспечивают метод более быстрой связи, а также собирают ценные данные для исследований и картографирования. Согласно базе данных, поддерживаемой Союзом заинтересованных ученых, по состоянию на апрель 2020 года на орбите Земли находится более 2500 активных спутников, из которых 1918 находятся на низкой околоземной орбите.

На протяжении последних десятилетий многие из этих космических аппаратов были выведены из эксплуатации или объявлены мертвыми. Эти космические корабли все еще вращаются вокруг планеты или слоняются в пустоте, создавая проблемы для активных миссий. Даже крошечные частицы в космосе являются огромными проблемами для живого космического корабля. Небольшой кусок металла может вывести из строя или даже уничтожить весь функциональный спутник при столкновении. По оценкам Европейского космического агентства, на орбите Земли находится более 128 миллионов кусков материала. Поскольку космические агентства продолжают эксплуатировать место вокруг нашей впечатляющей голубой планеты, они должны смотреть на устойчивое использование космоса. Это создает необходимость обнаружения, анализа, классификации и смягчения последствий этих объектов.

Этот вопрос, касающийся космического мусора, не был должным образом рассмотрен ведущими мировыми космическими агентствами. Для устойчивого

будущего в космосе удаление мусора становится совместимым. В этой статье обсуждается этот вопрос и приводится база данных классификации существующего мусора. Космический мусор был классифицирован на основе размера, наклона орбиты и высоты. Для сортировки таких объектов требуется коллективная база данных активных спутников и космического мусора, полученная из каталога Североамериканской аэрокосмической обороны (NORAD). Кластеры космического мусора были идентифицированы и отмечены критически от низкого до высокого уровня, в зависимости от их траектории, пересекающейся с активными спутниками. Сортировка, представленная в этой статье, облегчит процесс выбора желательного мусора для смягчения последствий в предстоящее время. Эта статья будет способствовать выбору мусора, делая процесс более плавным. Для выполнения такого анализа был создан алгоритм. С помощью этого алгоритма была разработана программа MATLAB, которая может быть использована для анализа обновленной базы данных NORAD по команде потенциальных пользователей [6, 7, 8].

Бистатический радар представляет собой набор бистатического излучателя или передатчика ( $T_x$ ) и бистатического приемника или датчика ( $R_x$ ). Геометрия бистатической системы изображена на рисунке ниже. Датчик принимает сигналы вдоль пути, образующего верхние стороны треугольника ( $R_T + R_R$ ), с бистатическими обнаружениями, относящимися к диапазону излучателя. Относительный бистатический диапазон задается:

$$R_{\text{Bistatic}} = R_T + R_R - L \quad (2)$$

где  $R_T$  диапазон от излучателя до цели,  $R_R$  диапазон от цели до датчика и  $L$ , известный также как прямой путь или базовая линия, диапазон от излучателя до датчика (рисунок 5) [9, 10, 11, 12].

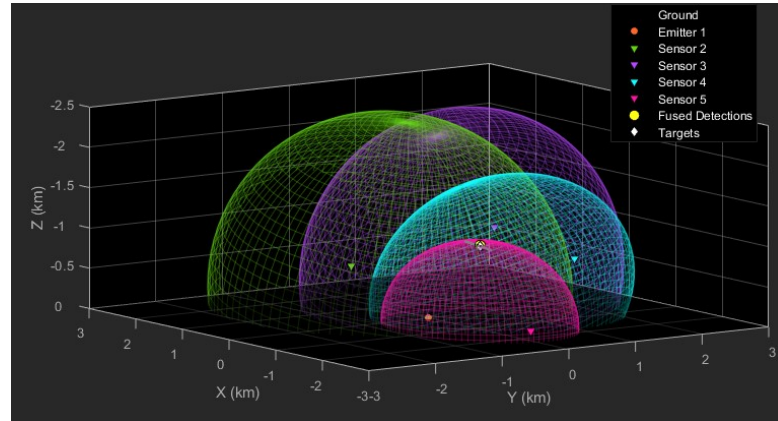


Рис. 5 - Обнаружение только бистатического диапазона с использованием четырех пар датчик-эмиттер [9, 10, 11, 12]

На рисунке 6 представлены результаты моделирования сближения СКМ (высота околокруговой орбиты 950 км, наклонение  $82^\circ$ ) с объектом космического мусора (высота околокруговой орбиты 960 км, наклонение  $83^\circ$ ).

