

МЕТОДЫ УТИЛИЗАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

Е.А. Милехина

kati.milekhina@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Рассмотрена проблема загрязнения околоземного пространства космическим мусором, показаны различные методы его утилизации, акцентируя внимание на активных и пассивных подходах. Проведены сравнение и анализ принципов работы различных технологий, их преимуществ, недостатков и применимости в условиях современной космической индустрии. Активные методы включают использование спутников и роботов для захвата и удаления обломков, в то время как пассивные методы сосредоточены на предотвращении образования мусора или его автоматическом деактивировании. Также освещены перспективы и вызовы, стоящие перед научным сообществом для эффективной борьбы с этой проблемой.

Ключевые слова: космос, космические исследования, космический мусор, спутники, утилизация космического мусора

Введение. Человечество давно проявляло интерес к космосу. Любопытство к космическим исследованиям в результате привело к запуску Советским Союзом первого искусственного спутника в октябре 1957 г. [1]. Через год, 17 марта 1958 г., был запущен четвертый спутник — американский спутник Vanguard-1, что привело к образованию первого искусственного космического мусора [1].

Для понимания того, что же представляет собой космический мусор и какие объекты можно причислить к этой категории, стоит дать определение. Комитет по использованию космического пространства в мирных целях по предупреждению образования космического мусора дает такое определение: «Космический мусор определяется как все находящиеся на околоземной орбите или возвращающиеся в атмосферу антропогенные объекты, включая их фрагменты и элементы, которые являются нефункциональными» [2].

Проблема космического мусора становится все более актуальной из-за увеличения числа спутников и расширения космических исследований. Важно отметить высокие риски возникновения эффекта Кесслера, где столкновение крупных объектов может привести к образованию большого количества новых осколков [3]. Эти осколки могут взаимодействовать с другими объектами, вызывая цепную реакцию и увеличивая количество мусора. В случае множественных столкновений или взрывов околоземное пространство может

стать непригодным для космических полетов. Разработка методов и стратегий для уменьшения количества мусора и создания более чистого космического пространства — один из главных приоритетов космической деятельности на сегодняшний день.

Утилизация космического мусора важно по следующим причинам:

- предотвращение столкновений с действующими космическими аппаратами (КА), что может привести к их повреждению или уничтожению;
- сохранение чистоты околоземного космического пространства для будущих миссий и исследований;
- снижение нагрузки на системы слежения и предупреждения о космических угрозах;
- экономия средств на разработку и запуск новых КА, которые могут столкнуться с мусором на орбите.

Согласно руководящим принципам Комитета по использованию космического пространства в мирных целях по предупреждению образования космического мусора, после окончания срока функционирования спутников операторам необходимо ограничить длительность их существования [4]:

– В районе низких орбит (до 2000 км) должно соблюдаться условие о продолжительности пассивного баллистического существования в результате тормозящего действия атмосферы — не более 25 лет. Однако в последнее время международное космическое сообщество обсуждает сокращение срока до 5 лет для уменьшения вероятности столкновения с другими космическими объектами [5];

– в районе геостационарной орбиты космические аппараты должны быть уведены на орбиту захоронения для исключения возможности входа в область рабочих орбит.

Данные правила соблюдаются благодаря использованию собственной двигательной установки КА. Однако для увода спутника требуется резерв топлива, что приводит к уменьшению срока службы или к увеличению стоимости миссии. Также присутствует риск выхода двигательной установки из строя, вследствие чего совершить данное действие будет невозможно. В связи с этим необходимо прорабатывать альтернативные методы увода.

Проблема космического мусора вызывает опасения у международного космического сообщества. В различных нормативных документах мирового уровня можно проследить эту тенденцию, например, в руководящих принципах обеспечения долгосрочной устойчивости космической деятельности ООН: «Государствам и международным межправительственным организациям следует поощрять разработку и применение соответствующих технологий для измерения, мониторинга и применения орбитальных и физических ха-

рактических космического мусора. Государствам и международным межправительственным организациям следует также способствовать предоставлению друг другу и распространению производных информационных продуктов и методов в целях поддержки исследований и международного научного сотрудничества по вопросам эволюции орбитального мусора» [2].

