

Баллистические характеристики формации нано-спутников, оснащенных газовой двигательной установкой

**Иванов Д.С.¹, Маштаков Я.В.¹, Монахова У.В.¹, Оседло В.И.², Свертилов
С.И.², Богомоллов В.В.²**

**¹ Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва,
Россия**

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

«Созвездие-270»: создание группировки нано- спутников формата кубсат :

- развитие системы мульти-спутникового мониторинга радиационного состояния околоземного космического пространства;**
- наблюдения космических гамма-всплесков, в том числе в ходе много-канальных наблюдений слияния релятивистских компактных объектов;**
- мониторинг электромагнитных транзиентов из атмосферы Земли.**

Кубсаты с приборами Московского университета

СириусСат 1,2 (15.08.2018 –
09.12.2020

СОКРАТ (05.07.2019 – 2021)

АмурСат (05.07.2019 – 09.2022

ВДНХ-80 (05.07.2019 –)

Norbi (28.07.2020 -)

ДЕКАРТ (28.07.2020 -)

Монитор-1 (09.08.2022 -)

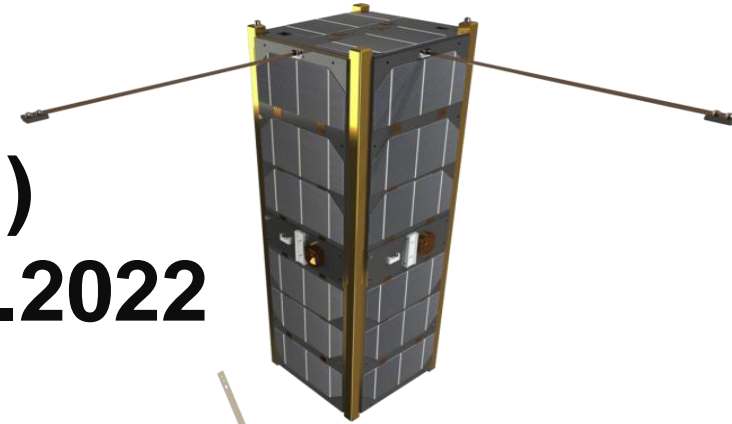
SKOLTECH-1B (09.08.2022 -)

SKOLTECH-2B (09.08.2022 -)

Авион (27.06.2023 -)

Монитор – 2,3,4 (27.06.2023 -)

UTMN-2 (27.06.2023 -)



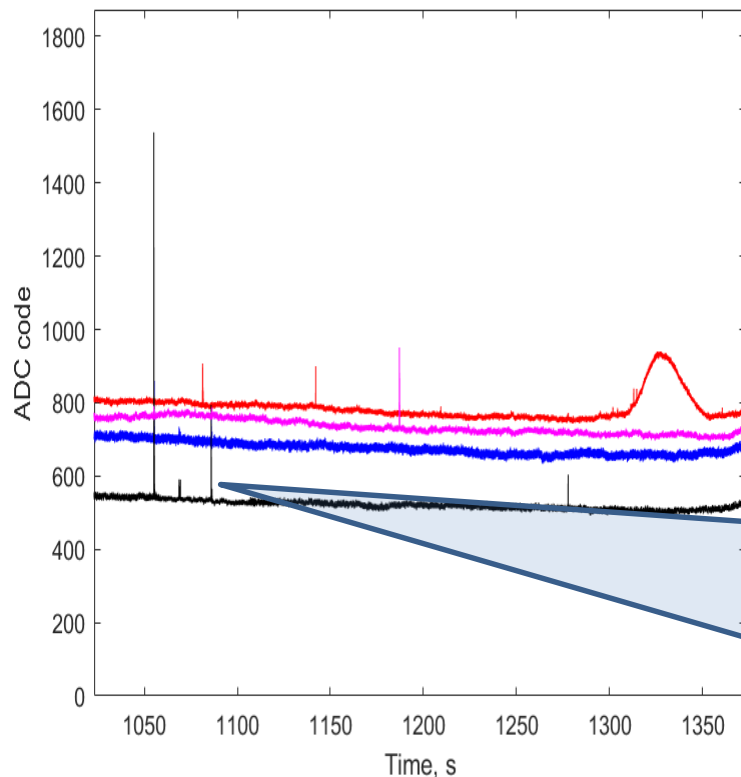
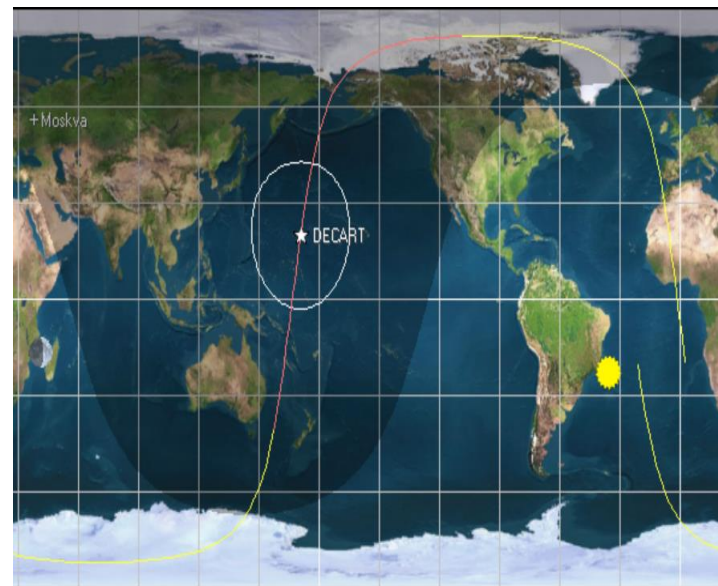
Результаты наблюдений электромагнитных транзиентов:

