



Малые межпланетные космические аппараты: МИССИИ И ТЕХНОЛОГИИ

м.н.с. Трофимов С.П.

Семинар сектора №4 отдела №5

ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

3 июля 2014 года

Interplanetary CubeSat Workshops (iCubeSats)

- Первый воркшоп прошел в 2012 году в MIT, второй – в 2013 году в Корнелльском университете, третий – в мае этого года в Калтехе
- Четвертый воркшоп намечен на 26-27 мая 2015 года в Империял Колледже (Южный Кенсингтон, Лондон)
- Дедлайн по аннотациям – 1 апреля 2015 года
- Спонсорами воркшопов выступают две компании – JA Initiative и PocketSpacecraft.com (были основаны профессором Корнелльского университета Майклом Джонсоном)

Interplanetary Small Satellite Conferences

- Конференции проходят в Калтехе (Pasadena, CA) и организуются молодыми выпускниками Калтеха, MIT, Корнелльского и Мичиганского университетов (многие из них сейчас работают в JPL)
- Первая конференция прошла в 2013 году, вторая – в апреле этого года
- Третья конференция ожидается весной или летом 2015 года (точная дата пока не объявлена)
- Среди спонсоров – крупные частные космические компании: United Launch Alliance, Aether Industries, Orbital Systems

International Workshops on LunarCubes (LCWs)

- Первые два однодневных воркшопа прошли в Пало Альто (CA) и Кокоа Бич (FL) 13 ноября 2012 года и 11 апреля 2013 года, соответственно
- Третий, четырехдневный, воркшоп проведен вновь в Пало Альто в ноябре 2013 года
- LCW 4 намечен на 7-9 октября этого года в Маунтин Вью (CA)
- Дедлайн по аннотациям – 12 августа 2014 года
- Организаторами/спонсорами воркшопов выступают частные компании космической индустрии из Техаса и Калифорнии (при активной поддержке JPL/NASA)

Планируемые миссии

- На данный момент ни один микро/наноспутник не выходил за пределы околоземных орбит
- Самые маленькие межпланетные КА – ARTEMIS-P1 и ARTEMIS-P2 (по 126 кг) – переведены к точкам L1 и L2 системы Земля-Луна в 2010 году (в 2011 году – на окололунные орбиты)
- Миссия INSPIRE: первый тестовый запуск кубсата на высокоэллиптическую орбиту (конец 2014 года)
- Запланировано выведение нескольких кубсатов на отлетную траекторию к Луне в рамках миссии EM-1 (первый пуск Space Launch System, конец 2017 года), в т.ч. 6U-кубсата RUNNER на встречу с астероидом

Объявленные конкурсы (1)

NASA Centennial Challenges Program: Small Spacecraft Challenges

На основе запросов информации в феврале и июне 2014 года готовится конкурсная документация на два конкурса:

- Lunar Propulsion and Communications Challenge (до \$1.5 млн за каждый этап + до \$500 тыс. за прогресс при подготовке)
- Deep Space Communications Challenge (до \$1.5 млн + до \$500 тыс. за прогресс при подготовке)

Вывод 6U-кубсатов на отлетную траекторию к Луне – в рамках миссии EM-1. Кубсаты должны сделать минимум один оборот по орбите с периселением >300 км и апоселением <10000 км (для второго конкурса – удалиться на расстояние >4 млн км)

Оценивается максимальный объем корректной информации, переданной за 30 минут и за 28 суток, а также самый поздний полученный 1024-битовый объем корректной информации

Объявленные конкурсы (2)

Google Lunar X Prize:

- Первому частному КА (менее 10% господдержки), успешно прилунившемуся, проехавшему не менее 500 м и передавшему HD видеосигнал – \$20 млн
- Второй приз с теми же условиями – \$10 млн
- Дополнительные призы – еще почти на \$20 млн, в том числе до \$2 млн за прохождение 5 км и такая же сумма – за выживание в течение лунной ночи

Осталось 18 конкурсантов, из них 5 фаворитов. Срок окончания конкурса – 31 декабря 2015 года