Поэтому различные компании такие как: Airbus (Лейден, Нидерланды), Ariane Group (ранее Airbus Safran Launchers), Швейцарским центром электроники и микротехнологий (Невшатель, Швейцария), Inria (Шене-Рокенкур, Франция) и многие другие работают над ее решением и изучают разные методы утилизации космического мусора [6].

Стратегии удаления космического мусора включают:

- снижение вероятности случайных разрушений в космосе;
- возможность выполнения маневров на орбите с целью предотвращения столкновений;
- перемещение космических объектов на более низкие орбиты после завершения их эксплуатации для последующего снижения и уничтожения в атмосфере;
- перемещение космических объектов с рабочих орбит на орбиты для захоронения.

Что касается методов удаления космического мусора, то их можно подразделить на активные и пассивные [7].

В активных методах используются специальные аппараты для захвата и увода космического мусора с орбиты на более низкую орбиту или орбиту захоронения. Рассмотрим несколько систем.

Захват и буксировка другими космическими аппаратами. Один из примеров метода удаления космического мусора с использованием захвата и буксировки другим космическим аппаратом — проект e.Deorbit. Европейское космическое агентство разрабатывает различные механизмы захвата, такие как сети, гарпуны, роботизированные конечности и щупальца, для подбора мусора на полярной орбите на высоте от 800 до 1000 км [8]. Космический аппарат ClearSpace-1 входит в один из таких механизмов. Проект Европейского космического агентства, направленный на удаление космического мусора с орбиты, возглавляет швейцарская компания ClearSpace SA. Основная цель проекта — демонстрация технологий для сближения, захвата и увода с орбиты отработавших спутников. В рамках проекта планируется использовать специальное устройство, представляющее собой «космический коготь» с четырьмя манипуляторами. Это устройство должно захватить и отвести на траекторию входа в атмосферу Земли объект, подлежащий удалению (рис. 1) [9].



Рис. 1. Космический аппарат ClearSpace-1

Дистанционное энергетическое воздействие. Примером удаления космического мусора с помощью лазерного воздействия является проект Laser broom. Ученые из лаборатории прикладной физики Университета Джона Хопкинса предложили технологию, в которой используются лазерные установки на поверхности Земли для очистки Космоса. Лазеры могут быть размещены на КА или на Международной космической станции (МКС) [10].

В проекте Momentum для испарения или дробления крупных фрагментов космического мусора предложено использовать мощный лазер. Лазерное излучение воздействует на мусор на расстоянии, не требуя прямого контакта с объектом. Этот бесконтактный метод считается более безопасным и эффективным для удаления космического мусора, особенно крупных объектов размером более 10 см [11].

В проекте Cosmic Shepherd для сбора космического мусора предлагается использовать магнитное притяжение. Спутник Cosmic Shepherd с инфраструктурой электромагнита будет захватывать металлические фрагменты мусора, такие как старые спутники и обломки ракет [12].

Захват гарпуном. Принцип системы «Захват гарпуном» основан на использовании гарпуна, который устанавливается на «преследующий» спутник. Гарпун состоит из набора шипов для крепления. Это крепление должно быть достаточно прочным и устойчивым, чтобы предотвратить непреднамеренное высвобождение во время захвата. Другая часть — это разрушаемая секция, которая поглощает энергию, генерируемую при столкновении. Последняя важная часть — это привязь для соединения преследователя и цели. Когда «преследующий» спутник приближается к целевому объекту на подходящее

расстояние, он выпускает гарпун, который попадает в цель и захватывает ее. Затем может наступить последний этап: либо снижение, либо изменение орбиты — в зависимости от типа орбиты (рис. 2) [12].

