

# SPACE DEBRIS REMOVAL AND EXPLOITATION OF LUNAR RESOURCES — PROFITABILITY PERSPECTIVES

## УДАЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЛУННЫХ РЕСУРСОВ — ПЕРСПЕКТИВЫ РЕНТАБЕЛЬНОСТИ



**Alexander O. MAYBORODA**,  
member of SpaceNet NTI working group, CEO, AVANTA-Consulting research company,  
Rostov-on-Don, Russia,  
[mayboro@gmail.com](mailto:mayboro@gmail.com)

**Александр Олегович МАЙБОРОДА**,  
участник рабочей группы SpaceNet НТИ, директор научно-исследовательской компании  
ООО «АВАНТА-Консалтинг», Ростов-на-Дону, Россия,  
[mayboro@gmail.com](mailto:mayboro@gmail.com)

The author of pictures – Alexander Mayboroda  
Graphics – Dmitry Anisimov

Автор рисунков – Александр Майборода  
Графика рисунков – Дмитрий Анисимов

**ABSTRACT** | Removing at least half of space debris, consisting of large metal objects, could be a cost-effective activity if, first, it becomes raw material, along with other extraterrestrial resources such as regolith, for the production of heat shields which is aimed to return the upper stages of medium and heavy rockets and, secondly, as a working medium for low-thrust electric rocket engines of interorbital tugs. Heat shields from external resources provide a means of increasing the payload of reusable launch vehicles.

**Keywords:** *space debris, regolith, reusable rockets, heat shields, interorbital tug, the working fluid from a metal ERE, Luna, Phobos, Deimos*

**АННОТАЦИЯ** | Удаление космического мусора, состоящего из крупных металлических объектов, может стать рентабельной деятельностью. Это произойдет, если он станет, во-первых, сырьем, наряду с другими внеземными ресурсами, такими как реголит, для производства на орбите теплозащитных экранов в целях возвращения верхних ступеней средних и тяжелых ракет и, во-вторых, рабочим телом для электроракетных двигателей (ЭРД) малой тяги межорбитальных буксиров. Теплозащитные оболочки из внешних ресурсов – способ повышения полезной нагрузки многоразовых ракет-носителей.

**Ключевые слова:** *коммерциализация космонавтики, космический мусор, реголит, многоразовые ракеты, теплозащитные экраны, межорбитальный буксир, металлическое рабочее тело ЭРД, Луна, Марс*

ВВЕДЕНИЕ

В 2011 году в России сформулирована концепция двухэтапного запуска и возвращения многоразовых ракет и космических кораблей: первый этап – запуск без тепловой защиты; второй этап – оснащение для возвращения верхних ступеней ракет в космосе теплозащитными оболочками, которые изготавливаются из внеземных ресурсов непосредственно в космосе. Кокон и экраны для возвращения верхних ступеней ракет-носителей (РН) могут быть «отштампованы» в орбитальной автоматической мастерской из запасов сырья на орбите. Предложенный способ увеличивает полезную нагрузку многоразовых РН и обеспечивает возвращение верхних ступеней не только супертяжелых, но также тяжелых и средних РН, энергетика которых не позволяет производить запуски с уже установленной тепловой защитой. При дешевых внеземных ресурсах дооснащение ракет теплозащитой после запуска в космосе выгодно, так как окупается спасением дорогой верхней ступени и ее повторным использованием. На рис. 1 показана

при наличии на Луне небольшой добывающей базы экспорт лунного сырья даже с помощью ракет будет многократно дешевле доставки сырья с Земли, а при использовании на Луне транспортной технологии SatTrap издержки сокращаются еще на порядок.