- вспышки из атмосферы Земли**
- жесткое излучение солнечных вспышек**
- космические гамма-всплески**

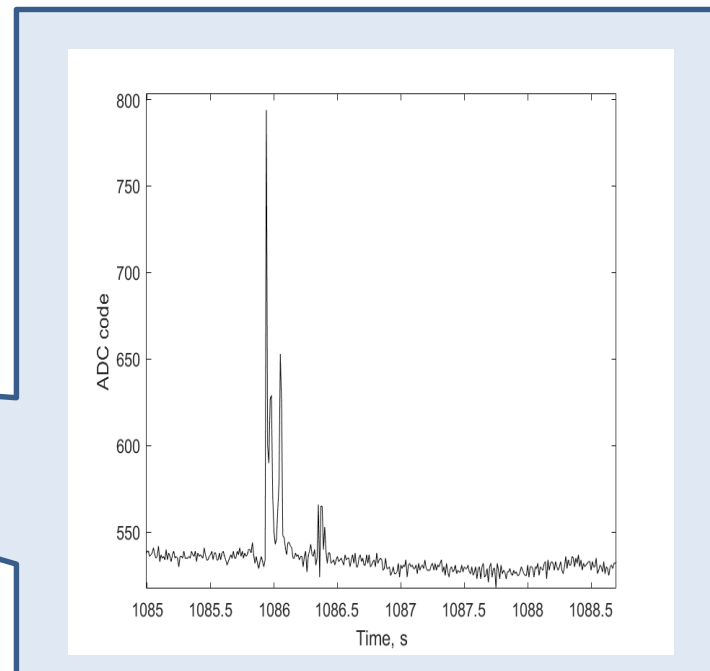
измерений детектора

Дата измерений: 09.12.2021
Начало измерений: 16:58 МСК

«ДУРА-2»



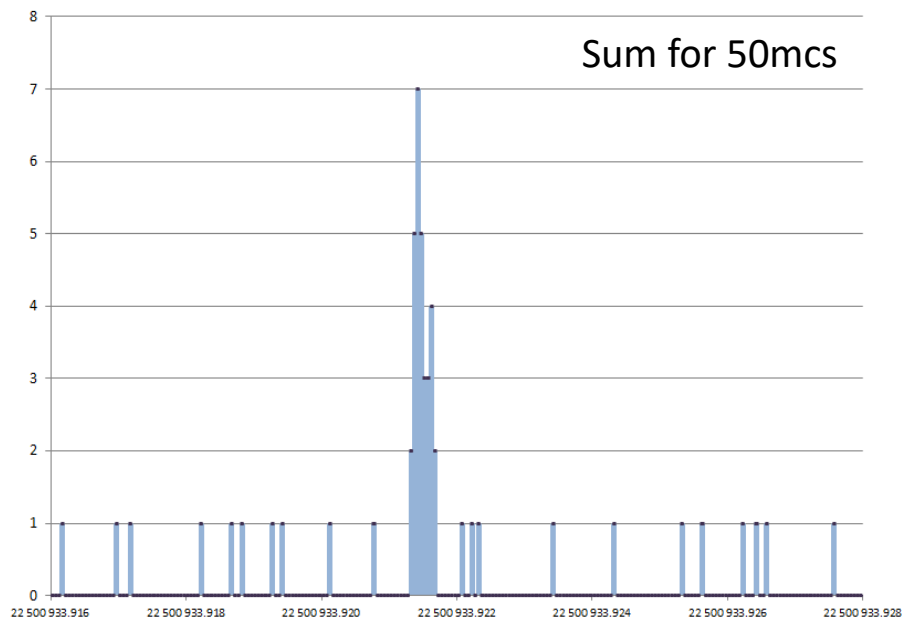
Серия вспышек вдоль пролета
спутника во всех 4-х каналах
регистрации.



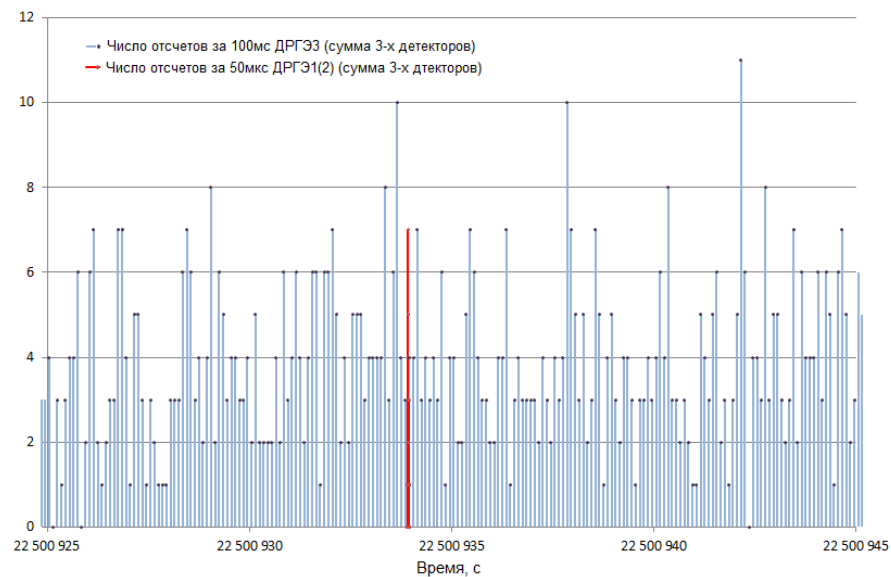
Осциллограмма одной грозовой
вспышки с временным разрешением

