

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАССИВНЫХ МЕТОДОВ ЛИКВИДАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

С.А. Камаев

kamaevserg@gmail.com

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

Рассмотрена проблема загрязнения околоземного пространства космическим мусором, показаны последствия этого загрязнения. Описаны различные методы утилизации космического мусора, при этом основное внимание сконцентрировано на пассивных подходах. Проанализированы принципы работы различных технологий, их преимущества, недостатки и применимость в условиях современной космической индустрии. Рассмотрена целесообразность их использования в денежном эквиваленте. Также рассмотрено совместное использование пассивных методов и экономический эффект от их применения. Использование данных методов позволит не только решить проблемы загрязнения околоземной орбиты, обеспечения безопасной работы космической техники, но и повлиять на общее развитие космических технологий и освоение космоса путем интеграции вышеупомянутых методов в отрасли, связанной с изучением Солнечной системы и дальнего космоса.

Ключевые слова: космос, космические исследования, космический мусор, спутник, утилизация космического мусора, засорение, орбита

Введение. Космический мусор — это объекты искусственного происхождения, которые находятся на орбите, но не представляют никакой практической значимости. В основном это аппараты, которые закончили свое активное существование — вышли из строя в результате аварии или просто выработали свой ресурс.

Космический мусор является проблемой, имеющей действительно космические масштабы. Системного решения этой проблемы не существует до сих пор. Уже сейчас на орбите Земли находится примерно миллион объектов размером 10 мм в диаметре, а скоро там и вовсе будет не протолкнуться. Многие в целом представляют себе, чем это все грозит, и оценивают масштаб проблемы — особенно с учетом того, что мусор движется со средней скоростью, в 10 раз превышающей начальную скорость пули, выпущенной из автомата Калашникова.

Угрозы космического мусора. Как уже было упомянуто, одной из главных проблем является скорость движения мусора. Другая важная проблема — количество космического мусора, который можно классифицировать по размеру.

Первую группу составляет малый космический мусор — это объекты, размер которых менее 1 см. Эти миллионы частиц практически никак не отслеживаются с Земли. Их полет непредсказуем. По данным, собранным к концу 2020 г., в космосе уже находится почти 128 млн фрагментов мусора размером более 1 мм, а частиц размером до 1 мм в диаметре насчитываются уже триллионы [1].

Вторая группа — средний космический мусор. Это объекты с диаметром наибольшего поперечного сечения от 1 до 10 см. Пусть их существенно меньше — порядка 900 тыс. единиц, — они намного опаснее. Плюс в том, что средние объекты можно отслеживать. Ранее задача их обнаружения вообще казалась фактически невозможной, но с лета 2021 г. микрочастицы стало возможно видеть в режиме реального времени благодаря интерактивной карте космического мусора AstriaGraph [2].

Самая малочисленная и самая опасная группа объектов — это крупный космический мусор. К нему относится все, что имеет диаметр поперечного сечения больше 10 см. Таких объектов к концу 2020 г. насчитывается уже порядка 34 тыс. единиц [1]. Это космические аппараты (КА) и их крупные обломки. Столкновение с таким объектом подобно аварии с автомобилем на скорости 28 тыс. км/ч. Более того, при разрушении образуется большое количество мелкого космического мусора, который будет двигаться по непредсказуемым траекториям.

Уже около 3 тыс. спутников вышли из строя из-за мусора и сами превратились в космический мусор. В ночь на 12 ноября 2021 г. фрагмент китайского метеоспутника Fengyun-1C должен был оказаться на расстоянии 600 м от Международной космической станции, и во избежание катастрофы орбиту станции подняли на 1200 м, а экипаж укрылся в космических кораблях [3]. Три дня спустя стало ясно, что столкновения удалось избежать, но гарантий, что ситуация не повторится, дать никто не может.

Синдром Кесслера. Как уже было упомянуто, даже мелкие объекты, двигаясь с космической скоростью, могут полностью уничтожить или вывести из строя работающий спутник в случае столкновения с ним. И таких случаев становится все больше. В недалеком будущем может наступить ситуация, когда цепная реакция разрастания космического мусора сделает использование космического пространства невозможным. Гипотеза о каскадном саморазмножении космического мусора в результате взаимных столкновений обломков впервые была выдвинута консультантом НАСА Дональдом Кесслером в 1978 г. [4].

По данным исследований, существуют расчетные значения для максимального количества спутников, которые могут быть выведены на орбиту

до наступления синдрома Кесслера. Это пороговое значение для количества спутников является функцией физических параметров и составляет около 72 000 спутников [5].

Современные решения проблемы космического мусора. Уже есть ряд предложений по борьбе с космическим мусором — от радикальных, вроде полного отказа от полетов в космос на несколько десятков лет в ожидании, пока околоземное пространство очистится само, до вполне реализуемых.