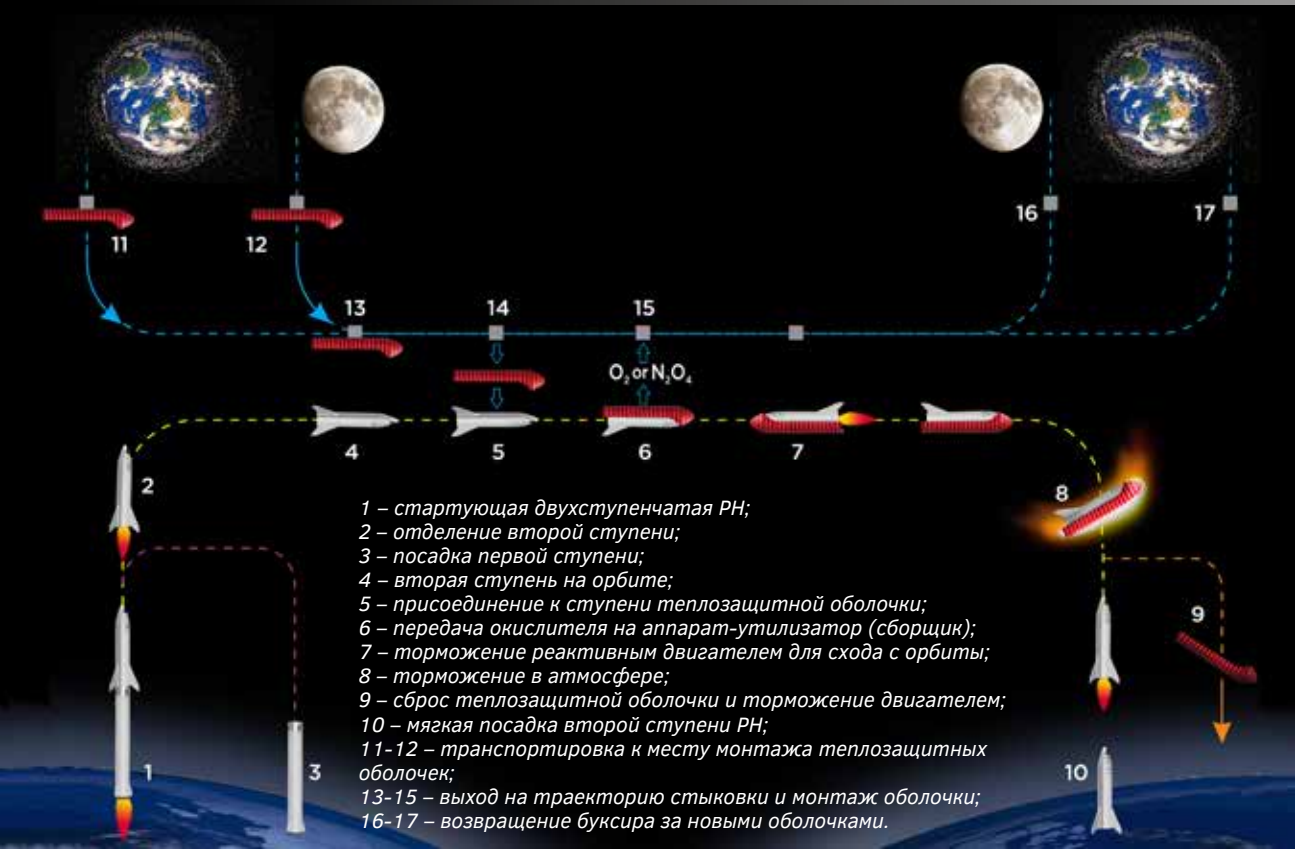
на гипотетическая возможность возвращения второй ступени РН Falcon 9 с головной частью при помощи донного теплозащитного экрана, изготовленного из внеземных ресурсов.

В качестве внеземных ресурсов рассматривались запасы сырья, создаваемые на околоземной орбите при помощи космического аппарата-накопителя (КАН), названного впоследствии SatTrap [1, с. 26], и лунные ресурсы – реголит и извлеченные из него металлы. При наличии на Луне небольшой добывающей базы экспорт лунного сырья даже при помощи ракет будет многократно дешевле доставки сырья с Земли, а при использовании на Луне транспортной

Рис. 1. Возвращение второй ступени РН Falcon 9 при помощи донного теплозащитного экрана, присоединяемого к ступени после старта на орбите



Рис. 2. Схема двухэтапного запуска и возвращения многоразовых РН



технологии SatTrap издержки сокращаются еще на порядок.

Предложение о космическом этапе подготовки ракет для возвращения на Землю было изложено в ходе интервью популярному научно-техническому журналу в связи с получением патентов на систему КАН [2, с. 8 – 13]. Англоязычный вариант интервью активно продвигался в интернете. Тем не менее в России предложение не получило дальнейшего развития в виде НИОКР ввиду отсутствия реальных планов по использованию лунных ресурсов и созданию многоразовой ракетно-космической техники.

Актуальность предложенной двухстадийной схемы многоразового использования РН была подтверждена в США уже через год после публикации: в 2012 году сотрудник НАСА переоткрыл российскую схему и подал заявку на открытие финансирования НИОКР по этой теме. Заявка получила одобрение и была удовлетворена. Опыты НАСА показали перспективность использования внешних ресурсов для возвращения космической техники [3, 4]. В текущем десятилетии, когда ресурсы Луны стали целью

планов НАСА и ЕКА, двухстадийная схема станет основой частной космонавтики, так как благодаря ей возможно создание полностью многоразовых ракет среднего класса.