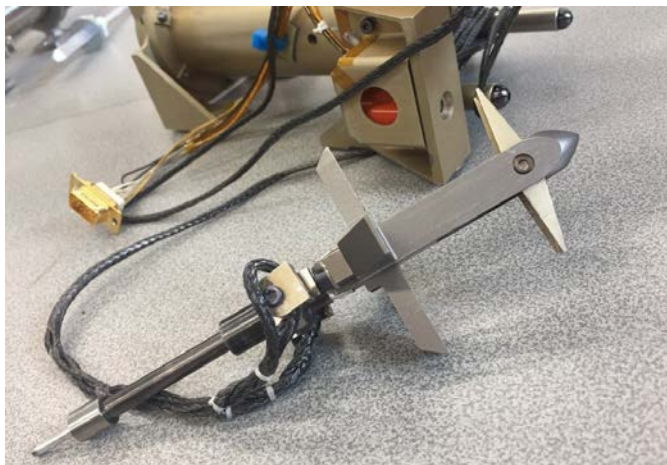


Рис. 2. Пример системы «Захват гарпуном»

Адгезивный метод. Компания Astro Scale разработала адгезивный метод в Сингапуре. Технология включает КА-носитель с несколькими наборами для схода с орбиты. Преимущество этого метода заключается в том, что КА-носитель содержит несколько комплектов для снятия с орбиты, позволяющих собирать множество обломков за один полет, подобно рогатке. Каждый вспомогательный набор оснащен двигателем, а на его передней стороне находится поверхность с силиконовым клеевым покрытием. Клей наносится с допуском в 20° . Перед установкой необходимо согласовать размеры фрагментов и мишени [13].

Захват сетью. Данный метод основан на выбрасываемой на расстояние сети, которая после захвата космического мусора отправляет его на орбиту захоронения или сгорать в слою атмосферы.

В сентябре 2018 г. британский спутник RemoveDebris успешно продемонстрировал технологию захвата космического мусора с помощью сети. Эксперимент проходил на высоте 300 км над поверхностью Земли. Спутник выпустил сеть, которая быстро развернулась и захватила мусор. Если бы захват не был демонстрационным, сеть была бы прикреплена к спутнику, который затем унес бы мусор с собой. Однако, поскольку это была только демонстрация, сеть и коробка остались в космосе на небольшой высоте, где они сгорели в атмосфере через несколько месяцев (рис. 3) [14].

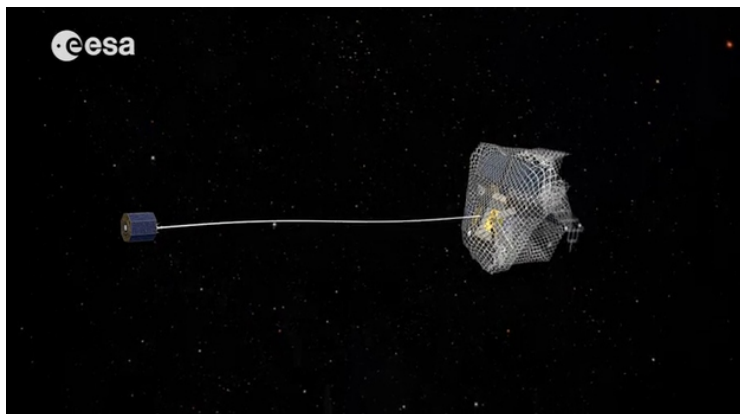


Рис. 3. Пример системы «Захват сетью»

Пассивный метод удаления космического мусора включает использование внешних факторов, таких как сила сопротивления воздуха или сила сопротивления фотонов, для увода мусора с орбиты [15]. Существует несколько проектов, относящиеся к данному методу.



