

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

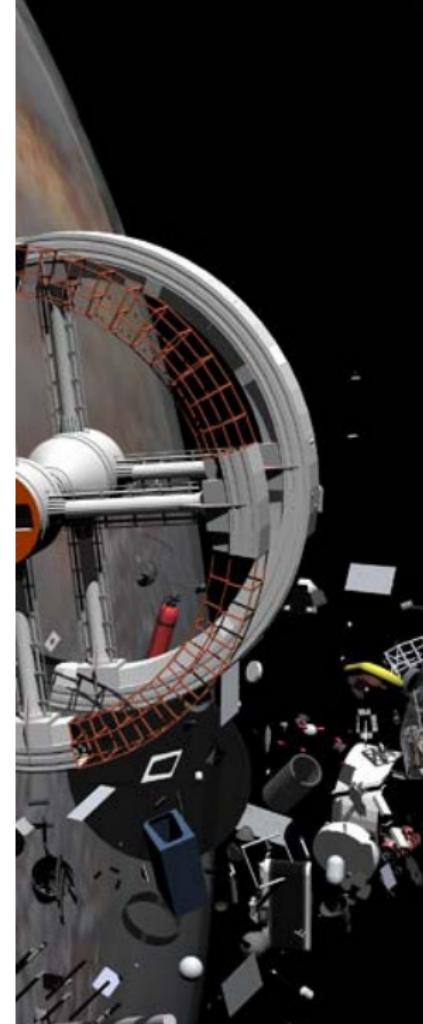
Содержание

- 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



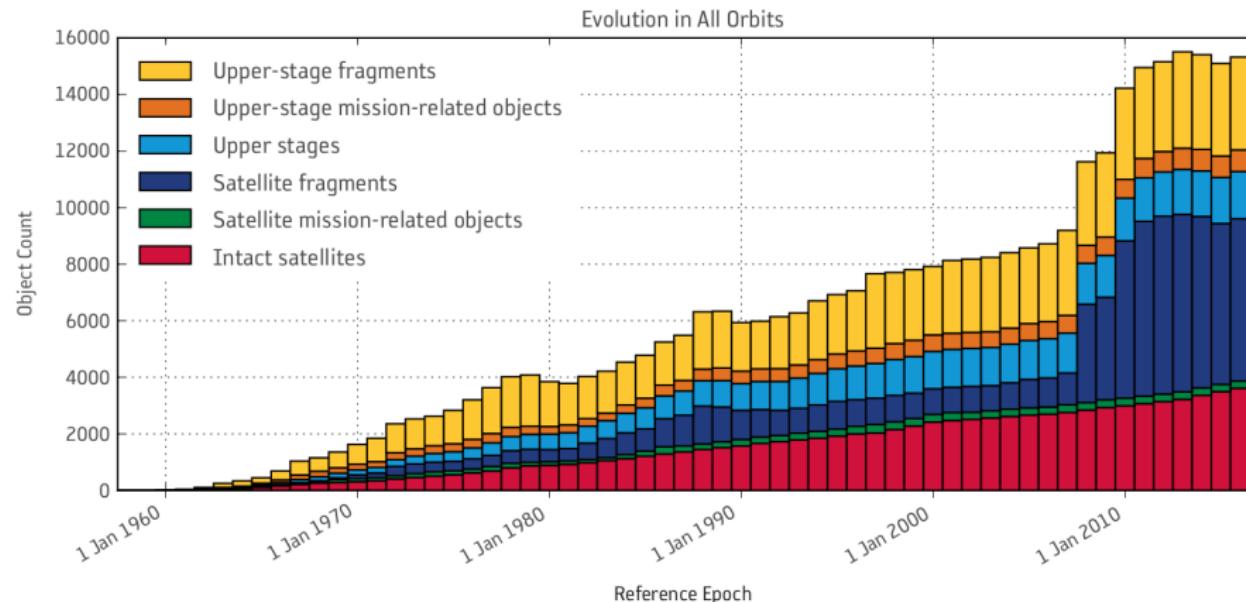
- Европейская конференция по космическому мусору проводится каждые четыре года, начиная с 1993 года.
- Место проведения: [ESOC](#), Дармштадт, Германия
- ESOC – Европейский центр управления космическими полётами: научно-исследовательское подразделение Европейского космического агентства, отвечающее за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

A photograph of a satellite, likely the International Space Station, shown from a low angle. The satellite's metallic surfaces and various equipment are visible against the black void of space. Numerous small, white, grey, and blue objects, representing orbital debris, are scattered around it, creating a sense of clutter and potential danger.

