

HOW TO REMOVE SPACE DEBRIS FROM NEAR-EARTH SPACE?

КАК ОЧИСТИТЬ ОКОЛОЗЕМНОЕ ПРОСТРАНСТВО ОТ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА?



Valery Y. KLYUSHNIKOV,
Dr. Sci. (Tech), Senior Fellow, Chief Researcher, FSUE
“Central Research Institute of Machine Building”,
ROSCOSMOS, Moscow, Russia,
wklj59@yandex.ru

Валерий Юрьевич КЛЮШНИКОВ,
доктор технических наук, старший научный
сотрудник, главный научный сотрудник ФГУП
«Центральный научно-исследовательский институт
машиностроения», Роскосмос, Москва, Россия,
wklj59@yandex.ru

ABSTRACT | The article provides a detailed review of methods to remove fragments of “space debris” from near-Earth space. The active and passive methods of removal are described. Areas of their application as well as their advantages and disadvantages are analyzed.

Keywords: *a fragment of space debris, removal from near-Earth space, deorbit*

АННОТАЦИЯ | В статье проведен подробный обзор предлагаемых методов очистки околоземного космического пространства от фрагментов космического мусора. Рассматриваются активные и пассивные методы очистки. Анализируются области их применения, преимущества и недостатки.

Ключевые слова: *фрагмент космического мусора, очистка околоземного космического пространства, увод с рабочей орбиты*

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос о воздействии ракетно-космической техники (РКТ) на окружающую среду был поднят впервые в конце 70-х – 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 околоземное пространство. В работах с самого начала принимали активное участие Комитет по космическим исследованиям (КОСПАР), Международный совет научных союзов (МСНС) и Международная астронавтическая федерация (МАФ). Результаты исследований были отражены в ряде итоговых документов [1], согласно которым наиболее опасным последствием космической деятельности является увеличение количества космического мусора (КМ) техногенного происхождения.

К космическому мусору, представляющему собой, с точки зрения классической прикладной экологии, твердые отходы космической деятельности, относятся отработавшие ракетные блоки, ступени ракет-носителей (РН) и разгонные блоки (РБ), космические аппараты (КА), прекратившие активное существование, различного рода отделяющиеся технологические элементы РН и КА (бленды, заглушки, чеки, пружины, толкатели, осколки пиросредств и др.), а также фрагменты, образовавшиеся в результате столкновений космических объектов и взрывов на орбите.

Загрязнение околоземного космического пространства (ОКП) представляет собой проблему,

степень серьезности которой все возрастает: имеются достоверные данные о выходе из строя нескольких КА по причине столкновения с КМ. Регулярно проводятся маневры уклонения Международной космической станции (МКС) от опасного сближения с фрагментами КМ.

Дальнейшее загрязнение ОКП фрагментами КМ в качестве последствия может иметь полное прекращение доступа в космос. По достижении определенной плотности орбитальной группировки КМ начинается цепная реакция его «саморазмножения» (в результате взаимных столкновений и взрывов), после чего любая попытка выведения КА на околоземную орбиту будет заканчиваться столкновением с фрагментом КМ. Такое развитие событий получило название синдром (эффект) Кесслера (другое название – каскадный эффект) – по имени впервые описавшего такой сценарий консультанта НАСА Дональда Кесслера [2].

Вероятность столкновений на любой орбите растет приблизительно пропорционально квадрату количества космических объектов (КО). При этом каждая орбитальная область имеет свою «критическую плотность» КО.

По мнению ряда экспертов, каскадный эффект уже начался, по крайней мере, на высотах 900–1000 км, а также в пределах некоторых популяций мелкой фракции КМ [3].

Национальные космические агентства и международное сообщество в целом стремятся ограничить загрязнение ОКП с тем, чтобы отсрочить наступление каскадного эффекта до появления технологических возможностей по его радикаль-

Рис. 1. Классификация методов очистки околоземного космического пространства от космического мусора



ному предотвращению. Для этого используются в основном меры нормативного регулирования, затрагивающие конструкцию и функционирование РН и КА: ограничение числа технологических элементов, отделяемых в процессе выведения КА и его эксплуатации на орбите, удаление отработавших КА и РБ из зоны рабочих орбит в зону захоронения или в плотные слои атмосферы, минимизация рисков самопроизвольного разрушения КА, РН, РБ и др.

Действующими нормативными документами (в частности, стандартом ГОСТ Р 52925-2018 [4]¹) определены защищаемые зоны космического пространства:

- область геостационарной орбиты (ГСО), представляющая собой сегмент сферической оболочки ОКП шириной от -15° до $+15^\circ$ относительно плоскости ГСО², с минимальной высотой, равной высоте ГСО минус 200 км, и максимальной высотой, равной высоте ГСО плюс 200 км;

- низкоорбитальная область (НОО), представляющая собой сферическую область ОКП с высотой не более 2000 км от поверхности Земли.

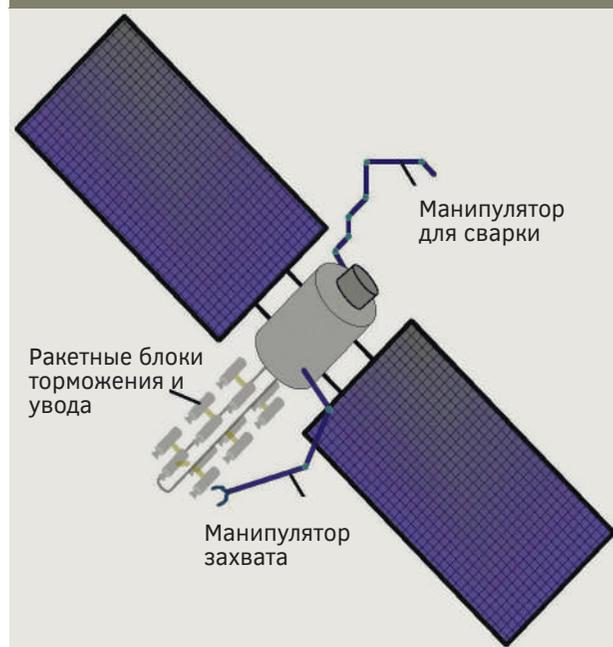
В соответствии с этим после окончания активного функционирования космические объекты на ГСО должны быть уведены вверх так, чтобы высота перигея превышала высоту ГСО примерно на 200-300 км (точная расчетная высота увода в каждом конкретном случае определяется по специальной формуле [4]). Закончившие активное функционирование низкоорбитальные объекты должны быть уведены на орбиту с расчетной продолжительностью пассивного баллистического существования не более 25 лет. В обоих случаях уводимые космические объекты не должны вновь попадать в защищаемые области ОКП по крайней мере в течение 100 лет.

Технические меры по ограничению роста орбитальной группировки КМ начали предпринимать сравнительно недавно. К настоящему времени, по данным специализированного сайта <https://www.space-track.org> (США), на околоземных орбитах обрабатываются порядка 19 000 сравнительно крупных (размером не менее 10 см) фрагментов КМ. Рано или поздно их необходимо будет убрать. И к этому уже приступают.