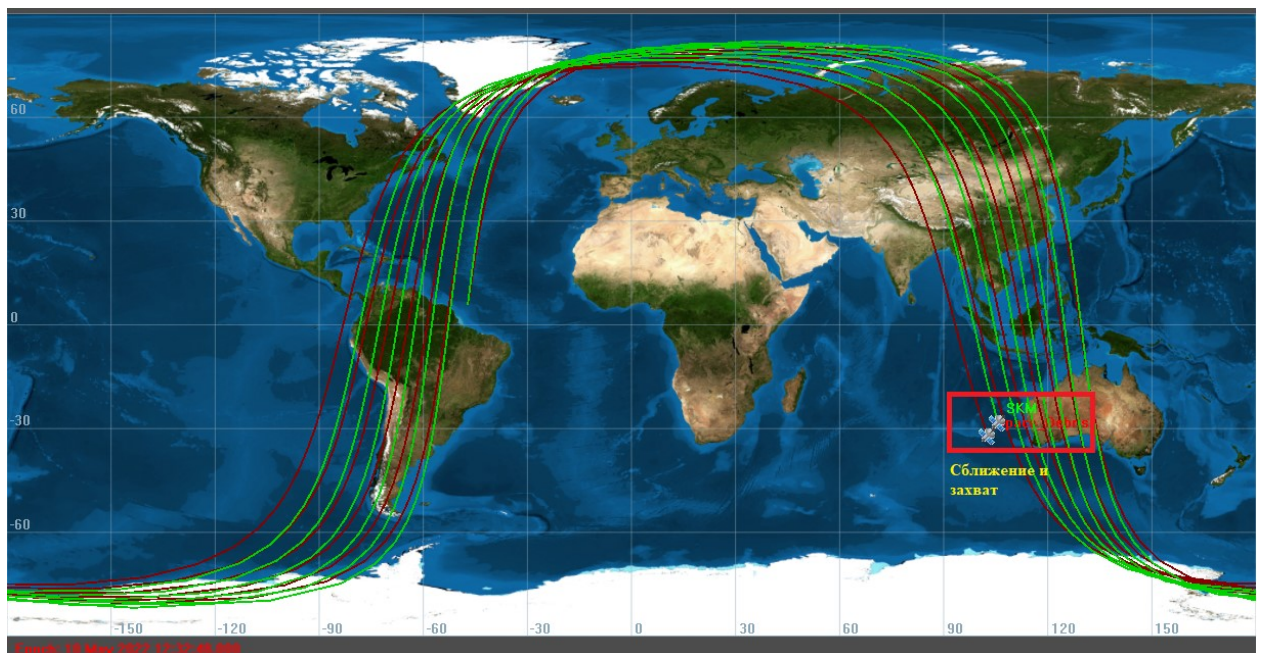


Рис. 6 – Сближение космического мусора

При выбранных данных сближение происходит на 6-м витке.

Для более точного моделирования поведения космического мусора, создано множество имитационных моделей:

- DAS 2.0.2 (программное обеспечение для оценки мусора) — это программа моделирования от НАСА, которая предназначена для работы с оценкой орбитального мусора [13];

- MASTER-2001 (Справочник по метеороидам и космическому мусору на Земле) — модель ЕКА, имитирующая космическую среду [14, 15];

- LEGEND (модель экологического мусора между НОО и ГСО) — это модель НАСА, которые моделируют будущее столкновение на основе баз данных космических объектов из сегодняшнего дня [15, 16];

- ORDEM2000 (инженерная модель орбитального мусора) — это модель НАСА, которая описывает орбитальную среду на низкой околоземной орбите (на высоте от 200 до 2000 км) [16, 17, 18, 19, 20].

