

УДК 531.13

К. Бомбарделли<sup>1</sup>, А. П. Алпатов<sup>2</sup>, А. В. Пироженко<sup>2</sup>, Е. Ю. Баранов<sup>3</sup>, Г. Г. Осинский<sup>3</sup>, А. Е. Закржевский<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Мадридський технічний університет

<sup>2</sup> Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, Дніпропетровськ

<sup>3</sup> Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпропетровськ

<sup>4</sup> Інститут механіки ім. С. П. Тимошенка Національної академії наук України, Київ  
alex.zakr@mail.ru

## ПРОЕКТ «КОСМИЧЕСКОГО ПАСТУХА» С ИОННЫМ ЛУЧОМ. ИДЕИ И ЗАДАЧИ

---

*Приводится краткая информация о целях и задачах международного проекта LEOSWEEP, который выполняется рядом украинских организаций совместно с ведущими европейскими космическими организациями. Проект связан с разработкой первой космической миссии по бесконтактному удалению с орбиты отработанных последних ступеней ракет-носителей.*

---

### ВВЕДЕНИЕ

Проект LEOSWEEP = Improving Low Earth Orbit Security With Enhanced Electric Propulsion (повышение безопасности низких околоземных орбит с улучшенным электрореактивным двигателем) победил в рамках проводимого Европейской комиссией конкурса FP7-SPACE-2013. При желании этот акроним можно рассматривать также как “LEO Sweep” (Чистка низких околоземных орбит). Проект получил высшие оценки экспертов — 15 баллов из 15 возможных.

Участники проекта:

- SENER Ingenieria Y Sistemas S. A. (координатор Испания);
- Universidad Politecnica De Madrid (Испания);
- Институт технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины (Украина);
- Государственное предприятие «КБ «Южное» им. М. К. Янгеля» (Украина);

- Международный центр космического права при Институте государства и права им. В. М. Корещко Национальной академии наук Украины (Украина);

- TransMIT Gesellschaft für Technologietransfer mbH (Германия);
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt Ev (Германия);
- DEIMOS Engenharia S. A. (Португалия);
- University of Southampton (Великобритания);
- Centre National de la Recherche Scientifique (Франция);
- Universidad Carlos III De Madrid.

Цель работы — информирование украинской научно-технической общественности об основных идеях, целях и задачах проекта. Дополнительные подробности можно найти на сайте проекта [<http://www.leosweep.upm.es>].

### ПРОБЛЕМА КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА И ЕЕ УГРОЗЫ

Около 2500 тонн мусора, состоящего из отработанных космических аппаратов (КА), разгонных блоков, последних ступеней ракет-носителей, осколков и т. д., движется сейчас на низких око-

---

© К. БОМБАРДЕЛЛИ, А. П. АЛПАТОВ, А. В. ПИРОЖЕНКО, Е. Ю. БАРАНОВ, Г. Г. ОСИНСКИЙ, А. Е. ЗАКРЖЕВСКИЙ, 2014

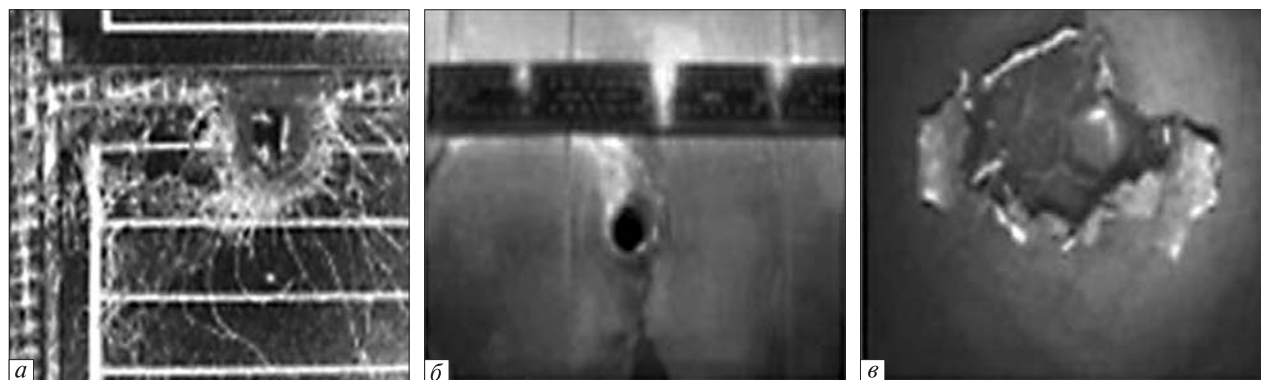


Рис. 1. Разрушения элементов КА мелким мусором

лоземных орбитах (НОО). Уже имеет место столкновение мусора с активными КА, с другим мусором, а также КА друг с другом [1].