Анализ рассматриваемых в последние годы методов очистки ОКП от КМ позволил их сгруппировать и классифицировать (рис. 1).

Конечно, очищать ОКП реально лишь от достаточно крупных фрагментов КМ, которые хотя бы наблюдаемы наземными оптическими и радиолокационными средствами (то есть размерами более 10 см). Удаление или утилизация ненаблюдаемого КМ – сложная, не решенная даже в теории задача. Предложения типа сингапурского стартапа Astroscale [5] не способны сделать настоящий прорыв в этой области.

Рис. 2. Роботизированный КА для удаления крупных фрагментов космического мусора



1. Активные методы очистки околоземного космического пространства

К активным методам очистки относятся те, что требуют затрат энергии уводимого фрагмента космического мусора (чаще всего КА, прекратившего активное существование) на реализацию маневра увода.

1.1. Увод с рабочей орбиты при помощи собственной двигательной установки

Увод КА, оснащенных апогейной или корректирующей двигательной установкой, может быть осуществлен при помощи собственных ракетных двигателей. Правда, для этого необходимо, во-первых, чтобы для увода оставался достаточный запас топлива, а во-вторых – чтобы сама двигательная установка и бортовые системы, обеспечивающие ее работу, были исправными. Разумеется, такие требования ограничивают стремление операторов космических услуг (связь, наблюдение и др.) получить максимальную прибыль от коммерческого использования той или иной космической системы.

Полученные в [6] результаты расчетов характеристической скорости показали, что максимум необходимого запаса характеристической скорости для увода КА с НОО составляет 337 м/с, а с ГСО – 23 м/с.

Для активных систем увода как перспективные рассматриваются электроракетные двигатели с большим ресурсом работы, высоким удельным импульсом и малым расходом рабочего тела и, следовательно, высокой экономичностью [6].

¹Стандарт гармонизирован с положениями международных нормативных документов, отражающих лучшие мировые практики по снижению засорения ОКП, в частности с международным стандартом ISO 24113:2011. Space systems – Space debris mitigation requirements.

²Высота ГСО равна 35786 км.

Следует, однако, заметить, что увод КА с орбиты по окончании срока их активного существования, за исключением геостационарных спутников связи, на данный момент не используется. Большинство разработок находятся на проектной стадии.

1.2. Захват и буксировка другим космическим объектом

Поскольку в большинстве своем объекты КМ, особенно накопленные с середины прошлого века, не способны к автономному изменению своих орбит (это или неактивные КА, не имеющие собственной двигательной установки, или несамостоятельные конструктивные фрагменты различных космических объектов), особую актуальность приобретает очистка ОКП при помощи специализированных КА – сборщиков космического мусора. Особо востребованной на сегодняшний день для таких аппаратов является задача удаления фрагментов КМ в окрестности Международной космической станции – наиболее уязвимо и дорогостоящего космического объекта.

В настоящее время существует множество проектных проработок таких специализированных КА. Сформировалось два направления создания КА для решения задач сбора КМ. Первое направление – использование одноразовых КА («космических камикадзе» [7]), второе – многоразовые аппараты с возможностью их дозаправки.

Одна из предлагаемых баллистических схем функционирования одноразового КА для уборки КМ (КАУКМ) предусматривает его выведение на орбиту ожидания высотой 300–400 км [8]. Служба контроля космического пространства определяет координаты фрагмента КМ, который необходимо свести с орбиты. Бортовая система управления КАУКМ рассчитывает программу управления и реализует перелет к заданному объекту, сближается с ним и с помощью специальных устройств фиксирует его на своем борту. Далее, если это позволяют конструкция КА и технические условия, может быть осуществлена операция сближения с другими элементами КМ с последующей их фиксации на борту КАУКМ. После сбора КМ осуществляется перелет КАУКМ на низкую предпусковую орбиту и пребывание на ней до наступления необходимых условий для спуска. Далее проводится операция управления спуском, КМ входит в плотные слои атмосферы и сгорает в ней с падением несгоревших фрагментов в заданном районе Мирового океана.

Многоразовый КАУКМ после отделения от него сводимых с орбиты фрагментов КМ возвращается на орбиту ожидания, при необходимости дозаправляется топливом и приступает к новой операции.

Рис. 3. Космический аппарат для сбора космического мусора CleanSpace One (EPFL)



Рис. 4. Элементы технологии активного удаления космического мусора с низких околоземных орбит RemoveDebris:



а) космический аппарат-демонстратор RemoveDebris

б) имитация захвата и увода элемента КМ при помощи разворачиваемой сети

в) имитация захвата и увода элемента КМ при помощи гарпуна

Представляет интерес концепция удаления с орбиты крупных фрагментов КМ SASTROBOT (Semi Autonomous Satellite Tracking Robot), предложенная в 2015 году индийскими специалистами [9]. Концепция заключается в использовании для очистки ОКП роботизированного КА, оснащенного двумя манипуляторами и запасом ракетных блоков, предназначенных для жесткой установки на объектах КМ, сводимых с орбиты (рис. 2).

В процессе выполнения своих задач роботизированный КА при помощи наземного комплекса управления определяет фрагмент КМ, который нужно удалить с орбиты, сближается с ним, захватывает при помощи манипулятора захвата и устанавливает (приваривает с помощью манипулятора для сварки) на его поверхность ракетный блок торможения и увода. После этого наземная станция управления включает двигатель увода и направляет фрагмент КМ к Земле, в плотные слои атмосферы.

Предполагается, что за одну миссию такой роботизированный КА способен убрать из ОКП около 18 неактивных спутников – фрагментов КМ. После этого он может быть использован повторно.

Известно, что в последних ступенях РН после окончания работы двигательной установки остается определенное количество невыработываемых жидких остатков компонентов ракетного топлива (преимущественно керосина и кислорода). Ученые – сотрудники Омского государственного технического университета и Центрального научно-исследовательского института машиностроения – предложили использовать газифицированные остатки ракетного топлива для создания импульса тяги для увода последних ступеней РН с орбиты в плотные слои атмосферы [10].