Цели возможных миссий

Точки либрации систем Солнце-Земля и Земля-Луна

- Точка ES L1: гелиофизические исследования
- Точки ES L1 и ES L5: прогноз космической погоды
- Точки ES L2 и EM L2: астрофизические наблюдения
- Точки EM L1 и EM L2: связь с лунными базами

Луна

- Создание каталога областей лунной поверхности, содержащих водяной лед

Марс

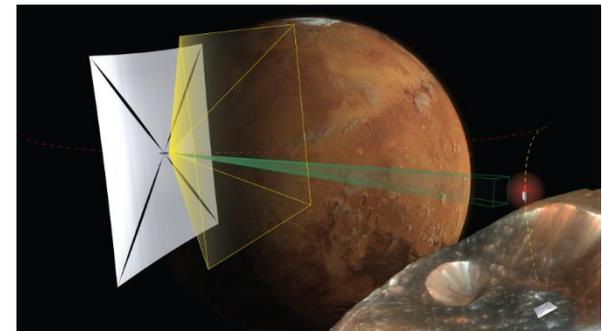
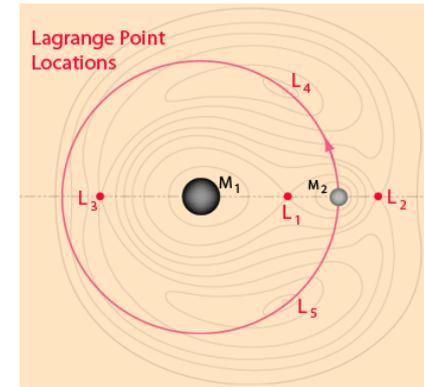
- Исследование полярных ледяных шапок Марса
- Взятие грунта с Фобоса

Астероиды

- Изучение минерального состава астероидов
- Подготовка к захвату астероида на околоземную/окололунную орбиту

Другие цели

- Полет к внешним планетам (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун)
- Выход из Солнечной системы



Credit: R. Staehle

Вывод на отлетную траекторию

- Для вывода на околоземные орбиты используют пусковой механизм на борту МКС или грузовых кораблях, а также на верхних ступенях ракет
- Выведение на отлетную траекторию к Луне, точкам либрации, планетам, астероидам может осуществляться в виде попутной нагрузки (rideshare) к миссиям на ГСО и в дальний космос



Credit: NASA Ames



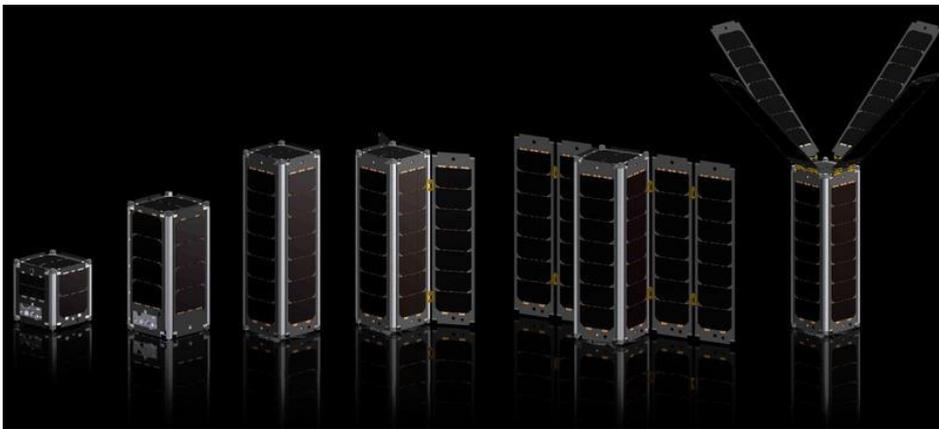
Credit: Tethers Unlimited

- Концепция NanoTHOR: верхние ступени ракет с остающимся у них топливом разгоняют малые КА на тросе. $\Delta V=1-5$ м/с дает КА импульс вплоть до 0.5-1 км/с

Масса-объем-энергия малых КА

Правило 1 кг – 1 л – 1 Вт: КА объемом 1 л (1U) весит примерно 1 кг, а средняя генерируемая мощность равна 1 Вт