Атмосферная гамма-вспышка (TGF) 2014-09-18-10-15-34

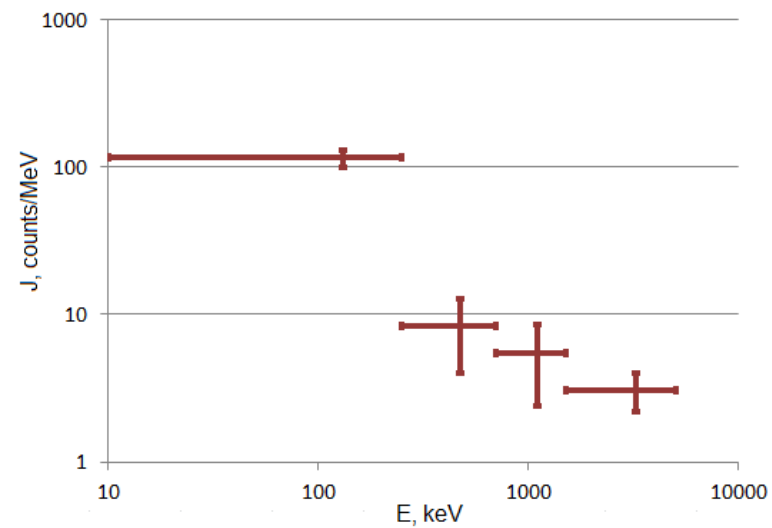
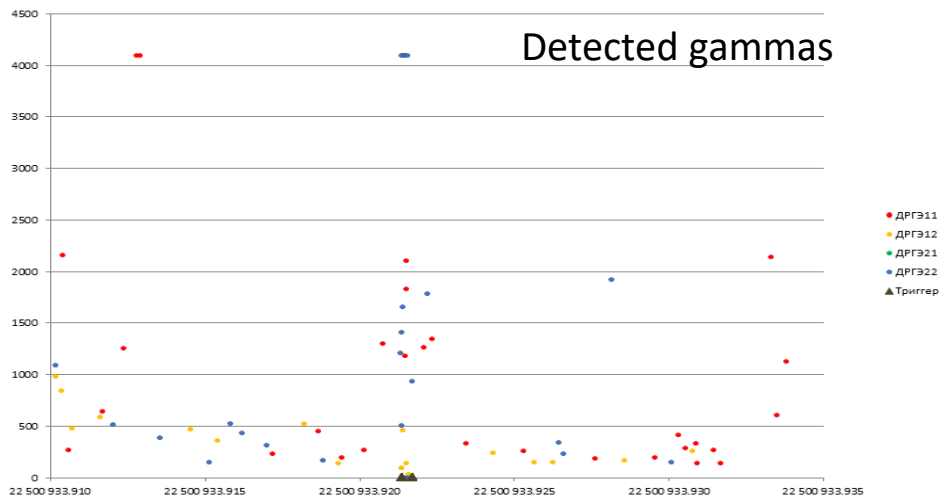
Гамма-излучение ДРГЭ-1(2)



Электроны DRGE-3



Detected gammas



Формация кубсатов



Созвездие работает как единый инструмент.

- ✓ Может стать первым созвездием кубсатов для регистрации GRBs и TGFs

Межспутниковая связь

позволяет:

- увеличить SNR: рассматриваются только те события, которые зарегистрированы по крайней мере на 2-х спутниках
- улучшить условия локализации (независимые измерения на каждом КА, триангуляция)
- Надежная связь (ни наземные, ни орбитальные системы связи не дают покрытия всего неба, здесь 1-4 спутника задействованы на регистрацию GRB – другие используются как ретрансляторы)



GRB detectors on board satellites of CubeSat class

A number of groups plan to launch the constellations of CubeSats with gamma-detectors for GRB study. They are also planned to be used for TGF and Solar flares

- The detector area sufficient for GRB registration is $\sim 100 \text{ cm}^2$
- Installing gamma detectors on several spacecraft that are about 1000 km apart makes it possible to use triangulation
- Exact timing is needed.
- Orientation accuracy $\sim 1^\circ$ is useful
- Fast telegrams are needed

If the satellites are launched to the polar orbit the problem of false triggering by electron precipitation rises. It can be solved by monitoring of electron flux

Advantages of position sensitive detectors:

- Wide dynamic range (important especially for TGFs)
- Determine coordinates if combined with mask
- Polarization measurements



Концепция проекта создания формации из минимум трех КА формата кубсат 3U(6U) с возможностью межспутникового взаимодействия

