

Проблема космического мусора: современные направления исследований

**обзор работ 7-ой Европейской конференции по космическому
мусору (офис центра управления полетами ЕКА, Дармштадт,
Германия, 18-21 апреля 2017 г)**

Юдинцев В. В.

Кафедра теоретической механики



САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
SAMARA UNIVERSITY

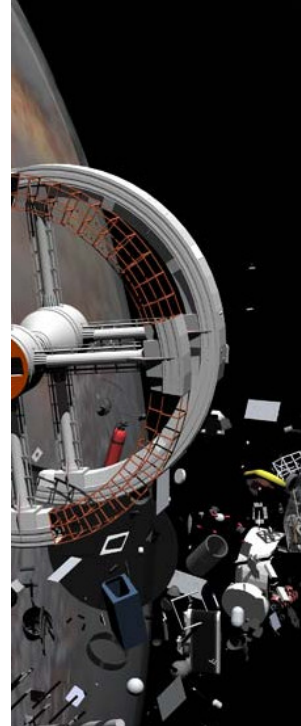
Содержание

- 1 Космический мусор
- 2 Оптические и радиолокационные измерения
- 3 Активные способы увода
- 4 Движение в атмосфере
- 5 Защита КА
- 6 АО “РКЦ “Прогресс” Самарский университет ОмГТУ

European Conference on Space Debris



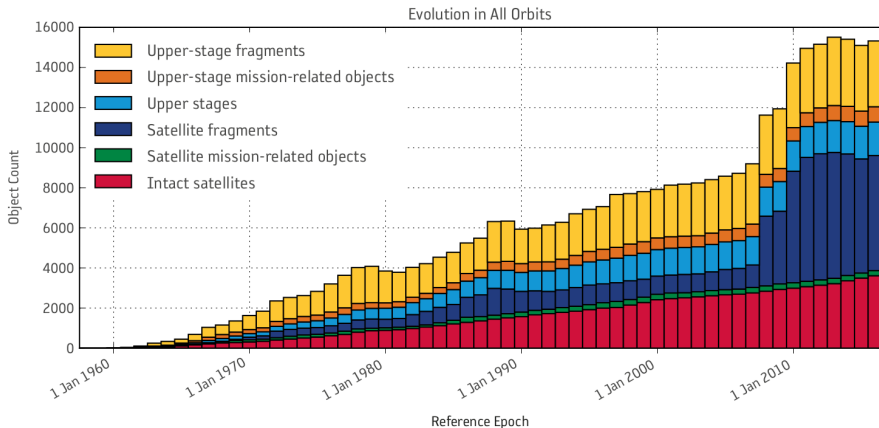
- Европейская конференция по космическому мусору проводится каждые четыре года, начиная с 1993 года.
- Место проведения: ESOC, Дармштадт, Германия
- ESOC – Европейский центр управления космическими полётами: научно-исследовательское подразделение Европейского космического агентства, отвечающее за управление космическими аппаратами



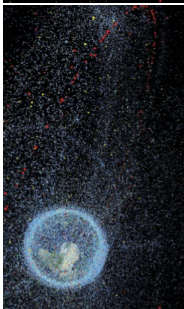
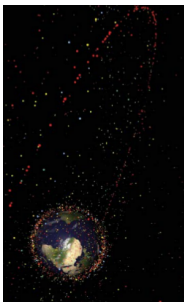
Космический мусор

Проблема

Наблюдаемые объекты космического мусора по типам:
фрагменты ступеней ракет, объекты связанные с штатной работой ступеней ракет, ступени ракет, фрагменты КА, объекты, связанные с работой КА, активные КА