УТИЛИЗАЦИЯ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА – ПЕРВЫЙ ЭТАП РАЗРАБОТКИ ВНЕЗЕМНЫХ РЕСУРСОВ

9 августа 2020 года в рабочую группу SpaceNet НТИ была подана заявка с проектом использования космического мусора (КМ) вместо лунного реголита в качестве сырья для изготовления теплозащитных оболочек верхних ступеней многоразовых РН [4]. Космический мусор также может быть эффективным заменителем недорогого сырья, поставляемого с Земли через систему SatTrap. Проектирование и создание межорбитального буксира – сборщика КМ – проще и быстрее, нежели орбитального накопителя сырья SatTrap. На первом этапе утилизации внеземных ресурсов выгодно использовать запасы КМ, а затем переходить к иным источникам сырья и средствам их транспортировки. В част-



ности, систему SatTrar выгодно использовать не на околоземной орбите, а на окололунной.

Идея переработки КМ в теплозащитные оболочки спускаемых ракетных ступеней и аппаратов далеко не очевидна. Во-первых, космический металлолом состоит в основном из алюминиевых сплавов. Температура плавления алюминия 660 °С, температура кипения 2519 °С, тогда как теплозащитный экран должен выдерживать поток воздуха с температурой несколько тысяч градусов. Лучший материал для теплозащитных экранов – это сублимирующие материалы, углерод и его соединения, переходящие в газовую фазу без плавления. Во-вторых, аппарат-сборщик должен иметь большой запас топлива для ЖРД и / или рабочего тела для ЭРД чтобы иметь возможность собирать фрагменты КМ, которые находятся на орбитах с разным наклоном и высотой. В-третьих, необходим мощный источник энергии для питания ЭРД и оборудования переработки космического мусора. Тем не менее решение этих проблем было найдено.

По текущим оценкам, на орбите Земли находится примерно 7200 тонн космического мусора. Около 3200 тонн оставили запуски американских ракет, 1700 принадлежат России и СССР, еще 900 и 450 тонн – Европе и Китаю. Все остальные страны произвели около 950 тонн мусора. Примерно на 40 % его составляют фрагменты отработанных ступеней ракет-носителей, а еще 40 % приходится на испорченные или отключенные космические аппараты [5].

Отработанные ступени ракет-носителей представляют наибольший интерес как источник сырья для производства теплозащитных экранов, так как они находятся в тех областях орбит вокруг Земли, на которые по-прежнему продолжают выведения космических аппаратов. Это, прежде всего НОО и солнечно-синхронные орбиты (ССО). Такое размещение минимизирует затраты по захвату квантов сырья и размещению готовых теплозащитных экранов на орбитах ожидания, так как практически исключает

**ОТРАБОТАННЫЕ СТУПЕНИ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ ПРЕДСТАВЛЯЮТ НАИБОЛЬШИЙ ИНТЕРЕС КАК ИСТОЧНИК СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ЭКРАНОВ, ТАК КАК ОНИ НАХОДЯТСЯ В ТЕХ ОБЛАСТЯХ ОРБИТ ВОКРУГ ЗЕМЛИ, НА КОТОРЫЕ ПО-ПРЕЖНЕМУ ПРОДОЛЖАЮТСЯ ВЫВЕДЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ.**

изменение наклона орбит. К примеру, на орбитах с общим наклоном в 71 градус находится 26 объектов с общей массой 186 тонн (в том числе 18 объектов общей массой 162 тонны, 6 объектов с массой 19,5 тонн и 2 объекта с массой около 5 тонн).

Отработанные ступени – это в основном запас алюминиевых сплавов, а также бронзы, титана, стали, никелевых и других жаростойких и жаропрочных сплавов в двигателях. Масса ЖРД в составе отработанных ступеней доходит до 16 %.

Таким образом, ресурсная база для защиты многоразовых вторых ступеней РН составит около 2900 тонн (7200 тонн × 0,4), в том числе около 2450 тонн алюминиевых сплавов и приблизительно 450 тонн стали и сплавов из цветных металлов. Еще 2900 тонн – это отработанные космические аппараты, тоже имеющие корпуса из алюминиевых сплавов.

Имеющейся массы сырья должно хватить до решения проблемы запуска производства теплозащитных экранов из лунного и астероидного реголита, если применить нестандартные решения: алюминий должен быть модифицирован – преобразован в оксид алюминия (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), тугоплавкое соединение, соответствующее требованиям. Преобразование – это сжигание алюминия в привозном кислороде. Одновременно с получением материала для теплозащитных оболочек из корундовой керамики сжигание алюминия обеспечивает аппарат-сборщик и утилизатор КМ энергией для межорбитальных маневров и переработки КМ.

Свойства корундовой керамики изучены хорошо [6]. Она используется для производства жаростойких изделий, хорошо сохраняющих прочность при нагреве до 1700 °С. Испытания корундовой керамики в условиях одностороннего нагрева высокотемпературным потоком продуктов сгорания ЖРД при температуре газового потока 2300 °С и охлаждении одной из поверхностей материала показали, что материалы после испытаний не имели следов термического разрушения [7, с. 217].

