

Парусный модуль «Одуванчик» для управления орбитой наноспутников

Авторы:

Валерия Мельникова , Александр Боровиков, Максим Корецкий

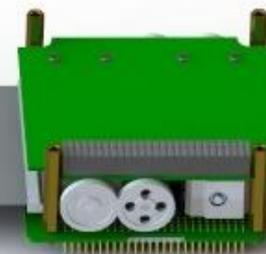
Юлия Смирнова, Екатерина Тимакова

Руководители:

Степан Тененбаум, Дмитрий Рачкин, Николай Неровный, Олег Коцур



Проблема

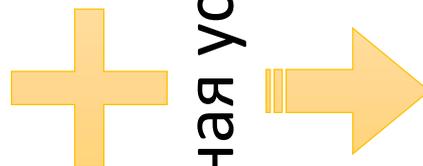


Все кубсаты летают
рядом как одна
материальная точка!

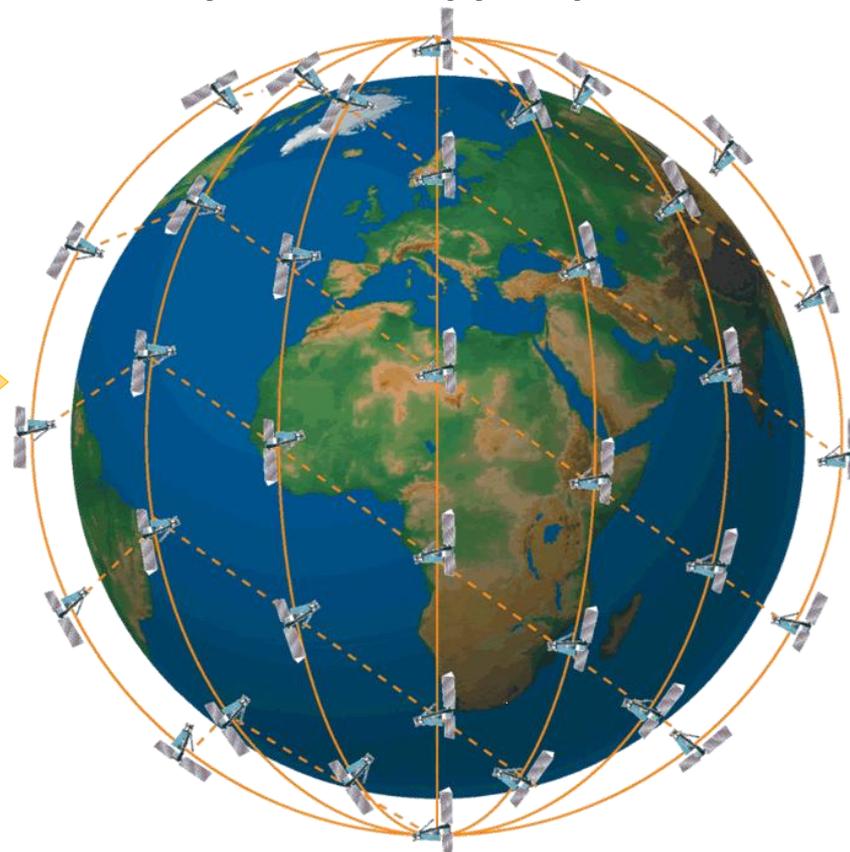


нужна

Двигательная установка



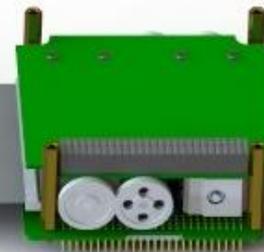
Спутниковая группировка



При кластерном
запуске в качестве
попутной нагрузки

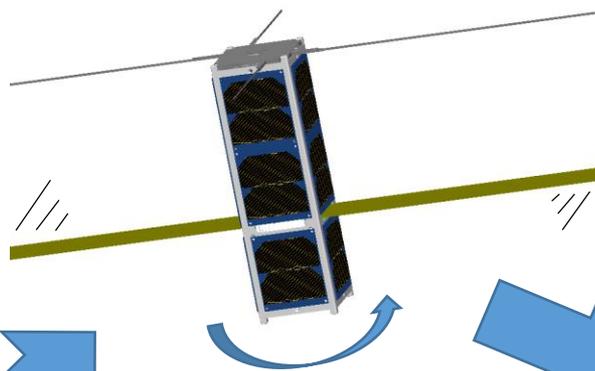
Аппараты расходятся по разным,
необходимым для работы орбитам