На сегодняшний день во избежание столкновения КА с космическим мусором либо уводят аппарат от столкновения, либо перемещают космический мусор на орбиту захоронения. Для перехода на орбиту захоронения выше геостационарной орбиты необходимо то же количество топлива, которое требуется спутнику примерно для трех месяцев удержания орбитальной станции. Также необходимо обеспечивать надежное управление ориентацией во время маневра перехода. Что же касается увода рабочих КА, то для их операторов стало обычным делом отклонять свою миссию от опасного пути. Фактически каждая запущенная миссия выполняет в среднем до четырех «маневров избегания столкновений» в год [6]. Эти маневры обходятся дорого. На земле необходимо потратить целые часы, отслеживая небо, рассчитывая риск и планируя маневры, не говоря уже о дополнительном расходе топлива и упущенных научных данных, которые можно было бы собрать за время, пока приборы выключены.

Операторы спутников обычно получают целый поток сигналов тревоги, большинство из которых ложные, и поэтому выполняют множество ненужных, но дорогостоящих маневров. Группировка из 300 спутников может получать около 580 сигналов тревоги, требующих вмешательства человека и маневров спутников в год. С учетом того что аварийный маневр на низкой околоземной орбите стоит около 25 000 евро, это составляет ошеломляющую сумму в 14 млн евро в год [7].

Основной проблемой является то, что применение рассмотренных методов не решает проблему существования космического мусора, и поэтому важно рассматривать методы по ликвидации космического мусора со всех орбит нашей планеты.

Подобные методы уже существуют. В данной работе будут рассмотрены пассивные методы увода КА. Эта группа методов предполагает использование естественной среды — того, что есть вокруг нас, — без искусственных воздействий.

Солнечный парус. Рассмотрим строение и принцип работы космического паруса. Парус представляет собой зеркало, которое обладает идеальными свойствами. Установим его в плоскость, перпендикулярную солнечным лу-

чам. Тогда сила давления светового потока будет направлена вдоль излучения. Набегающие фотоны дважды обмениваются импульсом с парусом: при поглощении и при излучении. Зеркало, в свою очередь, передает это силовое воздействие КА. Поворачивая парус, можно управлять направлением вектора тяги. Однако за это приходится платить ее значением, поскольку если нормаль плоского паруса перпендикулярна потоку лучей, то парус вообще не даст никакой тяги.

Ускорение, которое сообщает КА поток солнечных лучей, зависит также от отношения площади паруса к массе всей конструкции.

Совершенствование технологий солнечных парусов на примерах некоторых аппаратов. На сегодняшний день будущее технологии солнечного паруса больше напоминает сюжет фантастических фильмов, впрочем, разработки сверхскоростных наноспутников, оборудованных солнечными парусами, более чем реальны. Так, в 2016 г. группа Breakthrough Initiatives заявила о старте краудфандинговой платформы, главной целью которой станут исследования возможности запуска к ближайшей от нас звездной системе, Альфа Центавра, наноспутника весом 1 г, движимого силой фотонного паруса и лазерной установки, которая обеспечит сохранение его ускорения по мере удаления аппарата от Солнца [8].

Один из перспективных подходов предполагает создание оптических наноструктур, называемых «фотонными кристаллами», состоящих из повторяющейся сетки крошечных отверстий. Пробивание миллионов или миллиардов таких отверстий в материале значительно снижает его вес, но эти повторяющиеся структуры также создают необычные оптические эффекты, которые фактически могут повысить отражательную способность материала. Команда прогнозирует, что создание полноразмерного паруса площадью 100 м² займет около дня и будет стоить около 27 000 дол. США.

Эффективность использования солнечного паруса на разных орбитах. На высоте от 600 до 800 км сила воздействия фотонов преобладает над силой сопротивления атмосферы, поэтому целесообразнее использовать механизм развертывания паруса, взаимодействующего с солнечным светом. А при снижении до 500 км мусор и сам будет стремиться к сгоранию в плотных слоях атмосферы. Однако солнечный парус вполне эффективен и на геостационарной орбите. По результатам некоторых исследований [9], космический мусор массой 1000 кг, находясь на геостационарной орбите, был успешно сведен с нее при использовании парусов площадью 25 м² за 2350 дней; 100 м² — за 639 дней; 400 м² — за 236 дней.

По данным расчетов, спуск малых КА и космического мусора с низкой околоземной орбиты составляет примерно 70–120 дней [10].

Результат использования солнечного паруса. Как уже было изложено, стоимость солнечного паруса площадью 100 м² и его доставка рассчитывается 2 700 000 руб. (ввиду веса меньше 1 г, стоимость отправки в космос самого паруса можно не учитывать).