Низкоорбитального сырья может оказаться достаточно для возвращения 740 вторых ступеней РН типа Falcon 9, если массу одного экрана принять равной 3,9 тонны (при сухой массе ступени в 3,9 тонн). Такого количества средств спасения хватит на период в 10 лет, по окончании которого с высокой долей вероятности начнется разработка лунных ресурсов и производство теплозащитных экранов из лунной пенокерамики. Однако это нижняя оценка массы экрана, реальные показатели могут быть больше. На

*рис. 2* изображена схема двухэтапного запуска и возвращения многоразовых РН, использующих ресурсы космического мусора и Луны. Вместо донного теплозащитного экрана здесь используется экран в форме «санок» с аэродинамическим качеством, который испытывает меньшие тепловые нагрузки и потому не требует применения аблирующих материалов. Такие материалы лучше всего производить на основе углерода, но он дефицитный компонент в реголите и КМ.

При себестоимости второй ступени Falcon 9 равной 12 млн долларов ликвидация 40 % крупных фрагментов комического мусора обеспечит возвращение 740 ступеней, что дает экономический эффект до 8,9 млрд долларов. При этом предполагается, что возвращаемая ступень имеет запас топлива для мягкой посадки, систему воздушных стабилизаторов, посадочное шасси, силовые агрегаты для управления стабилизаторами и раздвижением опор шасси, хотя в перспективе возможно изготовление этих агрегатов на орбите из космического мусора. В настоящее время компания SpaceX не имеет планов по повторному использованию вторых ступеней Falcon 9, хотя технически такая возможность имеется. В данном случае вторая ступень Falcon 9 рассматривается как усредненная модель ступени условной типовой ракеты ближайшего будущего, позволяющая определить экономический выигрыш.

## ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЕПЛОЗАЩИТНОГО ЭКРАНА ИЗ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ (AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) И ЦВЕТНОГО КОСМИЧЕСКОГО ЛОМА

Для получения 1 т оксида алюминия на платформу по изготовлению теплозащиты необходимо доставить около 0,5 т кислорода. Кислород доставляется второй ступенью ракеты, которая стыкуется с орбитальной платформой для получения теплозащитного экрана, обеспечивающего ее возвращение. К примеру, если масса экрана составляет 100 % от массы возвращаемой ступени, где половина массы приходится на металлический каркас, а вторая половина массы экрана – масса слоя из оксида алюминия, то на орбитальную платформу необходимо доставить кислород, по массе составляющий всего 25 % от сухой массы ступени. Применительно к Falcon 9 добавочный груз в виде кислорода не превысит 1000 кг. Для легких и средних ракет пропорции будут иные.

## АЛЮМИНЕВЫЙ ЛОМ — ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ И РАБОЧЕЕ ТЕЛО ДВИГАТЕЛЕЙ АППАРАТОВ-УТИЛИЗАТОРОВ

