

УДК 004.3+519.6+531.36

## **Обзор и выбор средств увода крупногабаритного космического мусора**

**Пикалов Р.С.\*, Юдинцев В.В.\*\***

*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П.*

*Королева, Московское шоссе, 34, Самара, 443086, Россия*

*\*e-mail: [pickalovrs@gmail.com](mailto:pickalovrs@gmail.com)*

*\*\*e-mail: [yudintsev@gmail.com](mailto:yudintsev@gmail.com)*

### **Аннотация**

В работе рассматриваются способы активной очистки околоземных орбит от крупногабаритного космического мусора. Представлена классификация способов увода объектов космического мусора, проведено сравнение этих способов и описаны проблемы, которые могут возникнуть при их реализации.

**Ключевые слова:** космический мусор, активная уборка космического мусора, методы захвата, космический буксир, тросовые системы.

### **1 Введение**

Запуск первого искусственного спутника Земли в 1957 году положил начало новой космической эры в истории человечества, принёсшей новые возможности, знания и технологии, прочно вошедшие в повседневную жизнь современного человека. Однако, в результате космической деятельности за прошедшие 60 лет на

околоземных орбитах скопились сотни тысяч объектов искусственного происхождения [1]: ступеней ракет, нефункционирующих космических аппаратов, разгонных блоков, кусков обшивки, частиц, краски, топлива [2, 3, 4], которые называются космическим мусором [2, 3, 4] (рисунок 1).

В 1987 году американский астрофизик и специалист НАСА Дональд Кесслер рассмотрел возможные последствия неконтролируемого увеличения количества искусственных объектов на орбите. Рассмотренный им сценарий, названный позже его именем – эффект Кесслера, показал возможность лавинообразного роста космического мусора, который может быть инициирован столкновением всего двух крупных объектов. Это единственное событие может запустить «цепную реакцию» столкновений образовавшихся фрагментов с другими объектами, что может привести к практической недоступности некоторых орбит и массовому выходу из строя существующих КА [5]. Подобное развитие событий, в несколько утрированном виде продемонстрировано в художественном фильме "Гравитация" **[Ошибка! Источник ссылки не найден.]**.

С каждым годом риск реализации описанного сценария увеличивается. После первых зарегистрированных столкновений активных КА с космическим мусором [10] на эту проблему обратили внимание. На межгосударственном уровне стали разрабатываться рекомендации, направленные на предупреждение образования нового космического мусора в результате новых пусковых кампаний, однако на околоземных орбитах уже находится большое количество крупных объектов, представляющих угрозу, удаление которых необходимо для исключения развития

ситуации по сценарию Кесслера. В ближайшее десятилетие потребуется проведение активных мероприятий по уводу из областей часто используемых орбит крупных объектов космического мусора – отработавших ступеней ракет и закончивших своё функционирование космических аппаратов.

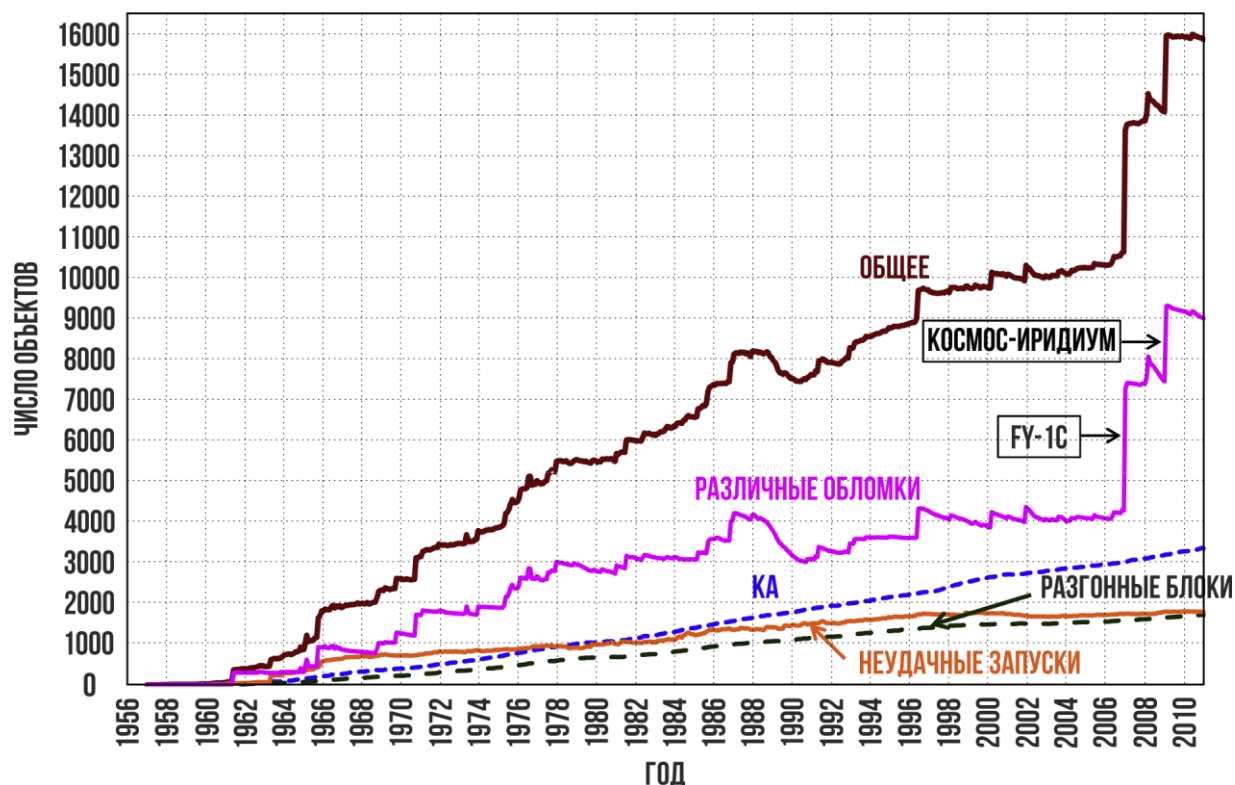


Рисунок 1 - Рост числа объектов искусственного происхождения на околоземной орбите [6]

## 2 Классификация космического мусора

Исследования распределения космического мусора в околоземном пространстве показывают, что наибольшее его количество находится на орбитах высотой от 600 до 1000 километров [6] (рисунок 2). Наиболее опасные объекты находятся на орбитах с наклоном от 82,83 до 82,99 градусов [8]. Здесь находится

большое количество орбитальных ступеней ракет и один из самых крупных объектов – уже нефункционирующий спутник Envisat, который часто рассматривают в качестве кандидата на увод с орбиты в рамках первых миссий по очистке околоземного пространства.