Наше решение

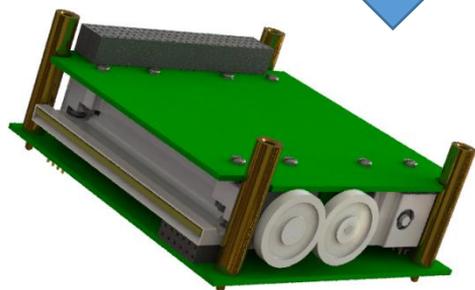


Двухлопастной роторный
солнечный парус

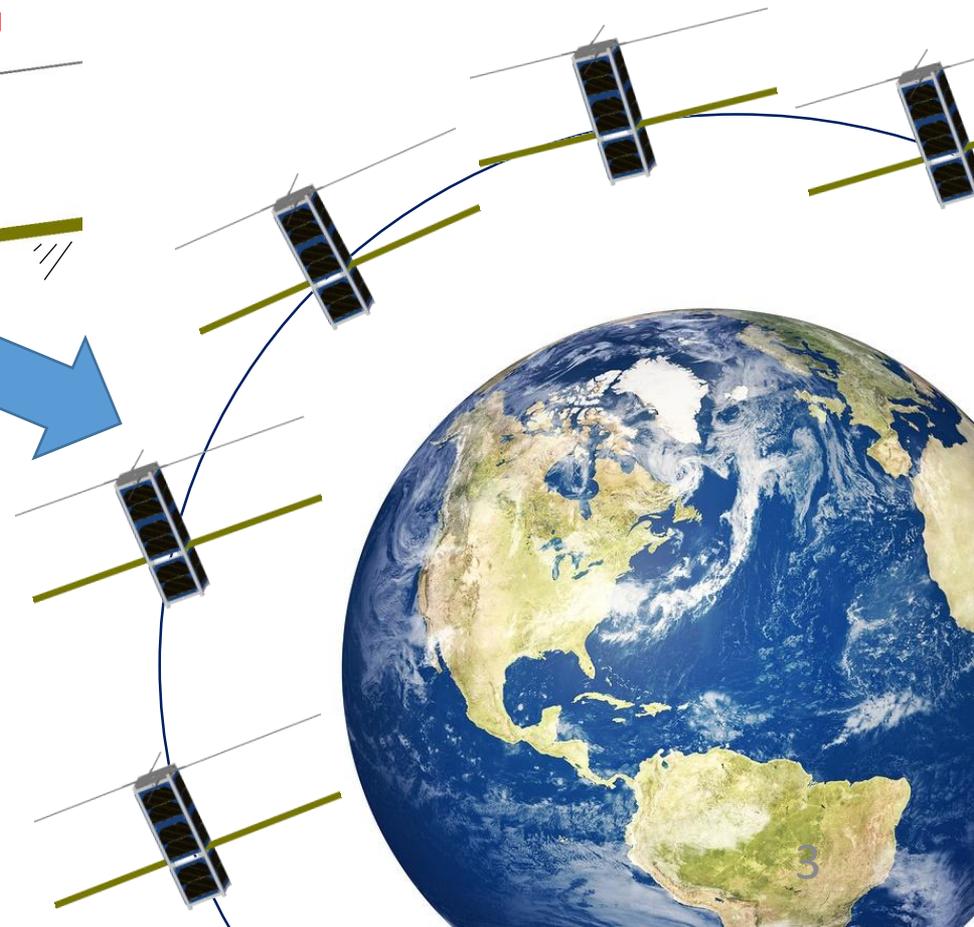
Спутниковая группировка



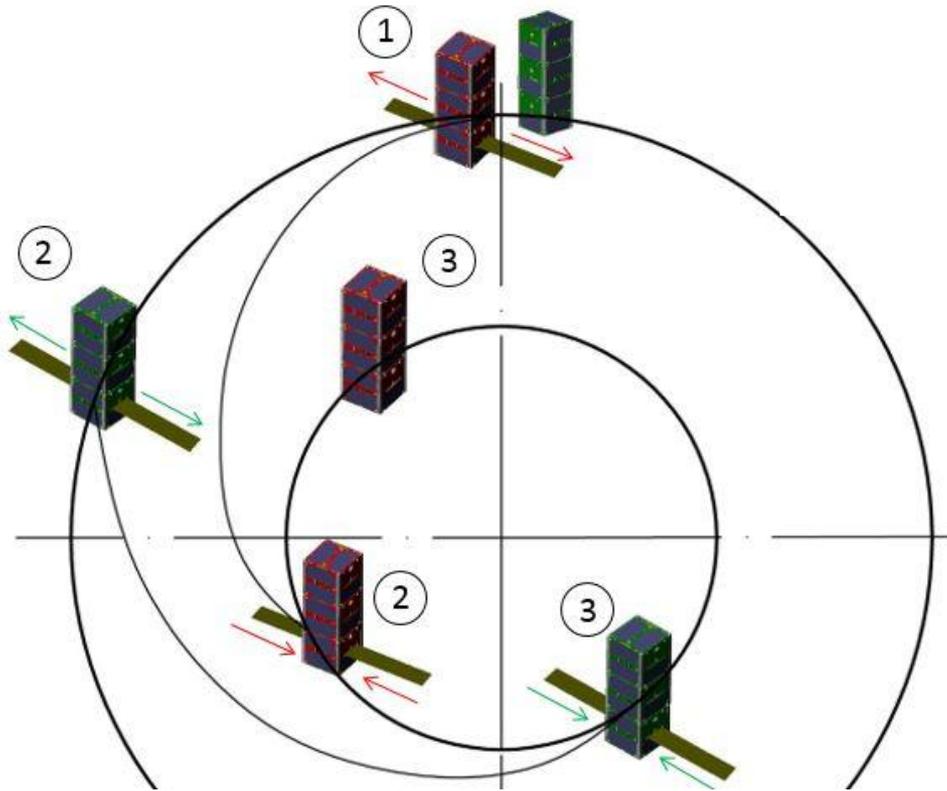
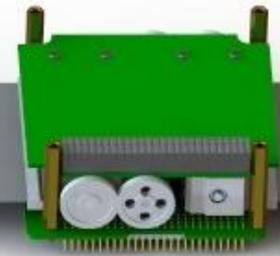
Аппараты с
модулем
«Одуванчик»



Модуль «Одуванчик»



Принцип работы



Алгоритм построения спутниковой группировки

- ① - номер шага
- ↔ - раскрытие паруса
- ← - закрытие паруса

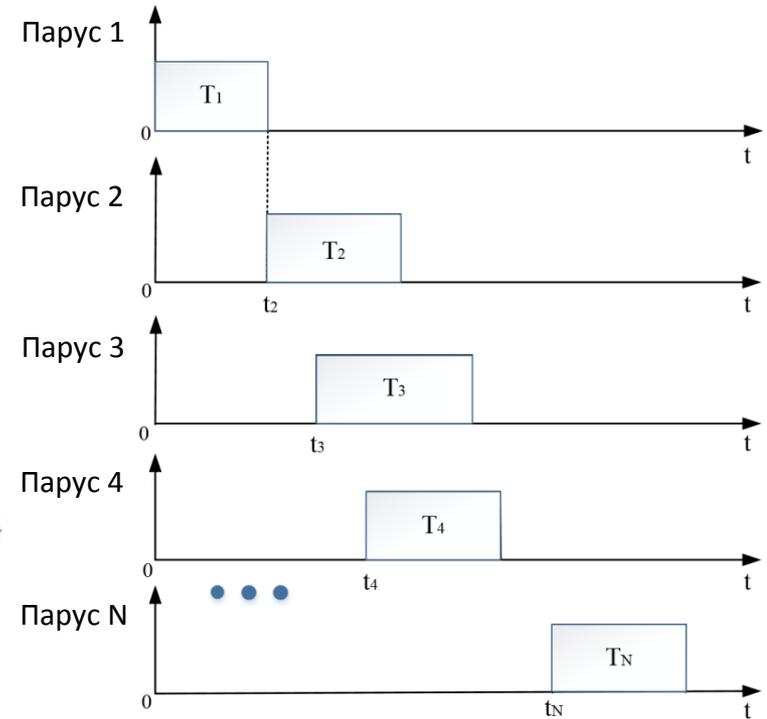
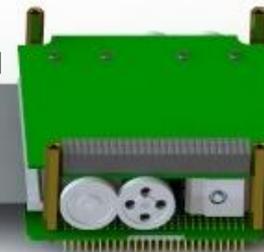


Диаграмма работы солнечных парусов

- N – число аппаратов
- t – момент начала раскрытия паруса
- T – период времени, в течение которого парус раскрыт

ПО для моделирования разработано нашей командой

Баллистические расчеты



$$\mathbf{X}''(t) = \mathbf{F}/m$$

где \mathbf{X} – вектор координат; m – масса кубсата;

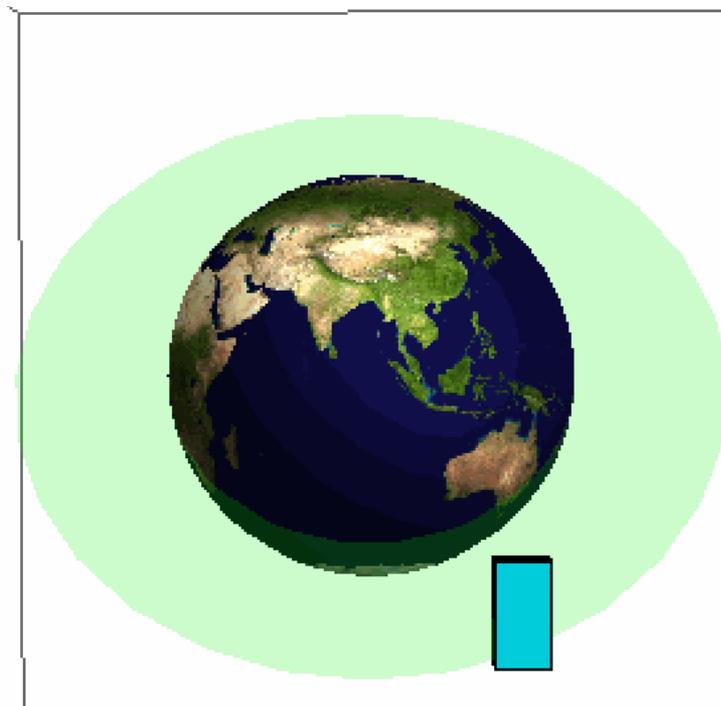
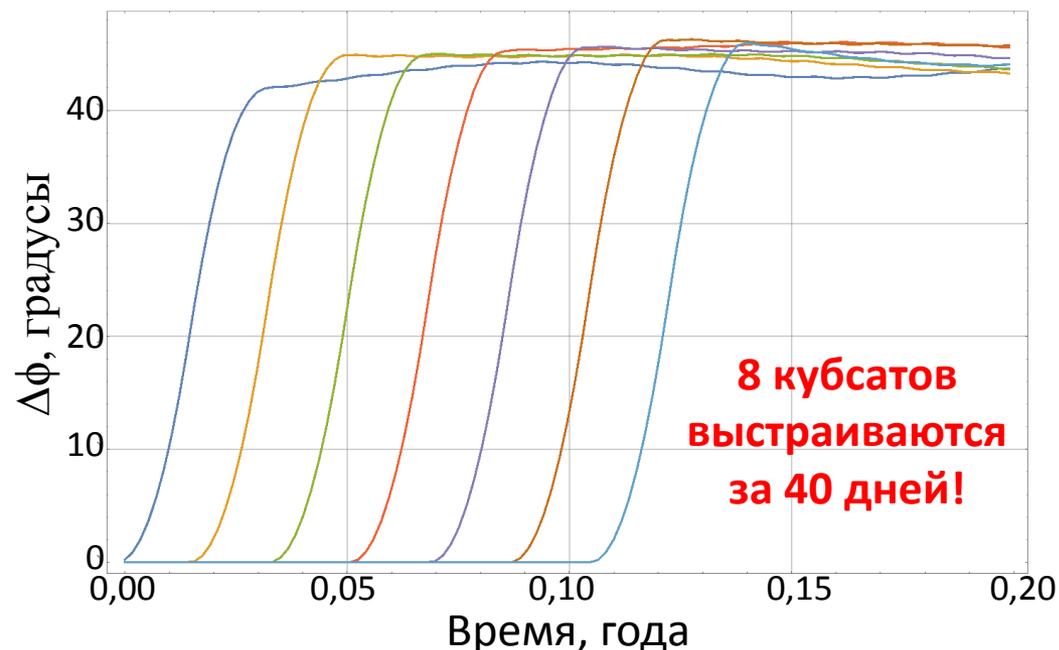
$\mathbf{F} = \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_a + \mathbf{F}_s$ – вектор силы, состоящий из:

\mathbf{F}_g – сила притяжения Земли (с учетом сжатия Земли - 2 зональная гармоника),

\mathbf{F}_a – сила сопротивления атмосферы

(ГОСТ Р 25645.166-2004, $F_{10,7} = 100$ сеп),

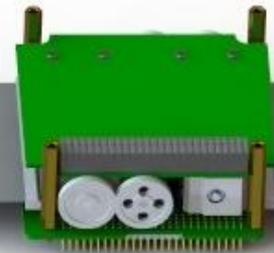
\mathbf{F}_s – сила солнечного давления.