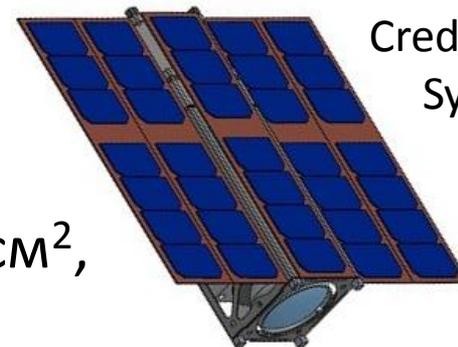
Правило не работает при раскрывающихся солнечных панелях



Credit: Clyde Space

Средняя максимальная мощность, снимаемая с панели площадью 100 см^2 , равна примерно 3 Вт

От солнечных панелей на 3U-кубсате сейчас можно получать до 100 Вт, на 6U-кубсате – до 200 Вт



Credit: MIT Space Systems Lab

Четыре ключевые технологии

1) Связь (передача телеметрии и научных данных)

- Высокоскоростной лазерный канал связи
- Остронаправленная разворачиваемая антенна

2) Адаптация к тяжелым внешним условиям

- Защита приборов и систем от высоких доз радиации
- Адаптация к низким ночным/полярным температурам (при посадке на поверхность небесного тела)

3) Передвижение в пространстве

- Двигатели малой тяги
- Солнечный парус

4) Навигация

- Автономная абсолютная и относительная навигация
- Прецизионная навигация в условиях хаотической динамики

Дальняя космическая связь для малых межпланетных КА

1) Высокоскоростной лазерный канал связи

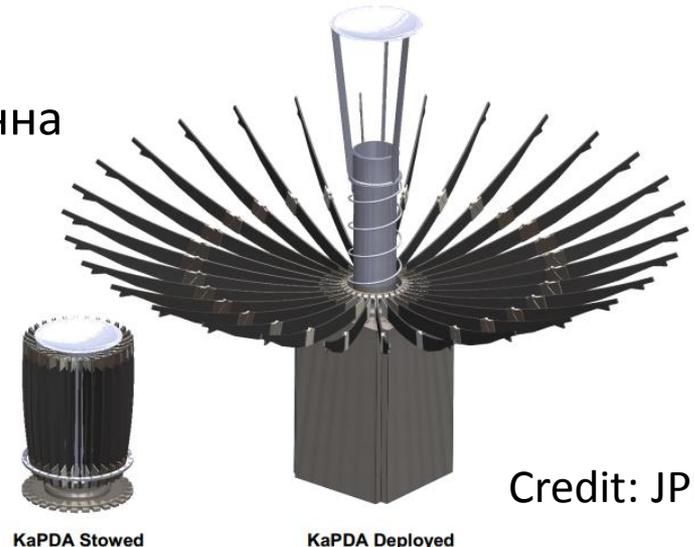
- Объем блока – 1U (10 см x 10 см x 10 см)
- Масса блока – 3 кг
- Питание – 5 Вт (для $r=400$ тыс. км)
- Точность наведения – 10-30 угл. мин.
- Пропускная способность – 150-200 Мбит/с



Credit: JPL

2) Остронаправленная разворачиваемая антенна

- Объем блока – 1.5U (1500 см³)
- Диаметр антенны – 0.5 м
- Питание – 1 Вт (для $r=380$ тыс. км)
- Пропускная способность – 200 Мбит/с
- Диапазон – K_a (34 ГГц)



Credit: JPL

Радиационная защита малых КА

Два источника высокоэнергетичных заряженных частиц:

- Солнечный ветер
- Космические лучи

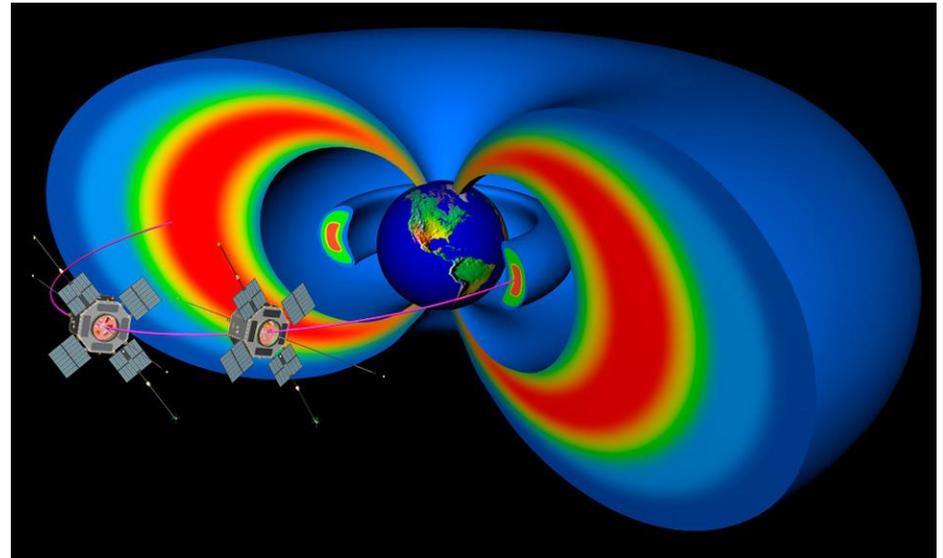
Кроме того, при разгоне с низкой или геопереходной (GTO) орбиты представляют опасность два пояса Ван-Аллена. Внутренний пояс (2-5 тыс. км) состоит главным образом из протонов >100 МэВ, внешний

(12-40 тыс. км) – из электронов

Космические лучи вызывают разовые

эффекты (single event effects) в бортовой электронике (обработка эффектов – программно: перезапись информации, перезагрузка)

Алюминиевый «щит» толщиной 3-8 мм снижает суммарную дозу радиации до приемлемых 10-20 крад



Credit: John Hopkins University Applied
Physics Laboratory

Двигатели малой тяги

1) Ионные двигатели:

- $V < 1.25U$, $m < 1.5$ кг, $N = 10-100$ Вт
- $F = 0.1-2.5$ мН, $I_{sp} = 1500-3000$ с

2) Плазменные двигатели:

- $V < 1U$, $m < 1$ кг, $N = 3-100$ Вт
- $F = 0.3-10$ мН, $I_{sp} = 500-1000$ с

3) Электроспрейные двигатели:

- $V < 0.1U$, $m < 0.5$ кг, $N = 1-100$ Вт
- $F = 0.05-5$ мН, $I_{sp} > 2500$ с

4) Электролитические двигатели:

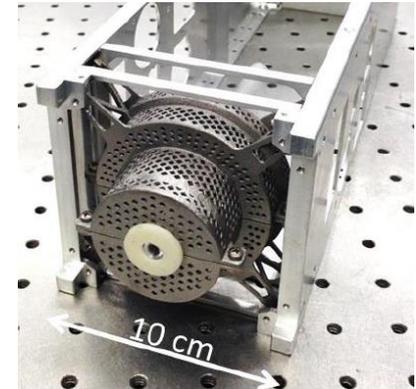
- $V < 1U$, $m < 1$ кг, $N = 0.1-10$ Вт
- $F = 10-1000$ мН, $I_{sp} = 300-350$ с

5) Двигатели на холодном газе:

- $V < 1U$, $m < 1$ кг, $N = 0.1-30$ Вт
- $F = 10-3000$ мН, $I_{sp} = 50-150$ с



Credit: Busek



Credit: University of Michigan PEP Lab



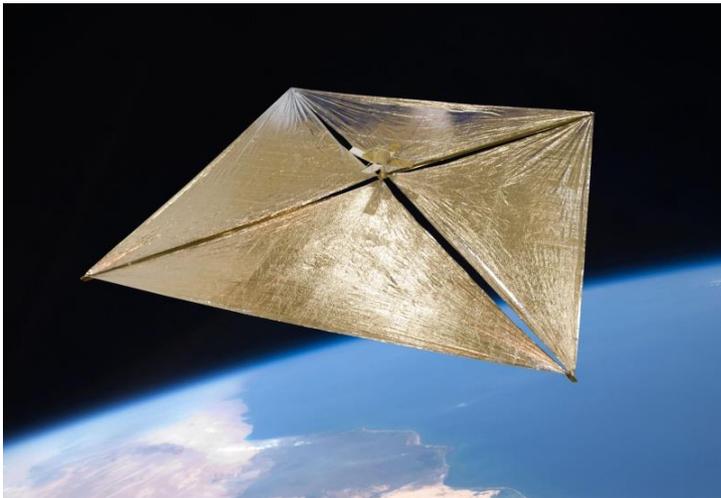
Credit: MIT Space Propulsion Lab



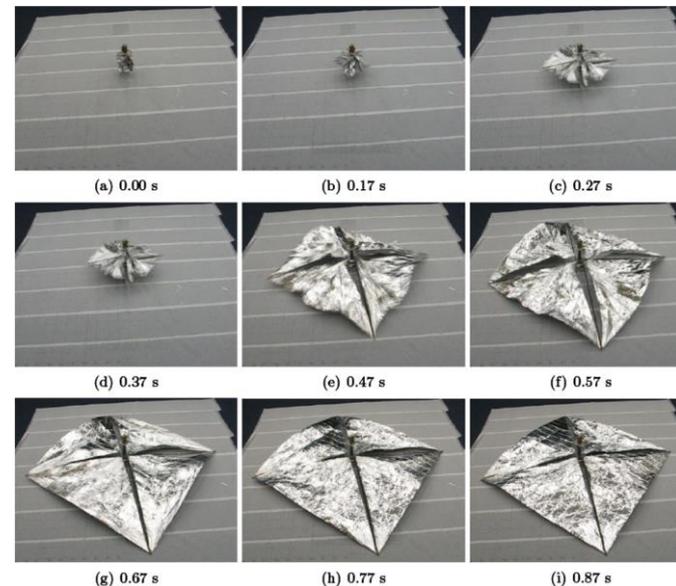
Credit: Tethers Unlimited

Солнечный парус

- Мембрана из майлара или каптона покрывается алюминиевой пленкой
- Парус площадью 10-100 м² создает тягу 0.05-0.5 мН (на расстоянии 1 AU)
- Успешные миссии: IKAROS (2010), NanoSail-D2 (2011)
- Планируемые в ближайшее время миссии: CubeSail (2014), DeOrbitSail (2014), LightSail-1 (2015)