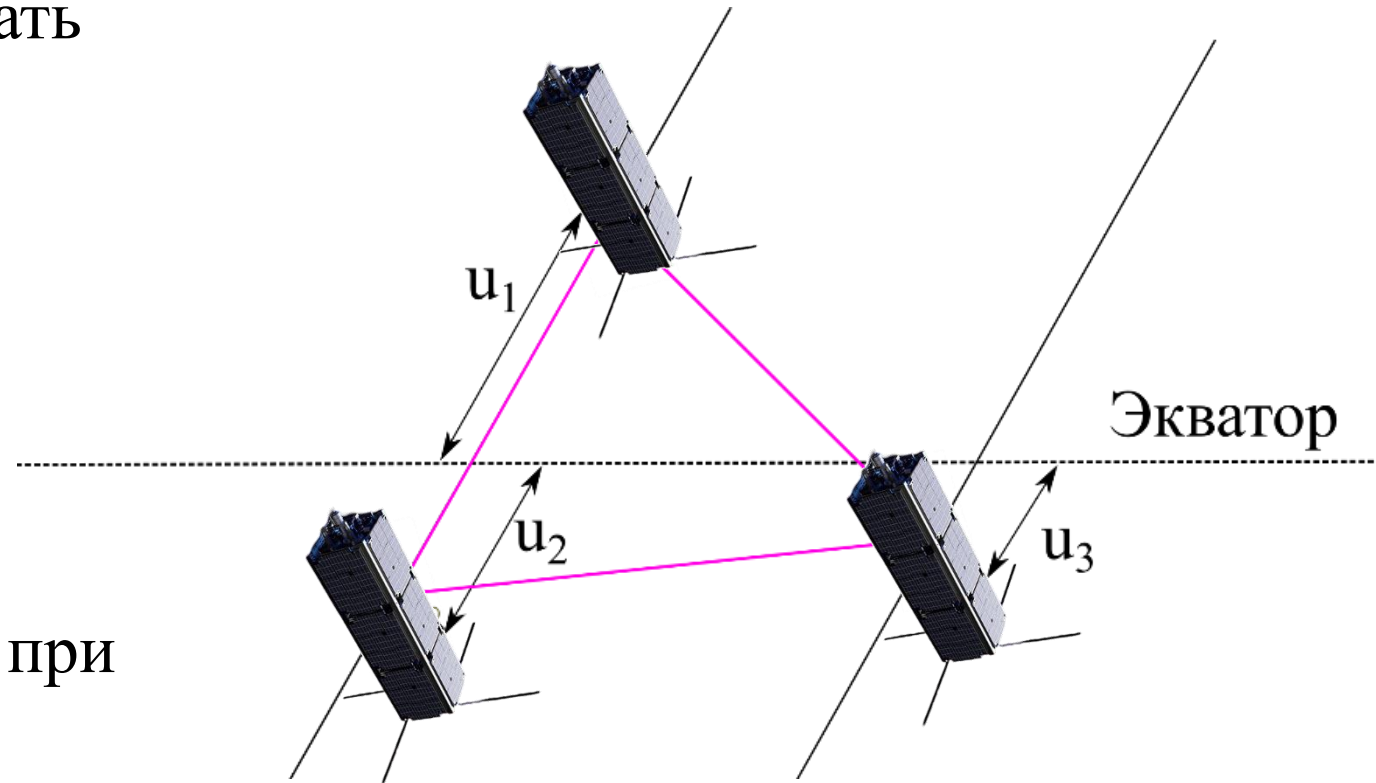
- 1) Создание научно-образовательного проекта по реализации многоспутниковой группировки с участием студентов и школьников на всех этапах реализации космической миссии.
- 2) Разработка и создание системы из минимум трех спутников, оснащенных детекторами УФ и гамма излучений. Отработка алгоритмов синхронизированного управления системой малых КА.
- 3) Одновременная регистрация УФ и гамма излучения в широком поле зрения с высоким временным разрешением. Набор базы данных и локализация источников гамма и УФ излучения в атмосфере Земли методом триангуляции. Получение глобального географического распределения УФ и гамма вспышек атмосферы Земли.
- 4) Одновременная регистрация астрофизических всплесков гамма излучения на нескольких КА с возможностью локализации их источников методом триангуляции.
- 5) Отработка межспутникового взаимодействия в плане синхронизации наблюдений, обмена данными, а также оперативного перестроения группировки (переход от одновременных наблюдений заданной области Атмосферы к одновременным наблюдениям неба с помощью КА, разнесенными в пространстве на большие расстояния).
- 6) Создание физического практикума по обработке данных многоспутникового эксперимента и управлению полетом системы космических аппаратов.
- 7) Популяризация космических исследований и экспериментов.

Требования к нано-спутникам группировки:

- диапазон высот орбит: от 300 до 550 км;
- ориентация осей системы координат (СК) КА при работе прибора – орбитальная (по вектору скорости и оси «зенит – надир»);
- погрешность определения положения каждой из осей СК прибора относительно осей СК КА не более 10 угловых минут (3σ);
- погрешность реализации орбитальной СК КА не более 1° (3σ);
- погрешность знания ориентации каждой оси СК КА относительно осей 2-й экваториальной СК не хуже 1° (3σ);
- погрешность знания положения центра масс КА на орбите при работе КНА не более 10 км (3σ);
- погрешность привязки бортовой шкалы времени к шкале всемирного координированного времени (UTC) не более 1 мкс.

Постановка задачи

- Три спутника должны образовывать правильный треугольник над экваториальной зоной
- Сторона треугольника должна варьироваться от 100 до 1000 км
- Время миссии 1 год
- Выведение на начальные орбиты при запуске с МКС

