

КЛАССИФИКАЦИЯ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОГРАНИЧЕНИЯ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

© 2023

В. Ю. Ключников доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный учёный секретарь;
АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»,
г. Королев;
KlyushnikovVY@tsniimash.ru

А. П. Захарова аспирант, научный сотрудник;
АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»,
г. Королев;
ZakharovaAP@tsniimash.ru

И. В. Усовик кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник;
АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»,
г. Королев;
UsovikIV@tsniimash.ru

Представлены анализ и классификация методов ограничения техногенного загрязнения околоземного космического пространства по выбранным критериям. Дана краткая характеристика существующих и перспективных методов ограничения техногенного загрязнения околоземного космического пространства с указанием уровня технологической готовности и области применения того или иного метода.

Ограничение техногенного засорения; техногенное загрязнение; космический мусор; околоземное космическое пространство; космический аппарат; классификация

Цитирование: Ключников В.Ю., Захарова А.П., Усовик И.В. Классификация и сравнительный анализ методов ограничения техногенного загрязнения околоземного космического пространства // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2023. Т. 22, № 3. С. 25-35.
DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-3-25-35

Введение

Проблема загрязнения околоземного космического пространства (ОКП) «космическим мусором» (КМ), как чисто теоретическая, возникла в конце 1950-х гг., сразу после начала запусков первых искусственных спутников Земли. Официальный статус на международном уровне она получила в начале 80-х годов прошлого столетия. Тогда по поручению Научно-технического подкомитета Комитета ООН по использованию космического пространства в мирных целях впервые были проведены исследования проблемы воздействия космических запусков на окружающую среду, включая ОКП. В работах активное участие принимали Комитет по космическим исследованиям, Международный совет научных союзов и Международная астронавтическая федерация. Результаты исследований были отражены в ряде итоговых документов [1; 2], в которых увеличение количества КМ, образующегося в ходе повседневной космической деятельности, а также в результате преднамеренных и непреднамеренных взрывов и разрушений космических объектов, признано наиболее опасным видом воздействия ракетно-космической техники (РКТ) на окружающую среду.

Образование КМ, во-первых, экстерриториально, а во-вторых – обладает свойством кумулятивности, т.е. способностью накапливаться. Если экстерриториальность (глобальность) загрязнения ОКП КМ очевидна, то кумулятивность загрязнения КМ научное сообщество осознало спустя 20 - 30 лет после начала космической эры. Моде-

лирование эволюции загрязнения ОКП, к примеру на основе отечественной модели SDPA (рис. 1), показывает, что даже после полного прекращения космических запусков частота взаимных столкновений, а значит и численность орбитальной группировки КМ все равно будет возрастать [3]. Аналогичные результаты получены и при использовании других моделей.

Таким образом, задача очистки ОКП от КМ (или хотя бы уменьшение орбитальной группировки КМ), конечно, стоит, но в ближайшие годы не может быть в полной мере решена именно вследствие кумулятивности загрязнения ОКП и слишком большого количества КМ различного размера на околоземных орбитах. Популяция КМ определённой размерности (например, более 10 см) может быть снижена только лишь в локальной операционной области ОКП (например, в области низких околоземных орбит (НОО) высотой до 2000 км или на геостационарной орбите (ГСО)). По этой причине корректно ставить и радикально решать можно только лишь задачу ограничения техногенного загрязнения ОКП, под которым понимают предотвращение образования новых объектов и фрагментов КМ в ОКП [4].