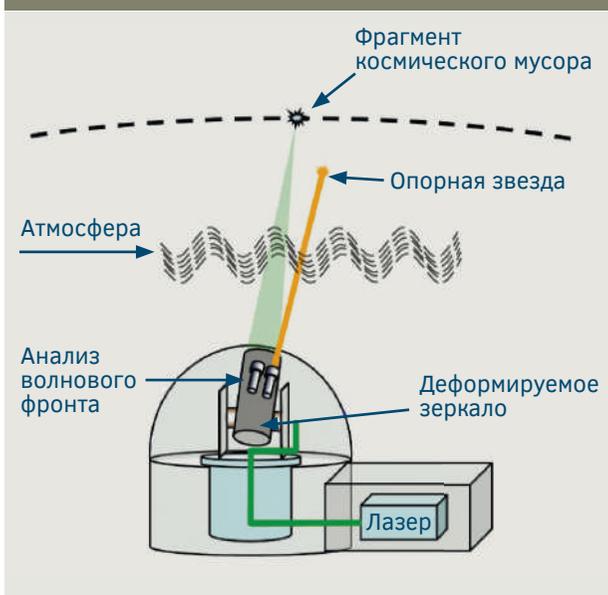
В 2012 году швейцарская Федеральная политехническая школа Лозанны (EPFL) объявила о планах создания КА CleanSpace One, предназначенного для сбора и увода в атмосферу КМ [11]. Для захвата и удержания фрагментов КМ должна использоваться раскладывающаяся сеть конической формы (рис. 3). В 2019 году планируется провести эксперимент по уводу с орбиты вышедшего из строя малого космического аппарата формфактора кубсат SwissCube.

В случае успеха планируемого эксперимента КА CleanSpace One будут выпускаться серийно.

Предполагается, что КА CleanSpace One будут выводиться на орбиту с помощью швейцарской авиационно-космической многоразовой системы S3 (Swiss Space Systems), использующей в качестве разгонной ступени самолет Airbus A300. Это позволит снизить общую стоимость проекта.

В 2018 году началась демонстрация технологии активного удаления космического мусора

Рис. 5. Основные компоненты станции LDR – лазерной системы удаления мусора (LDR – Laser Debris Removal)



с низких околоземных орбит RemoveDebris (Космический центр и Университет графства Суррей, Великобритания, финансируется Европейским космическим агентством) [12].

Миссия RemoveDebris состоит из основного КА массой около 100 кг и двух кубсатов. В задачи миссии входят демонстрация технологий имитации захвата и увода с орбиты фрагментов КМ (объект захвата – кубсат или технологический элемент основного КА) при помощи разворачиваемой сети, специально разработанного гарпуна и паруса, а также отработка технологий взаимной навигации (рис. 4).

Спутник-демонстратор RemoveDebris был выпущен в открытый космос с борта МКС 20 июня 2018 года при помощи манипулятора. По состоянию на январь 2019 года была успешно протестирована технология ловли имитатора КМ при помощи разворачиваемой сети. После того как объект (выпущенный кубсат) был пойман, шесть электромоторов, установленных по краям сети, стянули ее и прочно зафиксировали.

В январе-феврале 2019 года состоялись эксперименты с захватом имитатора фрагмента КМ (специальная панель, выставляемая на штанге с основного спутника-демонстратора) при помощи небольшого гарпуна размером с шариковую ручку, а затем – с выпуском тормозного паруса.

1.3. Внешнее дистанционное энергетическое воздействие

Энергетические воздействия на фрагменты КМ с целью изменения их орбит либо уничтожения (превращения в плазму) могут быть получены при помощи лазеров наземного или

космического базирования, а также путем инъекции струи ионов.

Технология очистки космоса лазерными установками с поверхности Земли под названием «Лазерная метла» (Laser broom) была предложена еще в 1996 году учеными лаборатории прикладной физики Университета Джона Хопкинса (США) [13].

«Лазерная метла» предназначена для ускорения схода с орбиты фрагментов КМ размером менее 10 см (рис. 5). Единичный импульс лазерного излучения вызывает абляцию материала металлического фрагмента и замедляет его движение по орбите на некоторую достаточно малую величину – порядка 1,0 мм/с (лазер должен работать в импульсном режиме, с тем чтобы избежать самоэкранирования мишени плазмой, образующейся в результате абляции). При частоте следования импульсов излучения порядка 100 в секунду снижение перигея орбиты фрагмента КМ может достигать порядка 200 м за сутки. В результате наземный мегаваттный импульсный НФ-лазер способен очистить ОКП до высот порядка 800 км за два года.

Принцип действия лазера космического базирования аналогичен описанному принципу действия наземного лазера [14]. Лазер космического базирования для ликвидации КМ (рис. 6) может быть установлен непосредственно на борту КА (или на МКС – такой проект рассматривается). Как вариант – использование отражающего зеркала, установленного на борту КА. При этом лазерное излучение генерируется на Земле. В первом случае, по существующим оценкам, твердотельного лазера с полупроводниковой накачкой мощностью несколько десятков кВт достаточно для уничтожения небольших (до 10 см) фрагментов КМ, во втором – необходим лазер мощностью порядка нескольких МВт.

Проекты лазерных систем удаления КМ из ОКП космического базирования вызывает дебаты из-за существующих международных договоров, запрещающих размещать в космосе какое-либо оружие, включая лазерное.

Особенно актуальной является задача удаления КМ из области ГСО. Дело в том, что точек стояния спутников на ГСО ограниченное количество, и стоимость одной точки высока – порядка 120–140 млн долл.

Для очистки ГСО от КМ предлагается относительно простой и экономичный способ: бесконтактное воздействие на неактивный КА (фрагмент КМ) узким пучком высокоскоростных ионов [15] в целях «сдувания» объекта с орбиты (рис. 7). Ионный пучок получают от электроракетного двигателя (ЭРД) сервисного КА, находящегося в непосредственной близости от объекта-цели (на расстоянии примерно 10–20 метров). Ионы ускоряются до 30 км/с и более

Рис. 6. Процесс удаления фрагментов космического мусора

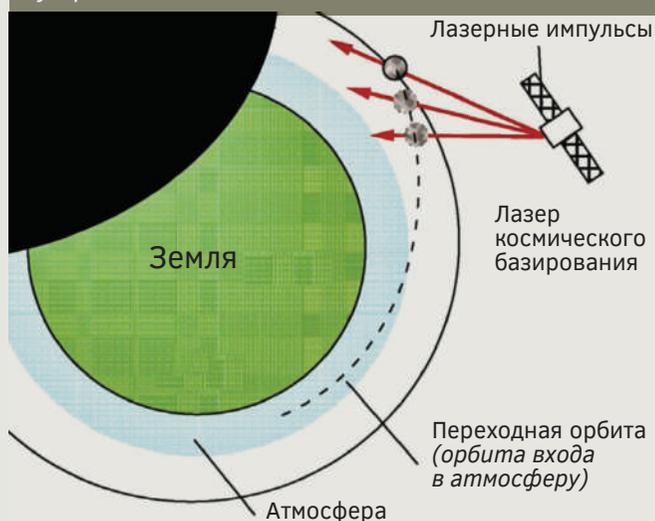


Рис. 7. Увод фрагмента космического мусора с рабочей орбиты при помощи ионного пучка (проект «Космический пастух»)