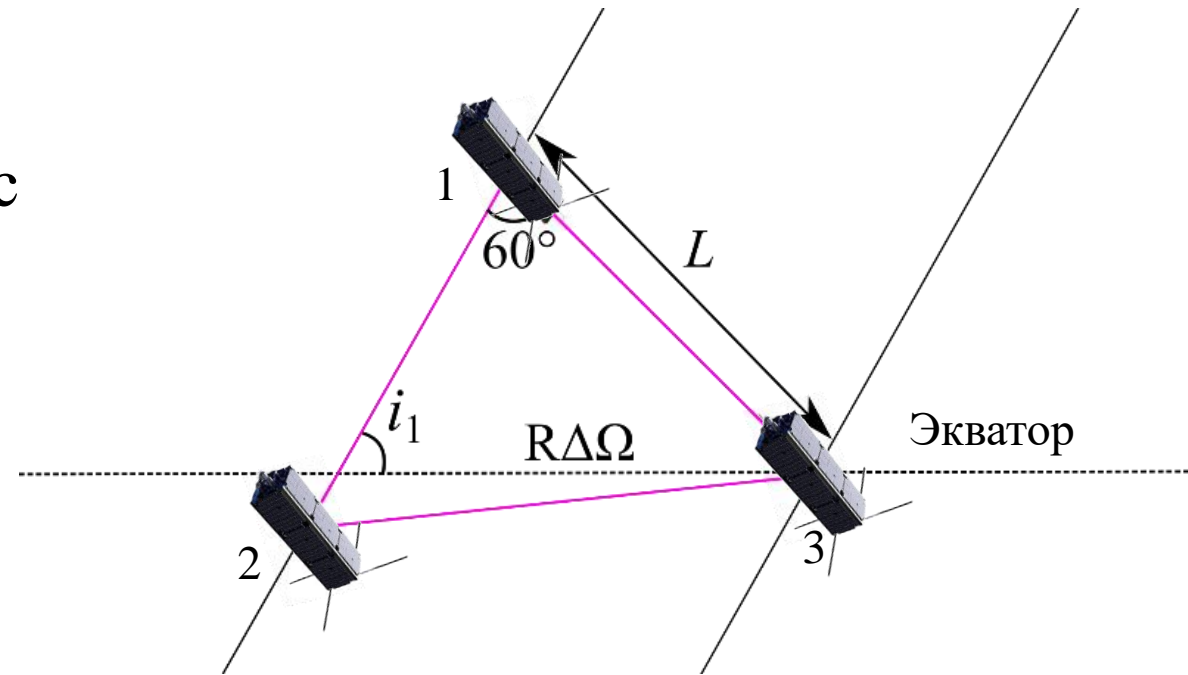


Цели:

- Построение формации с помощью газовой двигательной установки
- Поддержание на протяжении всего времени миссии при использовании естественной динамики относительного движения

Рассматриваемые орбиты

- После кластерного запуска аппараты должны быть помещены на две орбиты с разным наклонением с помощью двигательной установки
- Разность скорости дрейфа долготы восходящего узла используется для обеспечения требуемого увеличения стороны треугольника
- После изменения наклонения орбиты аппараты обеспечивают фазирование с помощью аэродинамического сопротивления



Связь между наклонениями:

$$\cos(i_2) = \cos(i_1) - \Delta\dot{\Omega}_{\text{req}} \frac{2R^2}{3nR_E^2 J_2}$$

Если $i_1 = 51.6^\circ$ (наклонение МКС), то $i_2 \approx 51.8^\circ$

Это требует $\Delta V \approx 25$ м/с

\Rightarrow Осуществимо для 3U кубсатов

с газовым двигателем ОКБ Факел



Основные проектные параметры прототипа автоэмиссионной ДУ:

рабочее тело	индий;
тяга	0,01...0,50 мН;
удельный импульс тяги	19 620...58 860 м/с (2 000...6 000 с);
энергопотребление	не более 50 Вт;
масса	не более 0,6 кг;
габаритные размеры	не более 100×100×65 мм.

Закон управления для фазирования с помощью аэродинамики

- С помощью системы ориентации изменяется площадь аппаратов относительно набегающего потока
- Это позволяет изменять разницу действующих сил аэродинамического сопротивления
- Закон измерения площади поперечного сечения:

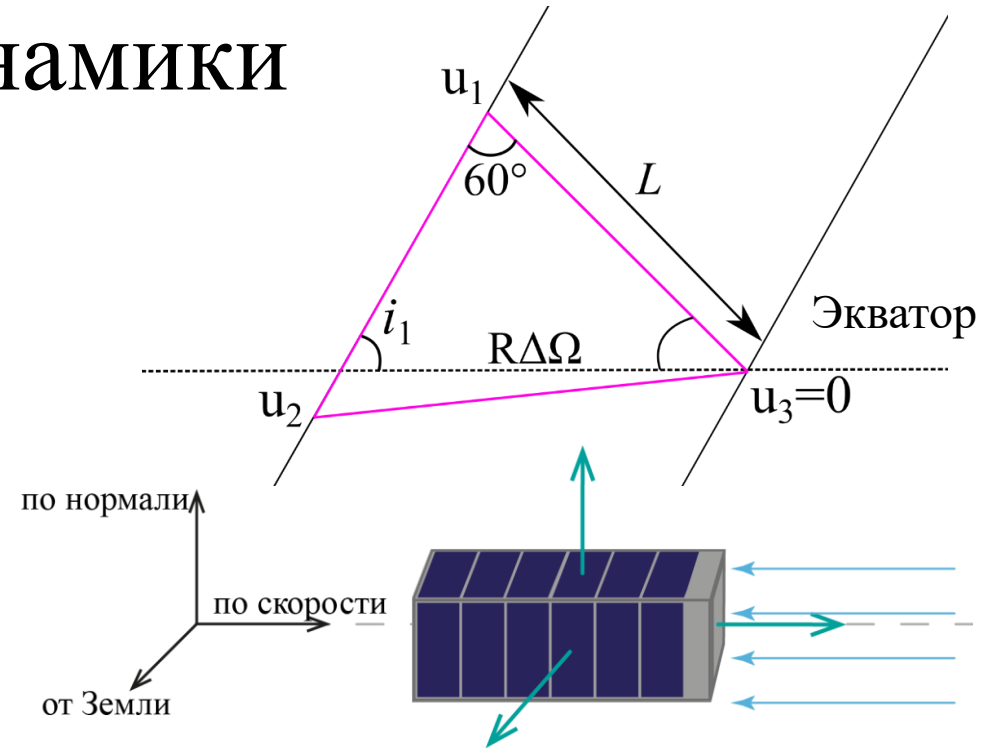
$$S_j = K_1 \Delta n_{1j} + K_2 (\Delta u_{1j} - \Delta u_{1j}^{\text{req}}) + \bar{S},$$