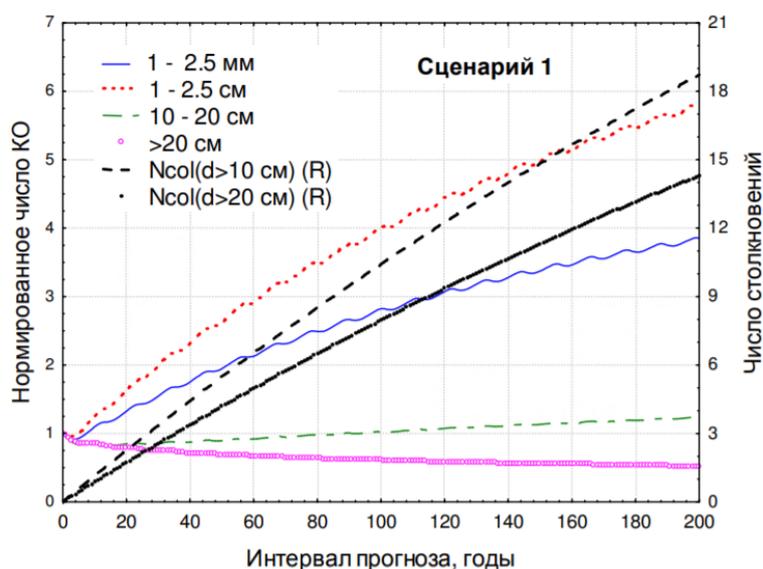


Рис. 1. Прогноз нормированного числа космических объектов и частоты столкновений на основе модели SDPA с учётом полного прекращения космической деятельности [3]

Поскольку образование КМ представляет собой глобальную проблему, то и предотвращение образования новых фрагментов КМ должно регулироваться на международном уровне путём разработки и внедрения международно признанных организационных и технических мероприятий.

Важным шагом в этом направлении было опубликование «Руководящих принципов по предупреждению образования космического мусора» Комитетом по использованию космического пространства в мирных целях [5] и Межагентским координационным комитетом по космическому мусору [6], а также разработка и внедрение международного стандарта ИСО 24113 [7]. Эти документы являются базовыми для рекомендательных нормативных документов национального законодательства, включая разработку технических стандартов. Так, на основе упомянутых документов, был разработан отечественный национальный стандарт ГОСТ Р 52925-2018 [8].

Классификация методов ограничения техногенного загрязнения околоземного космического пространства

В основу классификации методов ограничения техногенного загрязнения ОКП (рис. 2) могут быть положены четыре основных критерия:

- 1) время реализации принятого метода относительно момента наступления возможной угрозы (например, столкновения или взрыва с активным космическим аппаратом (КА) или фрагментом КМ): до или после;
- 2) степень конкретизации угрозы (конкретный фрагмент КМ определённой массы, космический объект или орбитальная группировка КМ в целом);
- 3) область ОКП, где может применяться тот или иной метод (НОО, ГСО, высокоэллиптические орбиты (ВЭО) либо тип орбиты не принципиален);
- 4) тип космического объекта, для которого применим метод (область применения метода).

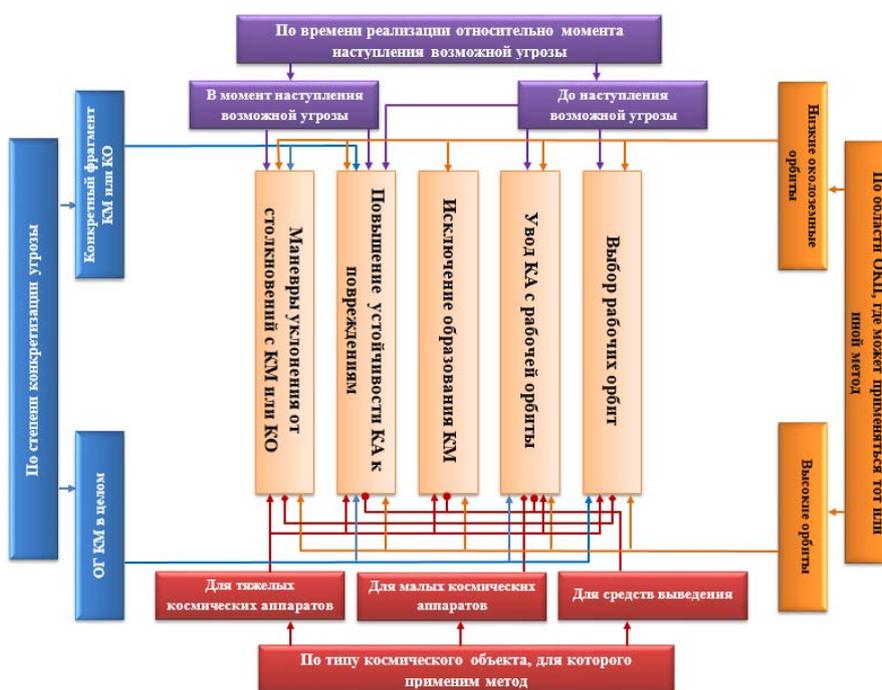


Рис. 2. Классификация методов ограничения техногенного загрязнения околоземного космического пространства