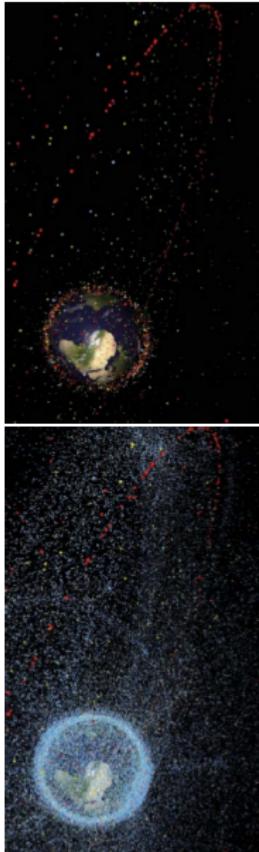
Космический мусор

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

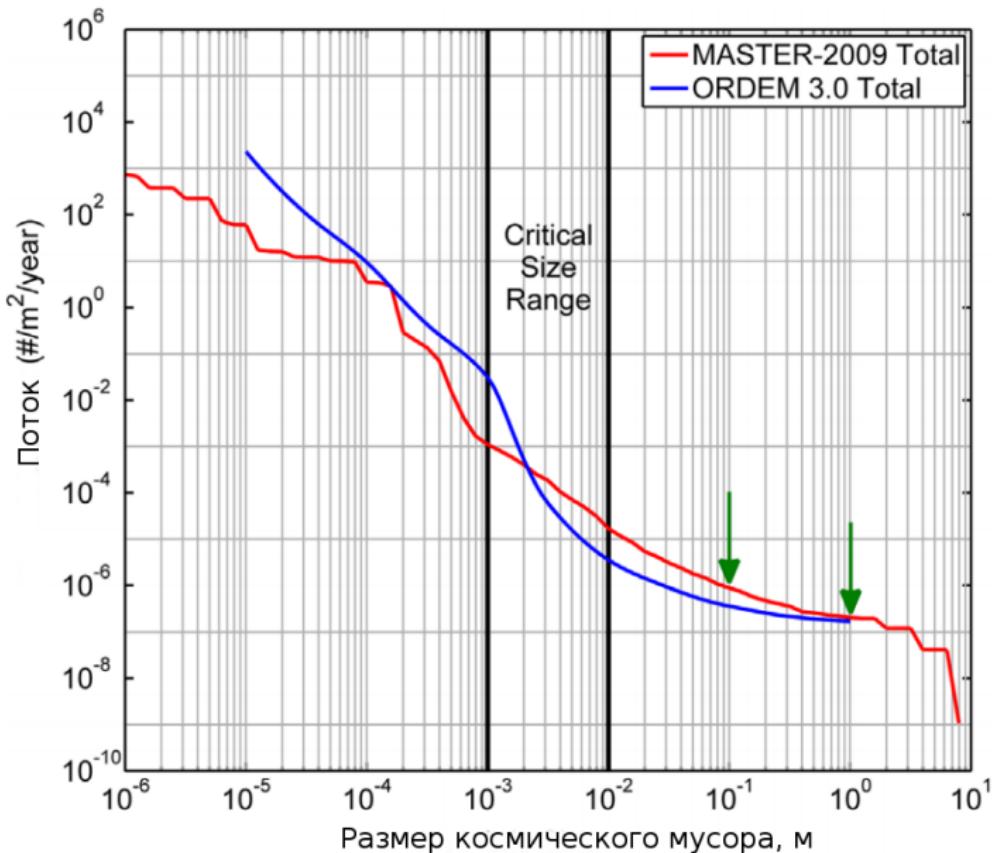


Видимое и невидимое

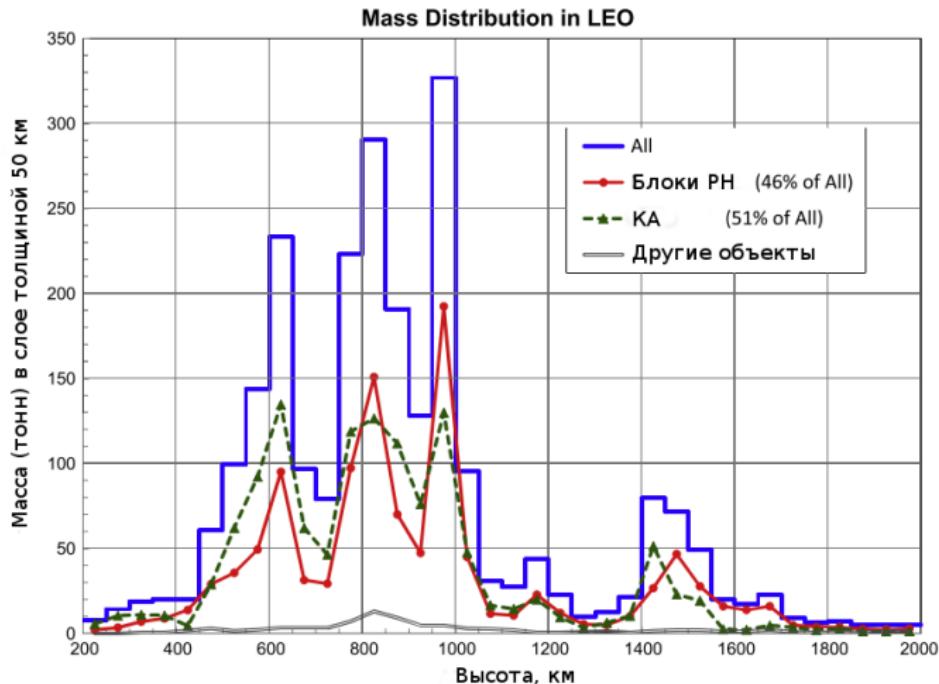


- Основной источник информации о “большом” космическом мусоре – Американская сеть слежения за космическим пространством ([US Space Surveillance Network](#))
- В каталог [US SSN](#) попадают объекты больше $5\text{-}10$ сантиметров ($2 \cdot 10^4$ объектов) на низких орбитах и не менее $0.3\text{-}1$ метра на высоких орbitах, 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