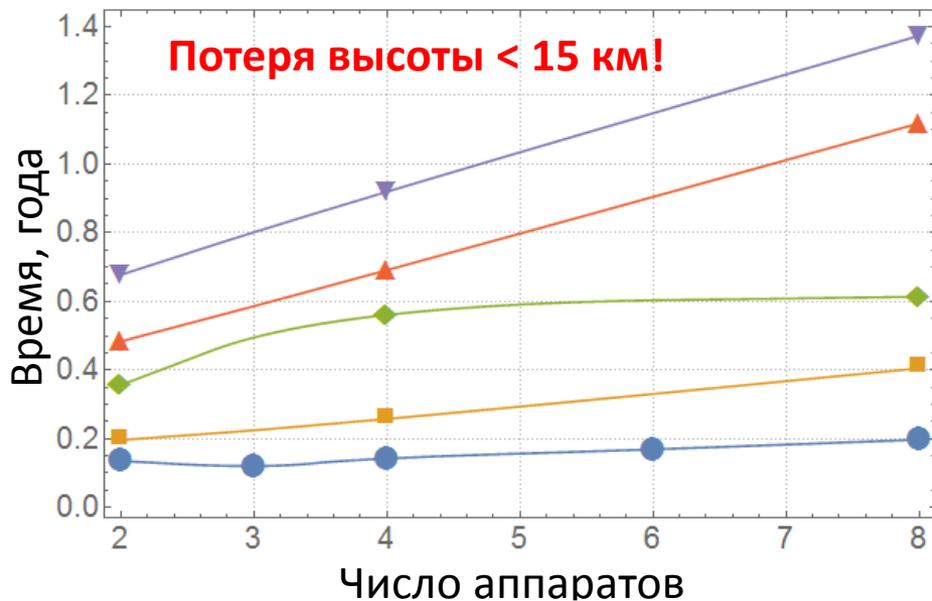
Зависимость от времени
углов между 8 аппаратами с
высотой орбиты 450 км и
площадью паруса 1 м²

(процессорное время – 12 часов)

Баллистические расчеты

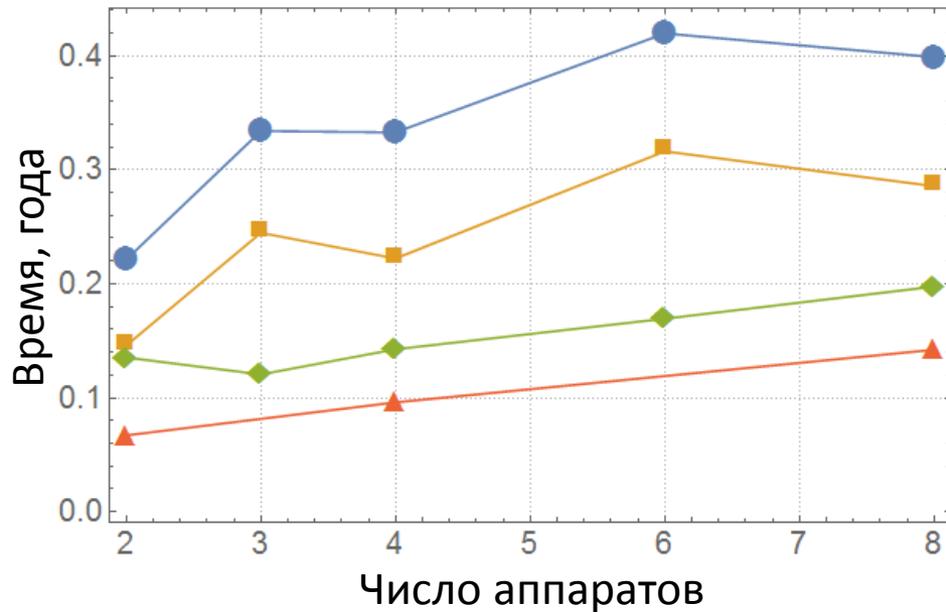


Влияние высоты орбиты
на время разведения
(площадь паруса – $0,5 \text{ м}^2$)



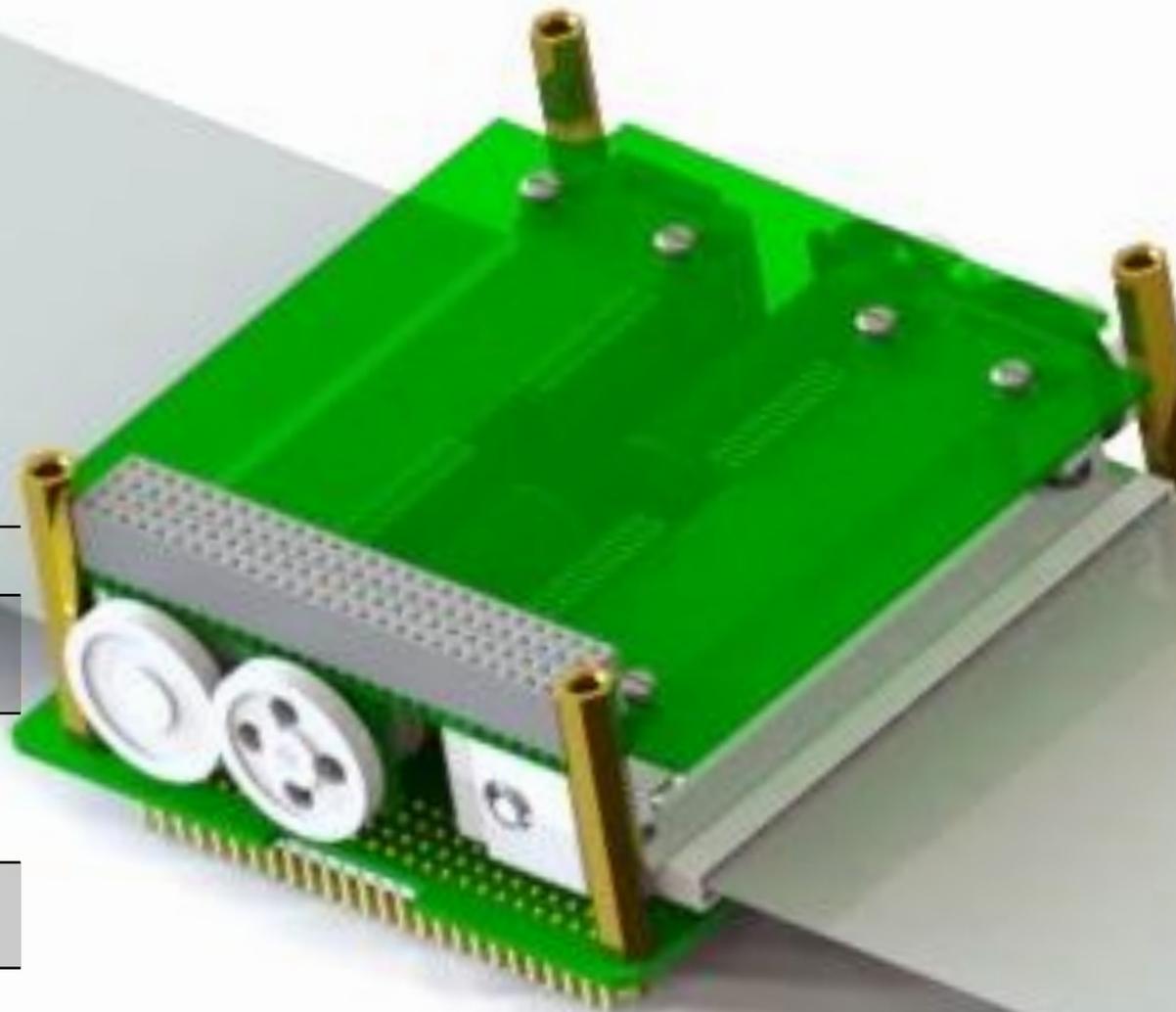
Высота:
● 450 км ■ 500 км ◆ 550 км ▲ 600 км ▼ 650 км