Анализ перечисленных выше нормативных документов, а также проектно-конструкторских решений, содержащихся в научной периодике, монографиях и технической документации, позволяет выделить следующие направления ограничения техногенного загрязнения ОКП (табл. 1):

1. Предотвращение (снижение вероятности) разрушения КА, достигаемое превентивно, до наступления любой возможной угрозы (например, столкновения или взрыва с активным КА или фрагментом КМ) за счёт:

- выбора рабочих орбит КА (наименее загрязнённой фрагментами КМ и функционирующими КА или с минимально возможным сроком баллистического существования);
- увода КА с рабочей орбиты по истечении срока активного функционирования;
- реализации проектно-конструкторских решений, исключающих образование КМ (использование пиротехнических средств, не реагирующих на столкновения с КМ, или пассивация).

2. Защита от непосредственного столкновения активного КА с другим КА или с фрагментом КМ, реализуемая в момент конкретной угрозы за счёт:

- устойчивости КА к разрушению в результате столкновения с КМ (например, путём установки защитных экранов, предохраняющих КА от механических повреждений при столкновениях с КМ, защиты корпуса от пробития частицей КМ или использования пиротехнических средств, не реагирующих на ударные воздействия, вызванные столкновением);
- манёвров уклонения активно функционирующих КА от столкновений с фрагментами КМ или с другими космическими объектами.

Таблица 1. Направления / методы ограничения техногенного загрязнения околоземного космического пространства

Направление / метод		Рекомендуемая область ОКП для использования метода	Тип КО, для которого применим метод	Характер возможной угрозы	Достигнутый уровень технологической готовности метода
Предотвращение (снижение вероятности) разрушения КА					
Выбор рабочих орбит запускаемого КА	Орбиты с минимально возможными сроками баллистического существования	НОО (высотой 500±100 км) или сверхнизкая орбита (высотой менее 200 км)	КА любой размерности Средства выведения	Общая угроза столкновения или взрыва	9
	Орбиты, наименее загрязнённые фрагментами КМ и функционирующими КА	Любые орбиты	КА любой размерности	Общая угроза столкновения или взрыва	9
Увод КА с рабочей орбиты по истечении срока активного функционирования	Активные способы	НОО (высотой до 2000 км) или ГСО	КА любой размерности	Общая угроза столкновения	7
	Пассивные способы	НОО (высотой до 2000 км)	Преимущественно малые КА	Преимущественно угроза столкновения с ненаблюдаемыми фрагментами КМ	7 – 9
Реализация проектно-конструкторских решений, исключающих образование КМ	Использование пиротехнических средств, не реагирующих на столкновения с КМ	Любые орбиты	Средства выведения	Общая угроза столкновения и взрыва	2
	Пассивация	Любые орбиты	Средства выведения КА любой размерности	Общая угроза взрыва	9
Защита от непосредственного столкновения активного КА с другим КО или с фрагментом КМ					
Повышение устойчивости КА к разрушению в результате столкновения с КМ	Установка защитных экранов	Любые орбиты	Тяжёлые КА	Угроза столкновения	4
	Защита корпуса от пробития частицей КМ	Любые орбиты	Тяжёлые КА Средства выведения	Угроза столкновения с ненаблюдаемыми фрагментами КМ	9
	Использование пиротехнических средств, не реагирующих на столкновения с КМ	Любые орбиты	Средства выведения	Угроза столкновения	2
Проведение активно функционирующими КА манёвров уклонения от столкновений	-	Любые орбиты	Тяжёлые и средние КА	Угроза столкновения	9

Примечание: Уровни технологической готовности оценивались в соответствии с ГОСТ Р 56861-2016 «Система управления жизненным циклом. Разработка концепции изделия и технологий. Общие положения».