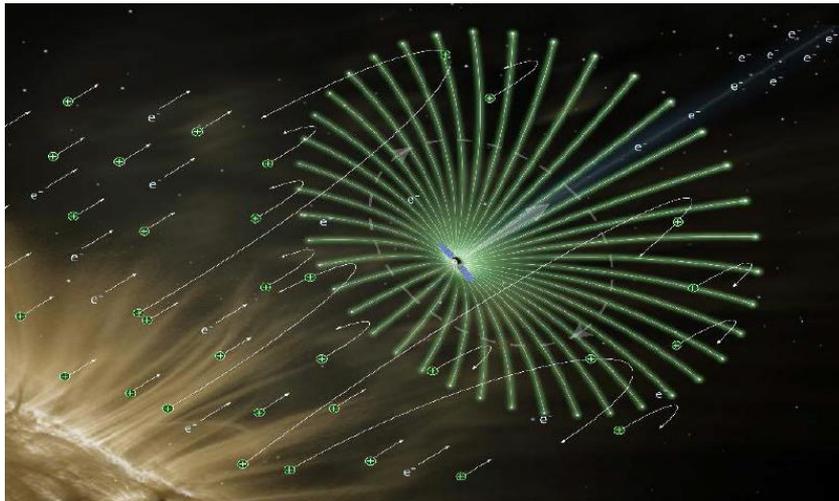
Credit: NASA



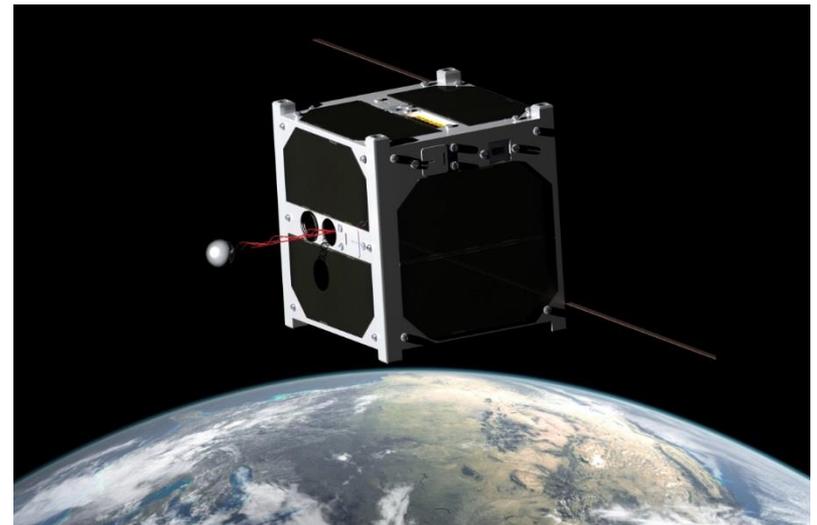
Credit: Surrey Space Centre

Другие способы передвижения

- Концепция E-Sail: заряженные частицы солнечного ветра передают импульс пучку длинных тросов, заряженных с тем же знаком
- Первый КА – эстонский 1U-кубсат ESTCube-1 – с 10-метровым тросом запущен в мае 2013 года и предназначен для измерения силы тяги
- Следующий КА – финский 3U-кубсат Aalto-1 – с тросом длиной 100 м будет выведен на орбиту в 2014 году



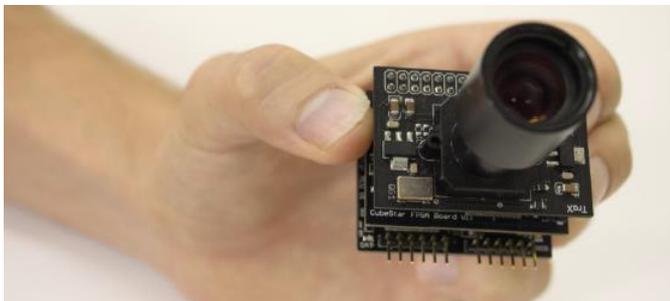
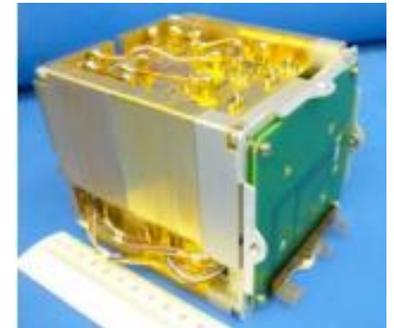
Credit: P. Janhunen



Credit: University of Tartu

Автономная навигация

- GPS Enhanced Onboard Navigation System (GEONS) – до 322 тыс. км (точки либрации EM L1), далее – автономная навигация
- Определение ориентации – по показаниям звездного датчика, орбиты – по измерениям наклонной дальности и радиальной скорости. Для группового полета также используют измерения межспутниковой дальности и радиальной скорости



Credit: Electronic Systems Lab,
Stellenbosch University

- Звездный датчик: Credit: JPL/NASA
потребляемая мощность 0.35 Вт,
объем <0.25U, масса <0.1 кг
- Транспондер Iris: объем 0.5U, масса 0.5 кг, потребляемая мощность 8 Вт

Заключение

- Достигнутый на сегодня уровень всех ключевых для межпланетного полета малых КА технологий позволяет осуществить первые тестовые миссии к Луне и точкам либрации системы Земля-Луна
- Наиболее перспективной платформой являются 3U- и 6U-кубсаты: унифицированная элементная база снижает время и стоимость разработки КА
- Регулярные конференции, семинары, воркшопы по теме применения малых КА в межпланетных полетах, а также конкурсы с большими призами способствуют быстрому прогрессу технологий