Влияние площади паруса
на время разведения
(высота – 450 км)



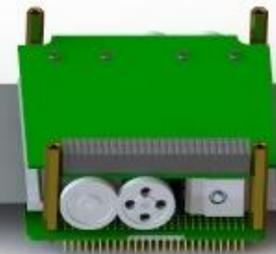
Площадь паруса:
● 0.135 м^2 ■ 0.26 м^2 ◆ 0.51 м^2 ▲ 1.01 м^2

Технические характеристики

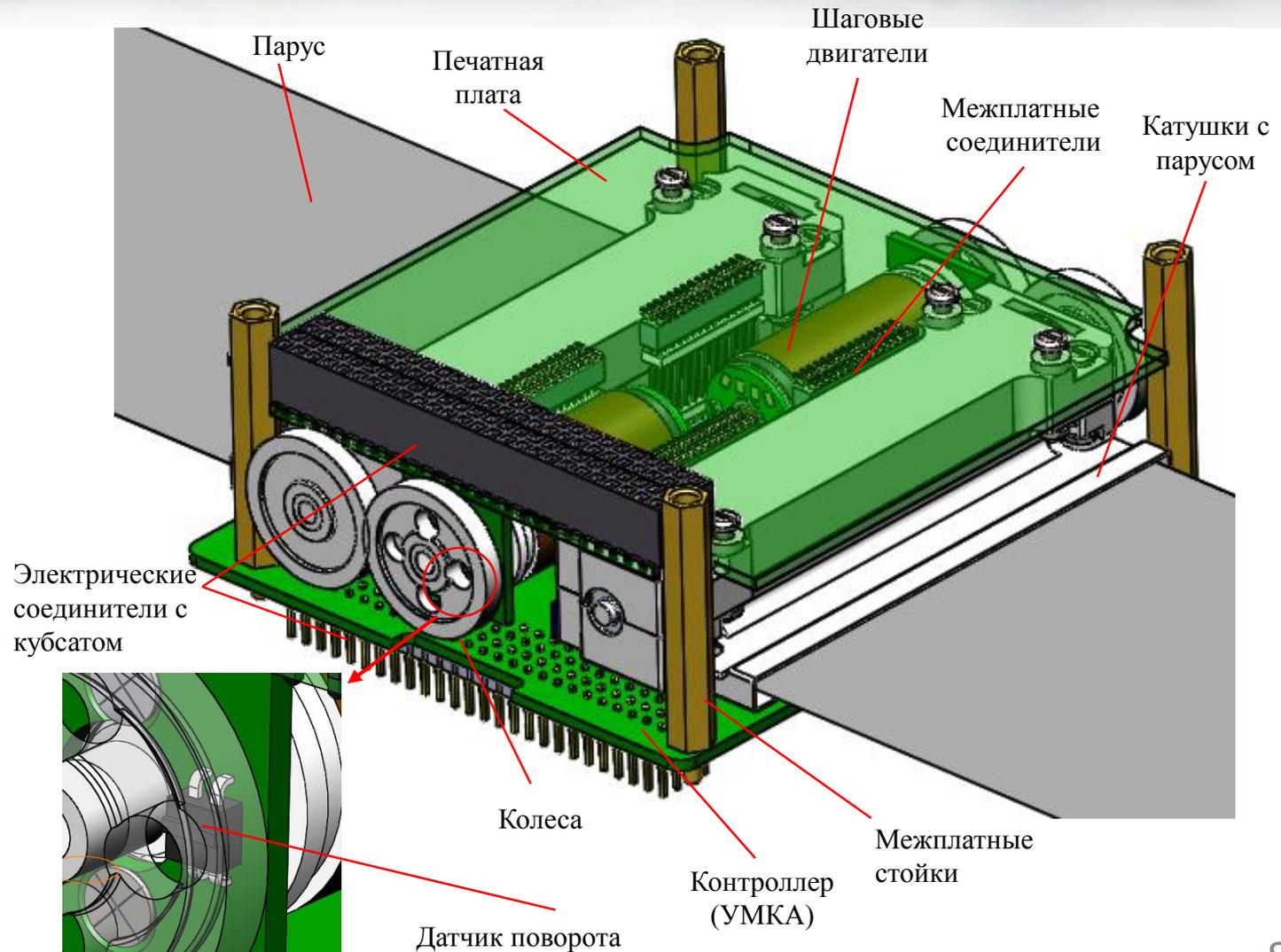


Масса, кг	0,30
Размеры, мм (парус закрыт)	90 x 96 x 38
Максимальная длина паруса, м (в 2-х катушках)	20
Максимальная ширина паруса, мм	76
Среднее энергопотребление	0
Энергопотребление во время открытия/закрытия паруса	1,2 Вт (в течении 15 мин)

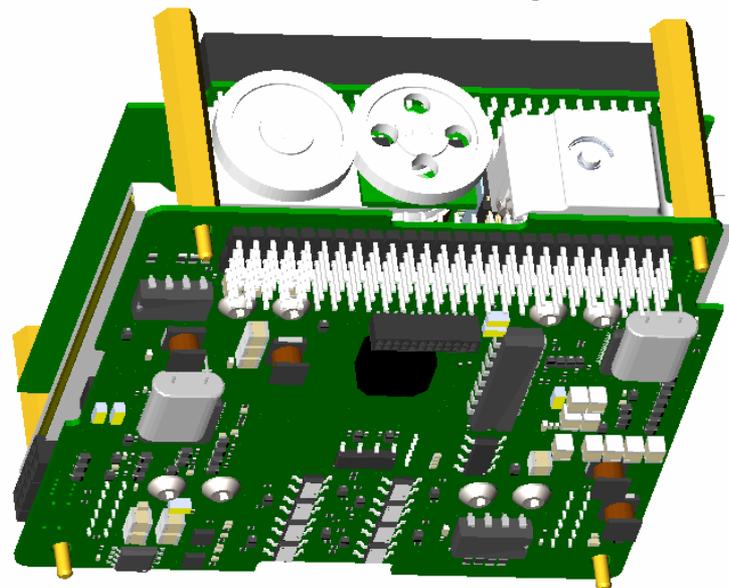
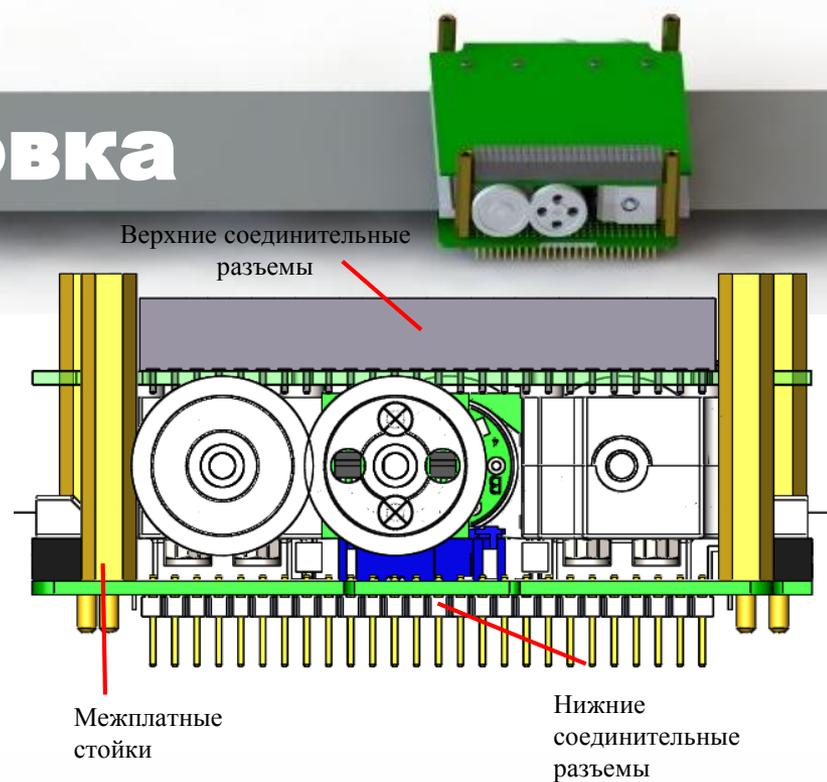
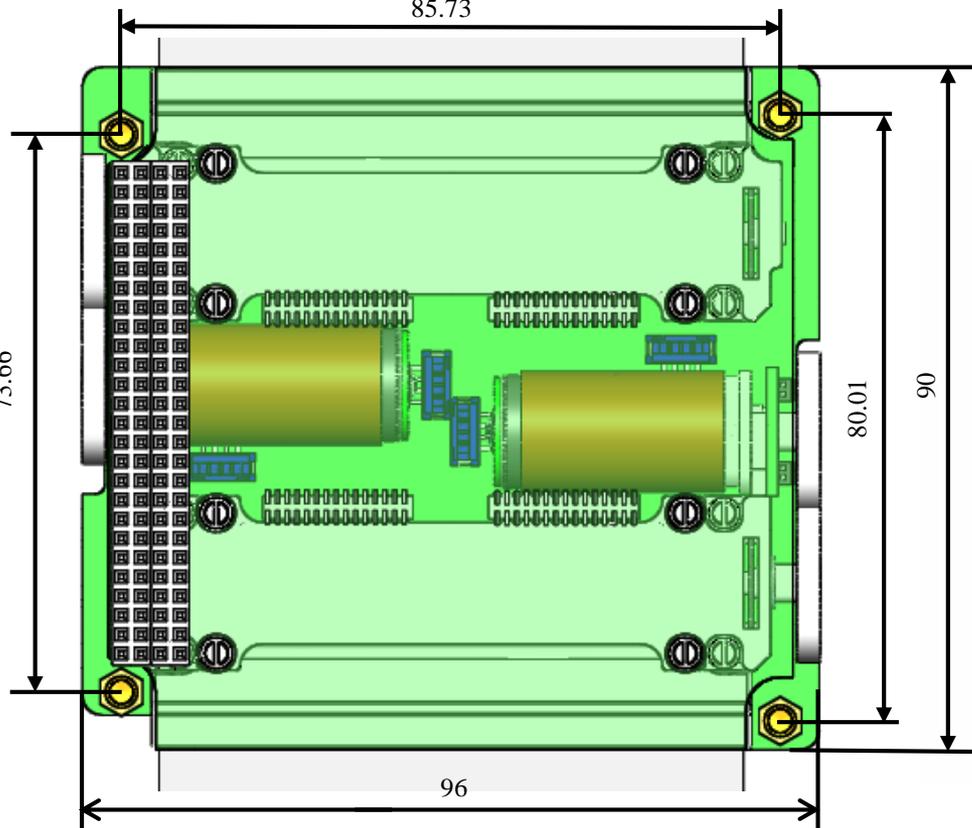
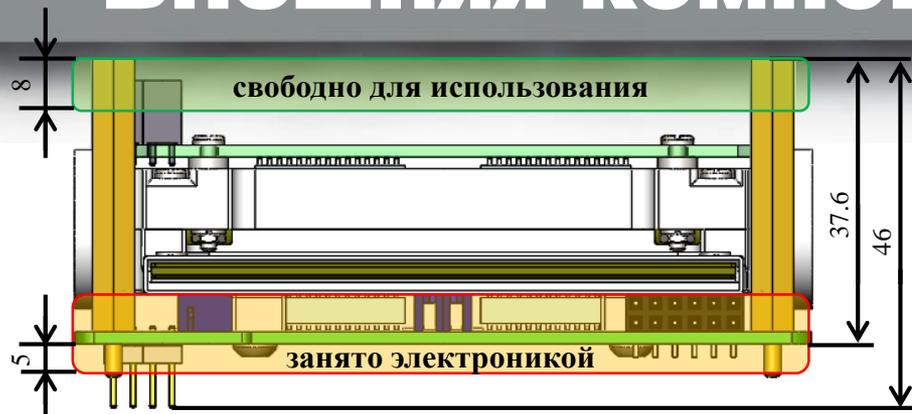
Внутренняя компоновка