Столкновение спутников «Космос-2251» и «Iridium-33» — первый случай столкновения двух искусственных спутников в космосе. Столкновение произошло 10 февраля 2009 г. над территорией Российской Федерации (над полуостровом Таймыр, над точкой 72.5° с. ш., 97.9° в. д.) на высоте 788.6 км. Скорости обоих спутников были приблизительно равны и составляли около 7470 м/с, относительная скорость равнялась 11.7 км/с. Искусственные спутники — «Космос-2251», принадлежавший космическим войскам России, выведенный на орбиту в 1993 г. и функционировавший до 1995 г., и «Iridium-33», один из 72 спутников оператора спутниковой телефонной связи Иридиум, запущенный на орбиту в 1997 г., в результате столкновения разрушились полностью. Масса американского спутника составляла 600 кг, а российского — 1 т. В результате столкновения образовалось около 600 обломков [[http://ru.wikipedia.org/wiki/Столкновение\\_спутников\\_Космос-2251\\_и\\_Iridium\\_33](http://ru.wikipedia.org/wiki/Столкновение_спутников_Космос-2251_и_Iridium_33)]. Всего на данный момент зарегистрировано пять известных столкновений КА [<http://smartnews.ru/articles/15652.html>].

Ожидаемое увеличение этих столкновений представляет серьезную угрозу для космической деятельности в ближайшем будущем.

Распределение мусора по размерам на НОО примерно следует степенному закону, где количество фрагментов резко возрастает с уменьше-

нием размера. Поэтому основная угроза столкновений исходит от мелких фрагментов мусора. Эти частицы мусора слишком малы, чтобы отслеживаться средствами наблюдения, но обладают достаточной кинетической энергией, чтобы нарушить работу активных КА.

Рис. 1 дает представление о разрушениях при столкновении даже с очень малыми кусочками мусора. На рис. 1, а изображен кратер в солнечной панели космического телескопа Хаббла. На рис. 1, б видно входное отверстие около 10 мм в радиаторе STS-118. Выходное отверстие (рис. 1, в) может быть значительно больше.

Вместе с тем основная угроза ухудшения ситуации в околоземном космическом пространстве исходит от больших объектов мусора. Возможность их разрушения в результате катастрофических столкновений дает очень неблагоприятный прогноз. В настоящее время широко признано, что снятие угрозы лавинообразного характера увеличения мусора при столкновениях объектов возможно только при условии значительного уменьшения количества крупных объектов на НОО. Поэтому разрешение проблемы космического мусора связано с решением проблемы увода объектов, общая масса которых составляет сотни тонн, с наиболее загруженных областей НОО.

Анализ распределения космического мусора позволяет сделать вывод, что основная его масса состоит из объектов массой более 200 кг, а объекты массой более тонны составляют более 75 % общей массы мусора на НОО [9]. Следовательно,

системы активного увода должны обеспечивать увод объектов с массой 1—1.5 т с НОО. Эти объекты наиболее плотно сосредоточены на высотах 950—1000 км и 800—850 км с наклонениями орбит 82°, 98° и 75°.

### ИЗВЕСТНЫЕ КОНЦЕПЦИИ УВОДА МУСОРА С НИЗКИХ ОКОЛОЗЕМНЫХ ОРБИТ

Анализ известных в настоящее время концепций увода космического мусора с орбит позволяет сформулировать три ключевые проблемы.

1. Экономическая и физическая жизнеспособность предлагаемой системы.

2. Минимизация операционных рисков, в том числе минимизация угроз дополнительного заорбления НОО.

3. Необходимость создания соответствующей нормативно-правовой базы для увода отработанных объектов, принадлежащих различным владельцам.

В настоящее время есть несколько концепций активного удаления орбитальных обломков — от лазерных систем [4, 6] до электродинамических связей [2, 7, 8]. Солнечные паруса, которые, как известно, непрактичны на НОО, были предложены для того, чтобы увести неисправный спутник за геостационарную орбиту [10]. Как только разрабатывался быстрый и эффективный метод удаления орбитальных обломков, возникала важная технологическая проблема передачи импульса от системы удаления к космическим обломкам, чтобы выполнить маневр их удаления с орбиты или ее изменение.