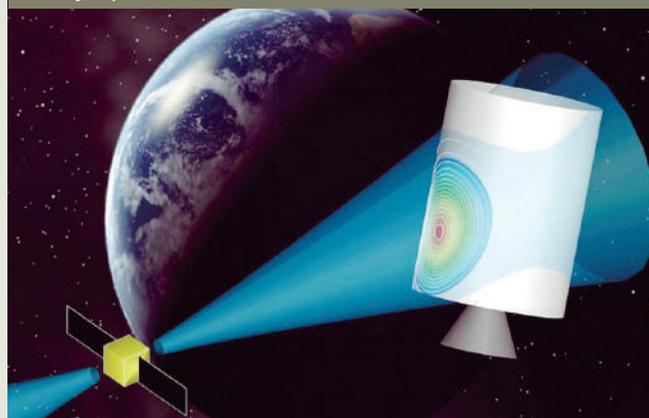


Рис. 8. Очистка рабочей орбиты от фрагментов космического мусора электростатическим способом



Рис. 9. Роботизированный комплекс Phoenix для утилизации и повторного использования составных частей космических аппаратов, прекративших активное существование

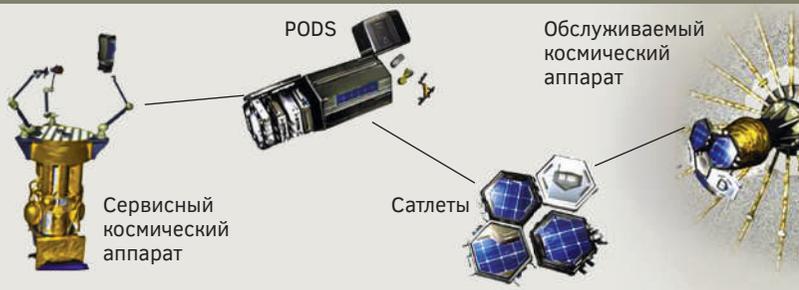


Рис. 10. Принцип работы электроракетного двигателя, использующего в качестве рабочего тела мелкую фракцию космического мусора

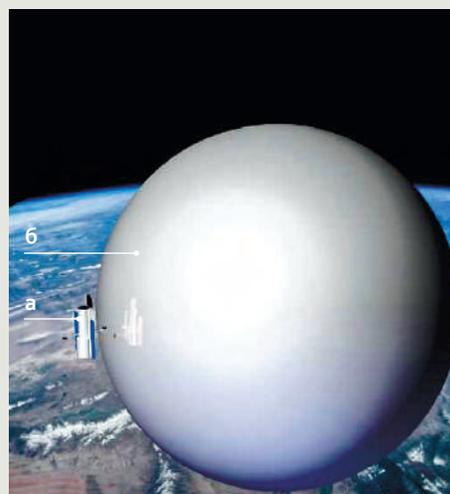
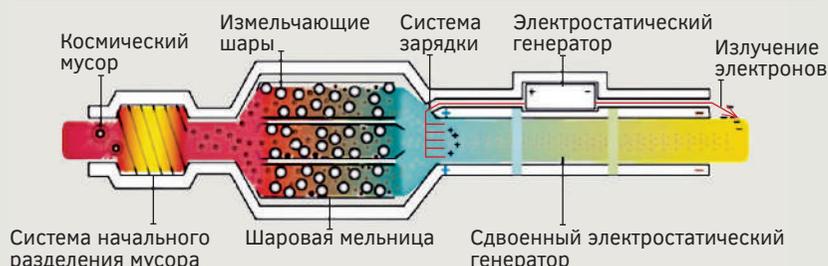


Рис. 11. Аэродинамическое устройство увода космического аппарата с рабочей орбиты по технологии Gossamer Orbit Lowering Device:
а – уводимый с орбиты космический аппарат;
б – надувной баллон

и, попадая на поверхность объекта-цели, воздействуют на него с некоторой силой, величина которой примерно равна величине тяги источника ионов – ЭРД. Сервисный КА сопровождает объект весь путь до орбиты захоронения (он может продержаться несколько недель).

Для компенсации реакции ионного двигателя (создаваемой им тяги) используют вторую двигательную установку (рис. 7).

Профессор Ханспетер Шауб (Hanspeter Schaub) из Университета Колорадо (США) рассматривает способ бесконтактного увода фрагментов КМ с ГСО при помощи электростатического поля [16]. При электростатическом удалении фрагмента КМ с рабочей орбиты сервисный КА и объект КМ заряжают одноименными или противоположными электрическими зарядами, после чего сервисный КА, используя свою двигательную установку, может «толкать» или «тянуть» объект КМ, используя силу кулоновского взаимодействия (рис. 8).

Для того чтобы зарядить объект КМ, его облучают ионным пучком. Проблему представляет управление связкой двух электростатически взаимодействующих тел.

1.4. Полная или частичная утилизация фрагментов КМ

Термин «утилизация» (от франц. utilisation / лат. utilis – полезный) определен стандартами в области ресурсосбережения как виды работ, при которых осуществляется переработка и/или вторичное использование отслуживших установленный

срок и/или отбракованных изделий, материалов, упаковки и тому подобного, а также отходов [17]. Таким образом, если говорить об утилизации КМ, то необходимо иметь в виду вторичное использование его фрагментов.

Примером такого подхода к утилизации КМ является проект Phoenix Агентства по перспективным оборонным научно-исследовательским разработкам США (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA), который нацелен на создание технологий повторного использования составных частей КА, прекративших активное существование [18], прежде всего антенн и солнечных батарей. Так, например, крупногабаритная антенна, которая стоит сотни миллионов долларов, может работать в космосе более 100 лет!

В соответствии с идеей проекта, роботизированный комплекс Phoenix будет разбирать неактивные КА при помощи специальных манипуляторов и извлекать из них работоспособные элементы (рис. 9). Транспортироваться эти элементы будут с помощью специализированных малых спутников PODS (Payload Orbital Delivery System). PODS будут находиться на борту основного КА Phoenix до тех пор, пока не потребуется их помощь в доставке элементов неисправного КА к месту монтажа – на новый спутник.

Для эффективного внедрения и широкого использования технологии Phoenix необходимо будет приспособлять архитектуру КА к утилизации в космосе. По мнению разработчиков, платформа типового КА должна состоять из так называемых саттелетов – элементов, на кото-

рые может быть «дезагрегирован» КА и которые обеспечивают выполнение им основных функций, таких как навигация, управление, связь, энергообеспечение, терморегулирование и др. При традиционном подходе каждая из этих функций выполняется соответствующей подсистемой КА.

Набор различных типов сатлетов должен быть достаточным, чтобы, «агрегируя» и соединяя соответствующими аппаратно-программными интерфейсами определенные сатлеты различных типов, можно было бы формировать и масштабировать достаточно широкий спектр разнообразных платформ для будущих КА разного назначения.

В настоящее время агентство DARPA планирует демонстрационный запуск роботизированного комплекса Phoenix в 2020 году и в дальнейшем будет стремиться коммерциализировать технологию утилизации КМ.

В дальней перспективе КМ может быть использован в качестве сырья для 3D- и 4D-принтеров, работающих в космосе или для получения ракетного топлива [19].