Важным фактором для скорости и эффективности удаления космического мусора является размер паруса. Однако пусть при увеличении его размера, растет и его эффективность, вместе с этим растет и вероятность аварийных ситуаций, что, безусловно, необходимо учитывать при использовании данного метода.

Устройство аэродинамической системы увода космического аппарата с орбиты. Принцип действия аэродинамических устройств увода КА с рабочих орбит основан на увеличении площади поперечного к направлению потока сечения КА, что приводит к увеличению силы аэродинамического сопротивления, которая направлена противоположно движению КА.

По завершении срока активного существования или в случае отказа малого КА для эффективного увода спутника с орбиты контроллер выдает команду на открытие контейнера хранения и включение газогенератора, в результате чего раскрывается надуваемый баллон. Условием для включения предлагаемой системы увода может служить выход из строя аккумуляторных батарей, команда с наземного комплекса управления космическими аппаратами или сигнал установленного таймера.

Рассмотрим реализацию методики увода с орбиты на основе аэродинамического торможения на примере малого КА «Аист» [11]. Результаты применения методики по выбору проектных параметров системы увода опытного образца «Аист» с орбиты 625 км показывают, что стоимость создания, выведения и эксплуатации КА составляет 1 161 000 руб., время увода с орбиты сократилось с 26 лет до 96 суток.

По сравнению с другими методами, работающими на низких орбитах, устройство аэродинамического торможения является гораздо эффективнее. По разным оценкам, объект космического мусора может быть сведен с орбиты высотой 500 км менее чем за 1 год. Однако важно понимать, что с ростом высоты эффективность торможения атмосферы падает: для высоты орбиты 800 км время увода увеличивается до 16 лет, для 900 км — до 39 лет, поэтому использовать атмосферное торможение для объектов, находящихся выше 800 км, нецелесообразно [12].

Устройство электродинамической тросовой системы увода космического аппарата с орбиты. Магнитное поле Земли может быть использовано для создания силы торможения, способной увезти объект с некоторых орбит. Эта сила может создаваться при помощи длинного токопроводящего троса.

Из курса школьной физики известно, что Земля — это большой магнит с северным и южным полюсами и магнитным полем. Если в магнитном поле двигать проводник с током, возникнет сила Ампера, которую можно использовать для торможения. Для этого с объекта необходимо вертикально к Земле опустить трос и пустить по нему ток.

Результаты уже проведенного моделирования [12] показывают, что электродинамическая тросовая система с массой около 1 % от массы КА позволят свести его с орбиты за время от 5–6 месяцев (для орбиты с наклоном 0°) до 1 года (для орбиты с наклоном в 50°). Однако стоит отметить, что немногочисленные на сегодняшний день эксперименты выявили основную проблему тросовых механизмов — их низкую надежность из-за повышенного риска неудачного развертывания троса.

Сравнение методов ликвидации. Если рассматривать жизнь КА в зависимости от высоты при условии, что для его увода ничего специально не делается, то на орбите 500 км аппарат будет жить 10–15 лет, а на высоте 1000 км может беспрепятственно существовать более 1,5 тыс. лет. При использовании атмосферы для торможения аппарата на орбите высотой до 1000 км 1,5 тыс. лет превращаются в 100 лет, что говорит о достаточно высокой эффективности метода.

С электродинамической тросовой системой 1,5 тыс. лет можно сократить до 1–2 лет. На практике большую эффективность могут показывать их совместные применения для гораздо большего сокращения времени по отношению к дополнительным затраченным средствам. Например, использовать солнечный парус для увода объекта на орбиту высотой 600...700 км, а впоследствии в дополнение использовать сопротивление атмосферы, когда его применение становится более целесообразным по сравнению с использованием солнечного паруса. Не менее важно совместное применение солнечного паруса и электродинамической тросовой системы. По результатам исследований [9] можно заметить, что время увода космического мусора значительно сокращается.

Как сказано выше, средств для аварийного маневра одного спутника в год уходит порядка 50 тыс. евро. С учетом количества размещенных рабочих спутников и активного вывода новых эта сумма может достигать 600 млн евро в год. При совместном применении солнечного паруса и метода сопротивления атмосферы расходы только на оборудование составит около 4 млн руб. (примерно 40 тыс. евро) для одного объекта космического мусора. Данные методы эффективно использовать против самого опасного крупного космического мусора, которого уже насчитывается порядка 34 000 единиц, поэтому ликвидация его с орбит Земле будет стоить примерно 1 млрд 360 млн евро.

Заключение. По результатам проведенной работы можно сделать следующие выводы.

1. Все методы в основном эффективны на малых околоземных орбитах, а на удалении от Земли их значимость и экономическая целесообразность падают.