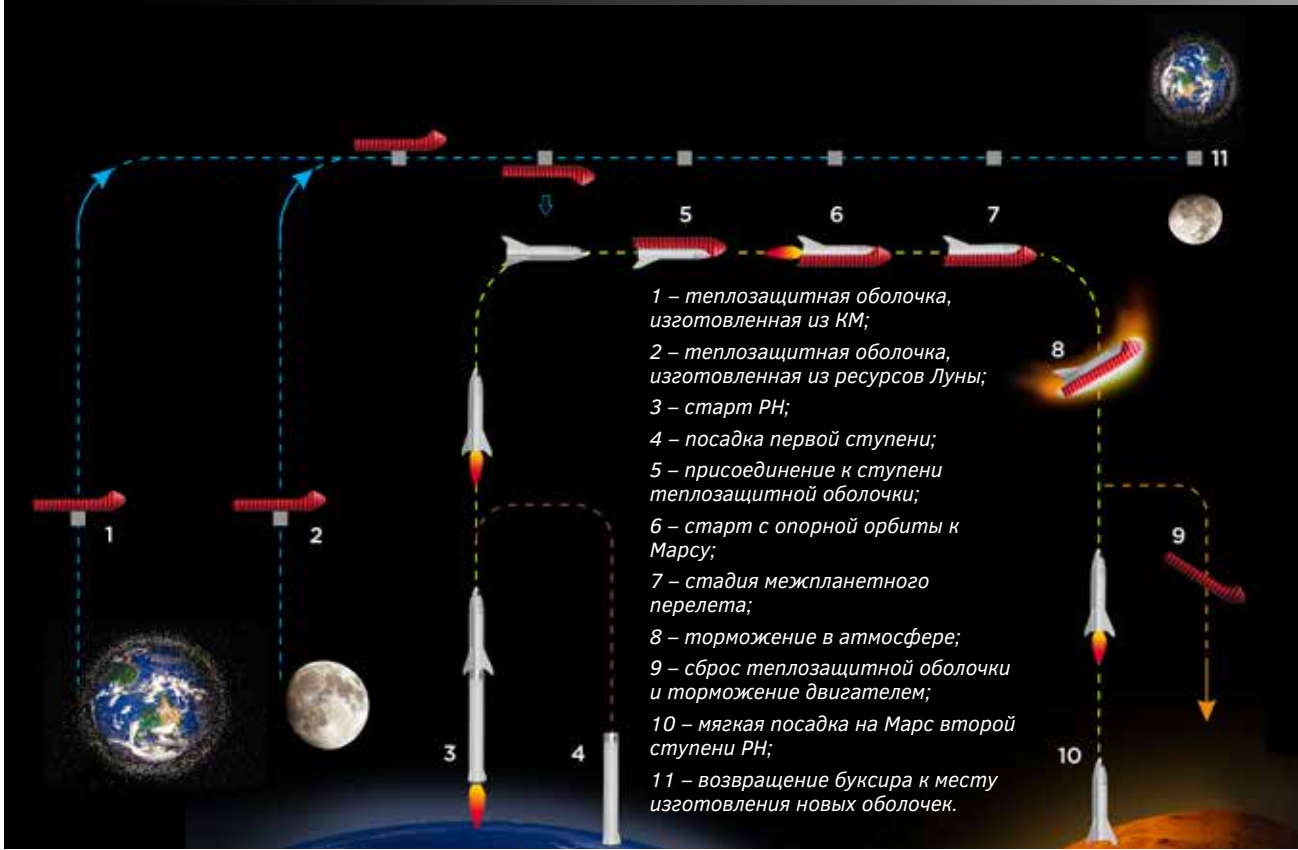
Сбор космического металлолома требует значительных затрат топлива и рабочего тела для двигательных установок. Дозаправка аппаратов-сборщиков чрезвычайно удорожает процесс сборки, поэтому использование части собранного алюминия для питания ЭРД – это решение проблемы пополнения запасов рабочего тела. Алюминиевые сплавы – перспективное рабочее тело высокоимпульсных электроракетных двигательных установок (ЭРДУ) при транспортных операциях между околоземными орбитами. Возможный удельный импульс ЭРДУ с металлическим рабочим телом – 50 000 м/с. В качестве рабочего тела в ЭРДУ, как правило, используют ксенон, висмут, можно использовать ртуть, литий, магний, кальций. В РКК «Энергия» испытывалась ЭРДУ мощностью 500 кВт с литиевым рабочим телом, на котором были получены вполне удовлетворительные характеристики. Возможна замена лития магнием и кальцием [8]. Замена лития на алюминий, добываемый из КМ, не приведет к заметному ухудшению тяговых и энергетических характеристик ЭРДУ, так как потенциалы ионизации этих металлов близки.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЗАПАСОВ АЛЮМИНИЯ МОЖЕТ СТАТЬ САМОСТОЯТЕЛЬНЫМ НАПРАВЛЕНИЕМ КОММЕРЦИАЛИЗАЦИИ КОСМОНАВТИКИ.**

Использование космических запасов алюминия может стать самостоятельным направлением коммерциализации космонавтики. Доставка спутников на геостационарную орбиту (ГСО) в несколько раз дороже вывода спутников на низкую околоземную орбиту (НОО). Доставка грузов на Луну в 10 раз дороже доставки на НОО. Поэтому сбор космического металлолома только в целях обеспечения рабочим телом многоразовых межорбитальных буксиров должен стать рентабельным направлением космической деятельности.

В настоящее время интенсивно разрабатываются средства изготовления космических аппаратов и агрегатов непосредственно в космических условиях путем аддитивной печати металлами. Работы ведутся компаниями Made In Space, Relativity Space и некоторыми други-

**Рис. 3.** Схема запуска РН к Марсу и оснащения второй ступени теплозащитной оболочкой, обеспечивающей посадку на планету, произведенной из КМ и лунных ресурсов:



ми. Имеющиеся заделы могут быть успешно применены в разработке оборудования для изготовления защитных экранов.

Энергоснабжение плавильных агрегатов выгодно осуществлять за счет сжигания части алюминиевого лома в кислороде, доставленном ракетной ступенью, которая прибыла для стыковки с защитным экраном. Если в прибывшей ракетной ступени содержится некоторый запас кислорода, то необходимое тепло выгодно производить за счет сжигания части алюминиевого лома – для полного расплавления 1 тонны алюминиевого сплава расход кислорода составляет 5,7 кг. С учетом КПД теплопередачи расход  $O_2$  составит 10 кг на 1 т Al. За счет незначительного увеличения массы вместо криогенного кислорода более удобно использовать пероксид водорода, воду или четырехокись азота.