Китайский ученый Лей Лан и его коллеги из Университета Циньхуа в Пекине предложили концепцию двигателя, способного превращать собранный КМ в ракетное топливо. В теории идея выглядит весьма простой: создать электроракетный двигатель, рабочее тело для которого получается путем сбора и измельчения ненаблюдаемого КМ (размерами менее 10 см) до порошка с последующим нагревом и ионизацией (рис. 10). Полученная плазма (электроны) ускоряется электрическим полем.

2. Пассивные методы очистки околоземного космического пространства

К пассивным методам относятся те, что не требуют затрат энергии на удаление фрагмента КМ. В частных случаях некоторые затраты энергии на установку средств пассивного увода фрагментов КМ с рабочей орбиты могут потребоваться от активного специализированного КА.

2.1. Аэродинамические тормозные устройства

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 направлению движения КА [20]. Конструктивно устройства увода могут быть выполнены как в виде объемной конструкции – в форме шара, тора, цилиндра, пирамиды, так и плоской – в форме диска, зонта, парашюта, квадрата, комбинации различных надувных форм и пр. [20]. Для изготовления аэродинамических устройств используются тонкопленочные полимерные материа-

Рис. 12. Устройство независимого автономного аэродинамического торможения на основе надувных баллонов (НПО имени С.А.Лавочкина)

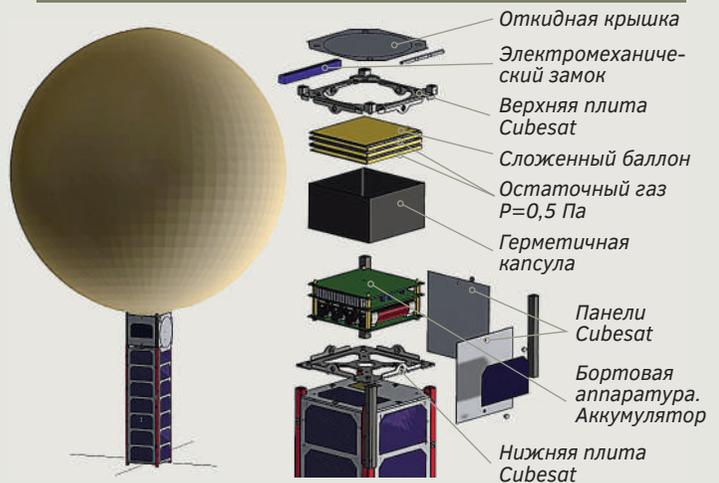


Рис. 13. Устройство аэродинамического торможения в виде конуса (НПО имени С. А. Лавочкина)

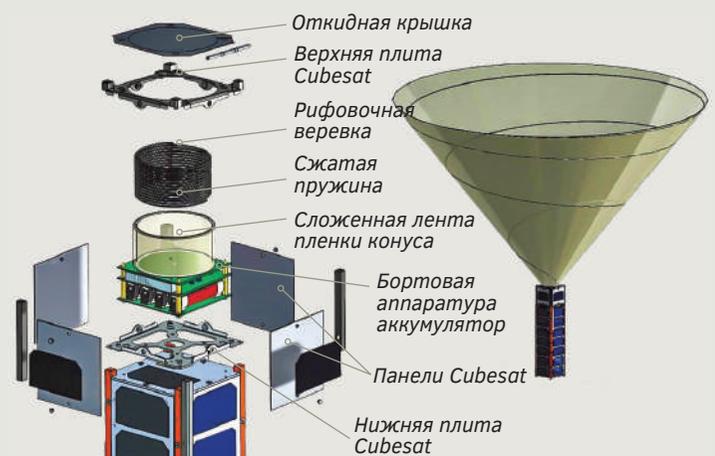
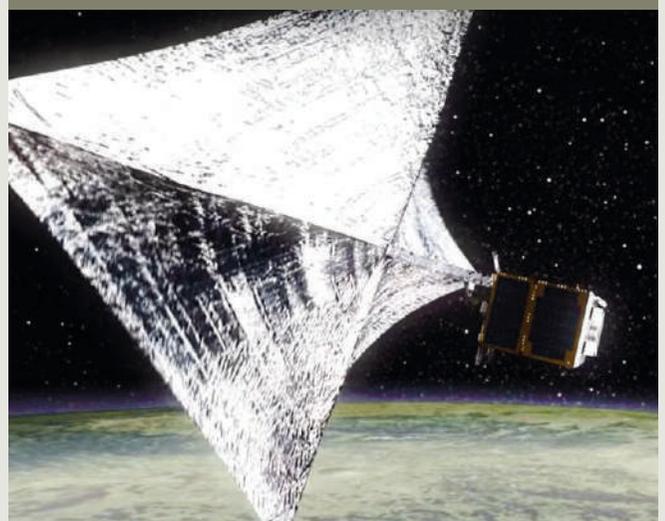


Рис. 14. Устройства типа «солнечный парус» (Суррейский космический центр)



лы, такие как Mylar, Kevlar, Twaron, Zylon, Картон и углеродистая ткань. Для повышения прочности материала полимерную пленку покрывают тонким слоем алюминия, кремния либо керамики.

В качестве примера технологии увода КА, реализующей аэродинамическое торможение, следует упомянуть устройство под названием GOLD (Gossamer Orbit Lowering Device), предложенное в 2011 году доктором Кристин Гейтс (Kristen Gates) [21].

Оболочка GOLD изготавливается из полиэтилентерефталатной (ПЭТФ) пленки с наружной металлизацией алюминием (рис. 11). Наружная металлизация обеспечивает защиту оболочки от разрушения. Толщина ПЭТФ – 5–12 мкм, удельная плотность – 9 г/м².

GOLD System могла бы ускорить процесс естественного схода с орбиты некоторых объектов с нескольких столетий до нескольких месяцев.

GOLD может эффективно функционировать на орбитах высотой от 750 до 900 км.

Учеными и специалистами НПО имени С. А. Лавочкина предложено устройство независимого автономного аэродинамического торможения на основе надувных баллонов [22]. При использовании предложенного пассивного средства торможения время спуска наноспутника массой 3–5 кг с орбиты составит порядка 10 суток вместо двух лет естественного схода с орбиты (рис. 12).

К недостаткам надувных устройств относится возможность прорыва оболочки при столкновении с мелким фрагментом космического мусора. При этом газ выходит наружу, и устройство прекращает функционировать.

Указанного недостатка лишено устройство аэродинамического торможения в виде конуса, также предложенное сотрудниками НПО имени С. А. Лавочкина (рис. 13).

Более сложными являются аэродинамические парусные устройства плоской конфигурации. Устройства плоской конфигурации имеют преимущество перед надувными: оно заключается в том, что при столкновении с фрагментом космического мусора хотя и образуется отверстие в поверхности, но устройство продолжит функционировать. Недостатками данных устройств являются сложность системы развертывания и ее повышенная масса.