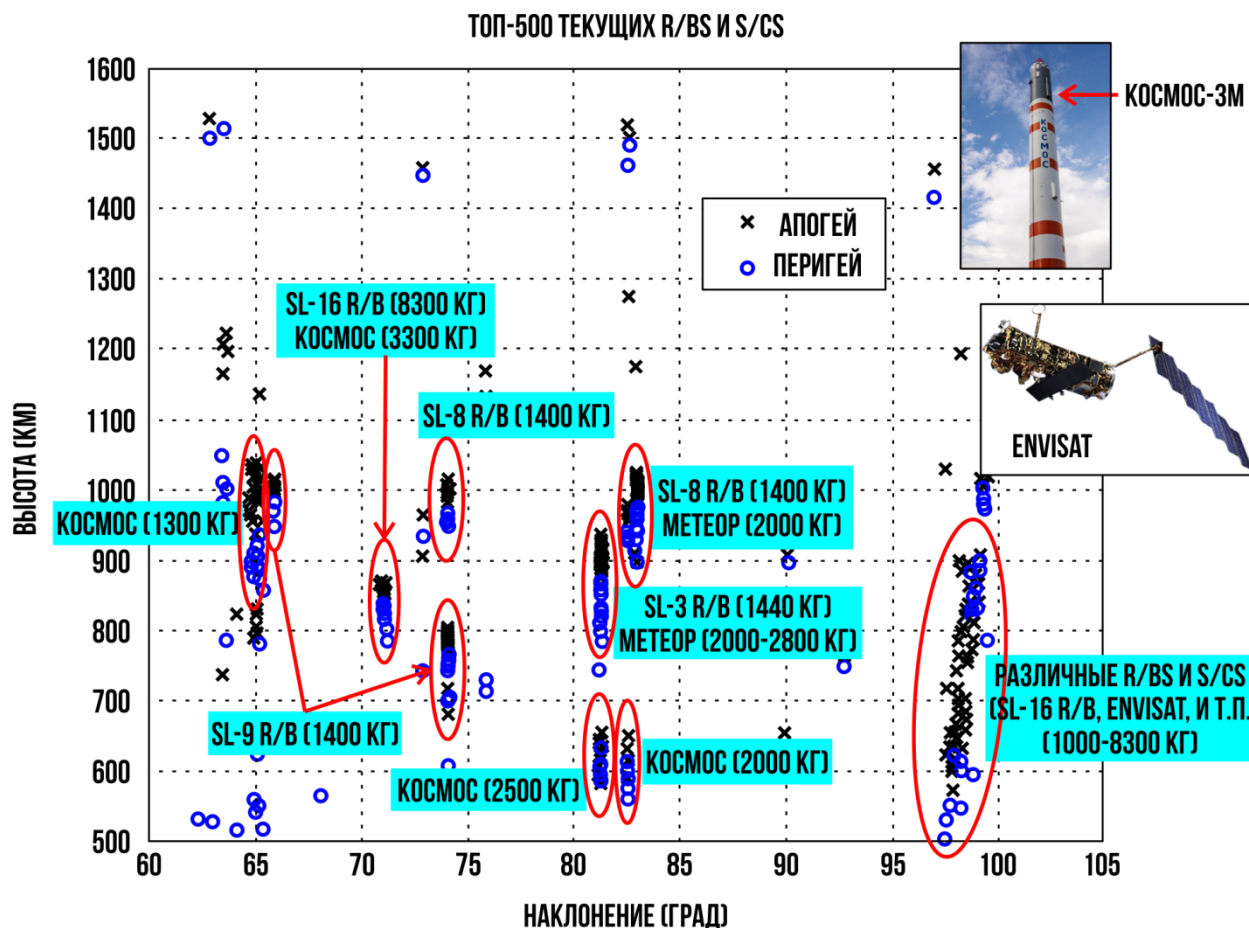


Рисунок 2 - Распределение крупногабаритных объектов космического мусора J. С.

Lio [6]

К 2015 году на околоземных орбитах насчитывалось порядка 17 тысяч объектов искусственного происхождения, размер которых превышает 10 сантиметров. Из них только четыре тысячи объектов представляют собой функционирующие космические аппараты [2]. По общепринятой классификации [9]

космический мусор принято делить на три категории: малый, средний и крупный (таблица 1).

Таблица 1 Классификация космического мусора [9]

	Категория		
	Малый	Средний	Крупный
Наибольший диаметр, м	<0.01	0.01-0.1	>0.1
Возможные последствия при столкновении	Возможны повреждения	Частичное/полное разрушение	Полное разрушение
Возможность защиты	Возможна	Невозможно	Невозможно
Наблюдаемость	Невозможно отследить, оценивается по прогнозам полученным с помощью статистических моделей	Частично отслеживаемо	Отслеживается
Примерная численность	> 100 миллионов	Около 500 000	> 21 000
Доля массы от общей массы всего мусора	Не установлено	5%	95%

Наиболее опасным является крупный космический мусор, чей размер превышает 10 сантиметров. Попадание такого объекта в космический аппарат приведёт к его полному разрушению с образованием множества обломков разных величины.

Первое известное столкновение двух крупных искусственных объектов произошло 10 февраля 2009 года над территорией России на высоте около 800 километров [10]. Его участниками стали уже нефункционирующий российский космический аппарат "Космос 2251", выведенный на орбиту в 1993 году, и американский спутник "Иридиум 33", запущенный на орбиту в 1997 году, который на момент столкновения ещё работал. Масса каждого аппарата была более 500 килограммов. Результатом столкновения стало полное разрушение объектов с образованием около 600 фрагментов [10]. На рисунке 3 представлены результаты моделирования распределения фрагментов в околоземном пространстве через 20 и 50 минут после столкновения.

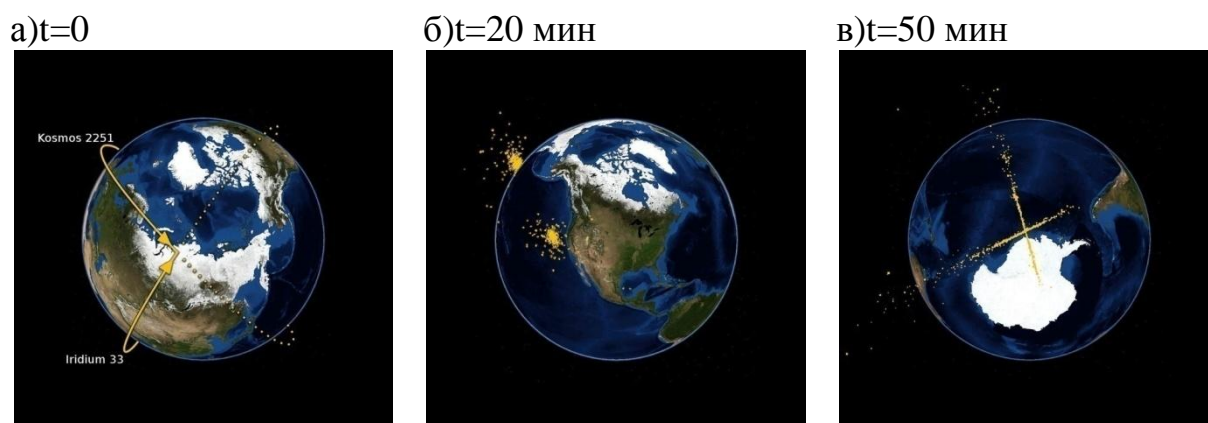


Рисунок 3 - Схема столкновения спутников "Космос 2251" и "Иридиум 33" - (а), разброс обломков через 20 минут после столкновения - (б), разброс обломков через 50 минут после столкновения - (в) [11]

Фрагменты, образовавшиеся в результате столкновения, не причинили вреда МКС и не привели к нарушению работы других КА, однако большое количество фрагментов ещё остаётся на орбите и угроза существующим КА, включая МКС, ещё остаётся.

Столкновение КА и космического мусора с характерным размером от 1 до 10 сантиметров также неизбежно приведёт к разрушению КА, при этом отследить движение такого и предупредить столкновение очень сложно.

Объекты малого космического мусора, с точки зрения воздействия на космическую технику, менее опасны. Индивидуальное отслеживание таких объектов невозможно, однако существуют и применяются методы пассивной защиты КА [12]. На КА устанавливают специальные защитные экраны и размещают бортовую аппаратуру таким образом, чтобы повысить живучесть КА в условиях возможного воздействия мелкого космического мусора.

Учитывая, что основным источником мелкого и среднего космического мусора могут стать крупные нефункционирующие объекты – ступени ракет, КА, наиболее эффективным способом снижения риска неуправляемого роста космического мусора является удаление с орбит больших объектов. Исследования показывают, что для стабилизации уровня космического мусора необходимо ежегодно удалять с орбиты около пяти крупных объектов.

### **3 Предупреждение образования космического мусора**

Для того чтобы стабилизировать количество космического мусора необходимо в первую очередь не увеличивать это количество в результате новых пусков. Это, конечно, не означает отказа от освоения околоземного пространства. Необходим более ответственный подход к проектированию новых миссий.

Статья VI договора о космосе (Договор о принципах деятельности государств по исследованию и использованию космического пространства, включая Луну и

другие небесные тела) говорит о том, что государства участники несут ответственность за национальную деятельность в космосе. В статье VII говорится, что сторона, запускающая аппарат, несёт ответственность за ущерб, причинённый этим аппаратом [14].

В 2002 году комитетом ООН по использованию космического пространства в мирных целях и предупреждению образования космического мусора рекомендовано международным организациям и государствам-членам ООН ограничить образование космического мусора при штатных операциях (при выведении КА на орбиту), свести к минимуму риск разрушения КА и ступеней ракет как при выведении, так и в конце срока активного существования. В частности, необходимо проектировать программу полёта так, чтобы избегать случайного и тем более намеренного столкновения, а также ограничивать срок существования КА и орбитальных ступеней на низкой околоземной орбите после окончания срока активного существования, а геостационарные КА переводить на более высокие орбиты – орбиты захоронения. Большинство национальных космических агентств руководствуются этими рекомендациями и предусматривают в программах выведения этап затопления или увода разгонных блоков на орбиты захоронения после завершения задачи выведения полезной нагрузки.