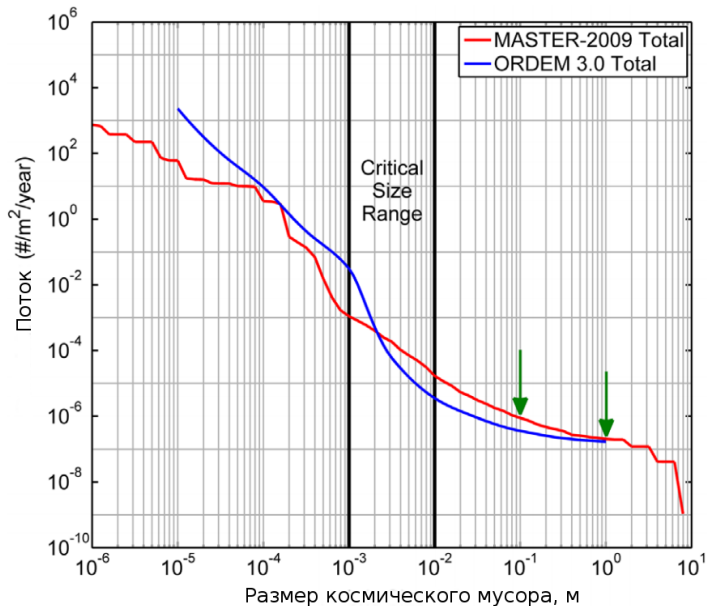


Видимое и невидимое

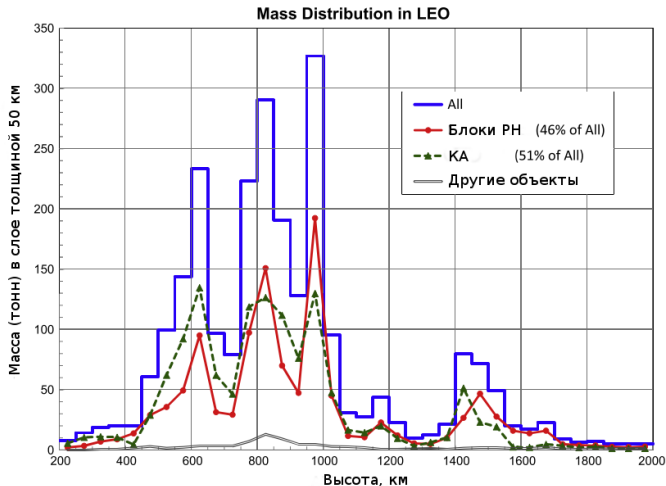


- Основной источник информации о “большом” космическом мусоре – Американская сеть слежения за космическим пространством (US Space Surveillance Network)
- В каталог US SSN попадают объекты больше 5-10 сантиметров ($2 \cdot 10^4$ объектов) на низких орбитах и не менее 0.3-1 метра на высоких орбитах, включая ГСО
- Количество объектов меньшего размера оценивается по статистическим моделям (MASTER, ORDEM):
 - 750 000 объектов от 1 до 10 см
 - 166 000 000 объектов от 1 мм до 1 см

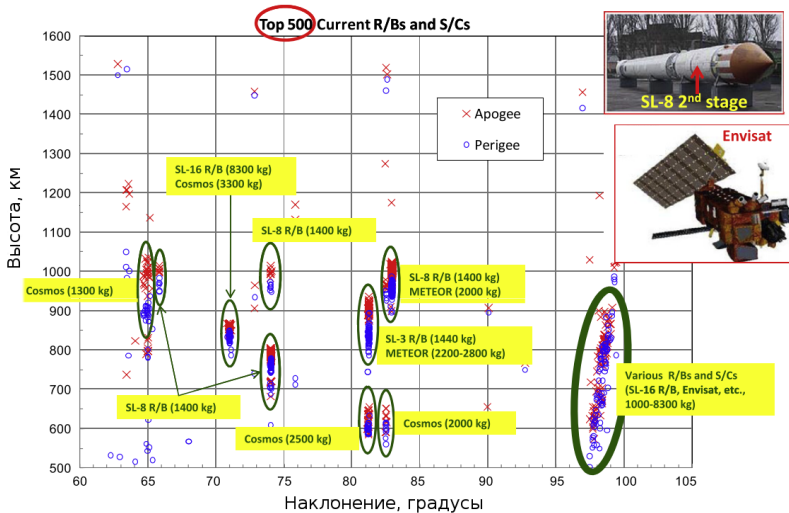
Поток на $\text{м}^2/\text{год}$ от размера частиц



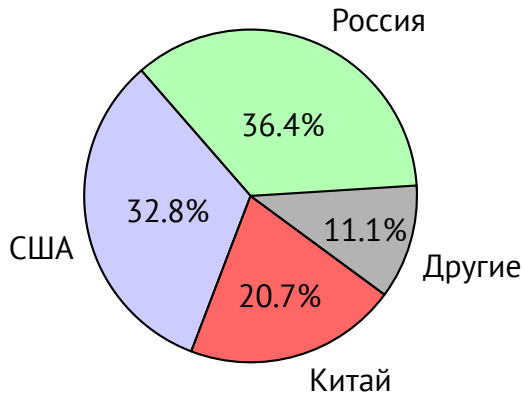
Распределение объектов КМ по высоте



500 наиболее опасных объектов



Динамика



На 04.04.2017

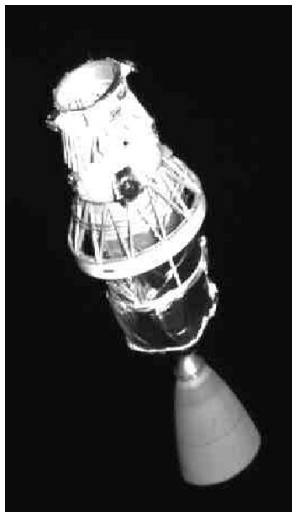
зарегистрировано 18347

крупных объектов:

- Россия: 6501
- США: 6017
- Китай: 3806
- Другие страны: 2028

Динамика с 01.01.17 по 04.04.17:

- Россия: +155 объектов
- США: +298 объектов



- 2007 Fengyun-1C (испытание противоспутникового оружия)
- 2009 Столкновение КА Иридиум-33 и Космос-2251 (2300 наблюдаемых фрагментов)
- 2012 Бриз-М (взрыв, 500 фрагментов)
- 2013 Первый Эквадорский спутник “Пегас”, запущенный 26 апреля 2013 года, через месяц (23 мая) столкнулся со ступенью РН Циклон-3 (1985 год). Связь со спутником потеряна

Опасные сближения с МКС: март 2011

Сближения, зарегистрированные автоматизированная системой предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве (ЦНИИмаш):

Дата	Время	Наименование КМ	Вероятность столкновения
09.03	12:55:18	SL-12 (РФ)	$4,1_{10^{-6}}$
14.03	00:02:48	Космос 2251 (РФ)	$2,6_{10^{-5}}$
14.03	14:18:57	Fengyun (Китай)	$8,3_{10^{-6}}$
22.03	03:40:13	Fengyun (Китай)	$1,2_{10^{-5}}$
24.03	19:25:31	CRRES (США)	$3,4_{10^{-6}}$
04.04	02:20:07	SL-3 R/B (Россия)	$7,7_{10^{-6}}$

В. Г. Лавреньев, И. И. Олейников, Автоматизированная система предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве
(<http://www.aspos.mcc.rsa.ru/pls/apex/f?p=1000:1>).