2.2. Солнечный парус

Известно, что световое давление при высоте полета $h < 500$ км оказывает на движение КА меньшее влияние, чем сопротивление атмосферы [23]. На высоте полета КА от 500 до 700 км влияние светового давления и сопротивления атмосферы приблизительно одинаково, а на высотах $h > 700$ км световое давление становится более значимым, чем сопротивление атмосферы. Поэтому устройства типа «солнеч-

ный парус» (СП) могут быть использованы для увода КА, прекративших активное существование, на орбитах высотой более 700 км.

Специалисты из Суррейского космического центра (Surrey Space Centre, Великобритания) предлагают Европейскому космическому агентству сверхтонкий СП (рис. 14) с автоматической ориентацией по вектору наибольшей тяги, высокая отражающая способность которого позволяет использовать давление солнечных лучей для постепенного уменьшения скорости вращения и снижения до высот 100 км и последующего входа в атмосферу.

Стандартный парус-«паутинка», разрабатываемый Суррейским космическим центром, имеет четыре раздвижные мачты. Размер СП в развернутом состоянии – 5×5 м. В развернутом положении СП помещается в отсеке размерами 10×10×20 см. Парус изготавливают из ультратонкой мембраны, а мачты – из углеволокна. Причем механические свойства углепластика позволяют свернуть мачты в рулетку.

В отличие от аэродинамических тормозящих устройств, материал устройства СП дополнительно, для увеличения коэффициента отражения, покрывается отражающим материалом, например тонким слоем алюминия. Достоинством СП является их повышенная надежность, а к недостаткам относятся сложные системы развертывания и ориентации относительно Солнца.

2.3. Электродинамическая «ловушка»

Предположение о возможности снижения высоты орбиты искусственного спутника Земли с помощью выпускаемого из него электродинамического проводящего троса, вдоль которого при движении в магнитном поле планеты течет ток, была выдвинута в 1995 году в [24].

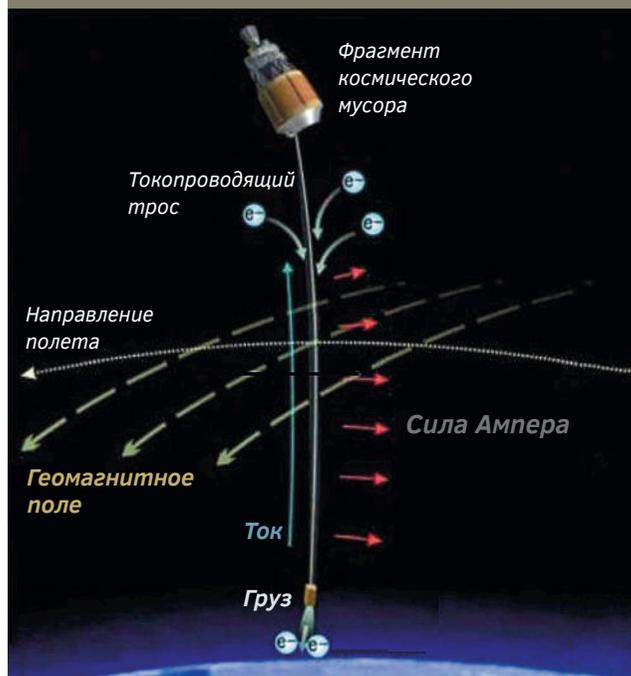
Физический принцип, лежащий в основе данного эффекта, достаточно прост: в соответствии с преобразованиями Лоренца в системе отсчета, связанной с движущимся по орбите КА, электрическое поле отлично от нуля. Оно вызывает появление в тросе тока при взаимодействии с электронами/протонами окружающей плазмы. Трос с током пересекает силовые линии геомагнитного поля, и на него действует сила Ампера, тормозящая КА (рис. 15).

Эффект будет максимальным для объектов на экваториальных орбитах и ослабевает с увеличением наклона орбиты.

Электродинамические тросы оказываются наиболее эффективными для сведения с рабочих орбит КА массой несколько сот килограммов. При этом рекомендуется использовать облегченную модификацию троса в виде ленты с характерной длиной 100–500 м [25].

Чтобы расширить возможность применения тросовых систем для сведения с рабочих ор-

Рис. 15. Принцип действия электродинамической системы увода космического мусора с рабочей орбиты



бит фрагментов КМ, была предложена концепция электростатической тросовой системы [25]. В этом случае тормозящая спутник сила создается при движении статически заряженного троса относительно ионосферной плазмы.

Японское агентство аэрокосмических исследований (JAXA) в феврале 2017 года пыталось испытать в космосе электродинамическую «ловушку» для космического мусора. Электропроводящий трос длиной около 700 метров из алюминия и нержавеющей стали должен был выпустить японский грузовой корабль «Конотори-б», пристыковавшийся к МКС в декабре 2016 года. После выпуска троса «Конотори-б», имитировавший фрагмент КМ, должен был войти в плотные слои атмосферы и сгореть. Однако выпустить трос не удалось.

Немногочисленные на сегодняшний день эксперименты выявили основную проблему тросовых механизмов – их низкую надежность ввиду повышенного риска неудачного развертывания троса.

3. Что делать в случае реализации синдрома Кесслера?

Американский ученый Гурудас Гангули (Gurudas Ganguli) из Исследовательской лаборатории ВМФ США предложил метод радикальной очистки низких околоземных орбит при помощи вольфрамовой пыли [26]. Идея метода состоит в том, чтобы выбросить на высоте 1100 км пылевое облако вольфрамовых частиц, создав вокруг Земли сферическую оболочку толщиной 30 км. Для этого потребуется примерно 20 т пыли. Размер частиц пыли – около 30 мкм. Сопrotивление атмосферы,

а также действие планетоцентрического эффекта Пойнтинга-Робертсона приведут к медленному сжатию оболочки и ее приближению к Земле.

Примерно за 10 лет облако опустится до критической высоты в 900 км, после чего сжатие пойдет быстрее. Облако вольфрамовой пыли будет тормозить мелкие фрагменты КМ и увлекать их за собой. По расчетам, на полную очистку ОКП в зоне низких орбит уйдет примерно 25 лет [26].

Авторы проекта уверены, что большого вреда активно функционирующим космическим аппаратам пыль не принесет. Однако пыль может повредить чувствительные системы работающих КА, в частности панели солнечных батарей. Да и в случае с крупными фрагментами такая технология работать не будет.

Таким образом, это предложение можно рассматривать только в крайнем случае – как своего рода перезагрузку для полного очищения низких околоземных орбит при наступлении синдрома Кесслера. При этом крупные фрагменты КМ должны будут удаляться методами, описанными выше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема загрязнения околоземного космического пространства, угрожающая цепной реакцией саморазмножения космического мусора, существует и с течением времени лишь обостряется. Даже если одномоментно прекратить космические запуски, численность орбитальной группировки КМ все равно будет возрастать за счет столкновений и взрывов на орбите.