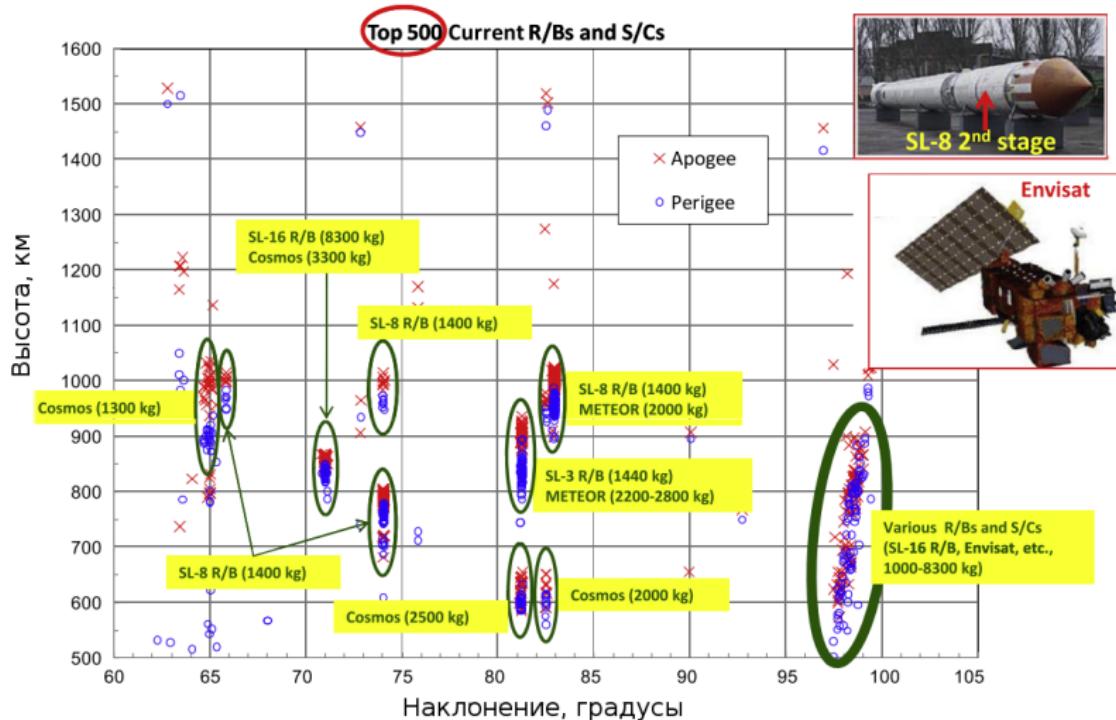
Поток на м²/год от размера частиц



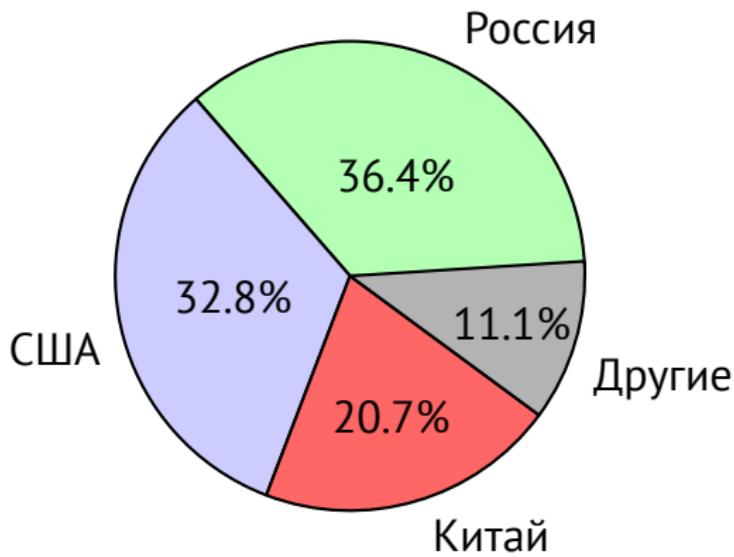
Распределение объектов КМ по высоте



500 наиболее опасных объектов



Динамика



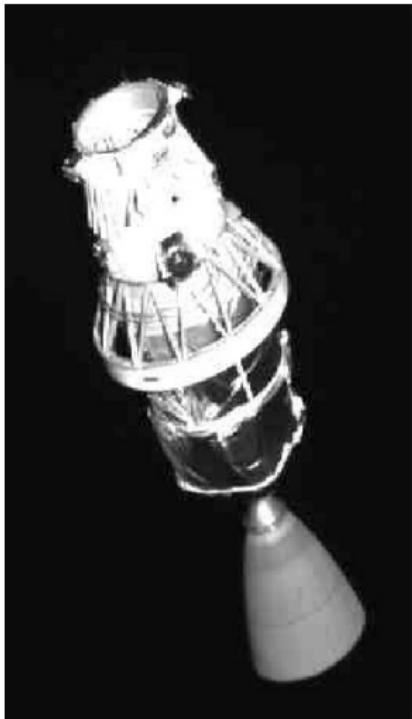
На 04.04.2017
зарегистрировано 18347
крупных объектов:

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

Динамика с 01.01.17 по
04.04.17:

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

События



- 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 автоматизированной системой предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве (ЦНИИИмаш):

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

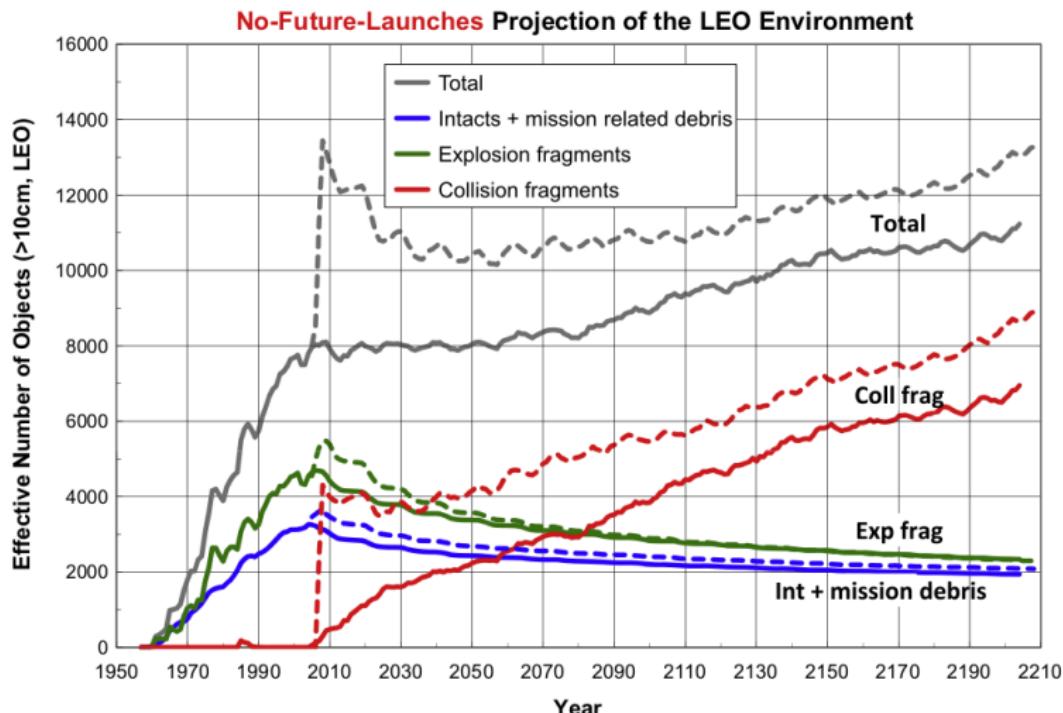
Space debris mitigation policy

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
 - 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