Сжигание части алюминиевого лома выгодно использовать и для генерации электроэнергии. Плазменно-дуговая резка и электросварка требуют источников тока большой мощности, в качестве которых не всегда удобно использовать батареи фотоэлектрических преобразователей.

В определенном и очень низком диапазоне удельного импульса ЭРД с металлическим рабочим телом (3000 – 5000 м/с) для питания двигателя выгодно использовать турбоэлектродвигатель, потребляющий тепло от сжигания алюминиевого лома в кислороде.

Орбиты с общим наклоном, но с разными радиусами имеют различные скорости прецессии. Изменяя высоту орбиты и другие параметры, можно переводить КА-сборщик на орбиту в другой плоскости. Поскольку у орбит разные скорости прецессии, то важно знать относительную скорость прецессии. Оценочные приближенные расчеты межорбитальных маневров космического аппарата-сборщика КМ (КА-сборщика) дают следующие результаты:

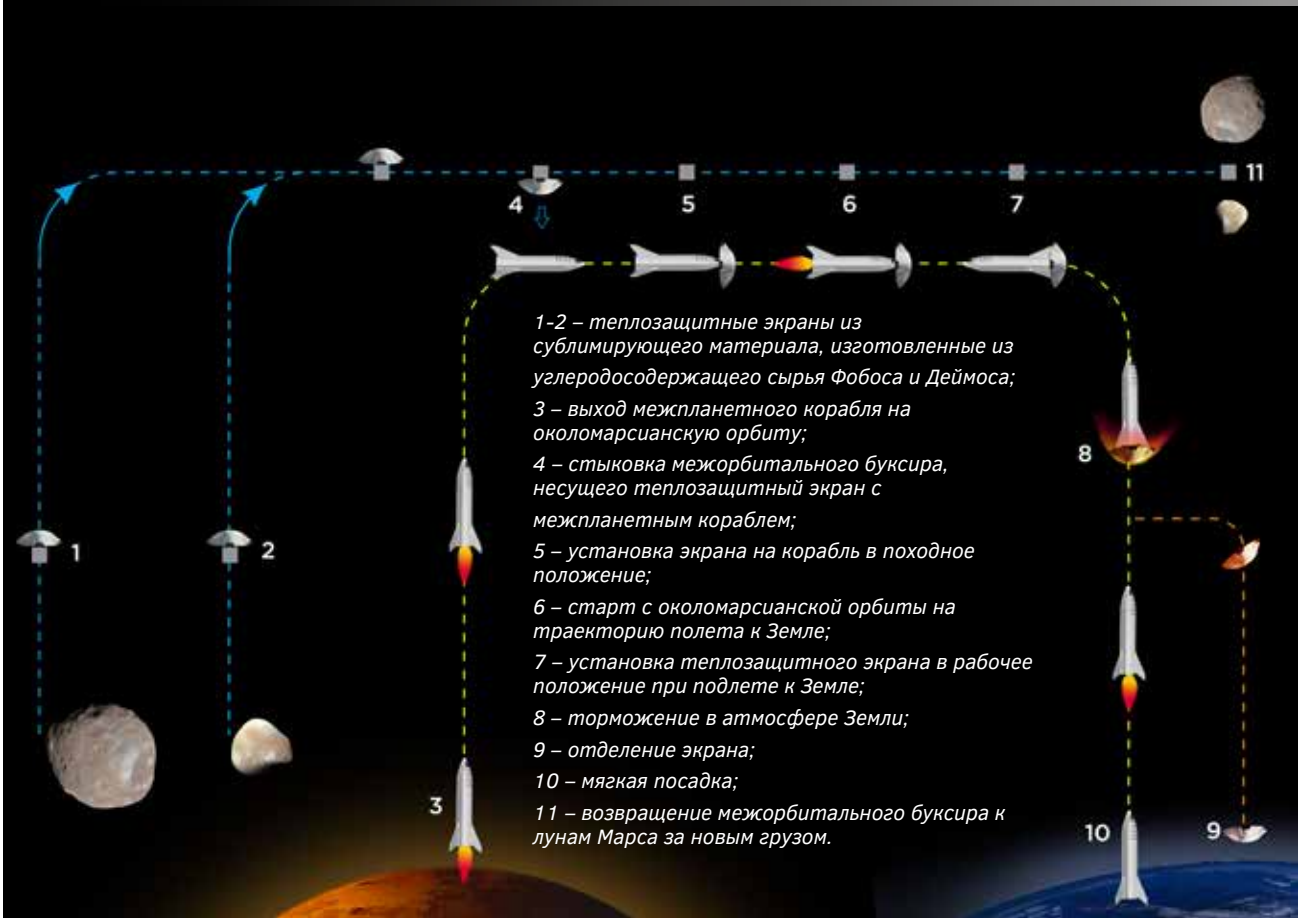
1. Расчет скорости перехода КА-сборщика к объекту в плоскости новой орбиты за счет прецессии при изменении высоты орбиты (орбиты приняты круговыми). Наклон орбит –  $51,63^\circ$  (наклон орбиты МКС). Время изменения орбиты – увеличение и понижение высоты – не учитывается. Подъем КА с 400 км на 522 км дает относительную скорость прецессии в 0,1 граду-