#### **4 Способы увода космического мусора**

Как было отмечено выше, большие объекты космического мусора, уже находящиеся на орбите, являются потенциальными источниками более мелкого, но не



менее опасного космического мусора. Их удаление с орбиты позволит снизить риск неконтролируемого роста космического мусора.

Для решения этой задачи необходимо разработать безопасные и эффективные способы сближения с космическим мусором, его захвата и орбитальной транспортировки [6]. В отличие от уже решённой задачи стыковки двух объектов на орбите, задача захвата космического мусора не предполагает его «сотрудничества» с активным КА – буксиром, как это происходит, например, при стыковке кораблей типа Прогресс или Союз с МКС, поэтому задача орбитальной транспортировки космического мусора после его захвата является новой задачей космонавтики, решение которой потребует построения новых моделей и алгоритмов управления движением связки буксира и космического мусора.

Операция по уводу космического мусора включает в себя следующие этапы [2, 18]:

- старт и выведение на орбиту космического буксира в рамках отдельной или попутной миссии;
- дальнейшее сближение с объектом космического мусора (целью);
- ближнее движение;
- координированный полет цели и буксира;
- захват цели и образование связки буксира и цели
- стабилизация связки;
- спуск с орбиты или перевод связки на орбиту захоронения

Задачи динамики и управления, возникающие на первых четырёх этапах, решены и отработаны, поскольку эти же задачи решаются в процессе стыковки пилотируемых и транспортных кораблей с МКС. Наиболее сложными являются последние три этапа. Этап захвата или стыковки с объектом космического мусора осложняется тем, что точной информации о его движении нет, поэтому анализ углового движения мусора может проводиться только на основе наблюдений с использованием различных датчиков и видеокамер космического буксира. После успешной стыковки с космическим мусором необходима стабилизация всей связки, для выполнения которой система управления буксиром должна адаптироваться к изменившимся инерционно-массовым и центровочным характеристикам связки. Эти три этапа являются ключевыми в миссии по уводу объекта космического мусора, от их выполнения зависит успех миссии.

Существующие методы увода космического мусора можно разделить на две большие группы (рисунок 4): пассивные и активные. Рассмотрим каждую группу подробнее.

#### **4.1 Пассивные способы**

Пассивные методы предполагают использование существующих физических полей или внешней среды для торможения космического мусора и свода его с орбиты.

На орбитах высотой до 600 км на движение искусственных спутников существенное влияние оказывает атмосфера. В обычных условиях, из-за малой площади поперечного сечения объекта это действие незначительно и снижение

объекта до плотных слоёв атмосферы может занимать десятки лет [13]. Для увеличения характерной площади космического мусора и более эффективного его торможения можно использовать надувные баллоны или разворачиваемые мембраны-паруса, закрепляемые на объекте космического мусора [2, 4, 19]. К недостаткам этого способа можно отнести необходимость разворачивания на объекте космического мусора сложной конструкции, установленной на нём заранее или прикрепляемой КА-уборщиком космического мусора.

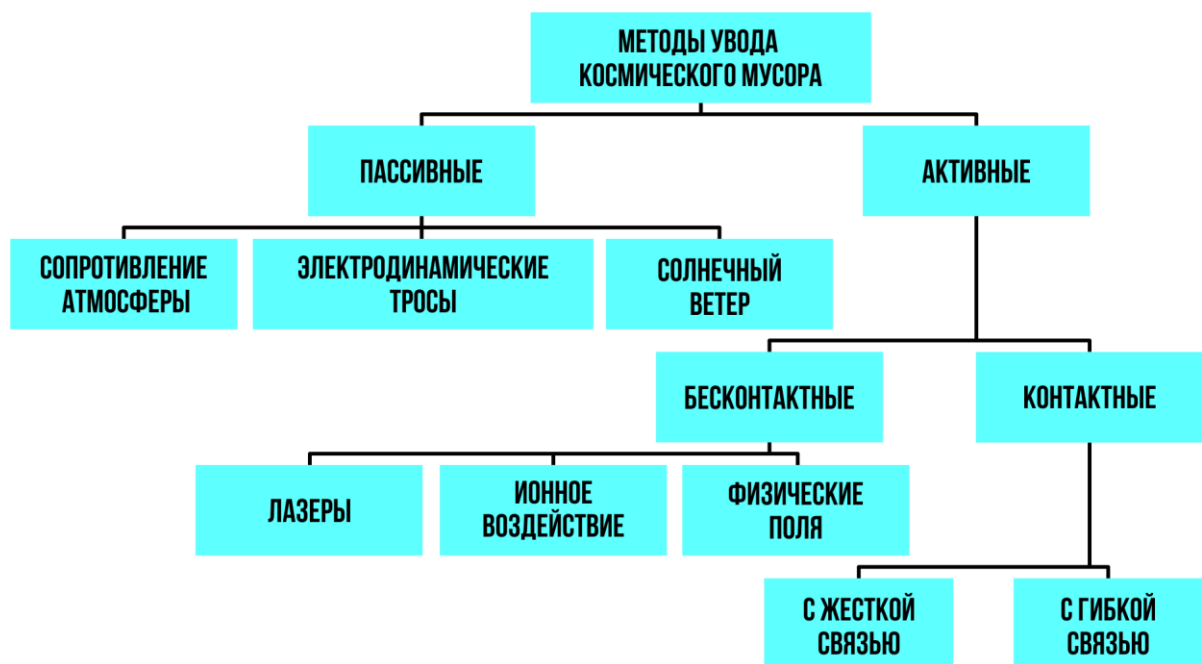


Рисунок 4 - Методы увода космического мусора

Другой более простой и надёжный подход к увеличению характерной площади предполагает использование специальной пены, способной расширяться в тысячу раз. Эта пена может устанавливаться на КА в малогабаритном контейнере или закрепляться на нём при пролёте КА-уборщика мусора [19, **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, 21]. В работе [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**] рассмотрены некоторые материалы, из которых может быть изготовлена пена

изменяющая размер в тысячу раз. Преимуществом этого способа пассивного увода космического мусора является отсутствие необходимости непосредственного контакта КА-уборщика мусора с самим мусором, что повышает вероятность успешного завершения миссии. Эта схема, также позволяет одному уборщику мусора выполнить облёт нескольких целей, прикрепляя к каждой расширяемую пену и используя для маневрирования и движения от цели к цели экономичные электрореактивные двигатели.

По оценкам, представленным в работе [13], объект космического мусора, с площадью Миделя порядка  $30 \text{ м}^2$ , может быть сведён с орбиты высотой 500 км менее чем за 1 год. 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 километров, нецелесообразно [12, 13].

На орбитах высотой более 700 км сила сопротивления атмосферы становится меньше силы давления солнечного света, поэтому на таких орбитах для создания силы торможения можно использовать солнечный парус [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**, 23]. В научной литературе неоднократно предлагалось использовать солнечный парус для межпланетных перелётов [22] поскольку для движения нет необходимости в расходе рабочего тела. В процессе снижения объекта космического мусора солнечный парус может также выполнять функцию устройства атмосферного торможения [23].

Недостатком этого способа увода является необходимость развёртывания на орбите крупногабаритной конструкции и управления ей в процессе спуска космического мусора с орбиты, что является сложной задачей. К настоящему времени на орбите было проведено только три успешных эксперимента по развёртыванию солнечного паруса.