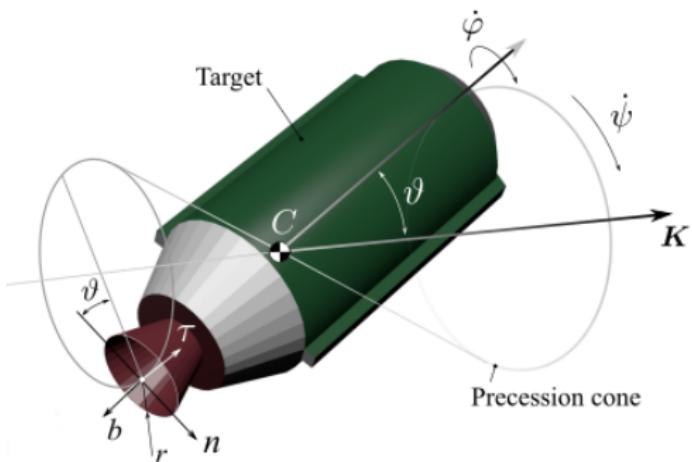
Темы (секции) конференции

- 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

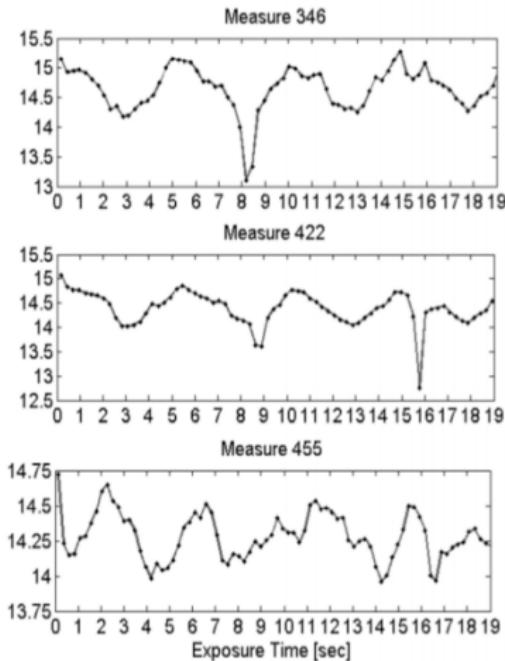
Задачи



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

Оптические методы

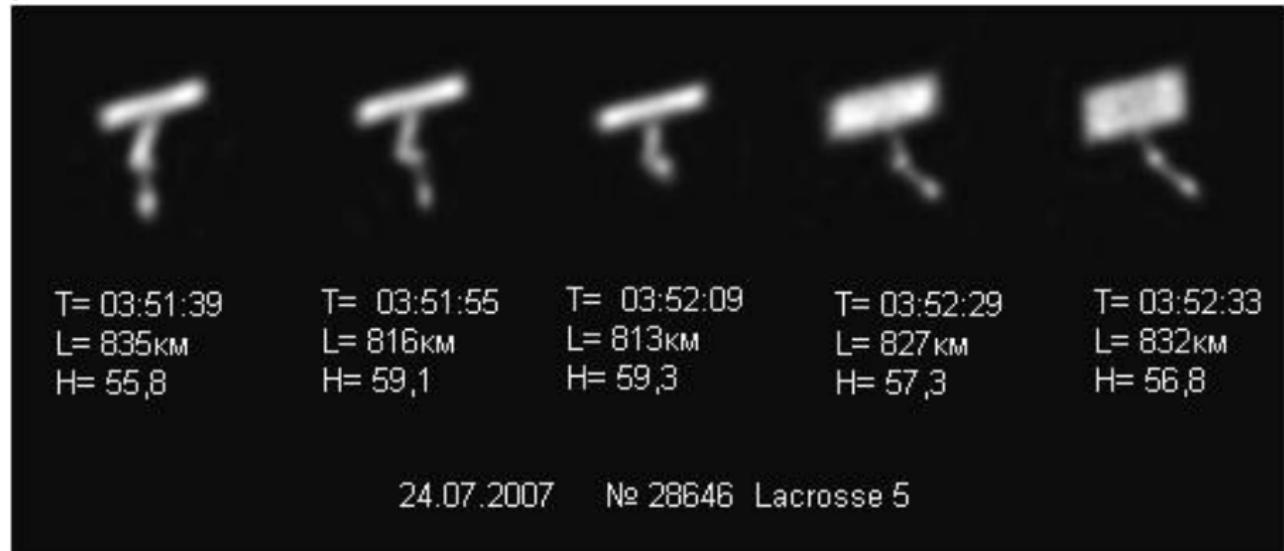
Пример кривой блеска



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

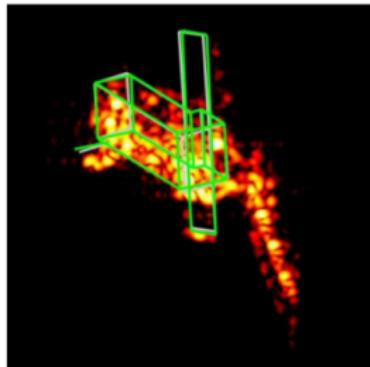
Оптические методы

При прямых наблюдениях крупных объектов можно определить угловое движение:

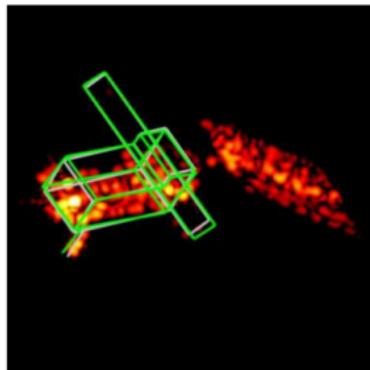


Изображение спутника-шпиона ВВС США “Lacrosse 5”,
полученное средствами Алтайского оптико-лазерного центра
имени Г. С. Титова.

Радиолокационные измерения

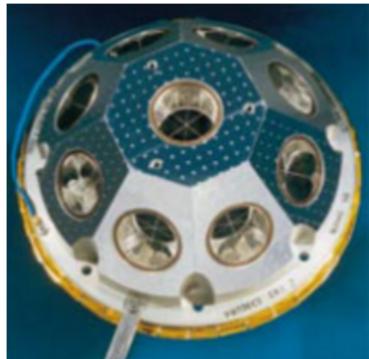


- ISAR – методы обратного (инверсного) синтезирования апертуры
- Метод позволяет построить изображение цели, используя её движение относительно радиолокатора



← Изображение спутника ENVISAT
Размеры: 2.5x2.5x10 м
Орбита: околокруговая 770 км

Лазерная локация спутников



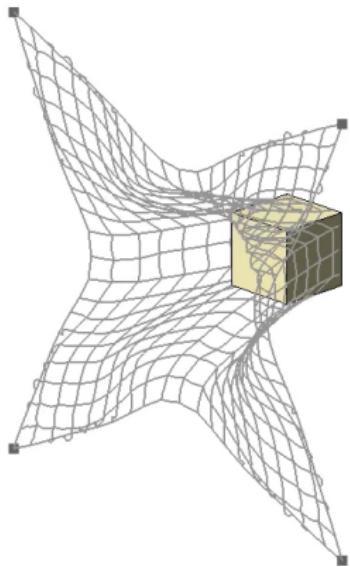
Отражатель, установленный
на КА ENVISAT

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



Активные способы увода

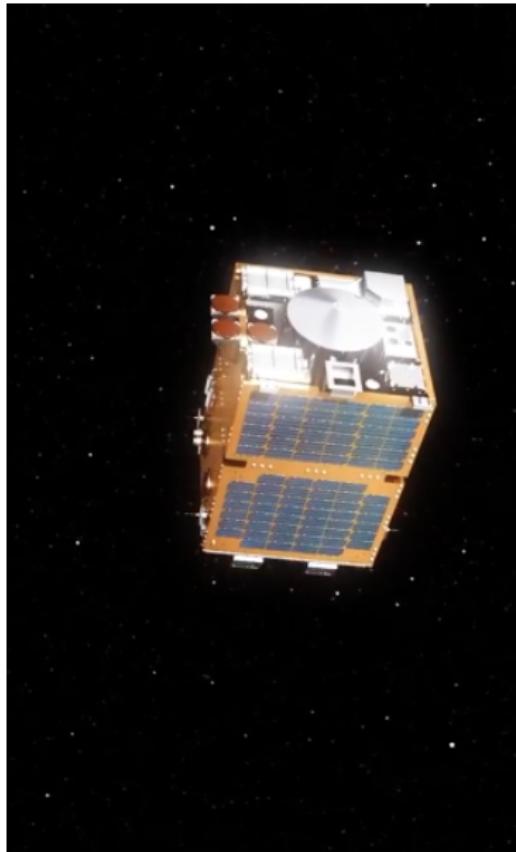
Темы статей



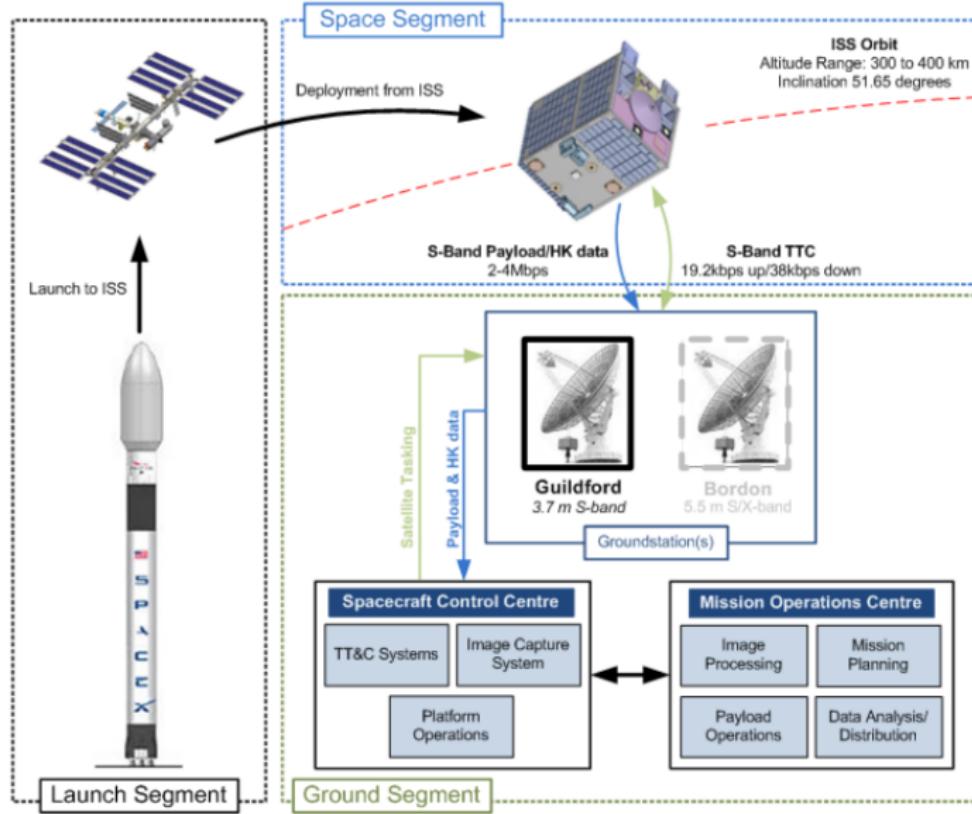
- Анализ сценариев активного увода космического мусора:
 - оптимальный выбор целей;
 - оценка затрат;
 - попутный увод (использование существующих РБ).
- Проработка способов захвата и увода целей:
 - гарпун;
 - сеть;
 - механизм штанга-конус;
 - робот-манипулятор;
 - бесконтактные способы.