са в сутки. Подъем КА с 400 км на 800 км дает относительную скорость прецессии в 0,3 градуса в сутки. Подъем КА с 400 км на 1136 км дает относительную скорость прецессии в 0,5 градуса в сутки. Теперь несложно рассчитать затраты характеристической скорости на маневр и, в последующем, выбрать оптимальный способ перехода на орбиты в другой плоскости. После выработки сырьевого ресурса на орбите своего размещения КА-сборщик может перемещаться на новые орбиты с невыработанным сырьевым ресурсом – на орбиты с таким же наклоном, но в другой плоскости. За счет маневрирования по высоте орбиты буксир может уменьшать или ускорять прецессию своей орбиты и таким образом без значительных затрат перемещаться на орбиты крупных фрагментов космического металлолома, находящиеся в другой плоскости. Для торможения буксира может быть выгодным использование электродинамической тросовой системы (ЭДТС).

2. Изменение наклона орбиты на 1 градус требует характеристической скорости от 136 до 129 м/с в диапазоне орбит со скоростями от 7800 до 7400 м/с. В теории, при «неограниченных» запасах рабочего тела для ЭРД в виде лома Al, можно одним КА-сборщиком обслужить все орбиты – от экваториальных до солнечно-синхронных. На практике при дефиците времени десять аппаратов-сборщиков быстро решат проблему удаления до 80 % массы КМ в виде крупных фрагментов.

Программа утилизации КМ станет началом намного более широкой программы использования реголита Луны, астероидов и лун Марса в целях получения теплозащитной керамики, топлива и рабочего тела для двигательных установок космических аппаратов. Межпланетные сверхтяжелые РН в теории могут оснащаться теплозащитой на Земле перед полетом. Однако из-за высокой опасности повреждения теплозащитной оболочки фрагментами космическо-

**Рис. 4.** Схема запуска РН к Земле и оснащения межпланетной ракеты теплозащитной оболочкой, произведенной из сырьевых ресурсов Фобоса и Деймоса:





го мусора при нахождении на низкой опорной орбите перед межпланетным перелетом может оказаться целесообразным оснащение сверхтяжелых РН тепловыми экранами только в космосе, после прохождения опасной зоны концентрации КМ. На рис. 3 изображена схема запуска межпланетной РН и ее оснащения теплозащитной оболочкой из внеземных ресурсов.

Возвращение межпланетного корабля на Землю с торможением в атмосфере также может обеспечиваться за счет космических ресурсов – сырьевых ресурсов Фобоса и Деймоса. Поскольку эти ресурсы содержат соединения углерода, то аэроторможение может происходить за счет донных экранов с аблирующей защитой на основе углерода. На рис. 4 изображена схема возвращения межпланетной РН на Землю и ее оснащения теплозащитной из околосолнечных ресурсов.

ВЫВОДЫ

Запасы крупных фрагментов металлического лома в околоземном пространстве могут быть утилизированы с коммерческой выгодой. Существующие и разрабатываемые технологии способны обеспечить перехват и утилизацию отработанных ракетных ступеней и космических аппаратов. Продуктом утилизации могут быть аэродинамические тормозные теплозащитные экраны и капсулы, оснащение которыми вторых ступеней РН обеспечит их сохранение при возвращении на Землю и многократное использование.

Алюминий, извлекаемый из космического металлолома, может быть утилизирован в целях получения рабочего тела для ЭРД космических аппаратов, выводимых на ГСО, к Луне, Марсу, астероидам и в дальний космос.

Не исключена возможность распространения этой технологии обеспечения многообразности вторых ступеней РН среднего класса на РН сверхтяжелого класса. Это повысит безопасность возвращения тяжелых РН и сократит стоимость вторых ступеней.



Литература

1. **Майборода А.О.** Как создать лунную базу и орбитальную станцию на 80 % дешевле // Воздушно-космическая сфера. 2018. № 1. С. 22 – 31.