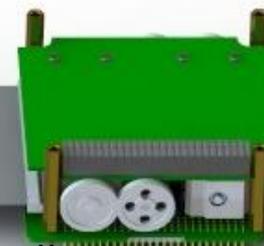
- Одуванчик
- Катушки с парусом
- Драйверы двигателей
- Контроллер
- Конструкция



Внешняя компоновка



Расчет на прочность

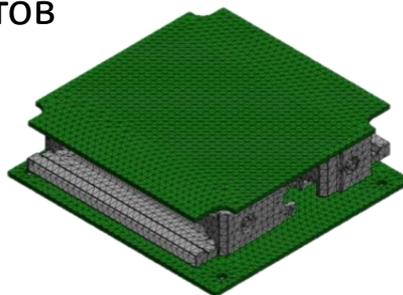


Программа расчета: SolidWorks Simulation

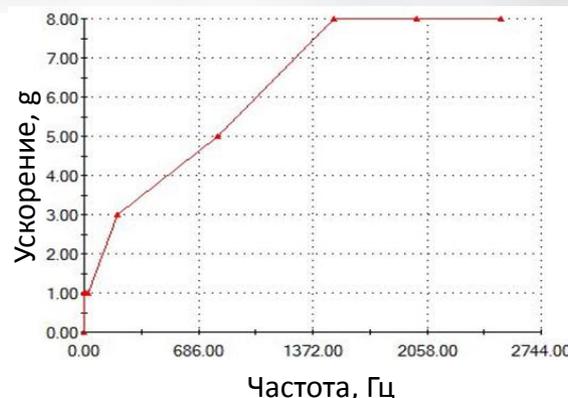
Статическая нагрузка: ускорение 10 g

КЭ сетка: 42908 Tet10 элементов

Запас прочности: > 4.0



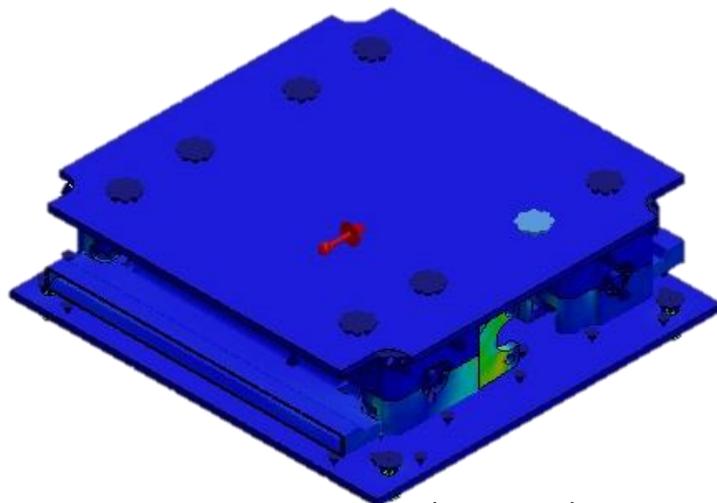
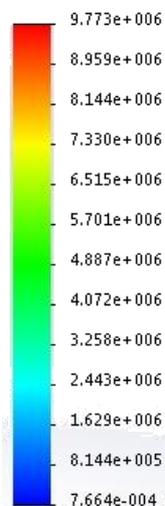
Профиль динамической нагрузки



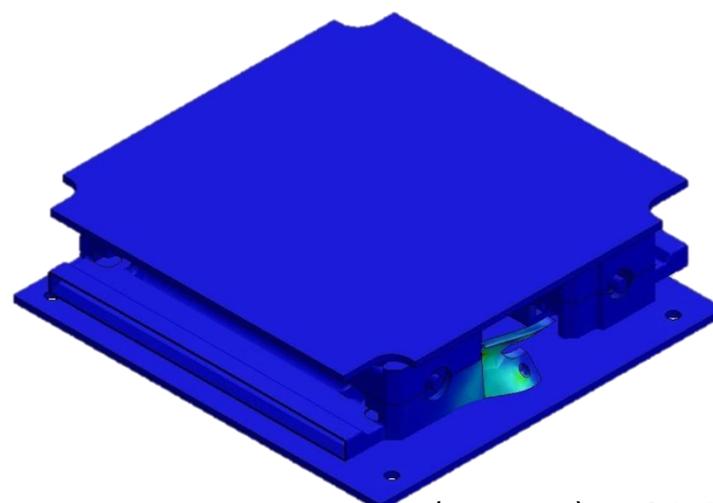
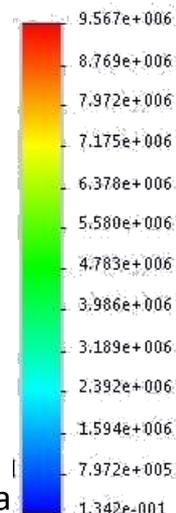
Результаты статического расчета:

Результаты динамического расчета (Q=10):

von Mises (N/m²)



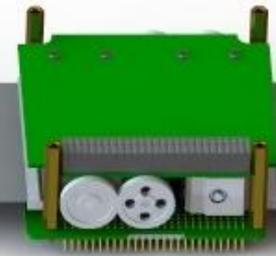
von Mises (N/m²)