Проект RemoveDebris

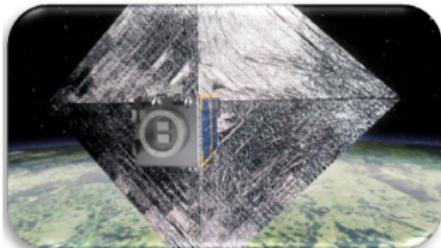
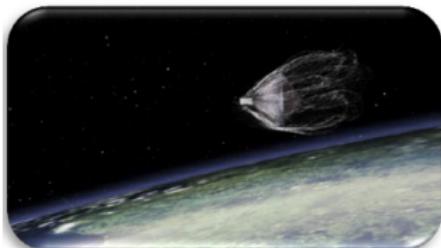
- RemoveDebris – демонстрационный эксперимент отработки технологий активного увода космического мусора, запланированный на конец 2017 года (запуск с международной станции).
- В качестве мишеней, имитирующих объекты космического мусора, будут использованы два наноспутника формата кубсат (пусковой контейнер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



Проект RemoveDebris



Проект RemoveDebris. Эксперименты



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

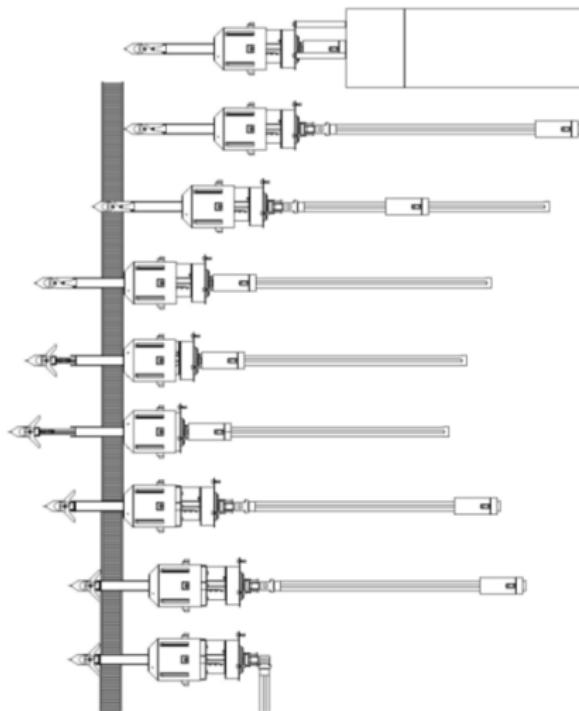
Отработка захвата цели гарпуном



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

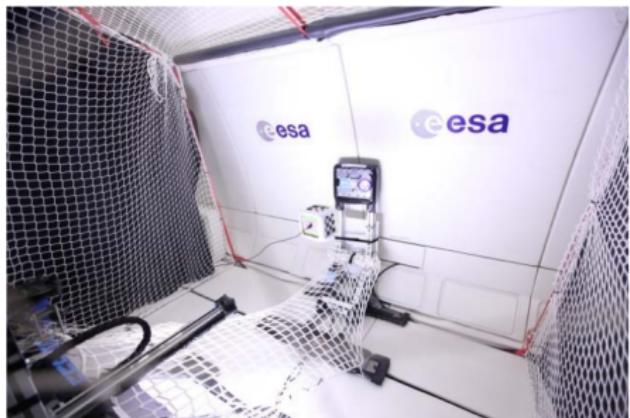
- Разработка устройства захвата при помощи гарпуна в Airbus началась в 2011 году
- Airbus участвует в разработке гарпуна для проекта [RemoveDebris](#)
- Одно из главных требований – минимизация образования космического мусора (фрагментов цели)

Отработка захвата цели гарпуном



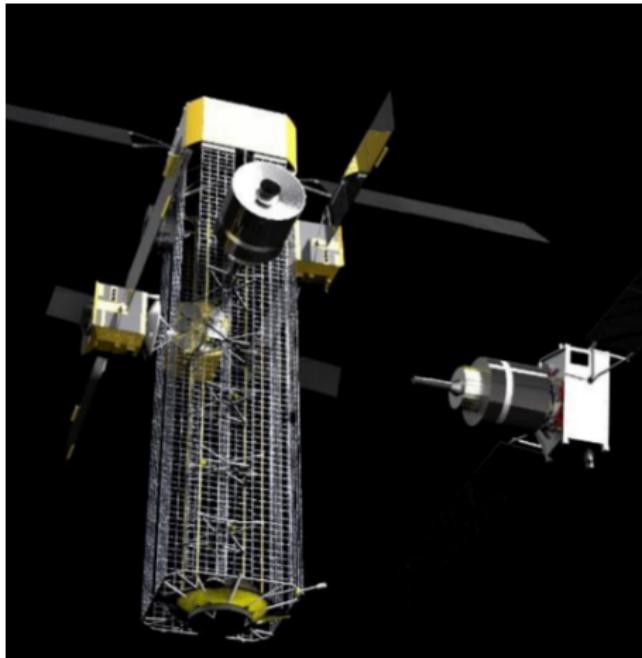
- Для “выстрела” используется сжатый газ. Давление регулируется для возможности изменения скорости от 4 до 80 атмосфер.
- Скорость гарпуна: 20-90 м/с (эксперимент).
- В условиях космического полёта гарпун будет испытан в рамках миссии RemoveDebris.