где:

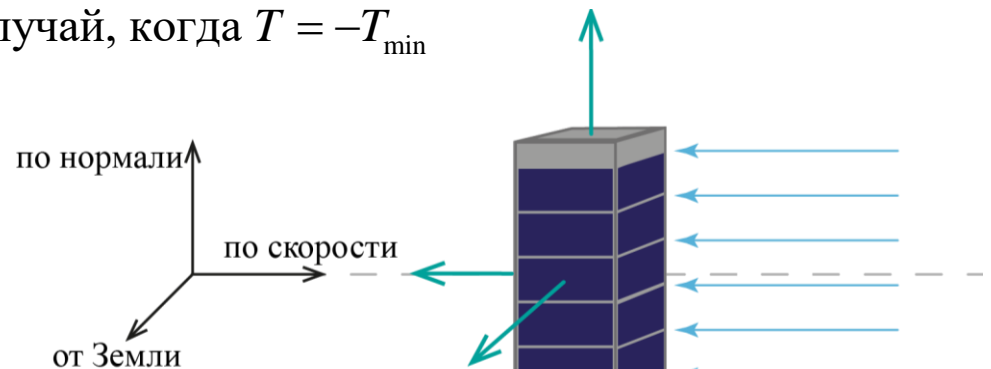
$$T_j^{\text{aero}} = -\frac{C_D}{2m} S_j \rho |\mathbf{V}|^2, \quad \bar{S} = \frac{1}{2} (S_{\text{max}} + S_{\text{min}})$$

$$\Delta u_{12}^{\text{req}} = \frac{L}{R} = \Delta \Omega \frac{\sin i_1}{\sin(60^\circ)}, \quad \Delta u_{13}^{\text{req}} = \Delta \Omega \frac{\sin(120^\circ - i_1)}{\sin(60^\circ)}$$

K_1, K_2 – положительные коэффициенты управления



Случай, когда $T = -T_{\text{min}}$



Случай, когда $T = -T_{\text{max}}$

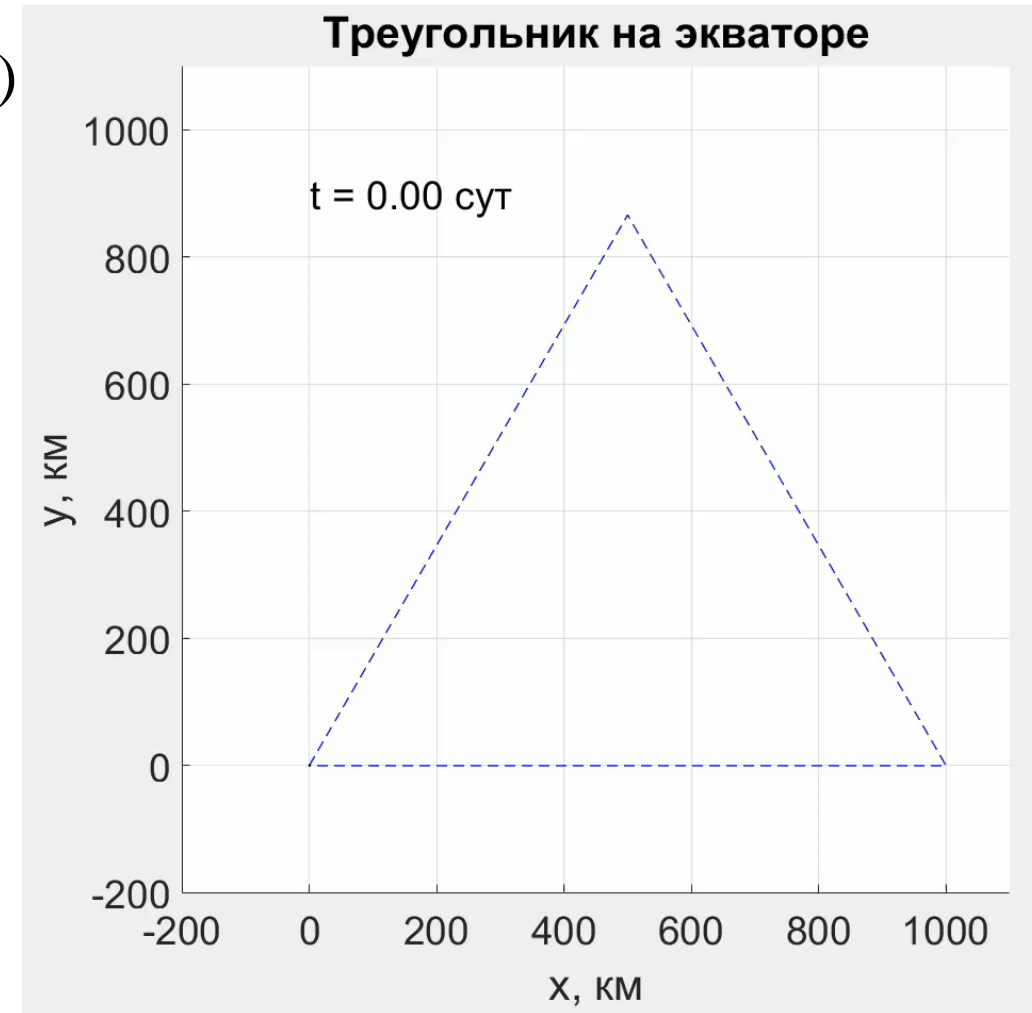
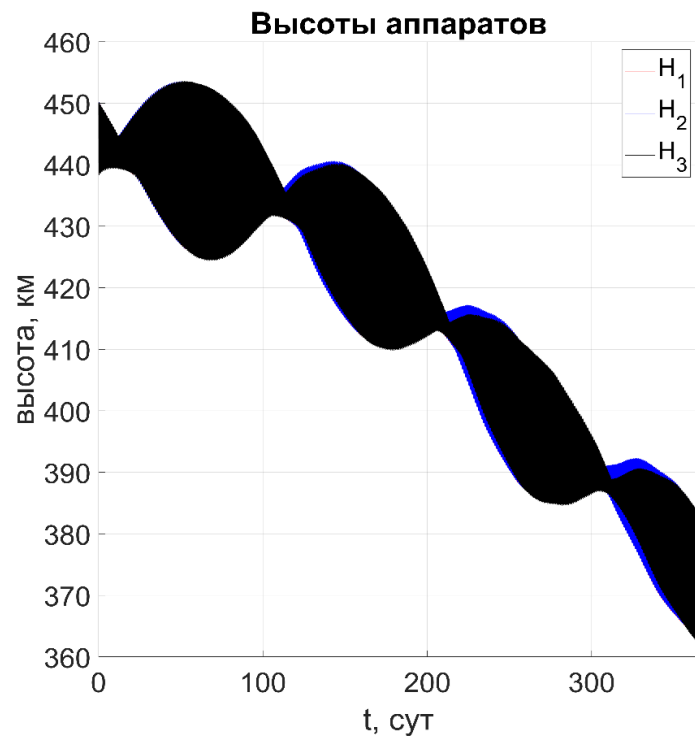
Моделирование с ошибками после маневрирования