Синдром Кесслера

- Фрагменты, образующиеся в результате столкновения крупных объектов, могут привести к каскадному эффекту (**синдром Кесслера**) – лавинообразному увеличению космического мусора
- Некоторые области орбит могут стать недоступны (опасны) для КА



Дональд Кесслер (Donald Kessler)
7-я Конференция по космическому мусору,
Дармштадт, Германия, 2017

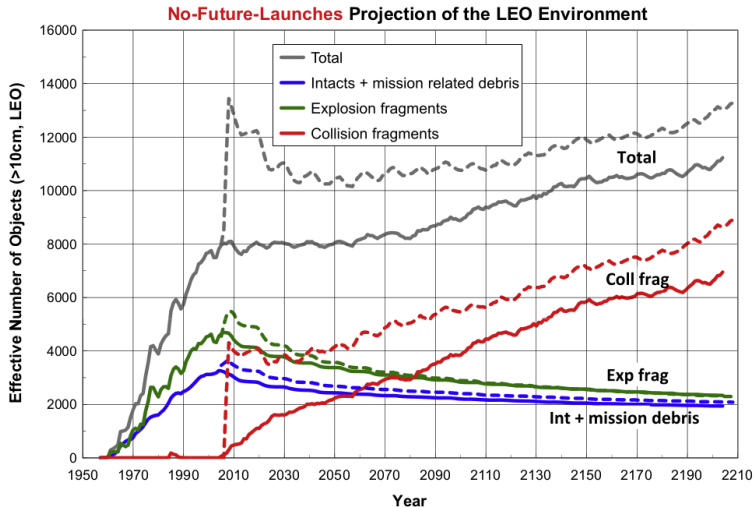
Space debris mitigation policy

Политика по предупреждению образования космического мусора:

- Увод КА с низких орбит в течение 25 лет после окончания срока активного существования – уменьшение высоты перигея до 550 км
импульс -50 м/с для начальной орбиты высотой 700 км
- Управляемый увод с орбиты для снижения риска падения фрагментов в заселённые ил области
импульс -200 м/с для начальной орбиты высотой 700 км
- Пассивация: рассеивание остатков энергии в баках (давление), в аккумуляторах, механизмах

*Daniel Briot [Impacts of the space debris mitigation rules on the spacecraft design in airbus defence and space](#) / Airbus Defence and Space

Прогнозы



J.C. Liou, An active debris removal parametric study for LEO environment remediation, Adv. Sp. Res. 47 (2011) 1865–1876.

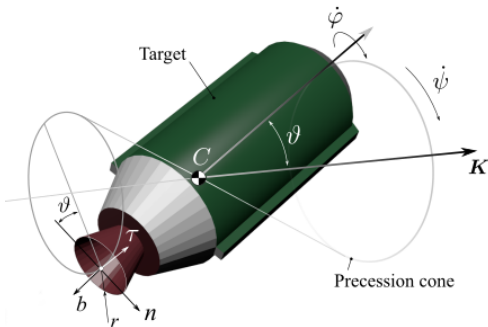
Темы (секции) конференции

- Наземные оптические, радиолокационные измерения, определение углового движения объектов
- Гиперскоростное воздействие, защита КА
- Активный увод космического мусора: миссии, сценарии, сближение, захват, относительное движение
- Средства наблюдения: системы, датчики, обработка
- Анализ рисков при входе в атмосферу, прогнозирование
- Предупреждение столкновений
- Моделирование состояния околоземного пространства (космический мусор, метеороидные частицы), анализ влияния развертывания больших спутниковых систем
- Предупреждение образования космического мусора

Оптические и радиолокационные измерения



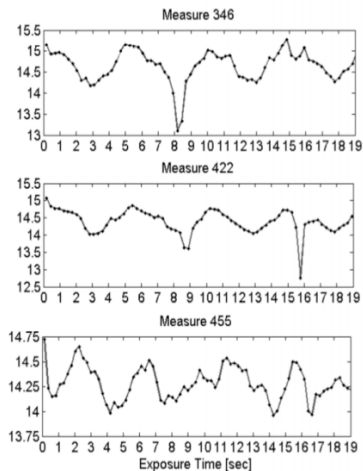
Задачи



- Наблюдение за космическим мусором оптическими и радиолокационными методами
- Определение углового движения объектов космического мусора
- Прогноз углового движения космического мусора (на несколько лет)

Оптические методы

Пример кривой блеска

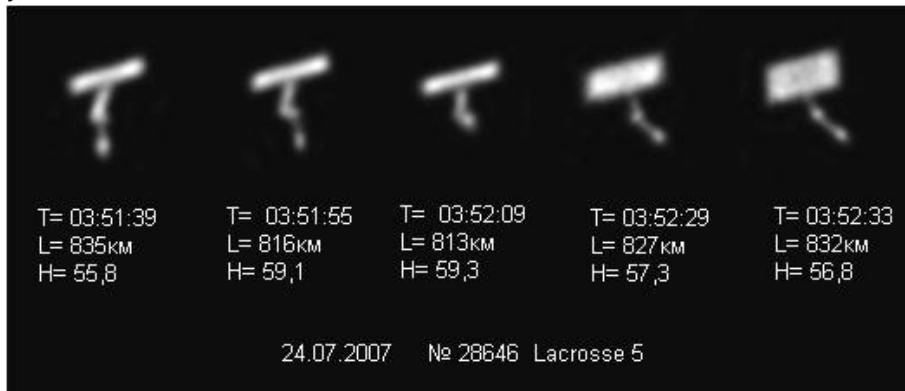


- Высота орбиты наблюдаемых объектов ограничена 2000 км
- Оценка частоты вращения по изменению блеска
- Для оценки углового движения необходимо знать форму объекта