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 буксируемым объектом

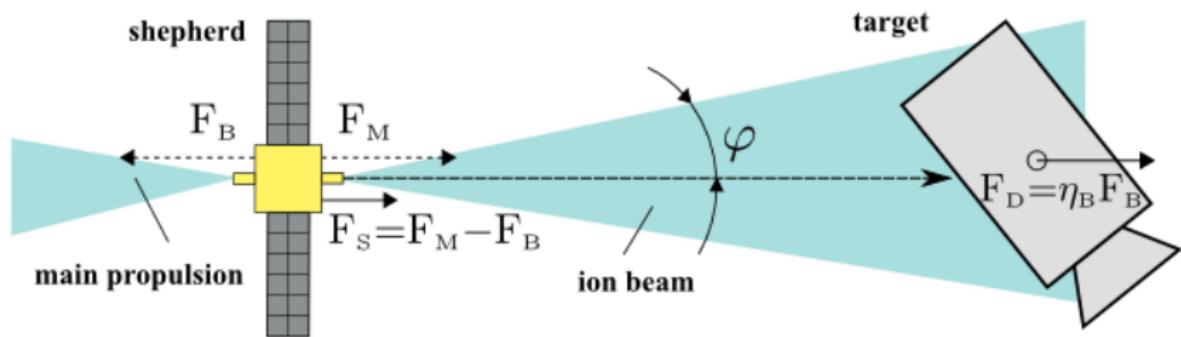
Проект Некрополь



- 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. Hempell A Mission to Demonstrate the Preservation of the Geostationary Orbit

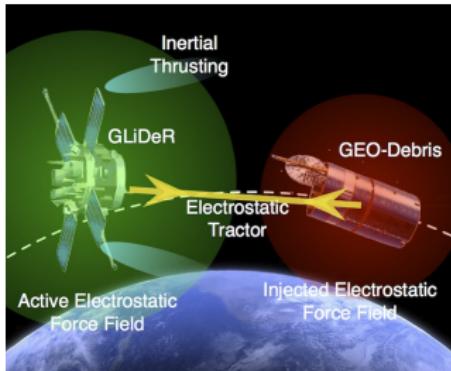
Увод спутников с ГСО ионным потоком



ЦНИИмаш представил результаты экспериментальных 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

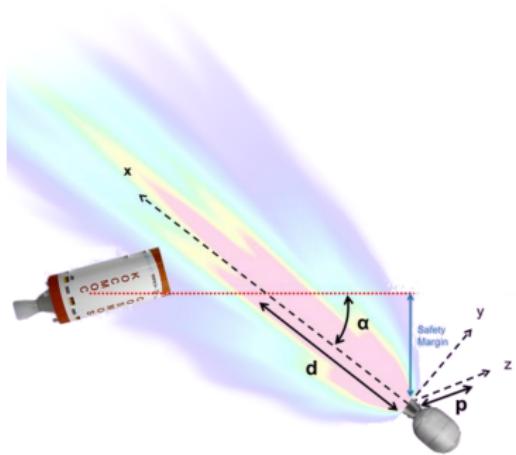


- Зарядив КА-буксир и объект космического мусора, можно осуществлять буксировку при помощи силы Кулона
- Силовое воздействие незначительно (порядка **миллиニュтонов**)
- На заряд КА и боксира оказывают влияние внешние условия: поток заряженных частиц в магнитосфере Земли, зависящий от активности Солнца

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

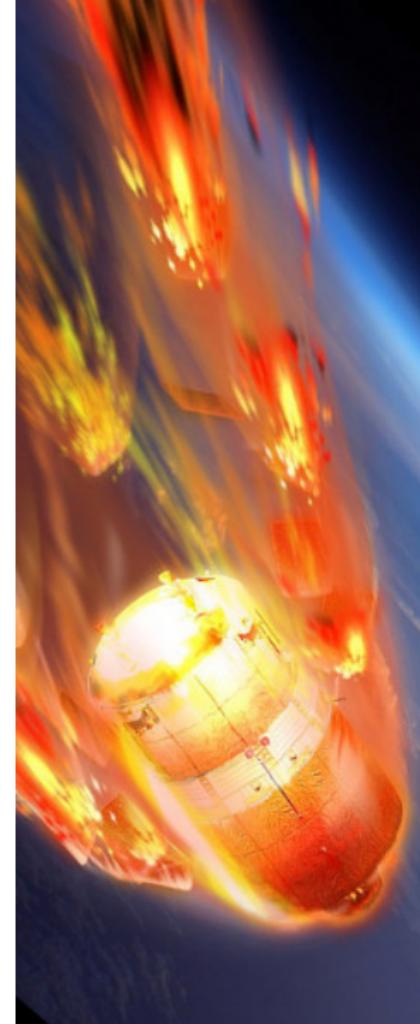
Trevor Bennett and Hanspeter Schaub [Touchless electrostatic detumble of a representative box-and-panel spacecraft configuration](#), University of Colorado.

Изменение орбиты космического мусора



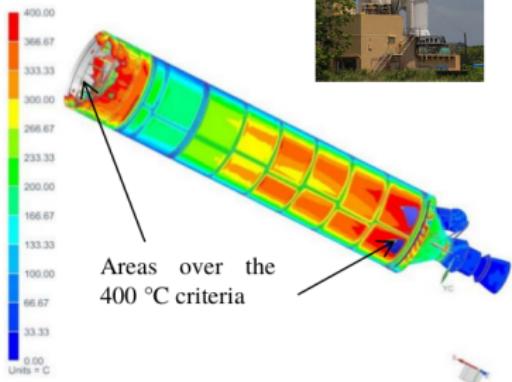
C. Dupont, S. Missonnier, L. Lequette, C. Bonnal, A. Jarry, F. Masson
Space debris braking system using derivative SRM for just-in time collision avoidance maneuver
Bertin Technologies, Expertise & Innovative Processes,
CNES, Launcher Directorate, France

- 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

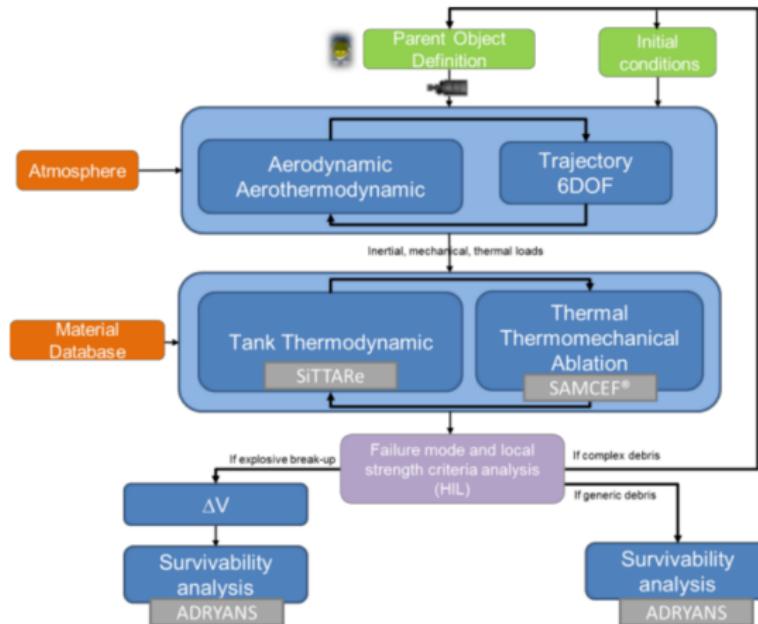
Движение ступеней ракет



- 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).