Сравнительный анализ методов ограничения техногенного загрязнения околоземного космического пространства

1. Выбор рабочих орбит запускаемого КА

С точки зрения максимального ограничения загрязнения ОКП космическим мусором целесообразно, во-первых, выводить КА на орбиты с минимальной пространственной плотностью КМ (для снижения вероятности столкновений с фрагментами КМ), а во-вторых – на орбиты с минимальным временем баллистического существования (в соответствии с действующими нормативными документами – не более 25 лет), обладающие большим потенциалом самоочищения.

В настоящее время максимумы концентрации КМ приходятся на НОО высотой до 2000 км и на ГСО. Количество точек стояния на ГСО ограничено 425 точками [9], и на данный момент там находится более 550 активных КА. Гораздо в большей степени загрязнены НОО. Особенно высока плотность КМ в диапазонах высот орбит 400...900 км и 1400...1600 км [10] (рис. 3). Таким образом, требованиям выбора рабочих орбит запускаемого КА по критериям минимальной пространственной плотности и минимальному времени баллистического существования удовлетворяют НОО в диапазонах < 300 км, 900...1400 км, а также > 2000 км.

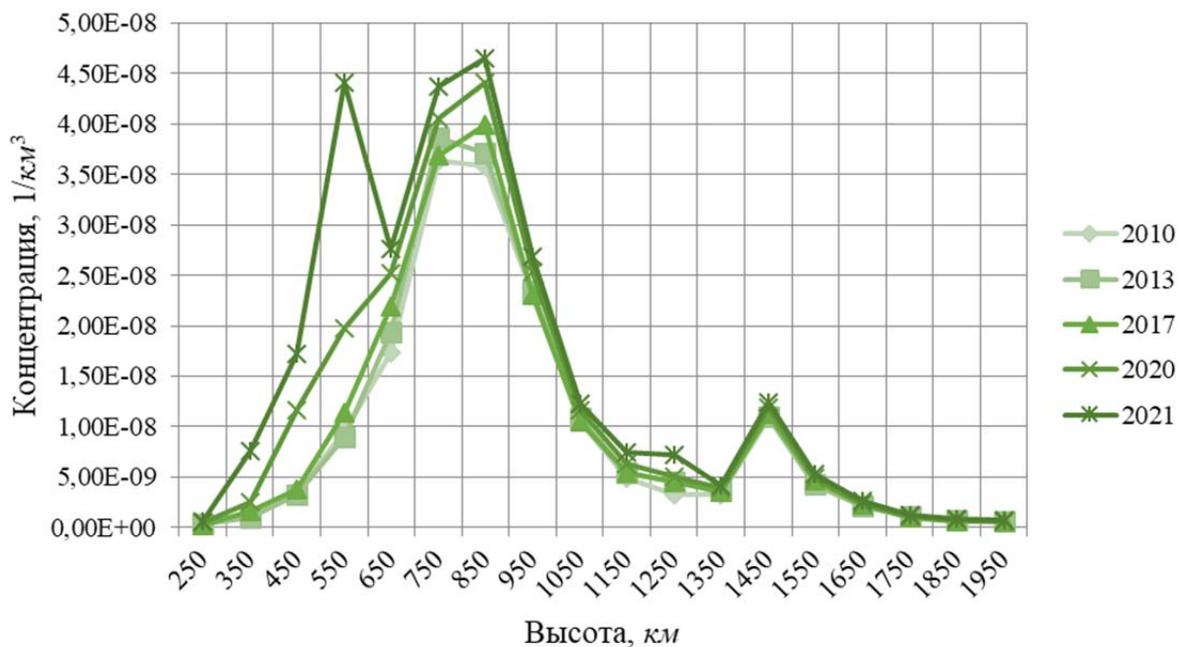


Рис. 3. Распределение космического мусора на высотах от 100 до 2000 км по годам

2. Увод КА с рабочей орбиты по истечении срока активного функционирования

Результаты расчётов, представленные в [11], показывают существенное влияние увода КА с рабочей орбиты в конце срока функционирования на эволюцию популяции объектов КМ в ОКП. Из рис. 4 следует, что при 90%-м соблюдении рекомендаций по уводу космических объектов (КО) с НОО после окончания активного функционирования, по сравнению с 30%-м соблюдением, загрязнение области НОО объектами размером более 10 см снизится на ~15% за 100 лет, а за 200 лет – на ~44% (при сохранении текущей интенсивности запусков).