Рис. 4. Пример системы «Солнечный парус»

Солнечный парус. Солнечный парус — это способ приведения в движение космических аппаратов с помощью больших зеркальных мембран. Радиационное давление небольшое и уменьшается соразмерно квадрату расстояния от Солнца, но, в отличие от ракет, солнечные паруса не требуют топлива. Несмотря на небольшую силу тяги, она сохраняется до тех пор, пока светит

солнце и существует парус (рис. 4). Солнечные коллекторы, регуляторы температуры и солнцезащитные экраны иногда применяются в качестве удобных «солнечных парусов», которые позволяют обычным космическим аппаратам и спутникам корректировать свою орбиту без расходования топлива. Это позволяет сберечь топливо, которое иначе использовалось бы для маневров. Благодаря такому подходу некоторые беспилотные космические аппараты, например, Pioneer 10, существенно увеличили свой срок службы [16].

Из ярких примеров использования данной системы можно выделить японский космический аппарат IKAROS, который первым успешно использовал солнечный парус из полиамидной пленки толщиной 7,5 мкм и площадью 196 м² в 2010 г. [17].

В 2011 г. был запущен американский спутник NanoSail-D2 с солнечным парусом диаметром 30 м, полет длился девять месяцев по низкой околоземной орбите для возвращения в атмосферу, чтобы оценить способность паруса разворачиваться в космосе и выводить спутники с орбиты [18].

Наноспутник «Парус-МГТУ» — космический аппарат, разработанный студентами и аспирантами МГТУ им. Н.Э. Баумана. Первоначально проект был представлен в 2011 г. на студенческом конкурсе Международного астронавтического конгресса в г. Кейптауне, ЮАР, где был высоко оценен жюри и занял первое место. В 2015 г. проект был поддержан Госкорпорацией «Роскосмос», после чего началась его реализация для последующего проведения на Международной космической станции (МКС). В октябре 2023 г. спутник был запущен [19].

Электродинамическая ловушка. В 1995 г. была выдвинута идея о возможности уменьшения высоты орбиты спутников с помощью электродинамического троса. Этот трос проводит электричество и генерирует ток при движении в магнитном поле Земли. Взаимодействие электронов и протонов окружающей плазмы создает электрическое поле, напряженность которого отлична от нуля. Трос, по которому идет ток, пересекает силовые линии геомагнитного поля, вызывая силу Ампера, которая замедляет движение КА [20].

В феврале 2017 г. японское агентство JAXA провело эксперимент электродинамической ловушки для космического мусора с помощью космического аппарата Kounotori-6, который пристыковался к МКС в декабре 2016 г. Планировалось выпустить электропроводящий трос длиной 700 м из алюминия и нержавеющей стали, однако эксперимент не удался (рис. 5) [21].

Электромагнитный парус. Электромагнитный парус — это новая двигательная установка для космических кораблей, которая использует солнечный ветер для движения. Парус отклоняет солнечный ветер с помощью электромагнитного поля, что создает тягу. Характеристики паруса изучаются с ис-

пользованием частиц и магнитогидродинамических моделей, а взаимодействие между плазмой и электромагнитным полем проверяется в наземных экспериментах [22]. Несколько живых примеров: в 2013 г. прототип электрического паруса был запущен с эстонским спутником ESTCube-1, но проверочные испытания не были проведены из-за системного сбоя [22]. В феврале 2023 г. была запущена система снижения аэродинамического сопротивления Drag Augmentation Deorbiting System. Это парус площадью $3,5 \text{ м}^2$, состоящий из полиамидной мембраны с алюминиевым покрытием (рис. 6). Он прикреплен к четырем рычагам в форме буквы X, усиленным углеродным волокном. Парус увеличивает атмосферное аэродинамическое сопротивление, что приводит к более быстрому сходу спутника с орбиты [23].