Fabio Santoni, Emiliano Cordelli, Andrea Spinetti, Fabrizio Piergentili [Orbiting objects rotational state identification by optical measurements](#) / Università di Roma "La Sapienza", DIAEE-DIMA

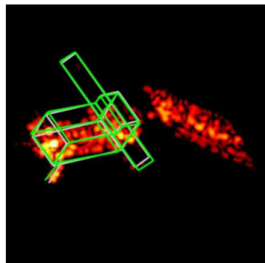
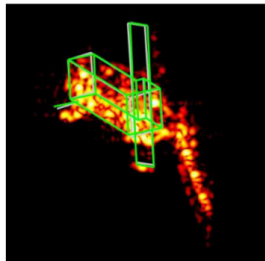
Оптические методы

При прямых наблюдениях крупных объектов можно определить угловое движение:



Изображение спутника-шпиона ВВС США “Lacrosse 5”, полученное средствами Алтайского оптико-лазерного центра имени Г. С. Титова.

Радиолокационные измерения



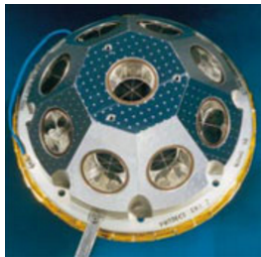
- ISAR – методы обратного (инверсного) синтеза апертуры
- Метод позволяет построить изображение цели, используя её движение относительно радиолокатора

← Изображение спутника **ENVISAT**

Размеры: 2.5x2.5x10 м

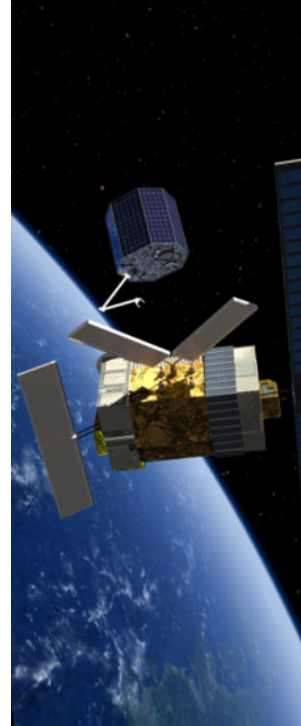
Орбита: околокруговая 770 км

Лазерная локация спутников

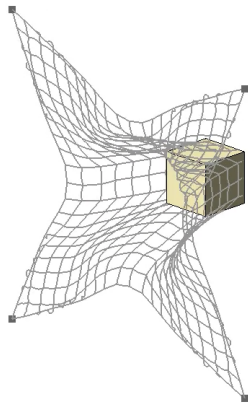


Отражатель, установленный
на КА ENVISAT

- Определение движения объектов космического мусора (элементы орбиты)
- Определение углового движения при наличии отражателей (“сотрудничающий” объект)



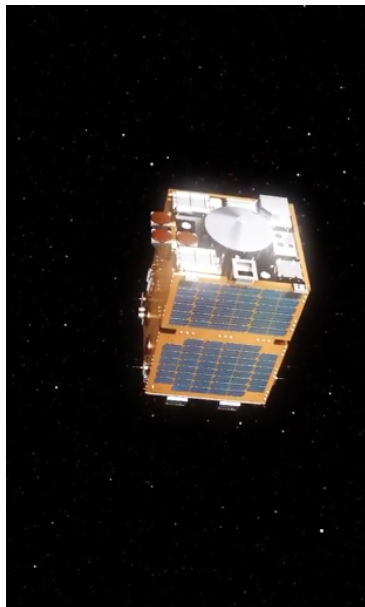
Активные способы увода



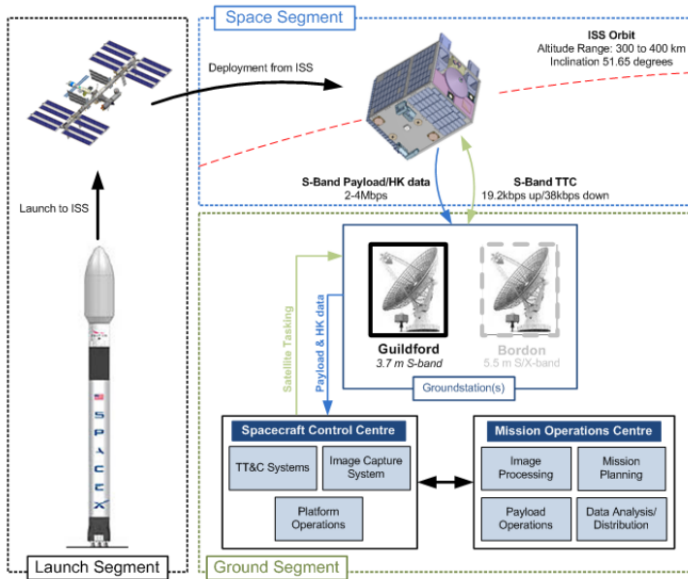
- Анализ сценариев активного увода космического мусора:
 - оптимальный выбор целей;
 - оценка затрат;
 - попутный увод (использование существующих РБ).
- Проработка способов захвата и увода целей:
 - гарпун;
 - сеть;
 - механизм штанга-конус;
 - робот-манипулятор;
 - бесконтактные способы.