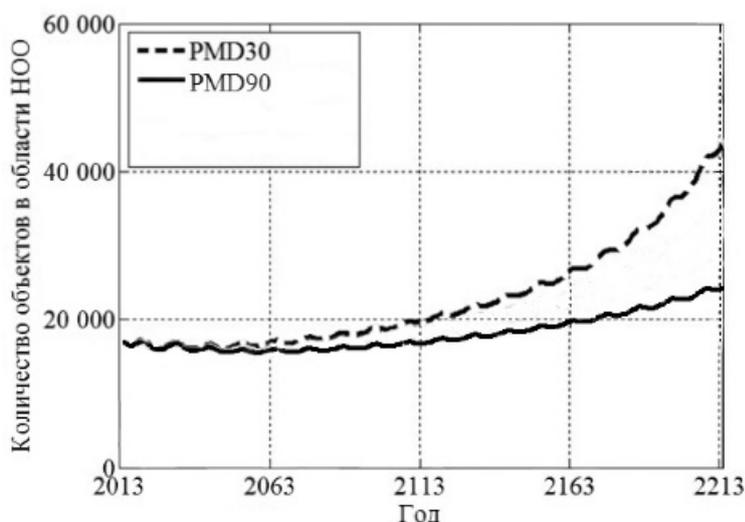


Рис. 4. Результаты прогноза эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит при соблюдении рекомендаций по уводу космических объектов с рабочей орбиты после окончания активного функционирования [11]

Увод КА с рабочей орбиты может быть осуществлён при помощи собственной двигательной установки (активный увод), а также за счёт использования аэродинамических или солнечных тормозных устройств (пассивный увод).

Полученные в [12] результаты расчётов характеристической скорости показали, что максимум необходимого запаса характеристической скорости для увода КА на орбиту захоронения (или в плотные слои атмосферы) с НОО составляет 337 м/с (затраты зависят от высоты рабочей орбиты КА), а с ГСО – 23 м/с.

Для пассивного увода отработавших КО используется атмосферное сопротивление или давление солнечного света. Устройства типа «солнечный парус» (приводящие в движение КА с помощью давления солнечного света) могут быть использованы для увода КА, прекративших активное существование на орбитах высотой более 700 км, а аэродинамические тормозные устройства – на высотах $h < 500$ км.

3. Реализации проектно-конструкторских решений, исключающих образование КМ

Функционирование на орбите изделий РКТ (последних ступеней ракет-носителей, разгонных блоков, космических аппаратов) сопровождается отделением операционных элементов: пружин, толкателей, фрагментов пироболтов, пиромембран и т.п. Так, по результатам анализа данных каталогизированных объектов КМ с сайта www.space-track.org, образовавшихся в результате пусков в 2021 году, в 41 пуске было обнаружено 102 объекта, которые классифицированы как элементы запущенных ракет-носителей РН. Большинство образовавшихся фрагментов будут находиться на орбите менее 25 лет, остальные 8 объектов (7,8%) имеют срок баллистического существования от 80 лет и более, включая 1 объект в области ГСО.

На рис. 5 обобщены основные причины образования фрагментов КМ (по данным до 2020 года) [10]. Следует заметить, что причиной 34,3% от всех рассмотренных событий являются взрывы.