Рис. 5. Космический аппарат Kounotori-6

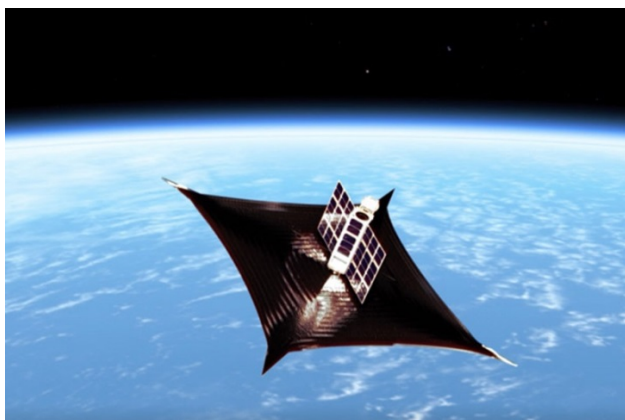


Рис. 6. Система снижения аэродинамического сопротивления Drag Augmentation Deorbiting System

Аэродинамическое тормозное устройство. Принцип аэродинамических устройств, используемых для увода космических аппаратов с рабочей траектории, основан на увеличении площади поперечного сечения космических аппаратов в направлении потока, что способствует росту аэродинамических сил сопротивления, направленных против движения космического аппарата. Для производства этих устройств используются тонкопленочные полимерные материалы, такие как Mylar, Kevlar, Twaron, Zylon, Картон и углеродистая ткань. Эти материалы могут быть покрыты тонкими слоями алюминия, кремния или керамики для повышения прочности.

Как пример технологии вывода КА с использованием аэродинамического торможения можно упомянуть устройство под названием GOLD (Gossamer Orbit Lowering Device), предложенное доктором Кристин Гейтс в 2011 г. (рис. 7). Оболочка GOLD изготовлена из полиэтилентерефталатной пленки, покрытой алюминием для защиты от разрушения. Толщина ПЭТФ составляет 5...12 мкм, а удельная плотность — 9 г/м² [23].

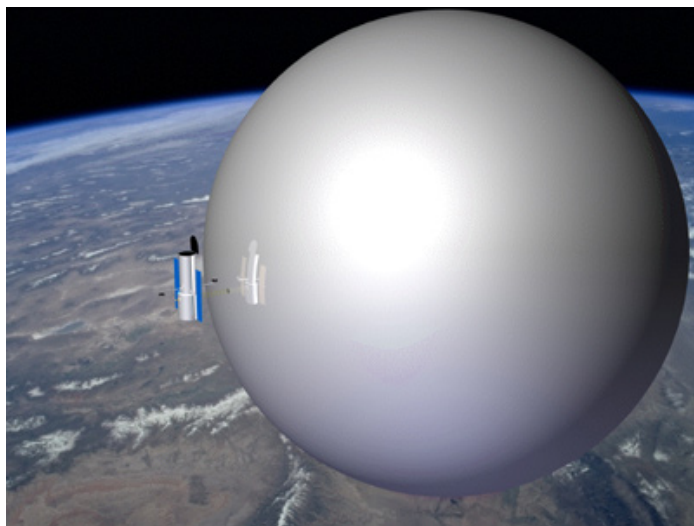


Рис. 7. Gossamer Orbit Lowering Device

Заключение. Сравнивая пассивные и активные методы, можно отметить, что пассивные методы реализованы с помощью конструкций, как правило, заложенных в космические аппараты, и направлены на предотвращение образования новых объектов космического мусора, активные методы предназначены для удаления уже существующих обломков на орбитах. Преимущества и недостатки описанных выше методов сведены в таблицу.