Проект RemoveDebris

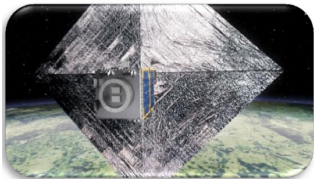
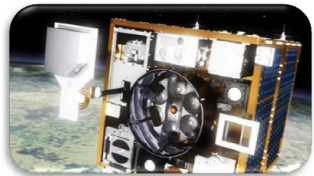
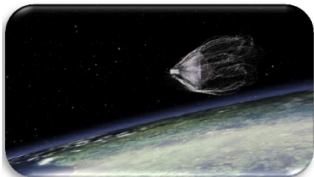
- RemoveDebris – демонстрационный эксперимент отработки технологий активного увода космического мусора, запланированный на конец 2017 года (запуск с международной станции).
- В качестве мишеней, имитирующих объекты космического мусора, будут использованы два наноспутника формата кубсат (пусковой контейнер ISI-POD).



Проект RemoveDebris



Проект RemoveDebris. Эксперименты



- Захват объекта при помощи сети
- Отработка гарпуна
- Отработка сближения с использованием видеокамер
- Развертывание паруса и использование его для увода с орбиты (за счёт увеличения аэродинамического сопротивления)

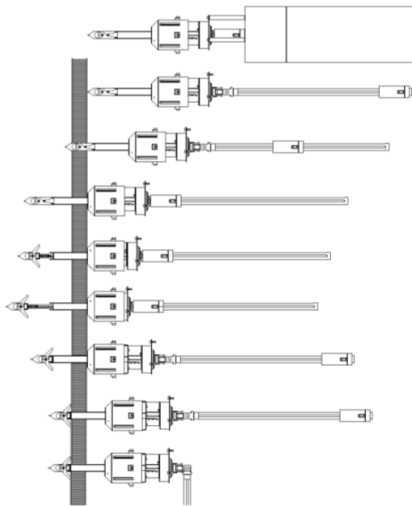
Обработка захвата цели гарпуном



- Разработка устройства захвата при помощи гарпуна в Airbus началась в 2011 году
- Airbus участвует в разработке гарпуна для проекта [RemoveDebris](#)
- Одно из главных требований – минимизация образования космического мусора (фрагментов цели)

Design and Testing of a Full Scale Harpoon Capture System / Airbus, ESA/ESTEC, University of Cambridge, Brunel University London

Обработка захвата цели гарпуном



- Для “выстрела” используется сжатый газ. Давление регулируется для возможности изменения скорости от 4 до 80 атмосфер.
- Скорость гарпуна: 20-90 м/с (эксперимент).
- В условиях космического полёта гарпун будет испытан в рамках миссии [RemoveDebris](#).

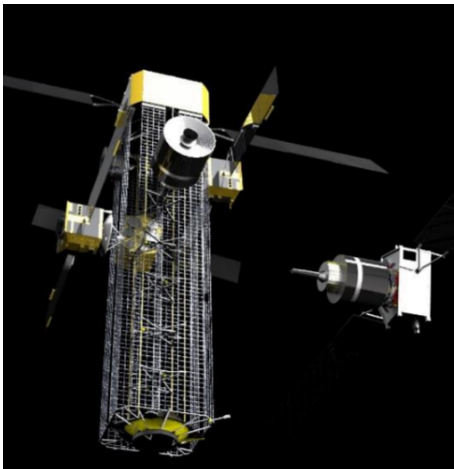
Design and Testing of a Full Scale Harpoon Capture System / Airbus, ESA/ESTEC, University of Cambridge, Brunel University London

SatLeash: захват сетью



- Университет Милана
- Студенческий проект (Программа [Fly Your Thesis!](#))
- Эксперимент в условиях микрогравитации (самолёт)
- Исследование динамики тросовой буксировки, управление тросом для исключения столкновения цели с буксиром

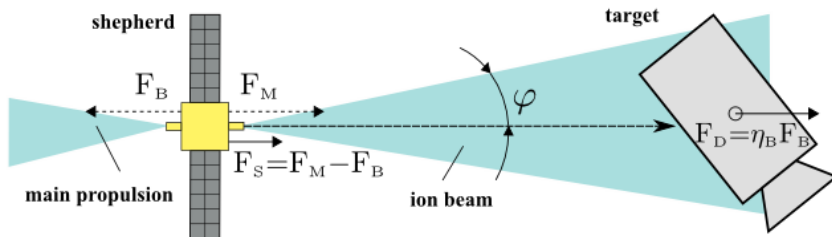
Проект Некрополь



- Проект направлен на “очистку” геостационарной орбиты
- Вместо индивидуального увода старых КА на орбиту захоронения предлагается собирать (прикреплять) несколько спутников к носителю
- После “наполнения” носитель переводится на орбиту захоронения

R. Longstaff, M. Hempzell [A Mission to Demonstrate the Preservation of the Geostationary Orbit](#)

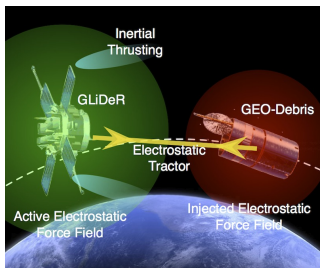
Увод спутников с ГСО ионным потоком



ЦНИИмаш представил результаты экспериментальных и работ по “фокусировке” ионного потока, который можно использовать для увода – сдува КА с геостационарных орбит.