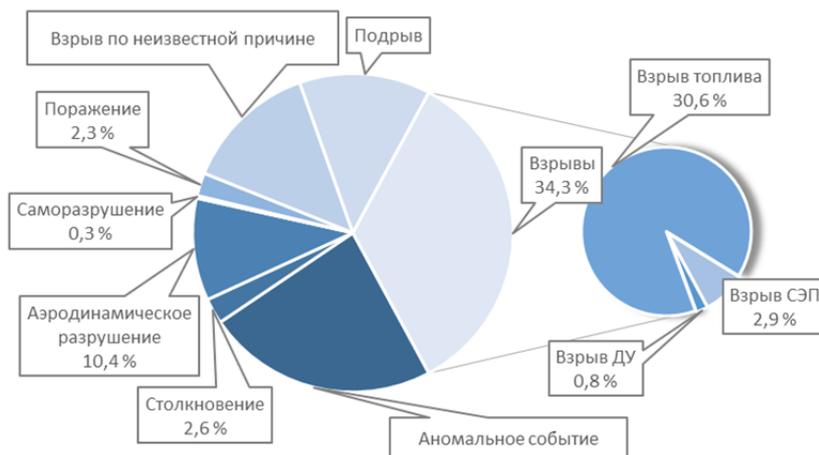


Рис. 5. Основные причины возникновения фрагментов космического мусора

В целях исключения причин взрывов на орбите перед завершением активного функционирования КО проводится пассивация, предусматривающая удаление (дожигание или дренаж) остатков топлива и газов наддува из баков и магистралей двигательной установки (ДУ), разрядку бортовых батарей и размыкание зарядных линий; стравливание газов из баллонов высокого давления, разгрузку (прекращение вращения) маховиков, гироскопов и других механических устройств.

Таким образом, проектно-конструкторские решения, исключающие (или, по крайней мере, ограничивающие) образование КМ, сводятся к исключению отделения операционных элементов изделий РКТ и пассивации космического средства после окончания его активного функционирования.

4. Повышение устойчивости космических аппаратов к разрушению в результате столкновений с космическим мусором

Повышение устойчивости тяжёлых КА и орбитальных станций (ОС) к разрушению в результате столкновений с КМ может быть достигнуто путём упрочнения корпуса КА (ОС), использования прочных конструкционных материалов и специальных покрытий, установкой на КА (ОС) защитных экранов, а также за счёт использования пиротехнических средств, не реагирующих на столкновения с КМ. Полная защита, обеспечивающая устойчивость КО к разрушению в результате столкновений с маломерным КМ, приводит к существенному увеличению массы КО и удорожанию конструкции. Экраны же относительно компактны и устанавливаются с учётом углов полёта фрагментов КМ. Помимо экранной защиты критичных зон ОС, устойчивость тяжёлых КА к разрушению в результате столкновений с КМ может быть повышена также за счёт использования пиротехнических элементов, не чувствительных к ударному воздействию. Подобный подход соответствует требованиям п. 6.2.3 ГОСТ Р 52925-2018 и может быть реализован с учётом потребных ресурсных затрат.

5. Проведение активно функционирующими космическими аппаратами манёвров уклонения от столкновений с фрагментами космического мусора или с другими космическими объектами

Для предотвращения столкновения активно функционирующего КА с фрагментом КМ может проводиться коррекция орбиты (манёвр уклонения). Так, периодически проводятся манёвры уклонения Международной космической станции от столкновения с крупными фрагментами КМ (в зависимости от рассчитанной вероятности столкновения и прогнозируемой дальности сближения). Для избегания столкновения с фрагмен-

том КМ 28 февраля 2020 г. была проведена коррекция орбиты европейского спутника Sentinel-1B [13]. Регулярно, в целях обеспечения защиты от столкновений, корректируют свои орбиты КА многоспутниковой группировки Starlink [14]. Из-за увеличения загрязнённости ОКП манёвры уклонения от столкновения будут принимать все более массовый характер.

Манёвры во избежание столкновений могут осуществлять, как правило, тяжёлые и средние КА. Орбитальное маневрирование малых КА ограничено незначительными запасами топлива.

Заключение

Вследствие кумулятивности загрязнения ОКП и большого количества фрагментов КМ различного размера на околоземных орбитах задача уменьшения загрязнения околоземного космоса в ближайшем будущем не может быть решена. Корректно ставить и в полном объёме решить можно только лишь задачу ограничения техногенного загрязнения ОКП в смысле предотвращения образования новых объектов и фрагментов КМ в ОКП.