**Преимущества и недостатки активных и пассивных методов утилизации
космического мусора**

Метод	Преимущества	Недостатки
Активные	Позволяют удалять крупные объекты или изменять их траектории, снижая риск столкновений. Могут быть применены к различным типам мусора, включая обломки спутников, ракетные ступени и отработанные космические аппараты	Высокие затраты. Сложная технология. Отсутствие правового регулирования. Риск повреждения действующих спутников при неудачном применении активных методов
Пассивные	Низкие затраты. Простая реализация. Минимальный риск для действующих спутников. Универсальность	Встраиваются в космические аппараты, из-за чего присутствует риск повреждения и невыполнения увода

Методы активного удаления космического мусора на данный момент сложнее ввести в массовое использование, поскольку они требуют большого количества вложений, но основное препятствие связано с отсутствием правового регулирования. Преобладающая структура международного космического права не допускает прерывания работы с космическими объектами без предварительного согласия запускающего государства. В случае исключения объекта без согласия это будет квалифицироваться как международно-противоправное деяние. В существующем режиме космического права отсутствуют какие-либо юридические процедуры и механизмы для удаления космического мусора [24].

Методы утилизации космического мусора играют важную роль в обеспечении безопасности и устойчивости космической деятельности. Выбор оптимального метода утилизации космического мусора зависит от многих факторов: размер и тип мусора, его орбита, стоимость, доступность технологий, а также временные рамки.

Активные методы более эффективны для удаления крупных объектов космического мусора, но они более дороги и сложны в реализации. Пассивные методы более доступны и безопасны.

В будущем, вероятно, будут использоваться комбинированные методы, сочетающие преимущества активных и пассивных методов. Также необходимо разрабатывать международные соглашения, регулирующие утилизацию космического мусора, и повышать осведомленность о проблеме космического мусора, стимулируя развитие новых технологий для ее решения.

Литература

- [1] Aslanov V., Ledkov A. Review of contact and contactless active space debris removal approaches. *Progress in Aerospace Sciences*, 2022, vol. 134, art. 100858.
- [2] *Руководящие принципы Комитета по использованию космического пространства в мирных целях по предупреждению образования космического мусора № V.18-05024*. ООН, 2019.
- [3] *Системный анализ проблем космического мусора*. Москва, Изд-во МАИ, 2023, 88 с.
- [4] Райкунов Г.Г., ред. *Космический мусор. В 2 кн. Кн. 2. Предупреждение образования космического мусора*. Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2014, 188 с.
- [5] *Orbital debris mitigation guidelines still useful, if complied with*. URL: <https://spacenews.com/orbital-debris-mitigation-guidelines-still-useful-if-complied-with/> (accessed April 28, 2024).
- [6] *Giving Earth's lower orbit a spring clean*. URL: <https://cordis.europa.eu/article/id/191258-giving-earths-lower-orbit-a-spring-clean> (accessed April 28, 2024).
- [7] *Космический мусор: предотвращение, удаление*. URL: <https://naukatehnika.com/kosmicheskiy-musor.html> (дата обращения 21.04.2024).
- [8] *ESA's e.Deorbit debris removal mission reborn as servicing vehicle*. URL: https://www.esa.int/Space_Safety/Clean_Space/ESA_s_e.Deorbit_debris_removal_mission_reborn_as_servicing_vehicle (accessed April 28, 2024).
- [9] *ClearSpace-1*. URL: <https://clearspace.today/> (accessed April 28, 2024).
- [10] Esmiller B., Jacqueland C., Eckel H.-A. et al. Space debris removal by ground based laser Main conclusions of the European project CLEANSPACE. *Applied Optics*, 2014, vol. 53. <https://doi.org/10.1364/AO.53.000145>
- [11] Liedahl D.A., Libby S.B., Rubenchik A. Momentum Transfer by Laser Ablation of Irregularly Shaped Space Debris. *arXiv*, April 2010. <https://doi.org/10.1364/10.1063/1.3507171>
- [12] Yalçın B.C., Martinez C., Hubert Delisle M. et al. ET-Class: An Energy Transfer-Based Classification of Space Debris Removal Methods and Missions. *Front. Space Technol.*, 2022, no. 3. <https://doi.org/10.1364/10.3389/frspt.2022.792944>
- [13] Matija Bc.M. *Active technology for space debris removal*. Master's Thesis. Czech republic, Faculty of Electrical Engineering Department of Computer Science, 2021, 79 p.
- [14] *Британцы впервые протестировали устройство для вылова космического мусора*. URL: <https://tass.ru/plus-one/5599027> (дата обращения: 23.04.2024).
- [15] Пендюрин М.В. Проектирование космических систем. *Луноход-1. VII Регион. молодежная аэрокосмическая конф.: матер.* Самара, СаАТ, 2023, с. 116–120.
- [16] *Solar sail*. URL: https://hyperspace.fandom.com/wiki/Solar_sail (accessed April 23, 2024).