V. V. Balashov, et al. [Radio frequency source of weakly expanding wedge-shaped xenon ion beam for contactless removal of large-sized space debris objects](#) / Central Research Engineering Institute, Research Institute of Applied Mechanics and Electrodynamics of the Moscow Aviation Institute (National Research University)

Электростатическая буксировка

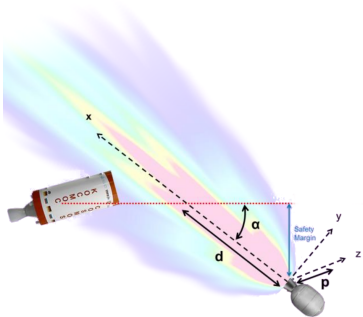


- Зарядив КА-буксир и объект космического мусора, можно осуществлять буксировку при помощи силы Кулона
- Силовое воздействие незначительно (порядка **миллиньютон**)
- На заряд КА и буксира оказывают влияние внешние условия: поток заряженных частиц в магнитосфере Земли, зависящий от активности Солнца

Joseph Hughes and Hanspeter Schaub [Orbital and storm time analysis of the pulsed electrostatic tractor](#), University of Colorado.

Trevor Bennett and Hanspeter Schaub [Touchless electrostatic detumble of a representative box-and-panel spacecraft configuration](#), University of Colorado.

Изменение орбиты космического мусора

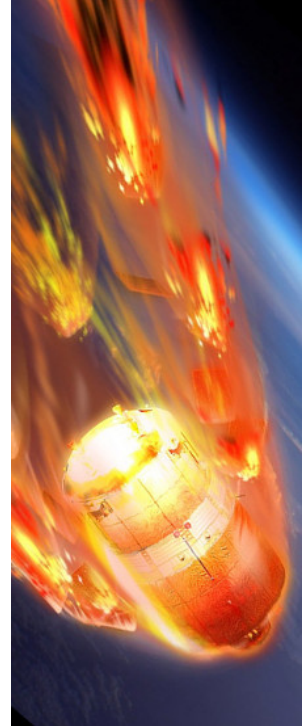


C. Dupont, S. Missonnier, L. Lequette, C. Bonnal, A. Jarry, F. Masson

Space debris braking system using derivative SRM for just-in time collision avoidance maneuver

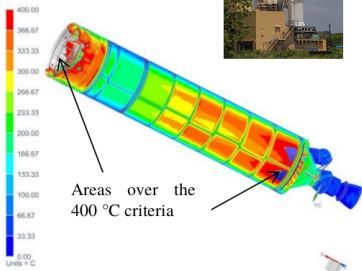
Bertin Technologies, Expertise & Innovative Processes,
CNES, Launcher Directorate, France

- Для оперативного изменения орбиты КМ с целью исключения его столкновения с неманеврирующими спутниками или другим КМ предлагается воздействовать потоком частиц работающего РДТТ, устанавливаемого на геодезические ракеты
- Изменение скорости даже на несколько сантиметров в секунду позволит изменить расстояние между объектами через сутки после воздействия на несколько километров



Движение в атмосфере

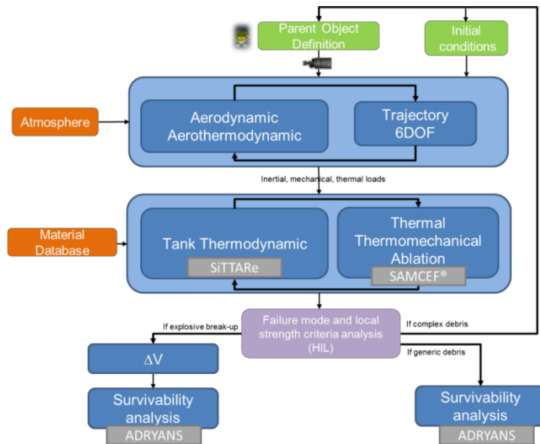
Движение ступеней ракет



- Исследования компании [Airbus](#)
- Анализ движения первой (основной) ступени Ариан-5 при движении в атмосфере с высоты 120 км и начальной скорости 7.79 км/с
- Сравнение результатов моделирования с наблюдениями: радиолокационные и оптические измерения с борта самолета при пуске 02.03.04 Ariane 5 G+ flight V 51 (Розетта).

C. Finzi, C. Bertorello, G. Pinaud, JM. Bouilly [Simulation of the Ariane 5 EPC reentry with the fragmentation tool suite](#) (Airbus Safran Launchers SAS).

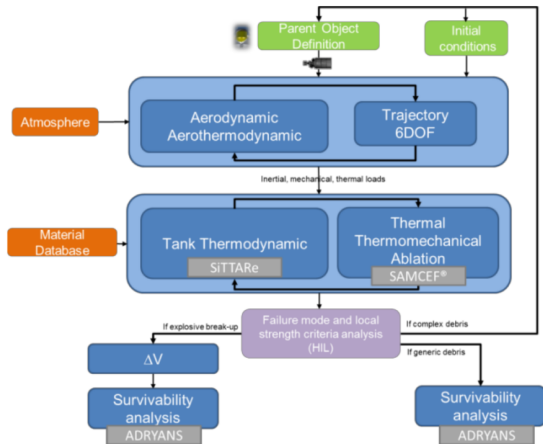
Модули программного комплекса



ARPEGE: расчёт
аэродинамические сил и
моментов,
пространственное
движение, тепловое
воздействие
SITTARE: анализ
поведения топлива в
баках

C. Finzi, C. Bertorello, G. Pinaud, JM. Bouilly [Simulation of the Ariane 5 EPC reentry with the fragmentation tool suite](#) (Airbus Safran Launchers SAS).