Наиболее очевидный способ сделать это — состыковать систему удаления с целевым объектом перед возвращением с орбиты. Эта операция может, однако, быть технологически сложной и очень опасной. Космические обломки разнообразны по форме и механическим свойствам. Они характеризуются сложным движением вокруг центра масс (беспорядочное вращение, плоское вращение, колебания с большими амплитудами и т. д.), что усложняет стыковку. Другое возможное решение состоит в том, чтобы выполнить операцию захвата с помощью вспомогательных устройств (например, сеть или гарпун) выпущенных с КА [5]. В этом случае главная труд-

ность, возможно, связана с развертыванием и наведением устройства захвата, которое, кроме того, было бы трудно использовать в дальнейшем для повторных операций удаления.

Концепция удаления обломков, основанная на импульсно-лазерных системах, имеет в этом случае существенное преимущество, поскольку позволяет управлять далекими целями на орбите, возможно даже с Земли. К сожалению, маленький импульс, полученный при абляции материала, не может быть эффективным для объектов с размером больше 20 см [3].

### КОНЦЕПЦИЯ КОСМИЧЕСКОГО «ПАСТУХА» С ИОННЫМ ПУЧКОМ

Основной принцип системы увода, положенный в основу проекта LEOSWEEP, заключается в использовании потока ионов в качестве средства, передающего силовой импульс [3]. Поток ионов ионного двигателя «КА-пастух» направляется на объект космического мусора (рис. 2). Скорость ионов порядка 30 км/с. Небольшое расхождение ионного луча (<15°), достижимое при использовании современных электроракетных двигателей, является ключевым моментом, позволяющим бесконтактное маневрирование «пастуха» на безопасном расстоянии от мишени. Достигшие поверхности мишени ионы внедряются в ее материал и полностью передают свой импульс, так же, как и отраженные ионы. Для компенсации силы реакции на «пастухе» предполагается дополнительная двигательная установка.

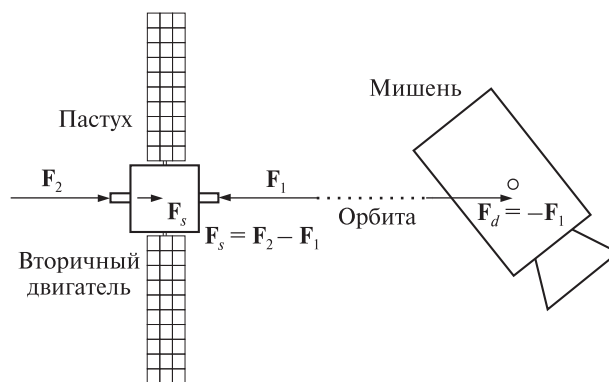


Рис. 2. Схема взаимодействия «пастуха» с ионным пучком

Концепция IBS схематически показана на рис. 2. «Спутник-пастух» оборудован основной двигательной установкой, которая испускает луч ускоренной квазинейтральной плазмы, направленный на мишень так, чтобы приложить силу  $F_d$  к мишени за счет импульса, который несут ионы плазмы. Если пренебречь импульсом, связанным с ионами, распыляемыми поверхностью мишени, а также считать, что луч полностью направлен на мишень, сила  $F_1$ , с которой основная двигательная установка действует на «спутник-пастух», будет равна по модулю и противоположна силе  $F_d$ .

На самом деле имеет место отражение части ионов от поверхности мишени, что в принципе увеличивает величину импульса, передаваемого мишени. Тем не менее их скорости отражения малы по сравнению со скоростями первичных ионов, так что их вклад в переданное количество движения будет незначительным. С другой стороны, уменьшение полного переданного импульса имеет место тогда, когда часть ионов пролетает мимо мишени из-за расхождения ионного пучка и возможных ошибок наведения луча, что устанавливает ограничение на максимальное расстояние между IBS и мишенью. Заметим, наконец, что рассогласование между центром давления луча и центром масс мишени не влияет на полный импульс, переданный мишени потоком ионов, пока последние продолжают полностью попадать в мишень. Это следует из закона сохранения количества движения системы до и после столкновения. С другой стороны, при этом будет происходить изменение угловой скорости мишени, что нужно будет учитывать в дальнейших исследованиях. Вектор суммарной силы, обеспечивающей торможение движения конфигурации «пастух — мишень», будет равен вектору  $F_2 = F_s + F_d$ . Отсюда следует, что двигатель, направленный в сторону движения по орбите, должен создавать тягу, большую, чем двигатель, бомбардирующий мишень. Соотношение модулей этих векторов определяется соотношением масс «пастуха» и мишени.