В настоящее время существует множество предложений, позволяющих по крайней мере отодвинуть срок наступления эффекта Кесслера. Для этого необходимо как минимум поддерживать относительно низкий уровень засоренности защищаемых зон космического пространства путем оперативного увода КА, прекративших активное существование, на орбиты захоронения или в плотные слои земной атмосферы.

Однако этого недостаточно: в ОКП остается множество фрагментов КМ, которые необходимо убрать. По аналогии с классической прикладной экологией такое загрязнение ОКП можно было бы назвать накопленным загрязнением. Сами орбиты захоронения также становятся все более опасными.

Космос экстерриториален. Ликвидировать накопленное загрязнение ОКП можно только при тесном международном сотрудничестве ведущих стран. Несомненно, для решения проблемы очистки ОКП необходимо привлекать частный бизнес. В частности, очистка ГСО от КА, прекративших активное функционирование, уже сегодня была бы коммерчески выгодна.

Литература



1. Воздействие космической деятельности на окружающую среду. Текст/документ ООН А/АС. 105/344 от 23 ноября 1984 г.
2. **D. J. Kessler and Burton G. Cour-Palais** (1978). Collision Frequency of Artificial Satellites: The Creation of a Debris Belt // *Journal of Geophysical Research*, № 83, p. 63.
3. **Kessler D.** et al. The Kessler syndrome: Implications to Future Space Operations // 33rd Annu. American Astronautical Soc. Rocky Mountain Section. Guidance and Control Conf. Breckenridge, Colorado, USA. 2010.
4. ГОСТ Р 52925–2018. Изделия космической техники. Общие требования к космическим средствам по ограничению техногенного засорения околоземного космического пространства. М.: Стандартинформ, 2018. 12 с.
5. **Уласович К.** Инженеры создали «липучку» для космического мусора [Электронный ресурс]//N+1. URL: <https://nplus1.ru/news/2016/05/02/space-debris> (Дата обращения: 14.01.2019).
6. **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.
7. **Миклашевская А.** Швейцария займется уборкой в космосе [Электронный ресурс] // *Коммерсант–online*, 1991–2019. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/1874567> (Дата обращения: 10.01.2019).
8. **Ишков С. А., Филиппов Г. А.** Выбор проектных характеристик космического аппарата – сборщика мусора с электроракетным двигателем малой тяги // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. 2014. № 4. С. 30–38.
9. **Srikrishnan S., Dr. Dash P. K., Dr. Nadaraja Pillai S., Arunvinthan S.** An Approach for Space Debris cleaning using space based Robots // *International Journal of Engineering Research And Management (IJERM)*, 2015. Vol. 2. Iss. 6. Pp. 51–54.
10. **Вожова И. Р., Трушляков В. И., Шатров Я. Т.** Обеспечение экологической безопасности и повышение тактико-технических характеристик перспективных ракет-носителей с бортовыми системами спуска отработавших ступеней // *Космонавтика и ракетостроение*. 2017. № 4. С. 54–64.
11. **Richard M., Kronig L., Belloni F., Rossi S., Gass V., Paccolat C., Thiran J. P., Araomi S., Gavrilovich I., Shea H.** Uncooperative Rendezvous and Docking for MicroSats//6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies, RAST 2013, Istanbul, Turkey, 12–14 June 2013. P. 11.
12. **Vaios J. Lappas, Jason L. Forshaw, Lourens Visagie** and all. RemoveDebris: An EU low cost demonstration mission to test ADR technologies // *International Astronautical Congress*, Sep 2014, Toronto, Canada. P. 14.
13. **Bruno Esmler, Christophe Jacqueland, Hans-Albert Eckel, Edwin Wnuk.** Space debris removal by ground based laser. Main conclusions of the European project CLEANSPACE // *Space Safety is No Accident, The 7th IAASS Conference, Fridrichshafen, Germany, 20–22 October 2014*. P. 13–22.
14. **Shen S.** et al. Cleaning space debris with a space-based laser system // *Chinese Journal of Aeronautics*. August 2014. Vol. 27. Iss. 4. Pp. 805–811.
15. **Бомбарделли К., Алпатов А. П., Пироженко А. В., Баранов Е. Ю., Осинский Г. Г., Закржевский А. Е.** Проект «Космического пастуха» с ионным лучом. Идеи и задачи // *Космічна наука і технологія*. 2014. Т. 20. № 2. С. 55–60.
16. **Hughes J. and Schaub H.** Orbital and Storm time analysis of the pulsed electrostatic Tractor // *Proc. 7th European Conference on Space Debris, Darmstadt, Germany, 18–21 April 2017*, published by the ESA Space Debris Office Ed. T. Flohrer & F. Schmitz. Available at: <http://spacedebris2017.sdo.esoc.esa.int> (Retrieval date: 11.01.2019).
17. ГОСТ Р 52104–2003. Ресурсосбережение. Термины и определения.
18. Bringing satellites out of retirement – The DARPA Phoenix program (2011, October 25). Available at: <https://phys.org/news/2011-10-satellites-the-darpa-phoenix.html> (Retrieval date: 11.01.2019).
19. **Скуратовский Б.** Очистка орбиты от мусора: решение китайских инженеров [Электронный ресурс] // *Mediasat*, 2007–2019. URL: <http://mediasat.info/2015/12/09/orbiting-garbage-collector/> (Дата обращения: 14.01.2019).
20. **Палий А. С.** Методы и средства увода космических аппаратов с рабочих орбит (состояние проблемы) // *Техническая механика*. 2012. № 1. С. 94–102.
21. **Nock K. T., Gates K. L., Aaron K. M., and McDonald A. D. Gossamer** Orbit Lowering Device (GOLD) for Safe and Efficient De-orbit // *AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference*. Toronto, Canada. August 2010. P. 11.
22. **Нестерин И. М., Пичхадзе К. М., Сысоев В. К., Финченко В. С., Фирсюк С. О., Юдин А. Д.** Предложение по созданию устройства для схода наноспутников CUBESAT с низких околоземных орбит // *Вестник НПО им. С. А. Лавочкина*. 2017. № 3. С. 20–26.
23. **Раушенбах Б. В., Овчинников М. Ю.** Управление ориентацией космических аппаратов. М.: Наука, 1974. 600 с.
24. **Grossi M.** Future of Tethers in Space // *Proceedings of 4th International Conference on Tethers in Space, Hampton, VA, USA, 1995*. P. 11–23.
25. **Трофимов С. П.** Увод малых космических аппаратов с низких околоземных орбит: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.02.01 / Трофимов Сергей Павлович. Москва, 2015. 125 с.
26. **Gurudas Ganguli, Christopher Crabtree, Leonid Rudakov, Scott Chappie.** A Concept For Elimination Of Small Orbital Debris // *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, 10 (ists28), April 2011*. P. 5.