Проведённый сравнительный анализ показывает:

а) в области НОО для лёгких (малых) КА наиболее целесообразно использовать следующие методы ограничения загрязнения ОКП:

– пассивный увод КА с рабочей орбиты по истечении срока активного функционирования;

– выбор рабочих орбит с меньшим загрязнением и минимально возможными сроками баллистического существования;

б) при запусках КА средней и большой размерности, в целях ограничения загрязнения ОКП, целесообразно рекомендовать:

– выбор орбит, наименее загрязнённых фрагментами КМ и функционирующими КА;

– реализацию проектно-конструкторских решений, исключающих образование КМ;

– повышение устойчивости КА к разрушению в результате столкновения с КМ;

– уклонение от столкновений с фрагментами КМ или с другими КО;

– активный увод КА с рабочей орбиты по истечении срока активного функционирования;

в) для тяжёлых КО типа долговременных пилотируемых орбитальных станций или КА научного назначения целесообразно рекомендовать:

– реализацию проектно-конструкторских решений, исключающих образование КМ;

– повышение устойчивости КА к разрушению в результате столкновения с КМ;

– уклонение от столкновений с фрагментами КМ или с другими КО;

г) применительно к разгонным блокам и последним ступеням ракет-носителей, в целях ограничения загрязнения ОКП необходимо применять активный увод с рабочей орбиты сразу же после отделения выводимого КА, например, с использованием остатков ракетного топлива в баках путём их газификации и выброса через сопло ракетного двигателя.

Наиболее перспективным методом ограничения загрязнения ОКП следует считать увод КО с рабочей орбиты по истечении срока активного функционирования, так как в этом случае происходит снижение общей засорённости орбит за счёт уменьшения срока баллистического существования и скорейшего входа КО в плотные слои атмосферы Земли.

Библиографический список

1. A/AC.105/344. Environmental effects of space activities: study. <https://digitallibrary.un.org/record/75326>
2. A/AC.105/259. Study on the dynamics of space objects. <https://digitallibrary.un.org/record/11321?ln=ru>
3. Назаренко А.И. Моделирование космического мусора. М.: ИКИ РАН, 2013. 216 с.
4. Захарова А.П. Анализ и классификация методов ограничения и снижения техногенного засорения околоземного космического пространства // Тезисы докладов XXV Международной научной конференции «Системный анализ, управление и навигация» (4-11 июля 2021 г., Евпатория, Крым, Россия). М.: Изд-во МАИ, 2021. С. 91-93.
5. Руководящие принципы Комитета ООН по использованию космического пространства в мирных целях по предупреждению образования космического мусора. https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/space_debris.shtml
6. IADC space debris mitigation guidelines. 2020. <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/library/iadc-space-debris-guidelines-revision-2.pdf>
7. ISO 24113:2023. Space systems — Space debris mitigation requirements. 2023. 12 с.
8. ГОСТ Р 52925-2018. Изделия космической техники. Общие требования к космическим средствам по ограничению техногенного засорения околоземного космического пространства. М.: Стандартинформ, 2018. 13 с.
9. Шубин П.С. К истории и проблемам участия России в рынке пусковых услуг на геостационарную орбиту // Исследования космоса. 2019. № 1. С. 22-35. DOI: 10.7256/2453-8817.2019.1.31105
10. Захарова А.П., Степанов Д.В., Степанов И.Б., Усовик И.В. Анализ трафика запусков, разрушений космических объектов и сходов с орбиты в период 2010-2021 гг. как основных составляющих эволюции космического мусора // Космонавтика и ракетостроение. 2022. № 2 (125). С. 99-111.
11. Горлов А.Е., Усовик И.В. Влияние активного удаления космического мусора на долгосрочное состояние техногенного засорения низких околоземных орбит // Космонавтика и ракетостроение. 2015. № 5 (84). С. 107-112.
12. Дронь Н.М., Хорольский П.Г., Дубовик Л.Г. Оценка энергетических и массовых характеристик систем увода космических аппаратов на базе электроракетных двигателей // Вестник двигателестроения. 2016. № 2. С. 76-80.
13. Copernicus Sentinel-1B collision avoidance manoeuvres on 28 February 2020. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/-/copernicus-sentinel-1b-collision-avoidance-manoevres-on-28-february-2020>
14. SpaceX's Starlink orbital space safety plan: Broadband satellite constellation is capable of avoiding collisions autonomously. <https://www.tesmanian.com/blogs/tesmanian-blog/starlink-orbital-safety>

CLASSIFICATION AND COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR LIMITING TECHNOGENIC POLLUTION IN THE NEAR-EARTH SPACE