- [17] *Ikaros: First Successful Solar Sail*. URL: <https://www.space.com/25800-ikaros-solar-sail.html> (accessed April 23, 2024).
- [18] *NASA's Next Solar Sail: Lessons Learned from NanoSail — D2*. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20120015556> (accessed April 24, 2024).
- [19] *Запуск наноспутника «Парус-МГТУ» в открытый космос*. URL: <https://bmstu.ru/news/zapusk-nanosputnika-parus-mgtu-v-otkrytyi-kosmos> (дата обращения 24.04.2024).
- [20] Ключников В.Ю. Как очистить околоземное пространство от космического мусора? *Воздушно-космическая сфера*, 2019, № 1, с. 97–107.
- [21] *Японский грузовой корабль провалил эксперимент по сбору космического мусора*. URL: <https://ria.ru/20170206/1487237739.html> (дата обращения 24.04.2024).
- [22] Yang Z., Zhang Z., Fan W., Deng Y. Mechanism analysis and experimental verification of electromagnetic sail, a new solar propulsion system without propellant. *AIP Publishing*, 2021, no. 1-2019. <https://doi.org/10.1063/5.0045258>
- [23] *ESA successfully unfurls sail to drag spacecraft out of orbit*. URL: <https://www.space.com/esa-drag-sail-prototype-adeo-unfurls> (accessed April 24, 2024).
- [24] Sheer A., Li S. Space Debris Mounting Global Menace Legal Issues Pertaining to Space Debris Removal: Ought to Revamp Existing Space Law Regime. *Beijing Law Review*, 2019, vol. 10, no. 3. <https://doi.org/10.4236/blr.2019.103025>

Поступила в редакцию 08.07.2024

Милехина Екатерина Андреевна — студентка магистратуры кафедры «Экономика и организация производства», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Корянов Всеволод Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация. E-mail: vkoryanov@mail.ru; SPIN-код: 6616-8654.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Милехина Е.А. Методы утилизации космического мусора. *Политехнический молодежный журнал*, 2024, № 05 (94). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/arse/nateeu/1000.html>

METHODS OF THE SPACE DEBRIS DISPOSAL

E.A. Milekhina

kati.milekhina@gmail.com

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

The paper considers a problem of the near-Earth space pollution with space debris, shows its various disposal methods and focuses on the active and passive approaches. It compares and analyzes principles of the various technologies operation, their advantages, disadvantages and applicability in the modern space industry. Active methods include the use of satellites and robots to capture and remove debris, while the passive methods focus on preventing the debris formation or its automatic deactivation. The paper also highlights the prospects and challenges facing scientific community in effectively solving this problem.

Keywords: space, space research, space debris, satellites, space debris disposal

Received 08.07.2024

Milekhina E.A. — Master's Program Student, Department of Economics and Production Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Koryanov V.V., Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Department of Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecraft, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation. E-mail: vkoryanov@mail.ru; SPIN-code: 6616-8654.

Please cite this article in English as:

Milekhina E.A. Methods of the space debris disposal. *Politekhnicheskij molodezhnyy zhurnal*, 2024, no. 05 (94). (In Russ.). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/arise/nateeu/1000.html>