References



1. Vozdeystvie kosmicheskoy deyatel'nosti na okruzhayushchuyu sredyu. Tekst/dokument OON A/AS.105/344, 23.11.1984.
2. **D. J. Kessler and Burton G. Cour-Palais** (1978). Collision Frequency of Artificial Satellites: The Creation of a Debris Belt. *Journal of Geophysical Research*, № 83, p. 63.
3. **Kessler D.** et al. The Kessler syndrome: Implications to Future Space Operations. 33rd Annu. American Astronautical Soc. Rocky Mountain Section. Guidance and Control Conf. Breckinridge, Colorado, USA. 2010.
4. GOST R 52925–2018. Izdeliya kosmicheskoy tekhniki. Obshchie trebovaniya k kosmicheskim sredstvam po ogranicheniyu tekhnogenno-go zasoreniya okolozemnogo kosmicheskogo prostranstva. Moscow: Standartinform, 2018. 12 p.
5. **Ulasovich K.** Inzheneriy zodalzi "lipuchku" dlya kosmicheskogo musora. N+1. Available at: <https://nplus1.ru/news/2016/05/02/space-debris> (Retrieval date: 14.01.2019).
6. **Dron' N. M., Khorol'skiy P. G., Dubovik L. G.** Otsenka energeticheskikh i massovykh kharakteristik sistem uvoda kosmicheskikh apparatov na baze elektroraketnykh dvigateley. *Vestnik dvigatelestroeniya*, 2016, no. 2, pp. 76–80.
7. **Miklashevskaya A.** Shveysariya zaymetsya uborkoy v kosmose. *Kommersant-online*, 1991–2019. Available at: <https://www.kommersant.ru/doc/1874567> (Retrieval date: 10.01.2019).
8. **Ishkov S. A., Filippov G. A.** Vybor proektnykh kharakteristik kosmicheskogo apparata – sborshchika musora s elektroraketnym dvigatelem maloy tyagi. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2014, no. 4, pp. 30–38.
9. **Srikrishnan S., Dr. Dash P. K., Dr. Nadaraja Pillai S., Arunvinthan S.** An Approach for Space Debris cleaning using space based Robots. *International Journal of Engineering Research And Management (IJERM)*, 2015, vol. 2, iss. 6, pp. 51–54.
10. **Vozhova I. R., Trushlyakov V. I., Shatrov Ya. T.** Obespechenie ekologicheskoy bezopasnosti i povyshenie taktiko-tekhnicheskikh kharakteristik perspektivnykh raket-nositeley s bortovymi sistemami spuska otrabotavshikh stupeney. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2017, no. 4, pp. 54–64.
11. **Richard M., Kronig L., Belloni F., Rossi S., Gass V., Paccolat C., Thiran J. P., Araomi S., Gavrilovich I., Shea H.** Uncooperative Rendezvous and Docking for MicroSats. 6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies, RAST 2013, Istanbul, Turkey, 12–14 June 2013. P. 11.
12. **Vaios J. Lappas, Jason L. Forshaw, Lourens Visagie** and all. RemoveDebris: An EU low cost demonstration mission to test ADR technologies // International Astronautical Congress, Sep 2014, Toronto, Canada. P. 14.
13. **Bruno Esmler, Christophe Jacqueland, Hans-Albert Eckel, Edwin Wnuk.** Space debris removal by ground based laser. Main conclusions of the European project CLEANSPACE // Space Safety is No Accident, The 7th IAASS Conference, Fridrichshafen, Germany, 20–22 October 2014. P. 13–22.
14. **Shen S.** et al. Cleaning space debris with a space-based laser system. *Chinese Journal of Aeronautics*, August 2014, vol. 27, iss. 4, pp. 805–811.
15. **Bombardelli K., Alpatov A. P., Pirozhenko A. V., Baranov E. Yu., Osinovy G. G., Zakrzhevskiy A. E.** Proekt "Kosmicheskogo pastukha" s ionnym luchom. Idei i zadachi. *Kosmichna nauka i tekhnologiya*, 2014, vol. 20, no. 2, pp. 55–60.
16. **Hughes J. and Schaub H.** Orbital and Storm time analysis of the pulsed electrostatic Tractor // Proc. 7th European Conference on Space Debris, Darmstadt, Germany, 18–21 April 2017, published by the ESA Space Debris Office Ed. T. Flohrer & F. Schmitz. Available at: <http://spacedebris2017.sdo.esoc.esa.int> (Retrieval date: 11.01.2019).
17. GOST R 52104–2003. Resursoberezhenie. Terminy i opredeleniya.
18. Bringing satellites out of retirement – The DARPA Phoenix program (2011, October 25). Available at: <https://phys.org/news/2011-10-satellites-the-darpa-phoenix.html> (Retrieval date: 11.01.2019).
19. **Skuratovskiy B.** Ochistka orbity ot musora: reshenie kitayskikh inzhenerov. *Mediasat*, 2007–2019. Available at: <http://mediasat.info/2015/12/09/orbiting-garbage-collector/> (Retrieval date: 14.01.2019).
20. **Paliy A. S.** Metody i sredstva uvoda kosmicheskikh apparatov s rabochikh orbit (sostoyanie problemy). *Tekhnicheskaya mekhanika*, 2012, no. 1, pp. 94–102.
21. **Nock K. T., Gates K. L., Aaron K. M., and McDonald A. D.** Gosamer Orbit Lowering Device (GOLD) for Safe and Efficient De-orbit // AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference. Toronto, Canada. August 2010. P. 11.
22. **Nesterin I. M., Pichkhadze K. M., Sysoev V. K., Finchenko V. S., Firsyuk S. O., Yudin A. D.** Predlozhenie po sozdaniyu ustroystva dlya skhoda nanosputnikov CUBESAT s nizkikh okolozemnykh orbit. *Vestnik NPO im. S. A. Lavochkina*, 2017, no. 3, pp. 20–26.
23. **Raushenbakh B. V., Ovchinnikov M. Yu.** Upravlenie orientatsiy kosmicheskikh apparatov. Moscow: Nauka, 600 p.
24. **Grossi M.** Future of Tethers in Space // Proceedings of 4th International Conference on Tethers in Space, Hampton, VA, USA, 1995. P. 11–23.
25. **Trofimov S. P.** Uvod malykh kosmicheskikh apparatov s nizkikh okolozemnykh orbit. Diss. kand. fiz.-mat. nauk. Moscow, 2015, 125 p.
26. **Gurudas Ganguli, Christopher Crabtree, Leonid Rudakov, Scott Chappie.** A Concept For Elimination Of Small Orbital Debris // Transactions of the Japan Society for Aeronautics and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, 10 (ists28), April 2011. P. 5.

© Ключников В. Ю., 2018

История статьи:

Поступила в редакцию: 14.01.2019

Принята к публикации: 01.02.2019

Модератор: Гесс Л. А.

Конфликт интересов: отсутствует

Для цитирования:

Ключников В. Ю. Как очистить околоземное пространство от космического мусора? // *Воздушно-космическая сфера*. 2019. №1(98). С. 96–107.