Магнитное поле Земли также может быть использовано для создания силы торможения для увода объекта с некоторых орбит. Эта сила может создаваться при помощи длинного токопроводящего троса [17, 18]. Течение тока по тросу, движущемуся в магнитном поле Земли, будет приводить к возникновению силы Лоренца (рисунок 5). В таблице 2 приведена сравнительная оценка эффективности использования электродинамического троса в зависимости от начальной высоты орбиты [13]

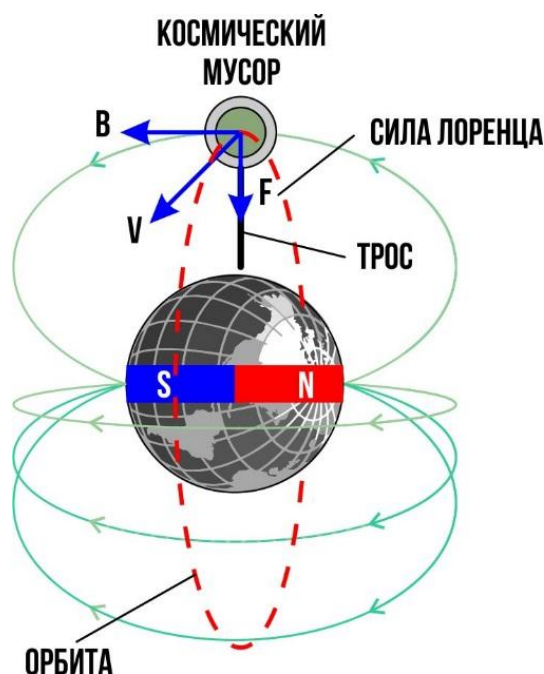


Рисунок 5 - Принцип действия электродинамической тросовой системы при уборке космического мусора

Таблица 2 - Время увода объекта космического мусора при помощи электродинамической тросовой системы и при использовании атмосферы в зависимости от начальной высоты [13]

Высоты, км	Время увода		
	Естественный сход с орбиты, лет	Использование атмосферы для площади Миделя 30 м <sup>2</sup> , лет	Электродинамическая тросовая система, лет
500	14	1	1/6
600	41	2	1/6
700	110	6	1/4
800	260	16	1/3
900	660	39	5/12
1000	1537	91	1/2
1100	3537	210	7/12
1200	8143	484	2/3
1300	18964	1128	3/4
1400	68470	2666	5/6
1500	106866	6356	11/12

Трос с автономным механизмом его развёртывания может устанавливаться на вновь запускаемых КА. Развёртывание троса выполняется после окончания функционирования космического аппарата [15, 16]. Результаты проведённого моделирования показывают [17], что электродинамическая тросовая система с массой около 1% от массы КА, позволят свести его с орбиты за время от пяти-шести месяцев (для орбиты с наклоном 0 градусов) до одного года (для орбиты с наклоном в 50 градусов). Для орбит с наклоном от 75 градусов и выше, электродинамическая тросовая система не эффективна [17].

Очевидным общим недостатком рассмотренных пассивных способов увода является длительное время увода космического мусора. Кроме этого, большинство рассмотренных способов требуют стабилизации углового движения космического мусора как при развёртывании устройства торможения (паруса или троса), так и в процессе увода. Увод таких объектов, а также объектов, давно выведенных из эксплуатации, возможен только при использовании активных методов, не требующих предварительно стабилизации уводимых объектов.

## **4.2 Активные методы**

Активные методы увода предполагают создание искусственного воздействия на объект космического мусора. По типу воздействия активные методы можно разделить на две группы:

- бесконтактные способы увода – это способы, предполагающие дистанционное силовое воздействие на космический мусор без формирования непосредственной механической связи;
- контактные способы увода – предполагают механический контакт КА-буксира или его отдельной части с космическим мусором.

Преимуществом первой группы методов является отсутствие механического контакта между буксиром и мусором, делающего процесс буксировки наиболее безопасным для буксира. С другой стороны дистанционное воздействие осуществляется небольшими по величине силами и процесс увода может быть

продолжительным в сравнении со способами, предполагающими непосредственное механическое взаимодействие между буксиром и мусором.

#### 4.2.1 Бесконтактные способы увода

Небольшие объекты космического мусора с характерным размером до 0,2 м могут сведены с орбиты с использованием лазеров. Воздействие лазерного излучения на материал космического мусора приводит к явлению абляции – уносу вещества с поверхности твёрдого тела под воздействием лазерного излучения (рисунок 6). В результате этого явления формируется импульс, передаваемый объекту космического мусора, который может быть использован для снижения его скорости. Источник лазерного излучения может устанавливаться на борту КА [25, 26, 27, 27, 28] или на Земле [30, 31]. Эффективность этого способа зависит от углового движения цели: вращение космического мусора при воздействии на него импульсов лазерного излучения приведёт к тому, что направления тормозящих импульсов будут меняться, что может привести к снижению эффективности торможения. Исследованию этой проблемы посвящена работа [32].

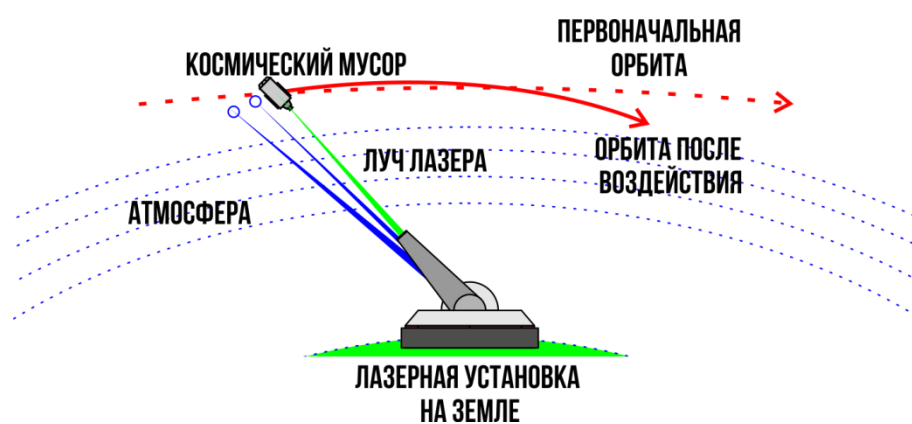


Рисунок 6 - Увод космического мусора при помощи лазерной установки



Перспективным способом активного торможения космического мусора является воздействие на него потока частиц, создаваемого, например, ионным двигателем [33, 34, 35]. Эта схема позволяет воздействовать на объект с безопасных расстояний (рисунок 7). Максимальное расстояние, определяющее эффективность этого способа буксировки, зависит от угла расхождения потока частиц, который зависит от конструкции используемого двигателя. Минимальным достигнутым значениям этого угла от 2 до 5 градусов соответствует максимальное расстояние эффективного воздействия около 30 метров [33]. Сила, действующая на космический мусор, имеет порядок десятков миллиньютонов.

Воздействие потока на космический мусор сложной формы может привести к возникновению нежелательного её вращения, что может снизить эффективность воздействия и усложнит управление относительным движением буксира.

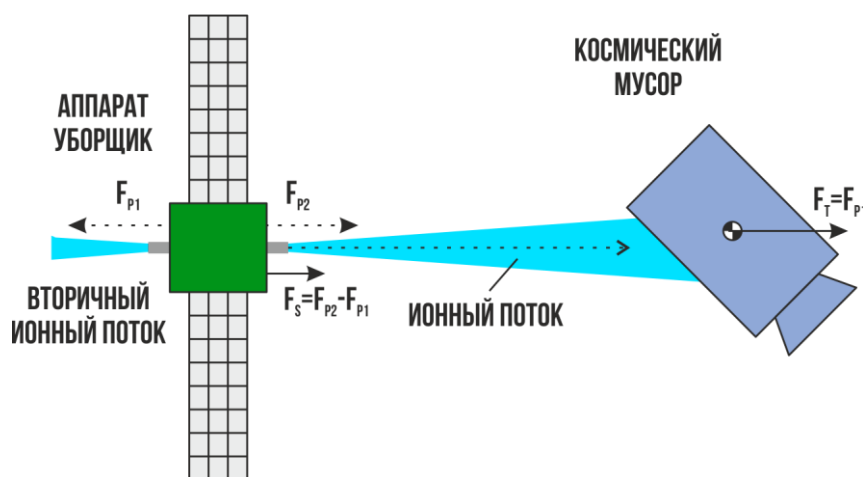


Рисунок 7 - Схема воздействия потоком ионов на объект [33]

Для воздействия на объект космического мусора могут быть использованы физические поля, например, электростатическое поле (рисунок 8). Здесь возможны две схемы буксировки: «тяги» или «толкай». В первом случае буксир и космический

мусор заряжаются разными по знаку зарядами, поэтому между ними возникает сила Кулоновского притяжения. Буксир, используя эту силу и поддерживая при помощи своих двигателей постоянное расстояние до космического мусора, может увести его на орбиту захоронения. Во втором случае буксир толкает космический мусор, также воздействуя на него силой Кулона, создаваемой одинаковыми зарядами буксира и мусора [36]. Учитывая небольшое расстояние между объектами, при управлении относительным движением буксира следует учитывать распределение заряда по поверхности объекта космического мусора и самого буксира для оценки действующих на него сил и возмущающих моментов [36]. Рассмотренный способ может быть использован для увода объектов космического мусора с геостационарных орбит на орбиты захоронения, находящиеся на 200 км выше.