Модули программного комплекса



SAMCEF:

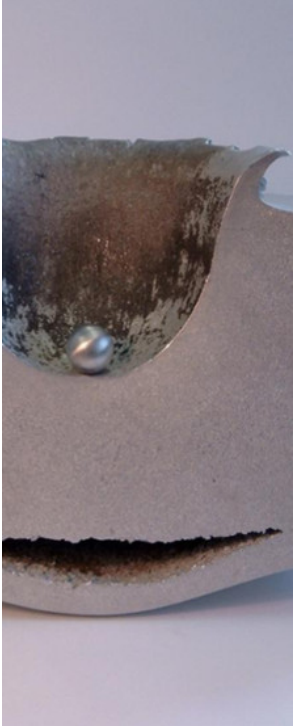
термомеханический
анализ конструкции

ADRYANS: анализ
движения фрагментов
(оценка возможности
достижения поверхности
Земли)

C. Finzi, C. Bertorello, G. Pinaud, JM. Bouilly [Simulation of the Ariane 5 EPC reentry with the fragmentation tool suite](#) (Airbus Safran Launchers SAS).

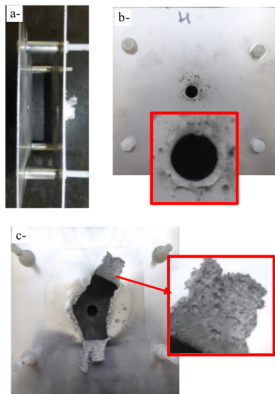
Результаты

- Первый этап разработки комплекса занял 2 года (2015, 2016).
- По итогам сравнения результатов моделирования с наблюдениями в настоящее время проводится уточнение моделей:
 - поведение конструкции (свойств материалов) при повышенной температуре; уточнение моделей соединения частей конструкции – взаимодействия частей при повышенной температуре (термомеханика);
 - уточнение моделей теплового взаимодействия элементов (включение в модель радиационного теплообмена полостях);
 - оптимизация (упрощение) КЭ модели с учётом неопределённости внешних условий (атмосфера).
- Разработка комплекса продолжается.
- Финальное тестирование запланировано на 2018 год.



Защита КА

Hypervelocity Impacts & Shielding

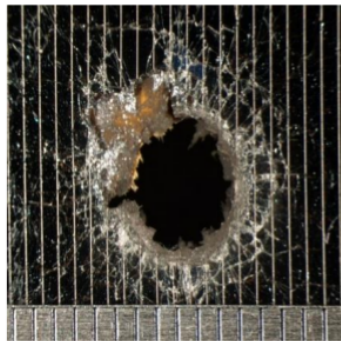


Воздействие частицы с массой 100 миллиграмм, летящей со скоростью 8,6 км/с

- Частицы миллиметрового размера не обнаруживаются земными радарами, поэтому использование маневров предотвращения столкновения невозможно
- Секция “Hypervelocity Impacts & Shielding” посвящена вопросам анализа воздействия на КА высокоскоростных частиц космического мусора (до 10 км/с) и пассивных способов защиты от такого воздействия

Воздействие на солнечные батареи

Ху Кунбо и др. “Исследование повреждений солнечных панелей при воздействии гиперскоростных миллиметровых частиц” (Китай).



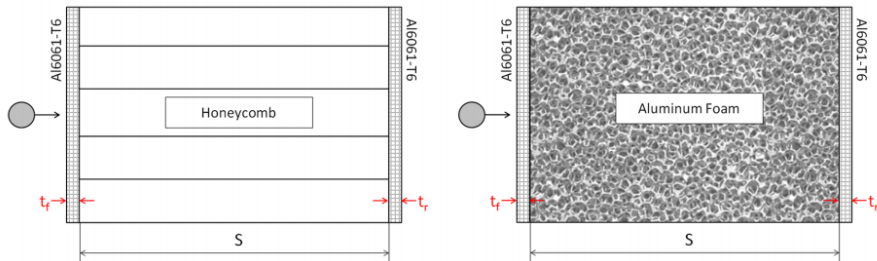
Воздействие частицы диаметром 3 мм, движущейся со скоростью 6.093 км/с

- Экспериментальная зависимость диаметра отверстия (D_h , мм) от кинетической энергии частицы (E , Дж)

$$D_h = 1.3E^{2/9}$$

- Оценка потери энергии БС при трёхлетнем воздействии частиц 50 мкм, 500 мкм и 5 мм по модели распределения ORDEM2000 (NASA): 4.85 %

Защита КА от космического мусора



Сравнение эффективности защитного экрана сотовой конструкции с экраном со вспененным алюминием при воздействии миллиметровой частицы, движущейся со скоростью 7 км/с.

Aleksandr Cherniaev, Igor Telichev [Weight-Efficiency of Conventional Shielding Systems in Protecting Unmanned Spacecraft from Orbital Debris](#), Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 54, No. 1 (2017), pp. 75-89.