Миссия начинается с вывода «пастуха» на орбиту мусора перед ним и завершается, когда оба спутника достигают запланированной ор-

биты. После этого «пастух» под действием тяги уже одного ЭРД переходит на орбиту следующего объекта, намеченного для увода с орбиты, а предоставленный действию сил атмосферного сопротивления уводимый с орбиты объект продолжает снижение до входа в атмосферу.

Концепция IBS содержит ряд ключевых преимуществ по сравнению с другими известными технологиями:

1) **эффективность увода.** Предполагается, что масса «пастуха» с топливом не будет превосходить 10 % от массы уводимых объектов. Так, для увода 1.5 тонного объекта с 1000 км круговой орбиты на 500 км орбиту потребуется около 23 кг рабочего тела (ксенона). Такого же порядка масса потребуется и для второго двигателя. С учетом веса конструкции КА и других его подсистем ожидаемая масса «пастуха» не будет превосходить 150 кг. Для сравнения отметим, что 150 кг — это приблизительно масса топлива верхних ступеней Р-Н для одноимпульсного перевода их на орбиту с перигеем 50 км;

2) **низкий уровень риска**, связанный с отсутствием прямого контакта с объектом. Номинальное расстояние между объектом и «пастухом» по предварительным оценкам составит 10—20 м;

3) **передаваемый импульс не зависит от формы и собственного движения объекта.** Это преимущество представляется весьма существенным, поскольку механические контакты с нестабилизированной (вращающейся) целью проблематичны;

4) **возможность повторного использования.** Благодаря высоким удельным импульсам, характерным для ионных двигателей, расходы топлива резко сокращаются, и возможны несколько операций по удалению с помощью одного «КА-пастуха»;

5) **маневренность.** «Пастух» обладает высокой эффективностью всех видов орбитальных маневров на основе использования ионных двигателей для изменения таких параметров орбиты, как высота, наклонение, проведение операции сближения, предотвращение столкновений;

6) **технологическая готовность.** Ключевые элементы рассматриваемой технологии уже прошли испытание в космосе. Это относится к ра-

диочастотным ионным двигателям и к датчикам относительной навигации. Сама конструкция «пастуха» обычна для КА.

## ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ПРОЕКТА

Проект LEOSWEEP направлен на создание условий, обеспечивающих в ближайшем будущем проведение работ по удалению крупномасштабного мусора с помощью технологии «пастуха» с ионным лучом.

Одной из основных целей проекта является активизация деятельности в Европе и в Украине по решению проблемы космического мусора. Достижение этой цели предполагает подготовку демонстрационной миссии активного увода мусора. А значит, выбор объектов увода и решение соответствующих правовых вопросов. Значительная роль здесь отводится Украине как стране, производящей и запускающей ракеты-носители.

Среди других задач проекта важны также следующие.

1. Подробное изучение физики процессов, положенных в основу концепции. Здесь речь идет и о физике потока ионов на НОО, и о его взаимодействии с уводимым объектом, а также об устойчивости процедуры увода для различных движений (орбитального, вокруг центра масс). Последняя задача предполагает построение адекватных математических моделей динамики как «пастуха», так и уводимого объекта, а также физических полей, имеющих существенное влияние на динамику всей конфигурации.

2. Определение ключевых технологических проблем и принятие конкретных решений. Здесь, в частности, предполагается проектирование и изготовление ионного двигателя с расхождением луча, по крайней мере в два раза меньше, чем у существующих. Большое внимание следует уделить выбору системы наблюдения и навигации относительного положения цели увода для обеспечения устойчивости управления. Предполагается также конструктивная доработка «пастуха» с целью облегчить управляемость и устойчивость исследуемых процессов.

3. Разработка и проведение ряда ключевых наземных экспериментов. Здесь, в частности,

предполагается проведение в ИТМ испытания взаимодействия пучка ионов с поверхностью верхних ступеней ракет-носителей, которые предполагается использовать для демонстрационной миссии.

## ВЫБОР ОБЪЕКТОВ ДЛЯ ДЕМОСТРАЦИОННОЙ МИССИИ

Анализ объектов космического мусора показывает, что около 63 % от общей массы более чем однотонных объектов состоит из верхних ступеней ракет-носителей. Это около 47 % от общей массы мусора на НОО. Более того, около 64 % общей массы верхних ступеней на НОО, или около 30 % от общей массы мусора на НОО, представлено только тремя видами ракет-носителей: «Циклон-3», «Зенит-2» и «Космос-3М».