В моделировании учитывались:

- Плотность атмосферы по ГОСТу (Р 25645.166-2004)
- Гравитация в разложении по сферическим гармоникам (10x10)
- Ошибки начальных условий

Пример с ошибками после маневрирования

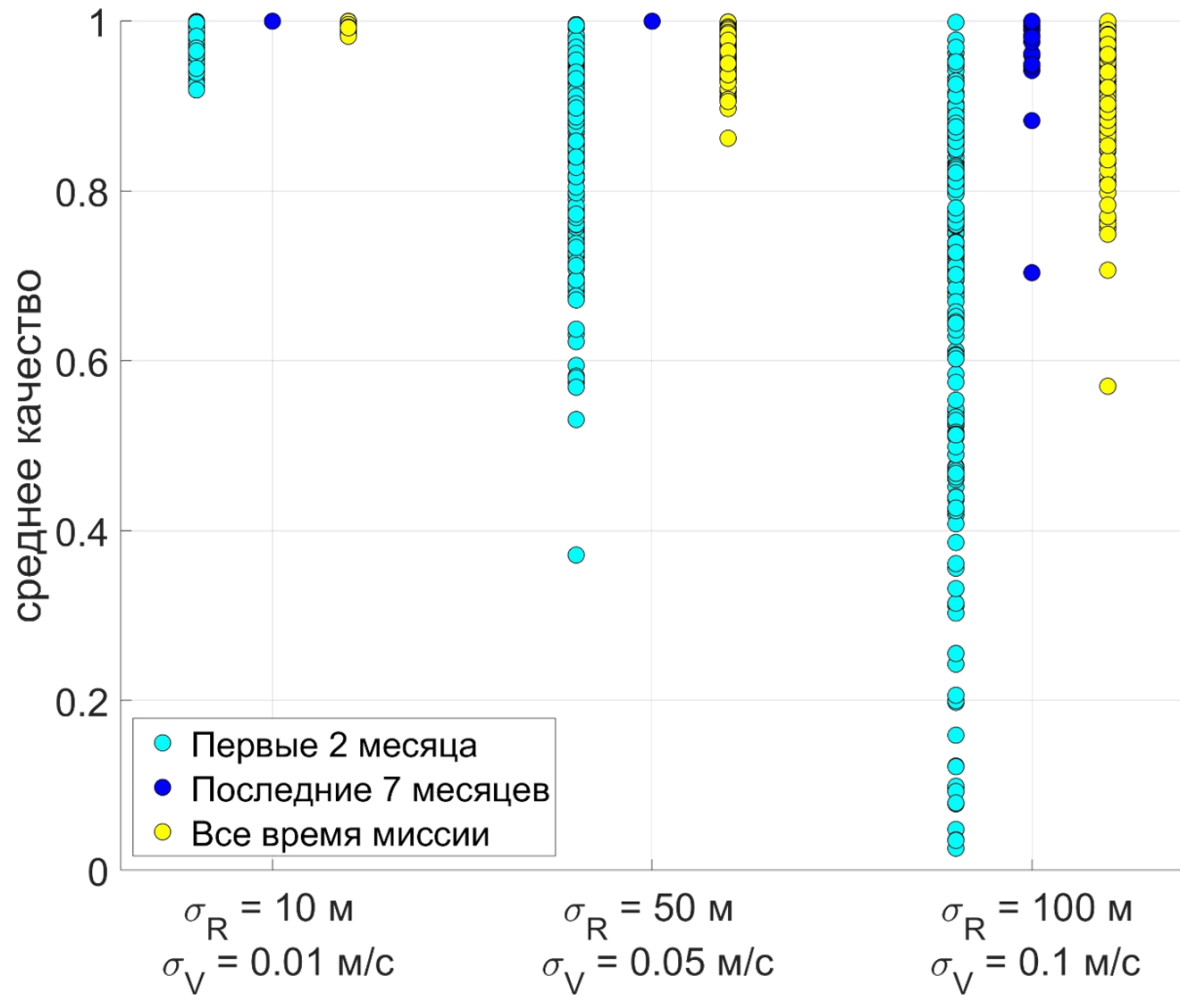
$$\sigma_R = 10 \text{ м}, \quad \sigma_V = 0.01 \text{ м/с}$$