Максимальное напряжение (по оси Z) ≈ 10 МПа Максимальное напряжение (по оси X) ≈ 10 МПа

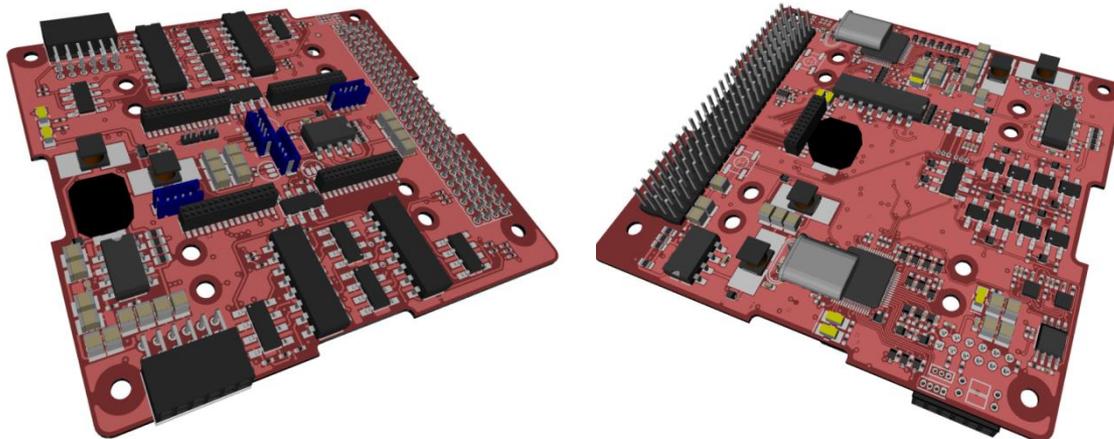
Модуль выдерживает статические и динамические нагрузки с запасом прочности >4 10

Контроллер

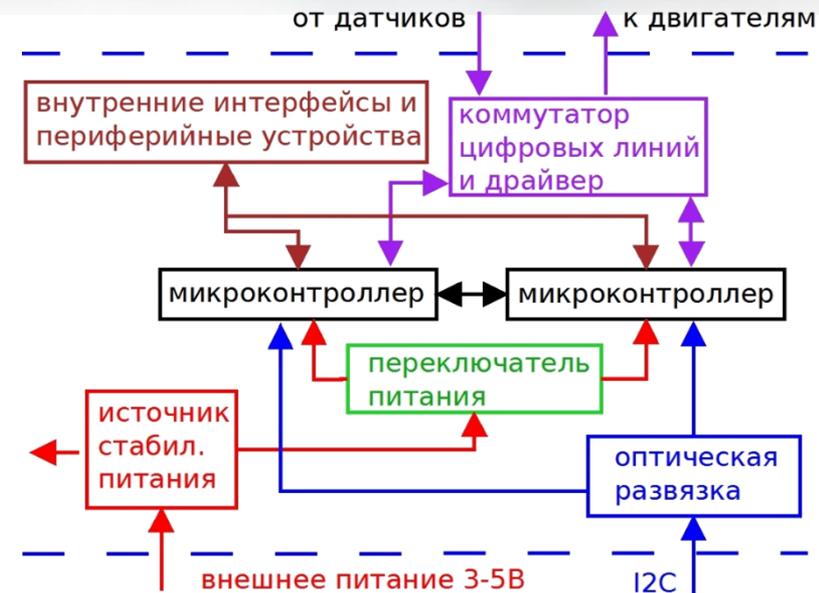


Решаемые задачи :

- Связь с материнским аппаратом
- Обеспечение стабилизированного питания конечных устройств (3.3; 5.0 V)
- Управление конечными устройствами
- Работа с датчиками
- Сбор и передача данных телеметрии



Печатный узел, разработанный нашей командой

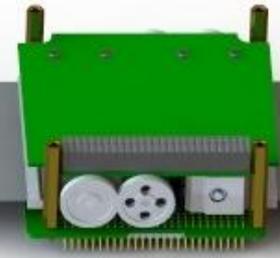


Архитектура

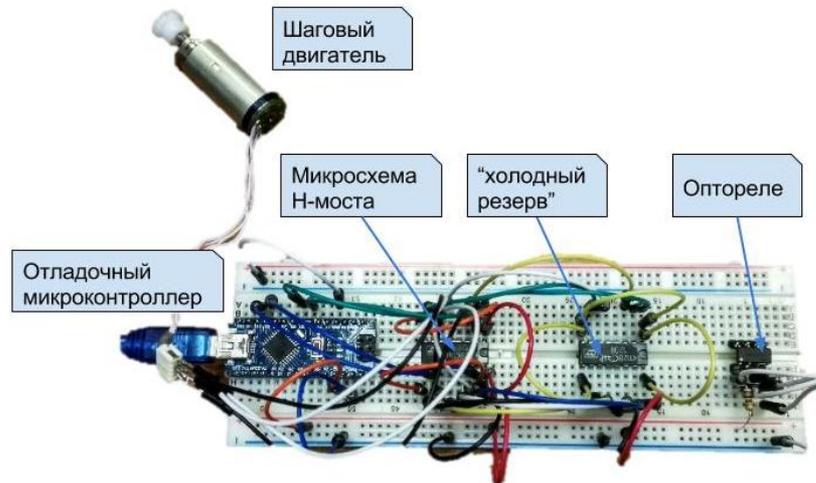
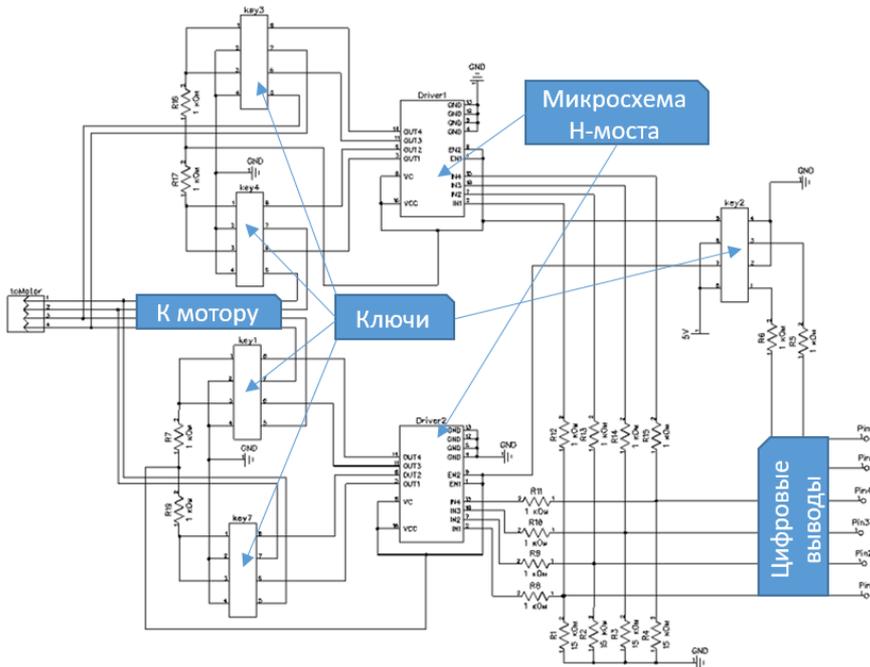
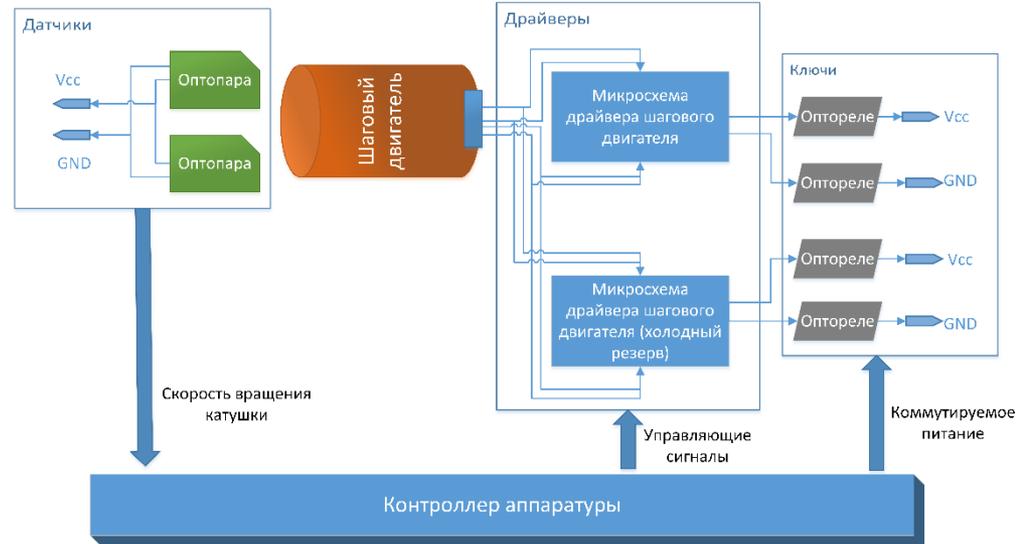
Особенности:

- Нормальное функционирование при одном произвольном необратимом отказе
- Использование преимущественно Российских компонентов

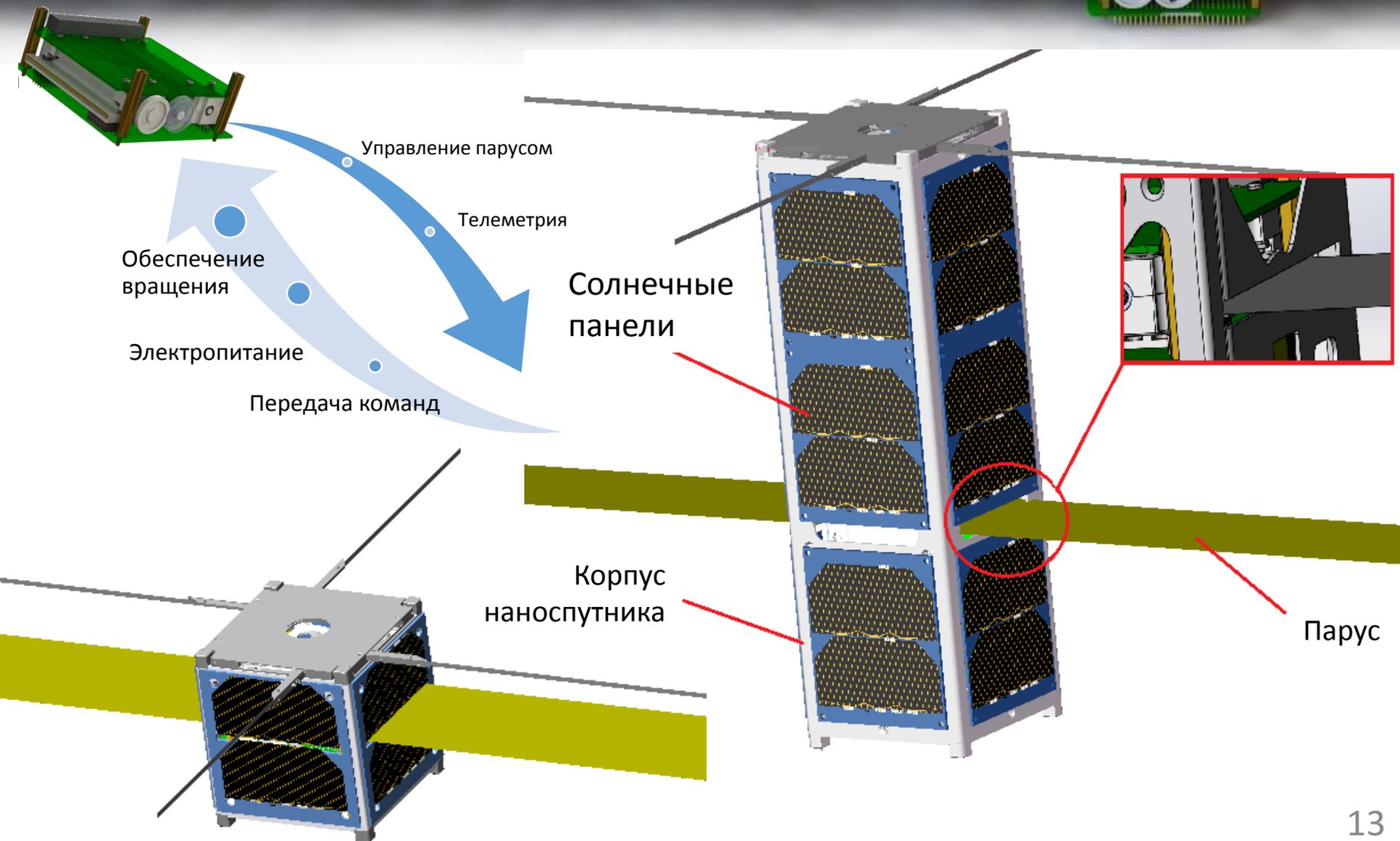
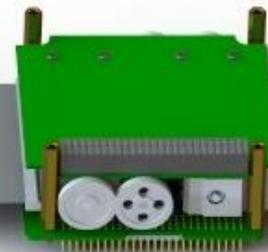
Драйверы двигателей



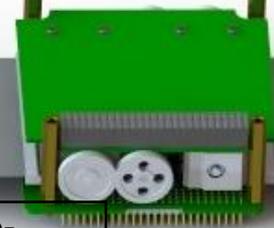
- Шаговые двигатели используются для открытия и закрытия паруса
- Двигатели управляются микросхемой российского производства с резервированием
- Датчики вращения контролируют работоспособность микросхемы

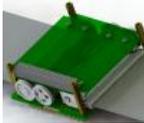


Интеграция в кубсат



Аналоги и наши преимущества



Критерии сравнения	Модуль «Одуванчик» 	ClydeSpace Pulsed Plasma Thruster 	Micro-space micropropulsion system 
Технология	Тонкопленочный парус	Импульсный эрд	Двигатель на холодном газе
Масса	0.30 кг	0.28 кг	0.30 кг
Энергопотребление	Среднее: 0 Во время открытия паруса: 1,2 Вт в теч. 15 мин	2.7 Вт	2 Вт
Полный импульс	-	42 Н*с	40 Н*с
Приращение скорости (для кубсата 3U)	-	10.5 м/с	10.0 м/с
Особенности управления	Непрерывная микро «тяга»	Импульсы 40×10^{-6} Н*С с частотой 1Гц	Непрерывная тяга
Стоимость	3 k\$	15 k\$	≈ 90 k\$

Способность сводить аппараты в полностью пассивном состоянии

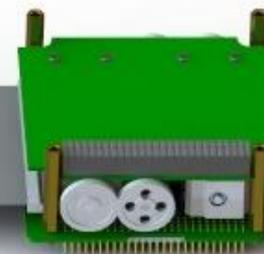
Более того:

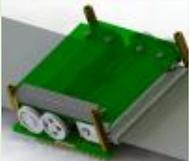
- Отсутствие расходуемых материалов (топливо);
- Простота конструкции и поэтому более высокая надежность;
- Использование преимущественно Российской электроники;
- Долгосрочные преимущества (технология солнечного паруса).

Низкое энергопотребление

Низкая стоимость по сравнению с двигательными установками

Экономическая выгода



Часть стоимости	Модуль «Одуванчик» 	ClydeSpace Pulsed Plasma Thruster 	Microspace micropropulsion system 
Стоимость устройства	3 k\$	15 k\$	90 k\$
Время фазирования	0.18 года	0.055 года	≈ 0
Стоимость потери времени на построение	11,8 k\$ ¹⁾	3,6 k\$	0 k\$
Суммарная стоимость:	14,8 k\$	18,6 k\$	90 k\$
Выгода	75,2 k\$ ¹⁾	71,4 k\$	0 k\$

Тип спутника	CubeSat 3U
Масса спутника	4 кг
Питание	10 Вт
Число спутников в группировке	4
Орбита	Солнечно-синхронная, высота 500 км
Размещение спутников на орбите	В плоскости орбиты с фазовыми углами: 0°, 90°, 180°, 270°
Время жизни	5 лет
Тип запуска	Попутный запуск

$$C_{\text{TIME}} = (C_{\text{SAT}} + C_{\text{launch}}) / T_{\text{LIFE}}$$

$C_{\text{SAT}} = 200\text{k\$}$ – стоимость разработки и изготовления устройства (оценка экспертов МГТУ)

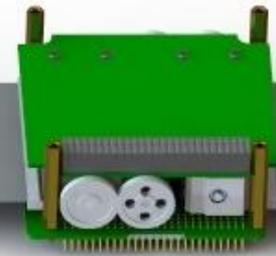
$C_{\text{launch}} = 130\text{k\$}$ - стоимость запуска (РН «Днепр»)