Все эти верхние ступени (таблица) были разработаны под руководством выдающегося конструктора Михаила Кузьмича Янгеля в ГKB «Южное». «Циклон-3» и «Зенит-2» создавались на Южном машиностроительном заводе.

Верхние ступени ракет-носителей являются идеальными объектами для крупномасштабных операций по уводу мусора. Для этого имеется по крайней мере три причины:

- можно осуществить увод нескольких однотипных объектов в одной миссии, при этом удалив с НОО тонны мусора;
- имеется достаточная концентрация верхних ступеней на орбитах определенных наклонений, которая облегчает осуществление многократных уводов в одной миссии;

## Параметры верхних ступеней КА разработки КБЮ на низких околоземных орбитах

Верхняя ступень	Масса, т	Количество на НОО	Суммарная масса, т	Производитель
«Циклон-3» (SL-14)	1.39	110	153	«Южмаш» (Украина)
«Зенит-2» (SL-22)	8.23	22	181	«Южмаш» (Украина)
«Космос-3М» (SL-8)	1.42	296	421	«Полет» (Россия)
Итого		428	755	



• увод верхних ступеней в меньшей степени связан с решением юридических вопросов на международном уровне, чем увод отработанных КА.

1. Алпатов А. П., Басс В. П., Баулин С. А. и др. Техногенное засорение околоземного космического пространства / Под ред. А. П. Алпатова. — Днепропетровск: Пороги, 2012. — 378 с.
2. Bombardelli C., Herrera J., Iturri A., Peláez J. Space debris removal with bare electrodynamic tethers // Proceedings of the 20th AAS/AIAA Spaceflight Mechanics Meeting, San Diego, CA, 2010.
3. Bombardelli C., Peláez J. Ion beam Shepherd for contactless space debris removal // J. Guidance, Contr., and Dynamics. — 2011. — 34, N 3. — P. 916—920
4. Bondarenko S., Lyagushin S., Shifrin G. Prospects of using lasers and military space technology for space debris removal // Second European Conference on Space Debris. — 1997. — 393. — P. 703.
5. Levin E. M. Dynamic analysis of space tether missions // Adv. Astronaut. Sci. — 2007. — 453 p.
6. Phipps C. R., Reilly J. P. ORION: Clearing near-Earth space debris in two years Using a 30-kW repetitively-pulsed laser // SPIE Proceedings of the International Society for Optical Engineering. — 1997. — P. 728—731.
7. Sanjurjo-Rivo M. Self-balanced bare electrodynamic tethers. Space debris mitigation and other applications: Ph. D. Thesis. — Technical Univ. of Madrid, School of Aeronautics, 2009.
8. Takeichi N. Practical operation strategy for deorbit of an electrodynamic tethered system // J. Spacecraft and Rockets. — 2006. — 43, N 6. — P. 1283—1288. — doi:10.2514/1.19635.
9. Technical report on space debris, United Nations. — New York, 1999. — 50 p.
10. Todd L., Bowling T. Debris mitigation in geostationary Earth orbit // Sixth Dynamics and Control of Systems and Structures in Space Conference, Riomaggiore, Italy. — 2004. — July.

Стаття надійшла до редакції 31.03.14

К. Бомбарделли, А. П. Алпатов, О. В. Пироженко,  
Е. Ю. Баранов, Г. Г. Осиновий, О. Е. Закржевський

#### ПРОЕКТ «КОСМІЧНОГО ПАСТУХА» З ІОННИМ ПРОМЕНЕМ. ІДЕЇ І ЗАДАЧІ

Приведено стисло інформацію про цілі та задачі міжнародного проекту LEOSWEEP, який виконується рядом українських організацій спільно з провідними європейськими космічними організаціями. Проект пов'язаний з розробкою першої космічної місії з безконтактного видалення з орбіти відпрацьованих останніх ступенів ракет-носіїв.

C. Bombardelli, A. P. Alpatov, A. V. Pirozhenko,  
E. Yu. Baranov, G. G. Osinovyj, A. E. Zakrzhevskii

#### PROJECT “SPACE SHEPPARD” WITH ION BEAM. IDEAS AND PROBLEMS

We give some short information on objectives and problems of the international project LEOSWEEP that is performed by a set of Ukrainian organizations in collaboration with leading European space organizations. The project deals with development of the first space mission directed on the contactless deorbiting of upper stages of launchers.