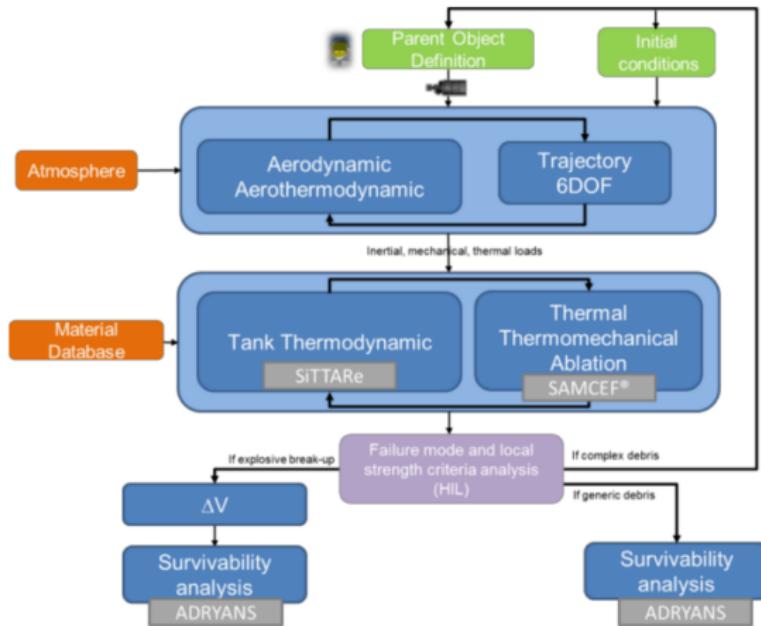
Модули программного комплекса



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).

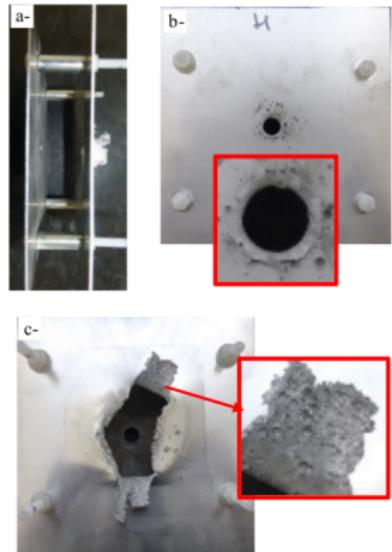
Результаты

- 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

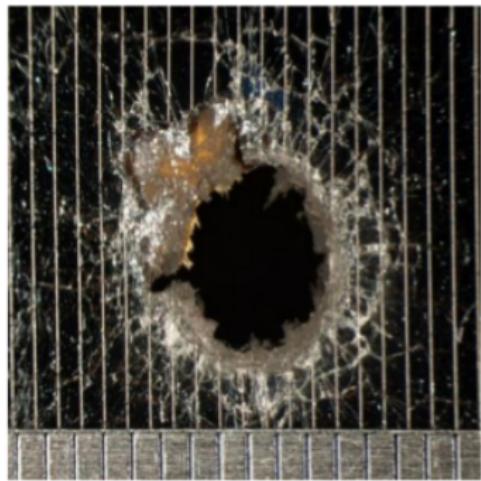


Воздействие частицы с массой 100 миллиграмм, летящей со скоростью 8,6 км/с

- 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

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



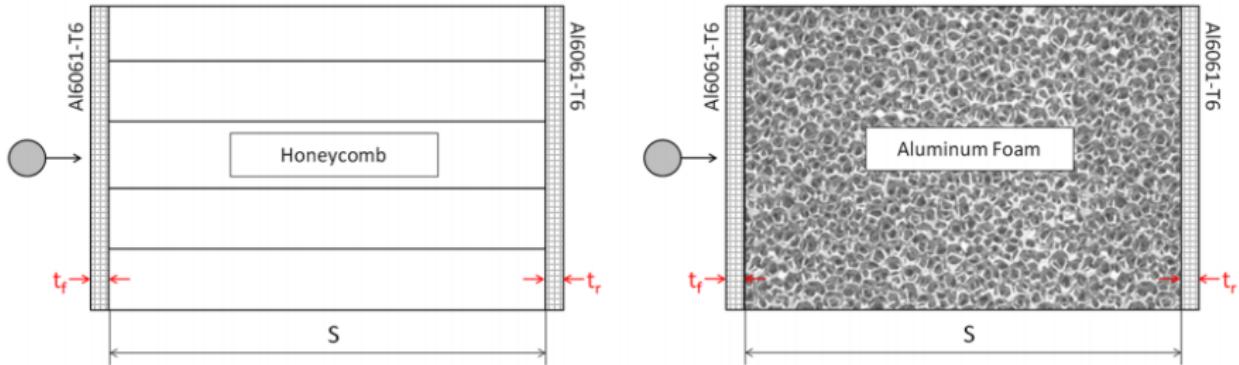
Воздействие частицы диаметром 3 мм,
движущейся со скоростью 6.093 км/с

- 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

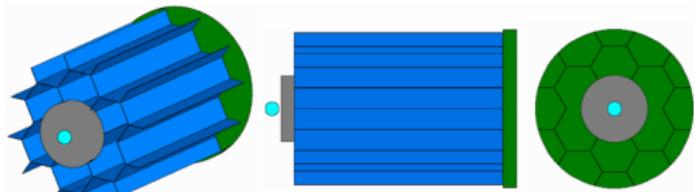
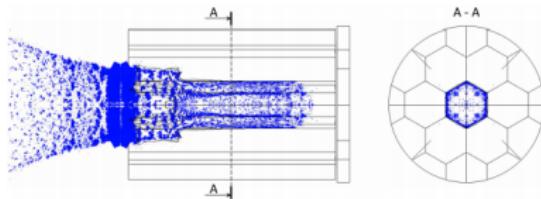


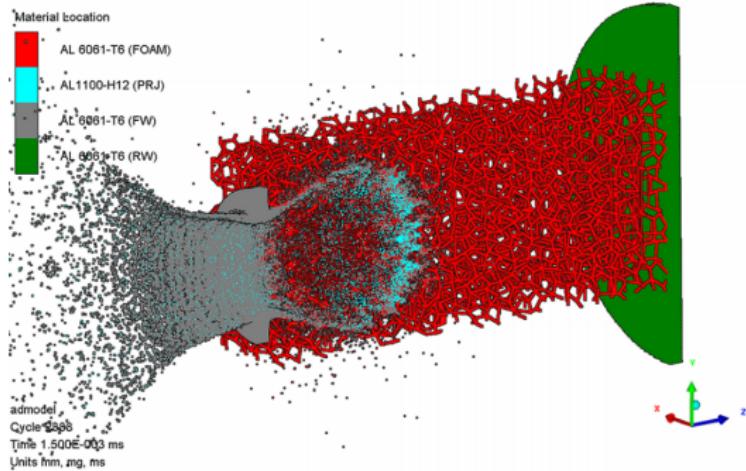
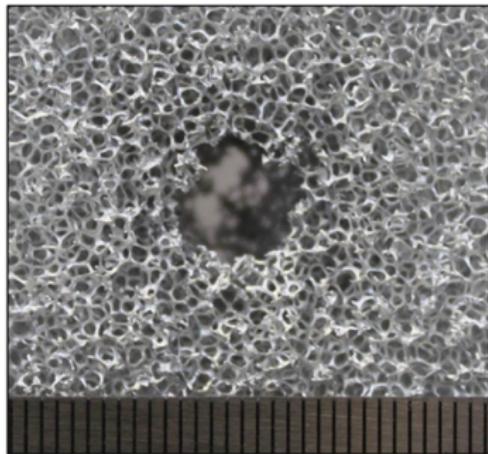
Fig. 10 Representative element of honeycomb-core sandwich panel.