## **Выводы**

Анализ показал, что количество космического мусора уменьшается медленно и только в периоды, когда его образование невелико и нет особо сильной фрагментации. Крупный космический мусор размером менее 10 см особенно вместе с неактивными полезными нагрузками, доминирует в космосе за пределами Земли.

Вероятность столкновения космического аппарата с космическим мусором возрастает на высотах орбит 800 - 950 км. Математическая модель космического мусора, выполненная в среде программирования Matlab, способна генерировать



космический мусор с случайное положение на орбитах вокруг Земли. На спутниковой орбите можно заметить, что возмущающие силы и дополнительные массы от собранного космического мусора незначительно повлияли только в небольших периодах.

### **Список источников**

1. 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)
2. Barkova M.E. About processing of technogenic space debris in fuel in low orbits // AIP Conference Proceedings, 2021, USA. URL: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/5.0035802>
3. ESA'S ANNUAL SPACE ENVIRONMENT REPORT. ESA UNCLASSIFIED. URL:[https://www.sdo.esoc.esa.int/environment\\_report/Space\\_Environment\\_Report\\_latest.pdf](https://www.sdo.esoc.esa.int/environment_report/Space_Environment_Report_latest.pdf)
4. Баркова М.Е. Космический аппарат для утилизации космического мусора в околоземном пространстве // Труды МАИ. 2018. № 103. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=100712>
5. Thomas Iversen Bredeli. Modeling and simulation of space debris distribution, Master of Science in Technology, July 24, 2013.

6. Subhadr Gupta, Raj Khismatrao, Suvigya Gupta, Harsh Singh. Space Debris Categorization and Sorting using MATLAB // 72nd International Astronautical Congress (IAC), Dubai, October 2021.
7. Lei Lan, Jingyang Li, Hexi Baoyin. Debris Engine: A Potential Thruster for Space Debris Removal, 2015, Tsinghua University, URL: <https://arxiv.org/vc/arxiv/papers/1511/1511.07246v1.pdf>
8. Назаренко А.И. Моделирование космического мусора. Серия: Механика, управление и информатика. - М.: ИКИ РАН, 2013. - 216 с.
9. Malanowski M., Kulpa K. Two Methods for Target Localization in Multistatic Passive Radar // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2012, vol. 48, no. 1, pp. 572-578.
10. Телегин А.М., Семкин Н.Д. Космическая пыль и её взаимодействие с космическими аппаратами. – Самара: Изд- во СГАУ, 2015. – 124 с.
11. Асланов В.С., Алексеев А.В., Ледков А.С. Определение параметров оснащенной гарпуном тросовой системы для буксировки космического мусора // Труды МАИ. 2018. № 90. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=74644>
12. Willis N.J. Bistatic Radar, SciTech Publishing, 2005, 344 p.
13. Opiela J.N., Hillary E. et al. Debris Assessment Software - User's Guide, Lyndon, Johnson Space Center, Tech. Rep., 2012.
14. Klinkrad H. Space Debris - Models and Risk Analysis. Springer, 2006. DOI:[10.1007/3-540-37674-7](https://doi.org/10.1007/3-540-37674-7)

15. Kessler D.J., Johnson N.L., Liou J.-C., Matney M.J. The Kessler Syndrome: Implications of Future Space operations, NASA, Tech. Rep., 2010.
16. J.-C. Liou, M. J. Matney, P. D. The New NASA Orbital Debris Engineering - Model ORDEM2000, NASA, 2002.
17. 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>
18. Авдеев А.В. К вопросу борьбы с космическим мусором с помощью лазерной космической установки на основе HF-НХЛ // Труды МАИ. 2012. № 61. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35496>
19. Низаметдинов Ф.Р., Сорокин Ф.Д., Иванников В.В. Разработка конечного элемента оболочки для моделирования больших перемещений элементов конструкций летательных аппаратов // Труды МАИ. 2019. № 109. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=111337>. DOI: [10.34759/trd-2019-109-2](https://doi.org/10.34759/trd-2019-109-2)
20. Jasper L.E.Z., Seubert C.R., Schaub H., Trushkyakov V., Yutkin E.: Tethered tug for large low earth orbit debris removal // AAS/AIAA Astrodynamics Specialists Conference Astrodynamics, Charleston, South Carolina, 2012.