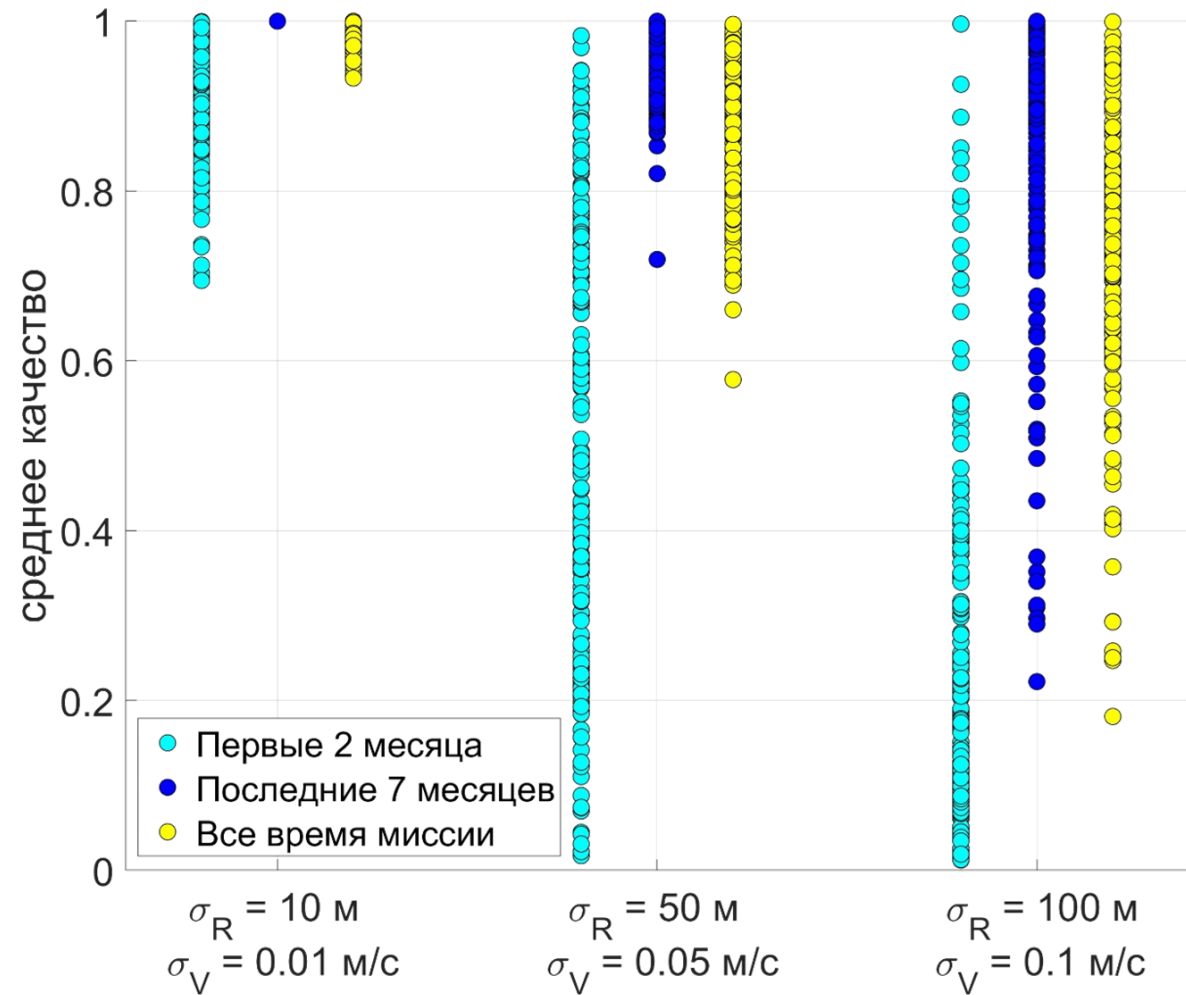
- △ Требуемый
- △ Текущий

Влияние ошибок начальных условий

$$\text{качество треугольника} = \frac{4\sqrt{3}S}{a^2 + b^2 + c^2}$$



Высокая солнечная активность (запуск в 2014 г.)



Низкая солнечная активность (запуск в 2019 г.)

Заключение

- Предложен подход к построению орбит аппаратов для формирования конфигурации в виде правильного треугольника при пролете над экватором
- Разработан алгоритм активного фазирования КА с помощью аэродинамических сил
- Проведено численное исследование, которое показало, что качество получаемой треугольной формации зависит от солнечной активности и ошибок во время маневрирования; для высокой солнечной активности допустимы среднеквадратические ошибки начальных условий до 100 м по положению и 0.1 м/с по скорости