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

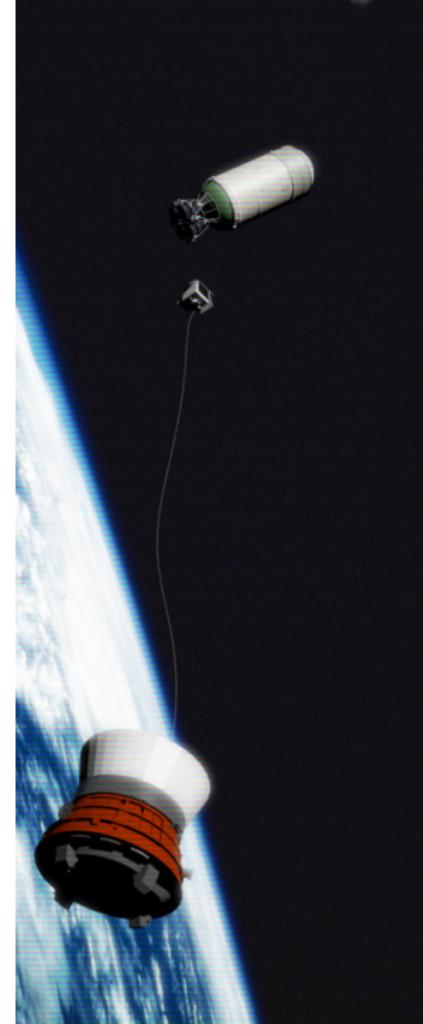
Aleksandr Cherniaev, Igor Telichev [Weight-Efficiency of Conventional Shielding Systems in Protecting Unmanned Spacecraft from Orbital Debris](#), Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 54, No. 1 (2017), pp. 75-89.

Защита КА от космического мусора



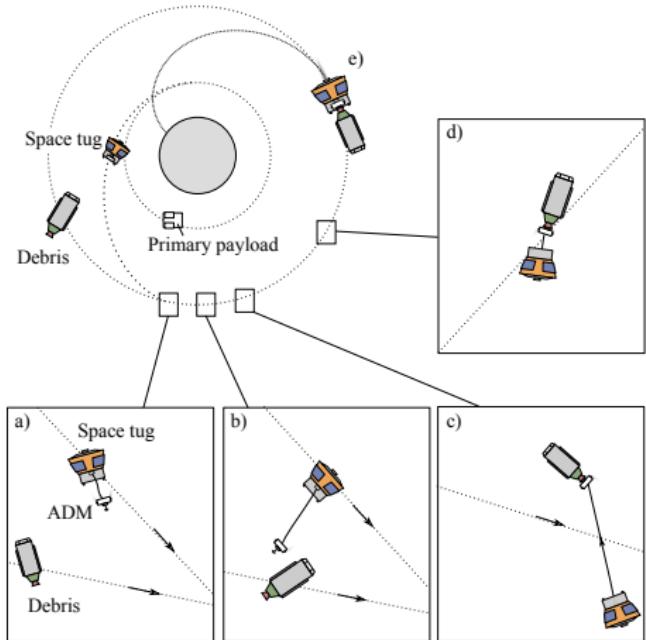
Панель со вспененным алюминием при той же массе более эффективна защищает от миллиметровых частиц, в сравнении с сотопанелью.

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

Попутный увод космического мусора

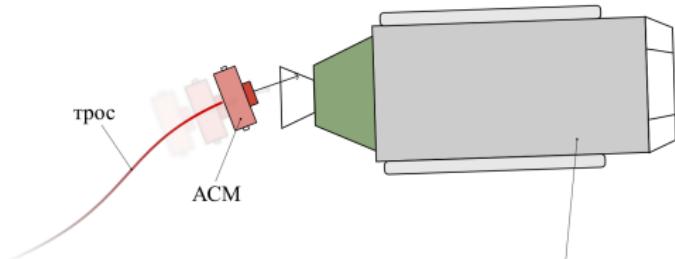


Увод космического мусора с
использованием автономного
стыковочного модуля (АСМ)

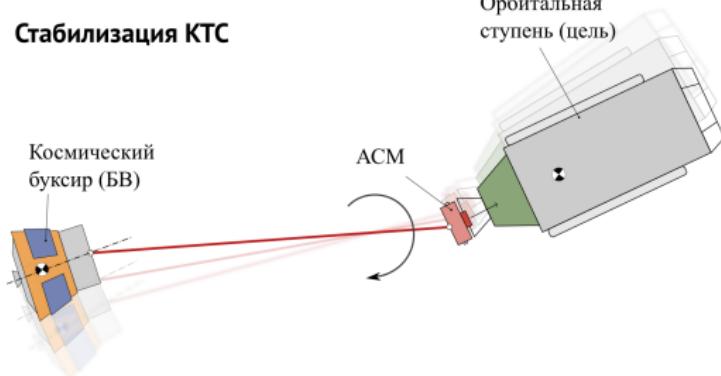
- Предварительный анализ миссии попутного увода объекта космического мусора при помощи блока выведения
- Анализ двух вариантов захвата и увода объекта космического мусора:
 - с использованием только БВ для решения задач захвата и увода;
 - с использованием отделяемого автономного модуля.

Захват /стыковка

Стыковка

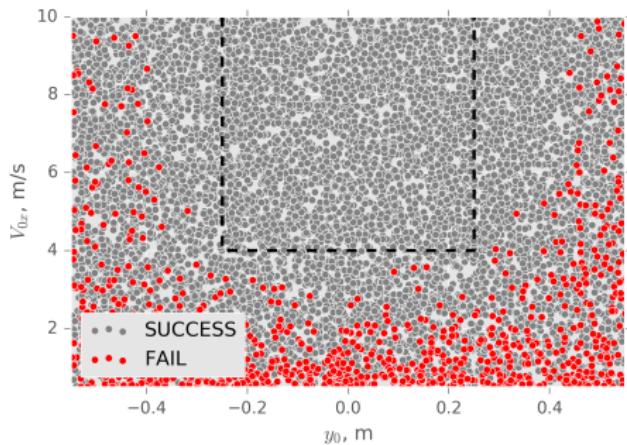
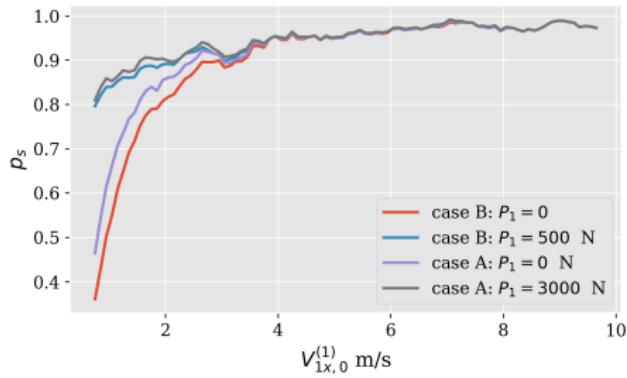


Стабилизация КТС



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

Оценка возможностистыковки



- Определена вероятность успешнойстыковки в зависимости от скорости сближения АСМ и объекта космического мусора
- Проведена оценка сил, действующих на конструкциюстыковочного 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>