## References

1. Barkova M.E. *Trudy MAI*, 2020, no. 110. 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)

2. Barkova M.E. About processing of technogenic space debris in fuel in low orbits, *AIP Conference Proceedings*, 2021, USA. URL: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/5.0035802>
3. *ESA'S ANNUAL SPACE ENVIRONMENT REPORT. ESA UNCLASSIFIED.* URL: [https://www.sdo.esoc.esa.int/environment\\_report/Space\\_Environment\\_Report\\_latest.pdf](https://www.sdo.esoc.esa.int/environment_report/Space_Environment_Report_latest.pdf)
4. Barkova M.E. *Trudy MAI*, 2018, no. 103. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=100712>
5. Thomas Iversen Bredeli. *Modeling and simulation of space debris distribution*, Master of Science in Technology, July 24, 2013.
6. Subhadr Gupta, Raj Khismatrao, Suvigya Gupta, Harsh Singh. Space Debris Categorization and Sorting using MATLAB, *72nd International Astronautical Congress (IAC)*, Dubai, October 2021.
7. Lei Lan, Jingyang Li, Hexi Baoyin. *Debris Engine: A Potential Thruster for Space Debris Removal*, 2015, Tsinghua University, URL: <https://arxiv.org/vc/arxiv/papers/1511/1511.07246v1.pdf>
8. Nazarenko A.I. *Modelirovanie kosmicheskogo musora* (Modeling of space debris), Moscow, IKI RAN, 2013, 216 p.
9. Malanowski M., Kulpa K. Two Methods for Target Localization in Multistatic Passive Radar, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, vol. 48, no. 1, pp. 572-578.

10. Telegin A.M., Semkin N.D. *Kosmicheskaya pyl' i ee vzaimodeistvie s kosmicheskimi apparatami* (Cosmic dust and its interaction with spacecraft), Samara, Izd- vo SGAU, 2015, 124 p.
11. Aslanov V.S., Alekseev A.V., Ledkov A.S. *Trudy MAI*, 2018, no. 90. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=74644>
12. Willis N.J. *Bistatic Radar*, SciTech Publishing, 2005, 344 p.
13. Opiela J.N., Hillary E. et al. *Debris Assessment Software - User's Guide*, Lyndon, Johnson Space Center, Tech. Rep., 2012.
14. Klinkrad H. *Space Debris - Models and Risk Analysis*, Springer, 2006. DOI:[10.1007/3-540-37674-7](https://doi.org/10.1007/3-540-37674-7)
15. Kessler D.J., Johnson N.L., Liou J.-C., Matney M.J. *The Kessler Syndrome: Implications of Future Space operations*, NASA, Tech. Rep., 2010.
16. J.-C. Liou, M. J. Matney, P. D. *The New NASA Orbital Debris Engineering - Model ORDEM 2000*, NASA, 2002.
17. Pikalov R.S., Yudintsev V.V. *Trudy MAI*, 2018, no. 100. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=93299>
18. Avdeev A.V. *Trudy MAI*, 2012, no. 61. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=35496>
19. Nizametdinov F.R., Sorokin F.D., Ivannikov V.V. *Trudy MAI*, 2019, no. 109. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=111337>. DOI: [10.34759/trd-2019-109-2](https://doi.org/10.34759/trd-2019-109-2)

20. Jasper L.E.Z., Seubert C.R., Schaub H., Trushkyakov V., Yutkin E.: Tethered tug for large low earth orbit debris removal, *AAS/AIAA Astrodynamics Specialists Conference Astrodynamic*, Charleston, South Carolina, 2012.

Статья поступила в редакцию 24.05.2022

Статья после доработки 25.05.2022

Одобрена после рецензирования 30.05.2022

Принята к публикации 25.08.2022

The article was submitted on 24.05.2022; approved after reviewing on 30.05.2022; accepted for publication on 25.08.2022