© 2023

- V. Yu. Klyushnikov** Doctor of Science (Engineering), Senior Researcher, Chief Scientific Secretary; JSC Central Research Institute for Machine Building, Korolyov, Russian Federation; KlyushnikovVY@tsniimash.ru
- A. P. Zakharova** Postgraduate Student, Researcher; JSC Central Research Institute for Machine Building, Korolyov, Russian Federation; ZakharovaAP@tsniimash.ru
- I. V. Usovik** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher; JSC Central Research Institute for Machine Building, Korolyov, Russian Federation; UsovikIV@tsniimash.ru

An analysis and classification of methods for limiting technogenic pollution of the near-Earth space according to selected criteria are presented. A brief description of existing and prospective methods for limiting technogenic pollution of the near-Earth space is given, indicating the level of technological readiness and the scope of application of a particular method.

Space debris mitigation; man-made pollution; space debris; near-Earth space; spacecraft; classification

Citation: Klyushnikov V.Yu., Zakharova A.P., Usovik I.V. Classification and comparative analysis of methods for limiting technogenic pollution in the near-Earth space. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2023. V. 22, no. 3. P. 25-35. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-3-25-35

References

1. A/AC.105/344. Environmental effects of space activities: study. Available at: <https://digitallibrary.un.org/record/75326>
2. A/AC.105/259. Study on the dynamics of space objects. Available at: <https://digitallibrary.un.org/record/11321?ln=ru>
3. Nazarenko A.I. *Modelirovanie kosmicheskogo musora* [Space debris modeling]. Moscow: IKI RAN Publ., 2013. 216 p.
4. Zakharova A.P. Analysis and classification of methods for limiting and reducing technogenic contamination of near-earth space. *Tezisy докладov XXV Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Sistemnyy Analiz, Upravlenie i Navigatsiya» (July, 4-11, 2021, Evpatoria, Crimea, Russian Federation)*. Moscow: Moscow Aviation Institute Publ., 2021. P. 91-93. (In Russ.)
5. *Rukovodyashchie printsipy Komiteta po ispol'zovaniyu kosmicheskogo prostranstva v mirnykh tselyakh po preduprezhdeniyu obrazovaniya kosmicheskogo musora* [Space debris mitigation guidelines of the committee on the peaceful uses of outer space]. Available at: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/space_debris.shtml
6. IADC space debris mitigation guidelines. 2020. Available at: <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/library/iadc-space-debris-guidelines-revision-2.pdf>
7. ISO 24113:2023. Space systems — Space debris mitigation requirements. 2023. 12 c.
8. GOST R 52925-2018. Space technology items. General requirements for space vehicles for near-earth space debris mitigation. Moscow: Standartinform Publ., 2018. 13 p. (In Russ.)

9. Shubin P.S. On the history and problems of Russian participation in the market of launch services to geostationary orbit. *Space Research*. 2019. No. 1. P. 22-35. DOI: 10.7256/2453-8817.2019.1.31105. (In Russ.)

10. Zakharova A.P., Stepanov D.V., Stepanov I.B., Usovik I.V. Analysis of the launches traffic, space objects destruction and re-entries in 2010-2021 as the main components of the space debris evolution. *Cosmonautics and Rocket Engineering*. 2022. No. 2 (125). P. 99-111. (In Russ.)

11. Gorlov A.E., Usovik I.V. Influence of the active removal of space debris on a long-term state of technogenic pollution of low-earth orbits. *Cosmonautics and Rocket Engineering*. 2015. No. 5 (84). P. 107-112. (In Russ.)

12. Dron' N.M., Khorol'skiy P.G., Dubovik L.G. Evaluating power and mass characteristics of systems for spacecrafts de-orbit based on electric propulsions. *Vestnik Dvigatelistroyeniya*. 2016. No. 2. P. 76-80. (In Russ.)

13. Copernicus Sentinel-1B collision avoidance manoeuvres on 28 February 2020. Available at: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/-/copernicus-sentinel-1b-collision-avoidance-manoevres-on-28-february-2020>

14. SpaceX's Starlink orbital space safety plan: Broadband satellite constellation is capable of avoiding collisions autonomously. Available at: <https://www.tesmanian.com/blogs/tesmanian-blog/starlink-orbital-safety>