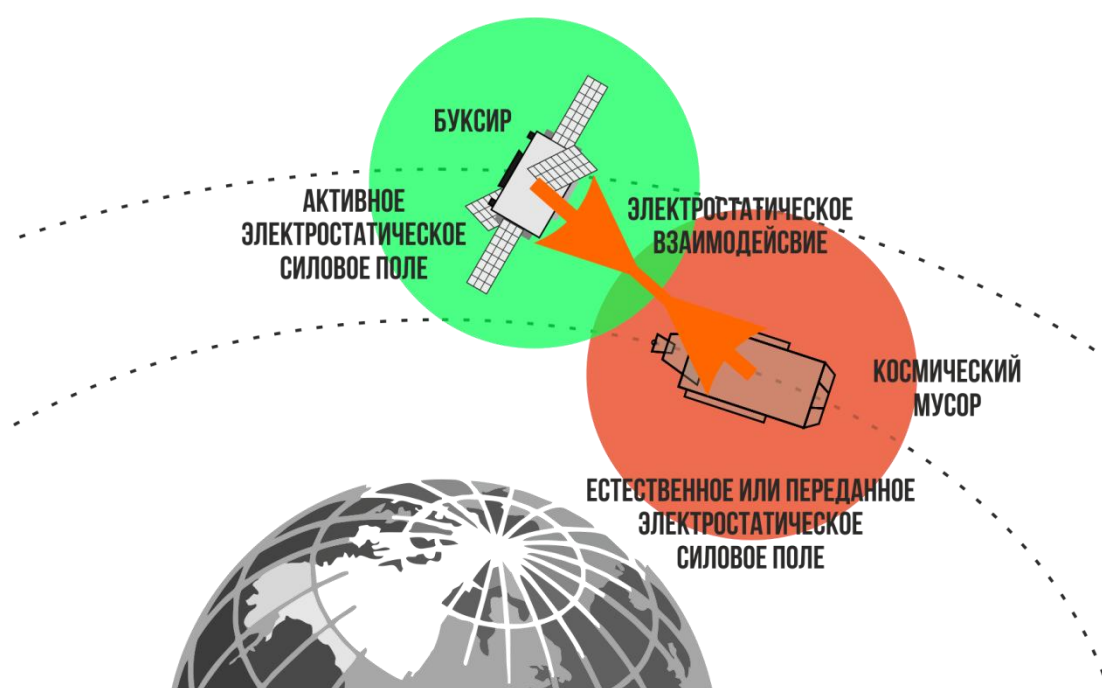


Рисунок 8 - Увод объекта космического мусора с геостационарной орбиты с использованием электростатического поля [39]

Магнитное поле, генерируемое космическим буксиром, может быть использовано для демпфирования углового движения космического мусора. В работе [37] рассматривается простейший случай плоского движения буксира и объекта космического мусора, на примере орбитальной ступени Ариан-4 и Ариан-5 (рисунок 9). Работа представляет результаты исследований по проекту Agora [38].

#### 4.2.3 Контактные методы

Контактные методы предполагают захват и увод объекта космического мусора с непосредственным механическим взаимодействием при помощи стыковочного устройства, манипулятора, сети, гарпуна. Общая схема увода космического мусора предполагает этапы дальнего и ближнего наведения, этап захвата космического мусора – формирование механической связи, этап стабилизации связки и следующего за этим увода всей связки с орбиты. Наиболее сложным этапом является этап захвата космического мусора. Космический мусор в общем случае не имеет специальных стыковочных устройств и может вращаться с большой угловой скоростью, поэтому технология захвата такого объекта принципиально отличается от отработанной технологии стыковки двух объектов на орбите.

На сегодняшний день предложено несколько способов захвата объекта космического мусора [2, 4]. Эти способы можно разделить на две группы:

- способы, использующие жёсткую связь;
- способы, использующие гибкую связь.

К первой группе относятся способы, использующие различные механические манипуляторы или специализированные устройства захвата [2]. Роботы-

манипуляторы давно используются в космической технике [40, 41, 42, 43, **Ошибка!** **Источник ссылки не найден.**]. На МКС используется робот-манипулятор Канадарм 2, Европейский манипулятор (ERA), JEM RMS, установленный на японском модуле Кибо. Манипуляторы, благодаря своей универсальности, могут быть использованы для захвата сложных объектов в составе многоразовых системы увода космического мусора (рисунок 9). Однако несмотря на то, что манипуляторы давно используются в космической технике, захват неуправляемого объекта является очень сложной задачей [44, 46, 46], особенно если этот объект совершает неуправляемое угловое движение [48, 49, 50, 51].

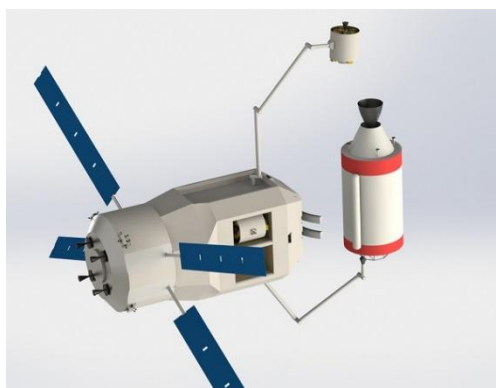


Рисунок 9 – Захват орбитальной ступени двумя манипуляторами [**Ошибка!**

**Источник ссылки не найден.]**

Ещё одним способом захвата космического мусора с использованием жёсткой связи является схема типа «штырь-конус», применяемая в настоящее время для стыковки пилотируемых и грузовых кораблей с МКС. На космическом буксире устанавливается штырь, а в качестве стыковочного порта (конуса) используется сопло двигателя космического мусора, например, орбитальной ступени. Сопло двигателя является одним из наиболее прочных элементов конструкции,

воспринимающим значительные тепловые и механические нагрузки, поэтому оно может быть использовано для стыковки даже в случае значительных относительных скоростей космического буксира и цели. Основная проблема при разработке такой схемы захвата – разработка эффективной математической модели, которая бы учитывала взаимодействие цели и буксира при различных сценариях сближения [52, 54]. Экспериментальные исследования такого способа захвата цели проводилось в наземных условиях [55], рисунок 10. Одним из недостатков подобной схемы является то, что он подходит только для захвата орбитальных ступеней и объектов, имеющих сопла.

У всех методов, предполагающих формирование жесткой связи, имеется один общий недостаток – сложность захвата вращающихся объектов. Вращение объекта космического в процессе формирования жесткой связи может приводить к возникновению больших ударных нагрузок на элементы устройства захвата, поэтому для захвата вращающихся объектов использование гибкой связи выглядит более предпочтительным [2, 4, 56, 57, 58]. К устройствам захвата с гибкой связью относятся: сети [59, 60], гарпуны [61, 62] и специализированные стыковочные модули на гибкой связи [63].

Использование сети, развертываемой буксиром-перехватчиком, для захвата объектов космического мусора рассмотрено в работах [56, 57, 64]. На рисунке 11 показана операция захвата сетью. Такая схема позволит уменьшить воздействие космического мусора на буксир и выполнять захват объектов, вращающихся с большой угловой скоростью. Кроме этого, сеть позволяет выполнять захват без

снижения относительной скорости между буксиром и целью, что позволит снизить затраты топлива на этапе перехвата.