2. **Мейлицев В.** Новая экономика космоса // Техника – молодежи. 2011. № 12. С. 8 – 13 [Электронный ресурс]. URL: [http://technicamolodezhi.ru/rubriki\\_tm/smelyie\\_proektyi/novaya\\_ekonomika\\_kosmosa](http://technicamolodezhi.ru/rubriki_tm/smelyie_proektyi/novaya_ekonomika_kosmosa) (Дата обращения: 02.05.2021).

3. **Steven Siceloff.** Researchers Look to Alien Soils for Heat Shield // NASA's John F. Kennedy Space Center. 2012. December 09. URL: <https://www.nasa.gov/centers/kennedy/news/regolithheatshield.html> (Дата обращения: 02.05.2021).

4. **Майборода А.О.** Пророки космической эры – отечественные и зарубежные [Электронный ресурс] // Независимая газета. «НГ-наука». 2020. 27 октября. URL: [https://www.ng.ru/science/2020-10-27/9\\_8000\\_space.html?print=Y](https://www.ng.ru/science/2020-10-27/9_8000_space.html?print=Y) (Дата обращения: 02.05.2021).

5. Астроном подсчитал массу «космического мусора» на орбите Земли [Электронный ресурс] // РИА «Новости». 2018. 13 июля. URL: <https://ria.ru/20180713/1524526139.html> (Дата обращения: 02.05.2021).

6. **Лукин Е.С., Макаров И.А., Тарасов С.В. и др.** Новые керамические материалы на основе оксида алюминия // Огнеупоры и техническая керамика. 2001. № 7. С. 2 – 10.

7. Успехи физики и химии силикатов. Памяти член-корр. АН СССР Н. А. Торопова [сборник статей] / АН СССР. Ин-т химии силикатов им. И. В. Гребенщикова; отв. ред. М. М. Шульц. Л.: Наука, 1978. 294 с.

8. **Агеев В.П., Островский В.Г.** Магнитоплазмодинамический двигатель большой мощности непрерывного действия на литии // Известия РАН. Энергетика. 2007. № 3. С. 82 – 95.

References

1. **Mayboroda A.O.** Kak sozdat' lunnyuyu bazu i orbital'nyuyu stantsiyu na 80 % deshevle. *Vozdushno-kosmicheskaya sfera*, 2018, no. 1, pp. 22 – 31.

2. **Meylitsev V.** Novaya ekonomika kosmosa *Tekhnika – molodezhi*, 2011, no. 12, pp. 8 – 13. Available at: [http://technicamolodezhi.ru/rubriki\\_tm/smelyie\\_proektyi/novaya\\_ekonomika\\_kosmosa](http://technicamolodezhi.ru/rubriki_tm/smelyie_proektyi/novaya_ekonomika_kosmosa) (Retrieval date: 02.05.2021).

3. **Steven Siceloff.** Researchers Look to Alien Soils for Heat Shield. *NASA's John F. Kennedy Space Center*. 2012. December 09. Available at: <https://www.nasa.gov/centers/kennedy/news/regolithheatshield.html> (Retrieval date: 02.05.2021).

4. **Mayboroda A.O.** Proroki kosmicheskoy ery – otechestvennye i zarubezhnye. *Nezavisimaya gazeta, "NG-nauka"*, 2020, October 27. Available at: [https://www.ng.ru/science/2020-10-27/9\\_8000\\_space.html?print=Y](https://www.ng.ru/science/2020-10-27/9_8000_space.html?print=Y) (Retrieval date: 02.05.2021).

5. *Astronom podschital massu "kosmicheskogo musora" na orbite Zemli.* *RIA "Novosti"*, 2018, July 13. Available at: <https://ria.ru/20180713/1524526139.html> (Retrieval date: 02.05.2021).

6. **Lukin E.S., Makarov I.A., Tarasov S.V. et al.** *Novye keramicheskie materialy na osnove oksida alyuminiya. Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*, 2001, no. 7, pp. 2 – 10.

7. *Uspekhi fiziki i khimii silikatov.* Ed. M.M.Shul'ts. Leningrad, Nauka, 1978. 294 p.

8. **Ageev V.P., Ostrovskiy V.G.** *Magnitoplazmodinamicheskiy dvigatel' bol'shoi moshchnosti nepreryvnogo deystviya na litii.* *Izvestiya RAN, Energetika*, 2007, no. 3, pp. 82 – 95.



© Майборода А.О., 2021

**История статьи:**  
Поступила в редакцию: 19.04.2021  
Принята к публикации: 03.05. 2021

**Модератор:** Плетнер К.В.  
**Конфликт интересов:** отсутствует

**Для цитирования:**  
*Майборода А.О. Удаление космического мусора и эксплуатация лунных ресурсов – перспективы рентабельности. Воздушно-космическая сфера. 2021. № 2. С. 32 – 41.*