Защита КА от космического мусора

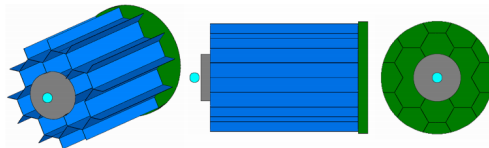
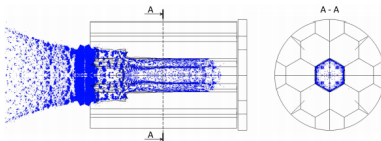


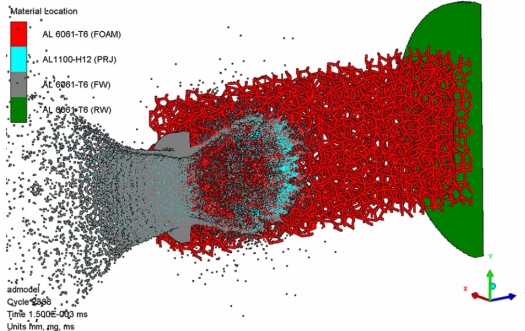
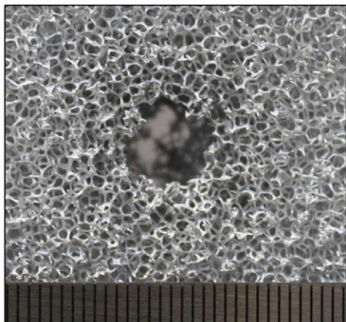
Fig. 10 Representative element of honeycomb-core sandwich panel.



Сотовая панель “канализирует” поток частиц, образовавшихся при разрушении переднего экрана, что усиливает воздействие на задний экран.

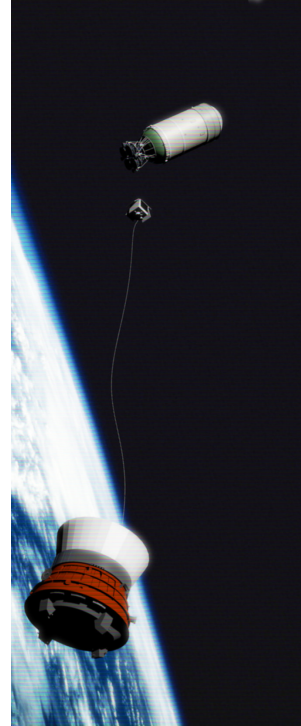
Aleksandr Cherniaev, Igor Telichev [Weight-Efficiency of Conventional Shielding Systems in Protecting Unmanned Spacecraft from Orbital Debris](#), Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 54, No. 1 (2017), pp. 75-89.

Защита КА от космического мусора



Панель со вспененным алюминием при той же масса более эффективна защищает от миллиметровых частиц, в сравнении с сотопанелью.

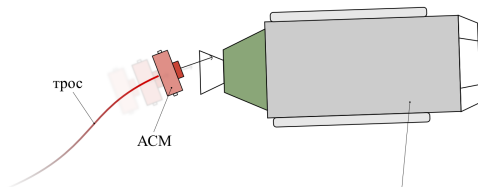
Aleksandr Cherniaev, Igor Telichev [Weight-Efficiency of Conventional Shielding Systems in Protecting Unmanned Spacecraft from Orbital Debris](#), Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 54, No. 1 (2017), pp. 75-89.



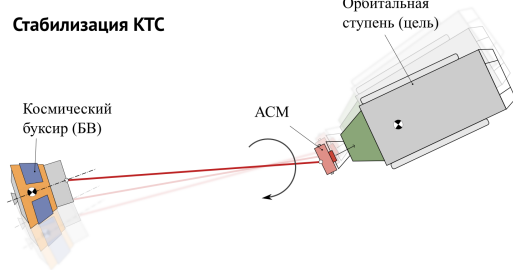
АО “РКЦ “Прогресс”
Самарский университет
ОмГТУ

Захват / стыковка

Стыковка

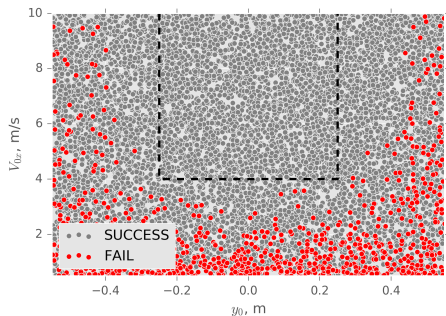
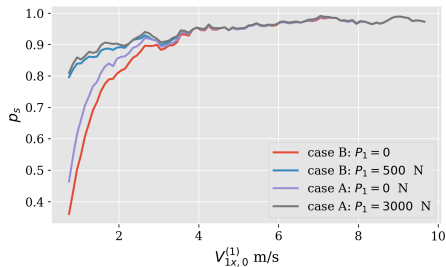


Стабилизация КТС



- Анализ процесса захвата вращающейся цели с использованием устройства типа штанга-конус
- Стабилизация тросовой системы

Оценка возможности стыковки



- Определена вероятность успешной стыковки в зависимости от скорости сближения АСМ и объекта космического мусора
- Проведена оценка сил, действующих на конструкцию стыковочного механизма

Источники / Image sources

- Final Flight of European Space Vehicle to Space Station Goes Out With a “Big Bang”
https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/news/atv_5
- The Greening of Orbital Debris
<https://appel.nasa.gov/2010/01/01/the-greening-of-orbital-debris>
- Hypervelocity impacts and protecting spacecraft
www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2013/04/Hypervelocity_Impact
- How can humans clean up our space junk?
https://cdn2.vox-cdn.com/uploads/chorus_asset/file/7719861/Cleaning_space.png
- Air Force Maui Optical and Supercomputing (AMOS) site.
www.orbitaldebris.jsc.nasa.gov/images/gallerypage/amos.jpg
- Working Principles of an Ion Beam Shepherd
<https://leosweep.upm.es/en/ibs/ibs-concept-applications/47-working-principles-of-an-ion-beam-shepherd>