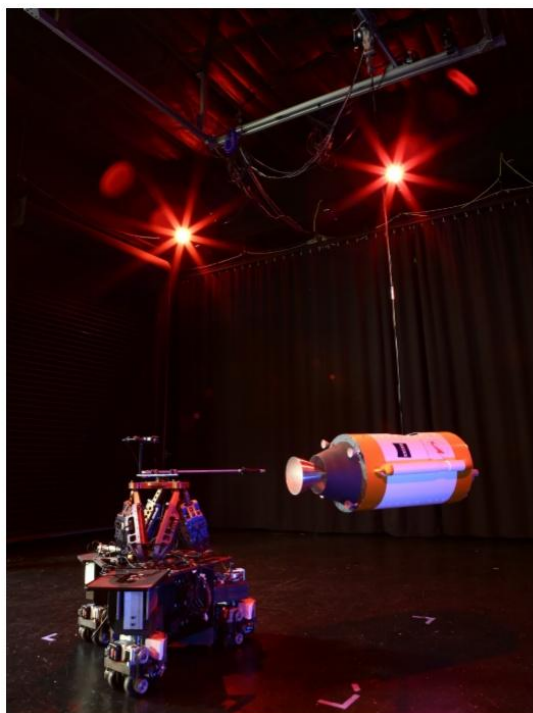


Рисунок 10 – Экспериментальная установка для исследования стыковки с использованием механизма типа «штырь-конус» [55]

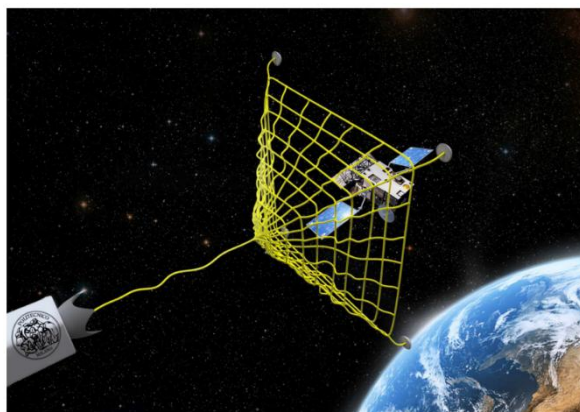


Рисунок 11 - Использование сети для захвата объекта космического мусора [57]

Ещё одним перспективным устройством захвата может стать гарпун, позволяющий без большого риска для космического буксира установить тросовую связь между ним и объектом космического мусора [65]. Гарпун должен пробить

обшивку (рисунок 12) захватываемого объекта и надёжно зафиксироваться для того, чтобы буксир смог, используя свои двигатели, увести объект на орбиту захоронения или снизить орбиту до входа в плотные слои атмосферы. Для надёжной фиксации гарпуна необходимо выбрать форму его ударной поверхности и механизм надёжной фиксации. При выборе формы и скорости выстрела гарпуном следует учитывать движение захватываемого объекта, свойства поверхности его обшивки. Кроме этого, целесообразно снизить вероятность возникновения осколков при пробивании обшивки [65] и возможность попадания в ёмкости, находящиеся под давлением.

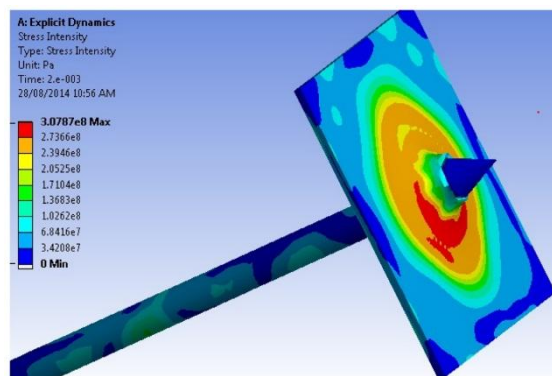


Рисунок 12 – Результаты моделирования взаимодействия гарпуна с обшивкой космического мусора [65]

В работах [3, 63] предлагается модифицированная схема использования лёгкого автономного стыковочного модуля, осуществляющего стыковку по схеме штырь-конус для захвата разгонных блоков типа Космос 3М. Предполагается что автономные модуль соединяется с аппаратом буксиром посредством тросовой связи. Предполагается что буксир используя данную схему будет производить последовательный захват нескольких объектов космического мусора, после чего осуществлять их совместный увод с орбиты.

При использовании тросовых систем, после формирования тросовой связи между буксиром и космическим мусором, необходимо обеспечить устойчивое и предсказуемое движение космического мусора после включения двигателя буксира. Космическим тросовым системам, включая тросовые системы для активной уборки космического мусора, посвящено большое число работ [58, 67, 68, 69, 70, 71]. Одной из проблем тросовой транспортировки является обеспечение устойчивого движения связки после включения двигателя буксира для транспортировки объекта космического мусора. Включение и работа двигателя могут привести к возникновению продольных колебаний тросовой системы и возбуждать угловое движение цели, поскольку точка закрепления троса не будет совпадать с центром масс цели. Это может привести к запутыванию троса. Кроме этого, импульсное воздействие на тросовую систему в результате включения двигателя буксира может привести к опасному сближению буксира и цели [74]. Движению цели на этапе задействования тяги двигателя буксира посвящены работы [76, 77], где показано угловое движение космического мусора в процессе орбитальной транспортировки. При использовании буксиром двигателей малой тяги возможно возникновение хаотических режимов [78].

При тросовой транспортировке космических аппаратов с крупногабаритными упругими элементами, такими как солнечные батареи или антенны, продольные колебания троса могут приводить к возникновению колебаний этих хрупких элементов, что может вызвать их разрушение [69]. Необходимо построение такого



управление тягой буксира  $F$  (рисунок 13), чтобы амплитуда колебаний упругих конструкций не превысила известных критических значений.

Остатки топлива в баках орбитальных ступеней также может влиять на процесс транспортировки [67]. В работе [79] рассматривается способ стабилизации, использующий управление тягой буксира, упругие свойства троса и способ закрепления троса на объекте несколькими тягами, позволяющими избирательно воздействовать на угловое движение объекта. В работах [74, 80, 81, 82] рассматривается задача построения управления буксиром для демпфирования продольных колебаний троса.

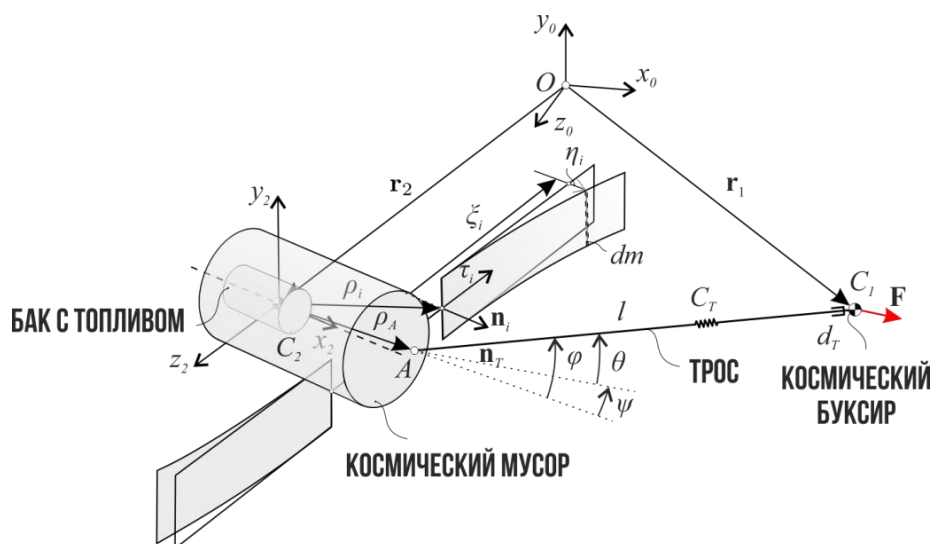


Рисунок 13 - Объект космического мусора с упругими элементами и остатками топлива в баках [67, 69, 70]

## Заключение

Проблема космического мусора – эта проблема которую необходимо будет решать в XXI веке. Чем раньше начнутся активные действия по уводу наиболее

опасных крупных объектов, тем меньше риск того, что ситуация в околоземном пространстве будет развиваться по катастрофическому сценарию Кесслера.

В данном обзоре рассмотрены самые известные способы активной очистки околоземного пространства от космического мусора. Наиболее перспективными на наш взгляд являются способы захвата и транспортировки на гибкой связи, в частности, с использованием сети. Эти способы наиболее безопасны для космического буксира и позволяют контролировать силовое воздействие космического мусора на буксир при помощи тросовой системы. Способы с жёсткой механической связью могут быть использованы для захвата объектов, которые не обладают существенным кинетическим моментом.

Целесообразно планировать миссии по уводу космического мусора как попутные, выполняемые разгонным блоком после выведения основной задачи – выведения основной полезной нагрузки. Это потребует доработки существующих разгонных блоков и разработки отделяемых автономных модулей для выполнения задач, специфичных для уборки космического мусора. В случае использования жёсткой механической схемы захвата мусора (при помощи манипулятора или стыковочного устройства штанга-конус при уводе ступеней ракет) роль космического буксира может выполнить разгонный блок, двигатели которого могут быть использованы для увода всей связки с орбиты. Увод космического мусора в рамках попутных миссий позволит значительно снизить затраты на очистку околоземных орбит.

*Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда*

*(Проект № 16-19-10158).*

### **Библиографический список**

1. Bolonkin A. New methods of removing space debris, 2014, available at: <http://www.rxiv.org/pdf/1403.0670v1.pdf>
2. Shan M., Guo J., Gill E. Review and comparison of active space debris capturing and removal methods // Progress in Aerospace Sciences, 2015, vol. 80, pp. 18 – 32.
3. Трушляков В.И., Юткин Е.А. Обзор средств стыковки и захвата объектов крупногабаритного космического мусора // Омский научный вестник. 2013. № 2. С. 56 – 61.
4. Pelton J.N. New solutions for the space debris problem, Springer, 2015, 94 p.
5. Kessler D.J., Cour-Palais B.G. Collision frequency of artificial satellites: the creation of a debris belt // Journal of geophysical research, 1978, vol. 83, pp. 2637 - 2646.
6. Wood A. Gravity by Alfonso Cuarón // Science Fiction Film and Television, 2014, vol. 7, no. 3, pp. 441 - 444.
7. Liou J.C. An active debris removal parametric study for LEO environment remediation // Advances in Space Research, 2011, vol. 47. no. 11, pp. 1865 - 1876.
8. Bonnal C., Ruault J.-M., Desjean M.-C. Active debris removal: Recent progress and current trends // Acta Astronautica, 2013, vol. 85, pp. 51 – 60.
9. Emanuelli M., Federico G., Loughman J., Prasad D., Chow T. Conceptualizing an economically, legally, and politically viable active debris removal option // Acta Astronautica, 2014, vol. 1, pp. 197 – 205.

10. Anselmo L., Pardini C. Analysis of the consequences in low earth orbit of the collision between cosmos 2251 and iridium, 2009, available at: <https://www.researchgate.net/publication/228975104>
11. 2009 satellite collision, available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/2009\\_satellite\\_collision](https://en.wikipedia.org/wiki/2009_satellite_collision)
12. Schildknecht T. Optical surveys for space debris // The Astronomy and Astrophysics Review, 2007, vol. 14, no. 1, pp. 41 - 111.
13. Палий А.С. Методы и средства увода космических аппаратов с рабочих орбит (состояние проблемы) // Техническая механика. 2012. №. 1. С. 94 - 102.
14. Данилова Л.В. Ответственность за засорение околоземного космического пространства // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2014. Т. 2. № 10. С. 267 - 268.
15. Forward R.L., Hoyt R.P., Uphoff C.W. Terminator tether: a spacecraft deorbit device // Journal Spacecraft and Rockets, 2000, vol. 37, no. 2, pp. 187 – 196.
16. Hoyt R.P. The Terminator Tape: A cost-effective de-orbit module for end-of-life disposal of LEO satellites // In: AIAA SPACE 2009 Conference & Exposition, Pasadena, California, USA, 14 - 17 September, 2009, pp. 6733.
17. Pardini C., Hanada T., Krisko P.H. Benefits and risks of using electrodynamic tethers to de-orbit spacecraft // Acta Astronautica, 2009, vol. 64, no. 5, pp. 571 – 588.
18. Зайцева О.Н., Лукьянчиков А.В., Пичхадзе К.М. Аспекты технической реализации автоматического космического комплекса для захвата и свода с орбиты

объектов, прекративших активное существование // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2012. Т. 5. № 16. С. 12 – 18.

19. Nock K.T., McDonald A.D., Aaron K.M. Balloon device for lowering space object orbits, Patent US no. 6830222, 14.12.2004.

20. Andrenucci M., Pergola P., Ruggiero A. Active Removal of Space Debris. Expanding foam application for active debris removal. Final Report. ESA, 2011, 132 p. available at: [http://www.esa.int/gsp/ACT/doc/ARI/ARI%20Study%20Report/ACT-RPT-MAD-ARI-10-6411-Pisa-Active\\_Removal\\_of\\_Space\\_Debris-Foam.pdf](http://www.esa.int/gsp/ACT/doc/ARI/ARI%20Study%20Report/ACT-RPT-MAD-ARI-10-6411-Pisa-Active_Removal_of_Space_Debris-Foam.pdf)

21. Pergola P., Ruggiero A., Andrenucci M., Summerer L. Low-thrust missions for expanding foam space debris removal // In: Proceedings of the 32nd International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany, 11-15 September, 2011, pp. 13.

22. McInnes C.R. Solar sailing: technology, dynamics and mission applications, Springer Science & Business Media, 2013, 296 p.

23. Visagio L., Lappas V. Hybrid solar sails for active debris removal // ESA Ariadna study AO, 2011, vol. 6411, no. 10, pp. 1 - 59.

24. Трофимов С.П. Увод малых космических аппаратов с верхнего сегмента низких орбит с помощью паруса для увеличения силы светового давления. - М.: ИПМ РАН, 2015. – 32.

25. Schmitz M., Fasoulas S., Utzmann J. Performance model for space-based laser debris sweepers // Acta Astronautica, 2015, vol. 115, pp. 376 – 383.

26. Phipps C.R., Bonnal C. A spaceborne, pulsed UV laser system for re-entering or nudging LEO debris, and re-orbiting GEO debris // Acta Astronautica, 2016, vol. 118, pp. 224 – 236.
27. Авдеев А.В., Метельников А.А. Бортовая лазерная установка для борьбы с космическим мусором // Труды МАИ. 2016. № 89. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=72840>
28. Ашурбейли И.Р., Лаговьер А.И., Игнатъев А.Б., Назаренко А.В. Возможности использования авиационной лазерной системы для борьбы с космическим мусором и поддержания орбит космического аппарата // Труды МАИ. 2011. № 43. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=24856>
29. Авдеев А.В. К вопросу борьбы с космическим мусором с помощью лазерной космической установки на основе HF-НХЛ // Труды МАИ. 2012. № 61. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35496>
30. Phipps C.R. A laser-optical system to re-enter or lower low Earth orbit space debris // Acta Astronautica, 2014, vol. 93, pp. 418 – 429.
31. Soulard R. ICAN: A novel laser architecture for space debris removal // Acta Astronautica, 2014, vol. 105, no. 1, pp. 192 – 200.
32. Liedahl D.A., Libby S.B., Rubenchik A. Momentum transfer by laser ablation of irregularly shaped space debris // AIP Conference Proceedings, 2010, vol. 1278, no. 1, pp. 772 - 779.
33. Merino M. Ion beam shepherd satellite for space debris removal // Progress in Propulsion Physics, 2013, vol. 4, pp. 789 - 802.

34. Kitamura S., Hayakawa Y., Kawamoto S. A reorbiter for large GEO debris objects using ion beam irradiation // Acta Astronautica, 2014, vol. 94, no. 2, pp. 725 – 735.
35. Bombardelli C. Dynamics of ion-beam-propelled space debris // In: International Symposium on Space Flight Dynamics, Sao Jose dos Campos, Brasil, February 28 - March 4, 2011, available at: [http://sdg.aero.upm.es/publications/pdf/2011/s8\\_p5\\_issfd22\\_pf\\_047.pdf](http://sdg.aero.upm.es/publications/pdf/2011/s8_p5_issfd22_pf_047.pdf)
36. Schaub H., Sternovsky Z. Active space debris charging for contactless electrostatic disposal maneuvers // Advances in Space Research, 2014, vol. 53, no.1, pp. 110 – 118.
37. Gómez N.O. et al. Control analysis for a contactless de-tumbling method based on eddy currents: problem definition and approximate proposed solutions // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, San Diego, California, USA, 7-11 January 2016, pp. 642.
38. Kumar K. Agora: Mission to demonstrate technologies to actively remove Ariane rocket bodies // Proceedings of the International Astronautical Congress, Jerusalem, Israel, 12-16 October 2015, vol. 6, pp. 6.
39. Schaub H., Moorer D.F. Geosynchronous large debris reorbiter: Challenges and prospects // The Journal of the Astronautical Sciences, 2012, vol. 59, no. 1-2, pp. 161 - 176.
40. Hiltz M., Rice C., Boyle K., & Allison R. Canadarm: 20 years of mission success through adaptation // Int. Symp. Artif. Intell. Robotics Autom. Space, 2001, vol. 1, pp. 1 – 8.