T_{LIFE} – время жизни кубсата

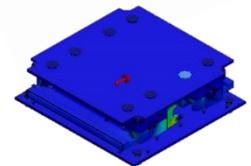
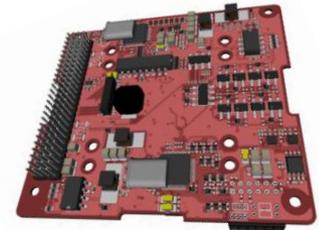
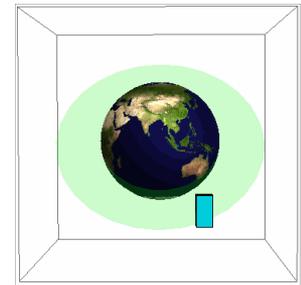
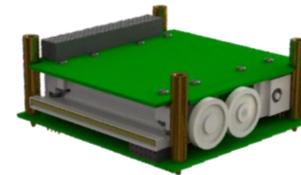
1) Посчитано для времени фазирования, реальные потери времени можно снизить до 1-2 недели (только на время развертывания солнечного паруса)

Выгода рассчитана для наиболее пессимистичного сценария

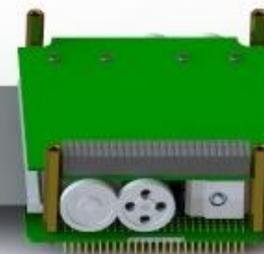
Выводы



- Проведенная работа показала выполнимость и технологическую конкурентоспособность применения технологии солнечного паруса
- Разработаны алгоритм и математическая модель для баллистических расчетов
- Создан встраиваемый в кубсаты модуль «Одуванчик», который осуществляет:
 - Построение группировок
 - Свод с орбиты отслуживших наноспутников
- Доказано, что модуль выдерживает статические и динамические нагрузки при запуске на типовом ракете-носителе
- Экономические расчеты показали, что выбранное решение проблемы построения орбитальных группировок конкурентно способно



Перспективы



Мобильная
связь



Мониторинг
Земли в
реальном
времени

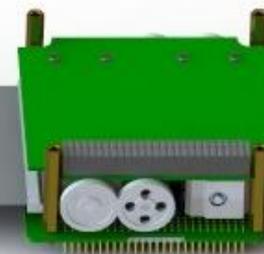
Наблюдение за
«космической
погодой»

модуль
«Одуванчик»

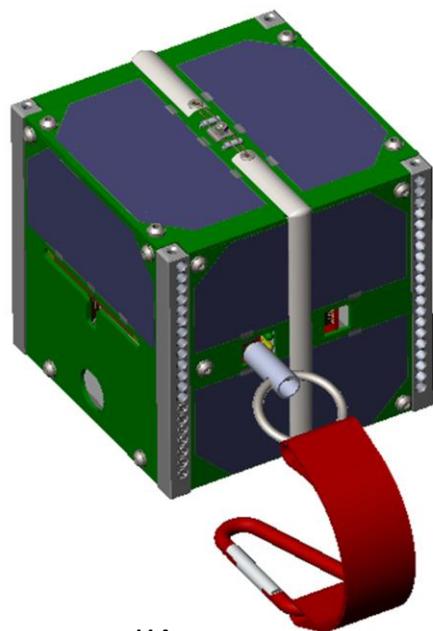


- Проведение испытаний на макете
- Проведение летных испытаний
- Поиск возможности запуска и его реализации через 1 год

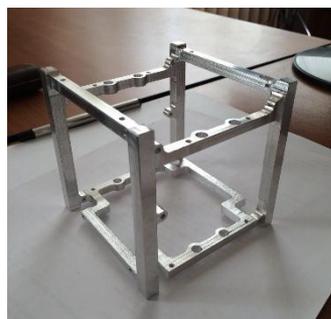
Отработка технологии



- Технология двухлопастной тонкопленочной конструкции разработана и готовится к отработке в космосе, в рамках космического эксперимента «Парус-МГТУ» который будет проведён в 2018 году на Международной космической станции.



3D модель КА для развёртывания конструкции



Корпус КА



Пленка паруса



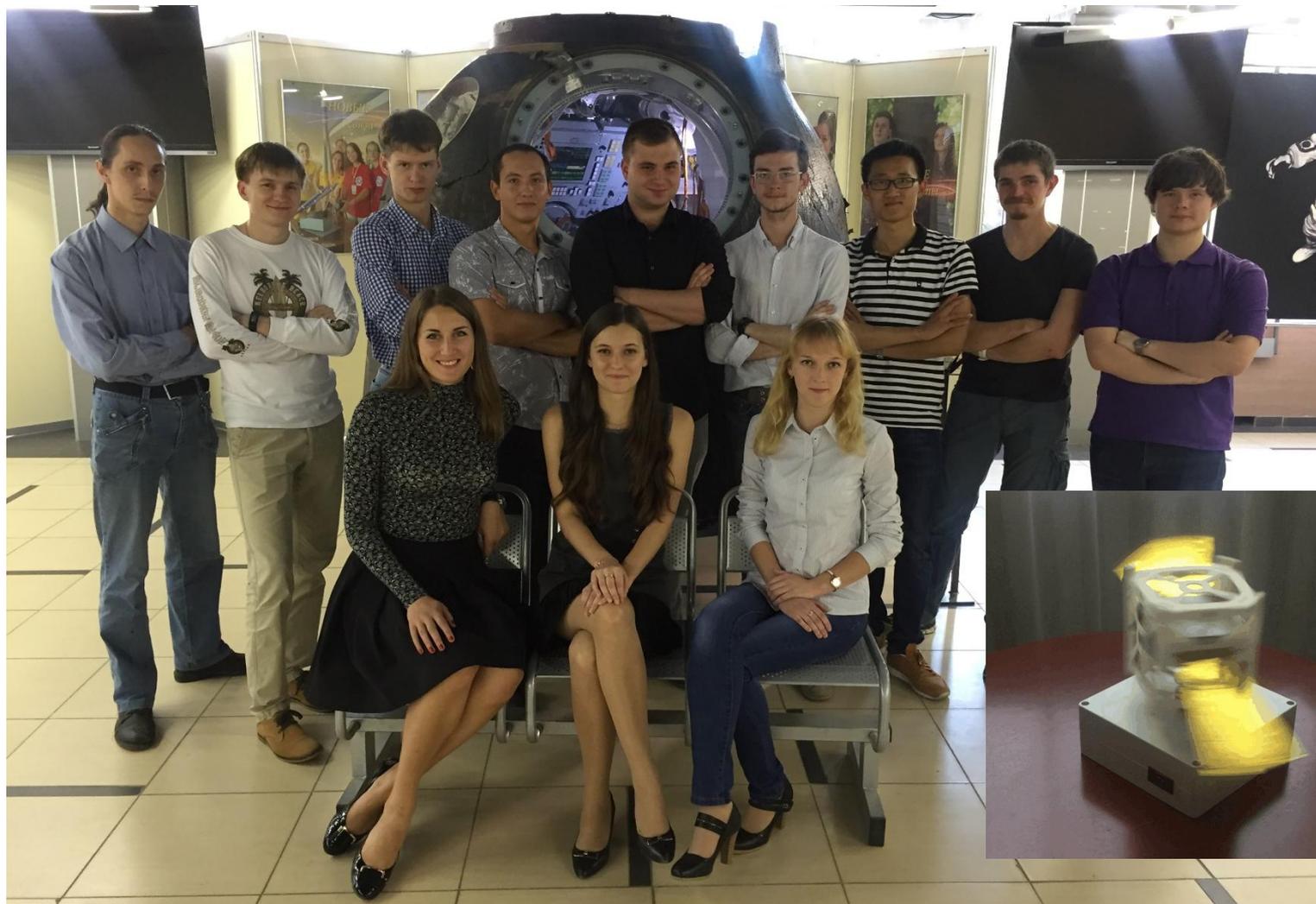
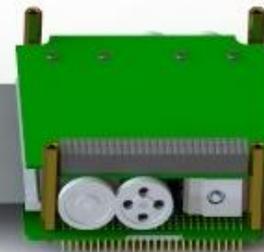
Прототип КА для отработки развёртывания с нитями – имитаторами лент



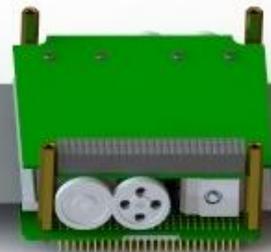
Образцы бортовой аппаратуры для КДИ



Спасибо за внимание!



Благодарность



Хотим сказать спасибо:

МГТУ им. Н. Э. Баумана, Профсоюзу студентов МГТУ, Молодежному космическому центру, каф. СМ-2 “Аэрокосмические системы”, каф. СМ-12 “Технологии ракетно-космического машиностроения” за помощь и поддержку