2. В основном рассмотренные методы работают при размещении средств их реализации на КА до отправки в космос. Один из главных недостатков — одноразовость их использования. Однако при дальнейшей разработке действующей методики вывода средств на орбиты и технологии установки на существующий космический мусор они уже способны доказывать свою эффективность.

3. Поскольку стоимость маневров по уводу КА для их защиты и окончательному уводу космического мусора имеет примерно один порядок, а во втором случае решается проблема самого факта существования космического мусора, логично заключить, что пассивные методы можно и нужно рассматривать для решения проблемы космического мусора.

Литература

- [1] *Космический мусор: чем опасно загрязнение околоземного пространства для спутников и космических исследований.* URL: <https://ecosphere.press/2025/02/07/kosmicheskij-musor-kak-rojavilas-svalka-na-orbite/> (дата обращения 12.03.2025).
- [2] *AstriaGraph.* URL: <http://astria.tacc.utexas.edu/AstriaGraph/> (accessed 24.03.2025).
- [3] Ячменникова Н. *Шансы на столкновение МКС с космическим мусором очень малы.* URL: <https://rg.ru/2021/11/15/shansy-na-stolknovenie-mks-s-kosmicheskim-musorom-ochen-maly.html> (дата обращения 14.03.2025).
- [4] Ключников В.Ю. Синдром Кесслера: будет ли закрыта дорога в космос? *Воздушно-космическая сфера*, 2021, № 4, с. 32–43.
- [5] Bongers A., Torres J. L. Orbital debris and the market for satellites. *Ecological Economics*, 2023, vol. 209. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2023.107831>
- [6] *ESA & UNOOSA space debris infographics and podcast.* URL: https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Debris/ESA_UNOOSA_space_debris_infographics_and_podcast (accessed 15.03.2025).
- [7] *Neuraspace introduces “Machine Learning Prediction Plots” for earlier collision avoidance planning.* URL: <https://blog.neuraspace.com/press-release-machine-learning-prediction-plots> (accessed 15.03.2025).
- [8] *This Ultra-Thin Lightsail Could Tow Tiny Spacecraft to the Nearest Stars.* URL: https://singularityhub.com/2024/07/31/this-ultra-thin-lightsail-could-tow-a-tiny-spacecraft-to-the-nearest-stars/?utm_source=ixbtcom (accessed 17.03.2025).

- [9] Visagie L., Theodorou T. HybridSail: Hybrid Solar Sails for Active Debris Removal. *Advanced Concepts Team*, 2011.
- [10] Трофимов С.П. *Увод малых космических аппаратов с низких околоземных орбит*. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Москва, 2015, 125 с. URL: <http://library.keldysh.ru/diss.asp?id=2015-trofimov> (дата обращения 14.03.2025).
- [11] Крестина А.В., Ткаченко И.С. Методика выбора проектных параметров системы увода малых космических аппаратов с орбиты. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 8. URL: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-8-2002>
- [12] Пикалов Р.С., Юдинцев В.В. Обзор и выбор средств увода крупногабаритного космического мусора. *Труды МАИ*, 2018. вып. 100. URL: https://trudymai.ru/upload/iblock/239/Pikalov_YUdintsev_rus.pdf (дата обращения 14.03.2025).

Поступила в редакцию 10.06.2025

Камаев Сергей Александрович — студент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Васильева Татьяна Владимировна, старший преподаватель кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Камаев С.А. Сравнительный анализ эффективности пассивных методов ликвидации космического мусора. *Политехнический молодежный журнал*, 2026, № 01 (102). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/arse/nateeu/1089.html>

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF PASSIVE METHODS OF SPACE DEBRIS REMOVAL

S.A. Kamaev

kamaevserg@gmail.com

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

The problem of pollution of near-Earth space by space debris and the consequences associated with it are considered. Various methods of its disposal are shown, focusing on passive approaches. The principles of operation of various technologies, their advantages, disadvantages and applicability in the conditions of the modern space industry are analyzed. The expediency of their use in monetary terms is considered. The joint use of passive methods and the economic effect of their application are also considered. The use of these methods can not only solve the problems of near-Earth orbit pollution and ensure the safe operation of space technology, but also influence the overall development of space technologies and space exploration by integrating the above-mentioned methods into industries related to the study of the Solar system and deep space.

Keywords: space, space research, space debris, satellite, space debris disposal, pollution, orbit

Received 10.06.2025

Kamaev S.A. — student of Department of Technologies of Rocket and Space Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Vasilieva T.V., Senior Lecturer of Department of Technologies of Rocket and Space Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation. E-mail: vtv64@mail.ru

Please cite this article in English as:

Kamaev S.A. Comparative analysis of the effectiveness of passive methods of space debris removal. *Politekhnicheskiy molodezhnyy zhurnal*, 2026, no. 01 (102). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/arise/nateeu/1089.html>