41. Aikenhead B.A., Daniell R.G., Davis F.M. Canadarm and the space shuttle // Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 1983, vol. 1, no. 2, pp. 126 – 132.
42. Sachdev S.S. Canadarm - a review of its flights // Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 1986, vol. 4, no. 3, pp. 268 – 272.
43. Burns S., Razvi S. Evolution of the space station robotic manipulator // In: 58th International Astronautical Congress, Hyderabad, India, 24-25 September 2007, available at: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20070010589.pdf>
44. Matsumoto S. Reconfigurable space manipulator for in-orbit servicing // In: Fourth International Conference and Exposition on Robotics for Challenging Situations and Environments, Albuquerque, New Mexico, USA, 27 February - 2 March, 2000, pp. 88 - 94.
45. Ma Z., Ma O., Shashikanth B.N. Optimal control for spacecraft to rendezvous with a tumbling satellite in a close range // In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Daejeon, South Korea, 9-14 October 2016, pp. 4109 - 4114.
46. Xin M., Pan H. Nonlinear optimal control of spacecraft approaching a tumbling target // Aerospace Science and Technology, 2011, vol. 15, no. 2, pp. 79 – 89.
47. Dimitrov D.N., Yoshida K. Utilization of the bias momentum approach for capturing a tumbling satellite // Proceedings IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Sendai, Japan, September 28 - October 2, 2004, vol. 4, pp. 3333 - 3338.



48. Nagamatsu H., Kubota T., Nakatani I. Capture strategy for retrieval of a tumbling satellite by a space robotic manipulator // Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Osaka, Japan, 4-8 November, 1996, vol. 1, pp. 70 - 75.
49. Nenchev D.N., Yoshida K. Impact analysis and post-impact motion control issues of a free-floating space robot contacting a tumbling object // Proceedings 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Innovations in Theory, Practice and Applications, Victoria, BC, Canada, 13-17 October, 1998, vol. 1, pp. 913 - 919.
50. Oki T., Nakanishi H., Yoshida K. Time-optimal manipulator control for management of angular momentum distribution during the capture of a tumbling target // Advanced Robotics, 2010, vol. 24, no. 3, pp. 441 - 466.
51. Yoshida K., Nakanishi H., Ueno H., Inaba N., Nishimaki T., Oda M. Dynamics, control and impedance matching for robotic capture of a non-cooperative satellite // Advanced Robotics, 2004, vol. 18, no. 2, pp. 175 - 198.
52. Concept for ADR of Kosmos 3M R/Bs: clamp configuration, available at: <https://www.stardust2013.eu/Home/OurTeam/MarkoJankovic/MarkosProjects/tabid/5018/Default.aspx>
53. Zhang X., Huang Y., Han W., Chen X. Research of docking characteristic of flexible beam based on probe-cone docking mechanism // Procedia Engineering, 2012, vol. 31, pp. 857 - 862.

54. Han W., Huang Y., Chen X. Research of impact dynamic modeling of flexible probe-cone docking mechanism based on Kane method // *Archive of Applied Mechanics*, 2015, vol. 85, no. 2, pp. 205 - 221.
55. Moody C.K., Probe A.B., Masher A., Woodbury T., Saman M., Davis J., Hurtado J.E. Laboratory Experiments for Orbital Debris Removal // In: *AAS Guidance, Navigation and Control Conference*, Breckenridge, Colorado, USA, 5-10 February, 2016, pp. 1 - 12.
56. Wormnes K., Le Letty, R., Summerer L., Schonenborg R., Dubois-Matra O., Luraschi E., Delaval J. ESA technologies for space debris remediation // In: *6th European Conference on Space Debris*, Darmstadt, Germany, on Monday, 22 April, 2013, vol. 1, pp. 1 - 8.
57. Benvenuto R., Salvi S., Lavagna M. Dynamics analysis and GNC design of flexible systems for space debris active removal // *Acta Astronautica*, 2015, vol. 110, pp. 247 – 265.
58. Aslanov V.S., Ledkov A.S. *Dynamics of the tethered satellite system*. Cambridge, Woodhead Publishing Limited, 2012, 331 p.
59. Sharf I., Thomsen B., Botta E.M., Misra A.K. Experiments and simulation of a net closing mechanism for tether-net capture of space debris // *Acta Astronautica*, 2017, vol. 139, pp. 332 - 343.
60. Shan M., Guo J., Gill E. Deployment dynamics of tethered-net for space debris removal // *Acta Astronautica*, 2017, vol. 132, pp. 293 - 302.

61. Forshaw J.L., Aglietti G.S., Salmon T., Retat I., Roe M., Burgess C., Chaumette F. Final payload test results for the Remove Debris active debris removal mission // Acta Astronautica, 2017, vol. 138, pp. 326 - 342.
62. Mori H., Izumiyama T., Hashimoto K., Kawamoto S., Hirako K. U.S. Patent Application, no. 15397348, 2017.
63. Трушляков В. И., Макаров Ю. Н., Олейников И. И., Шатров Я. Т. Способ очистки орбиты от космического мусора. Патент №2531679 РФ, МПК В64G 1/64. 27.10.2014.
64. Cercós L., Stefanescu R., Medina A., Benvenuto R., Lavagna M., González I., Wormnes K. Validation of a Net Active Debris Removal simulator within parabolic flight experiment // In: 12th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, Montreal, Canada, 17-19 June, 2014, available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/55248523.pdf>
65. Асланов В.С., Алексеев А.В., Ледков А.С. Определение параметров оснащенной гарпуном тросовой системы для буксировки космического мусора // Труды МАИ. 2016. № 90. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=74644>
66. Dudziak R., Tuttle S., Barraclough S. Harpoon technology development for the active removal of space debris // Advances in Space Research, 2015, vol. 56, no. 3, pp. 509 - 527.
67. Асланов В.С., Юдинцев В.В. Тросовая буксировка объекта космического мусора с полостью, заполненной жидкостью // Труды МАИ. 2017. №. 97. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=83566>

68. Aslanov V.S. Oscillations of a spacecraft with a vertical elastic tether // AIP Conference Proceeding, 2010, vol. 1220, pp. 1 – 16.
69. Асланов В.С., Юдинцев В.В. Выбор параметров системы увода космического мусора с упругими элементами посредством тросовой буксировки // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. №. 1. С. 7 - 17.
70. Aslanov V.S., Yudintsev V.V. Dynamics, analytical solutions and choice of parameters for towed space debris with flexible appendages // Advances in Space Research, 2015, vol. 55, no. 2, pp. 660 – 667.
71. Troger H., Alpatov A.P., Beletsky V.V., Dranovskii V.I., Khoroshilov V.S., Pirozhenko A.V., Zakrzhevskii A.E. Dynamics of tethered space systems, CRC Press, 2010, 223 p.
72. Асланов В.С., Пикалов Р.С. Безударное сближение космического мусора с буксиром при использовании тросовой системы // Труды МАИ. 2017. № 92. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=76750>
73. Купреев С.А. Метод формирования оптимальных режимов управляемого движения тросовых систем при решении практических задач // Труды МАИ. 2015. № 84. URL: <https://www.mai.ru/publications/index.php?ID=63053>
74. Купреев С.А. Условия существования предельных циклов у динамической системы движения связанных объектов на эллиптической орбите // Труды МАИ. 2016. № 88. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=69696>
75. Jasper L., Schaub H. Input shaped large thrust maneuver with a tethered debris object // Acta Astronautica, 2014, vol. 96, pp. 128 – 137.

76. Aslanov V.S., Yudinsev V.V. Dynamics of large debris connected to space tug by a tether // Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2013, vol. 36, no. 6, pp. 1654 – 1660.
77. Aslanov V.S., Yudinsev V.V. Dynamics of large space debris removal using tethered space tug // Acta Astronautica, 2013, vol. 91, pp. 149 – 156.
78. Aslanov V.S. Chaos Behavior of Space Debris During Tethered Tow // Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2015, vol. 39, no. 10, pp. 2399 – 2405.
79. Hovell K., Ulrich S. Attitude stabilization of an unknown and spinning target spacecraft using a visco-elastic tether // In: 13th Symposium on Advanced Space Technologies in Robotics and Automation, Noordwijk, Netherlands, 11-13 May, 2015, pp. 1 - 8.
80. O'Connor M.J., Cleary S., Hayden D. Debris de-tumbling and de-orbiting by elastic tether and wave-based control // In: 6th International Conference on Astrodynamics Tools and Techniques. Darmstadt, Germany, 14-17 March, 2016, available at: <https://indico.esa.int/indico/event/111/session/14/contribution/183/material/paper/0.pdf>
81. Cleary S., O'Connor W.J. Control of space debris using an elastic tether and wave-based control // Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2016, vol. 39, no. 6, pp. 1392 – 1406.
82. Jasper L., Schaub H. Tethered towing using open-loop input-shaping and discrete thrust levels // Acta Astronautica, 2014, vol. 105, no. 1, pp. 373 – 384.