



**XLII Академические чтения по космонавтике,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 23-26 января 2018**

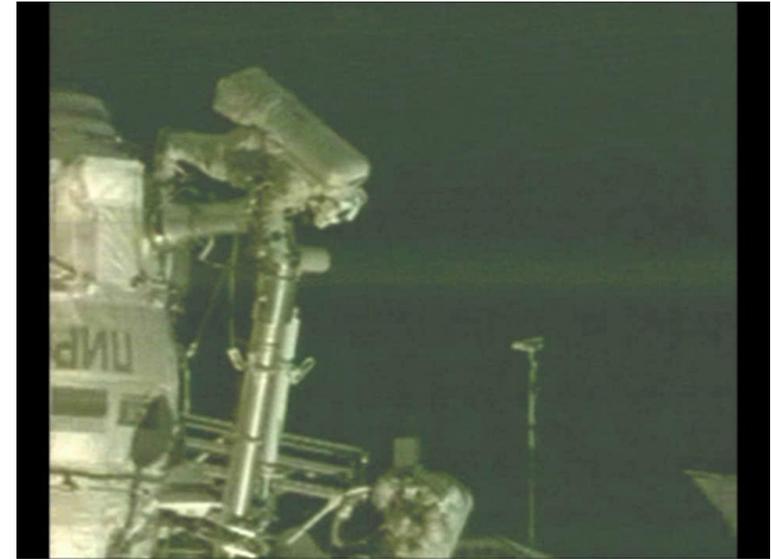
Угловое движение наноспутника ТНС-0 №2 после запуска с борта МКС

***Д.С. Иванов, М.Ю. Овчинников,
О.А. Панцырный, И.О. Федоров***

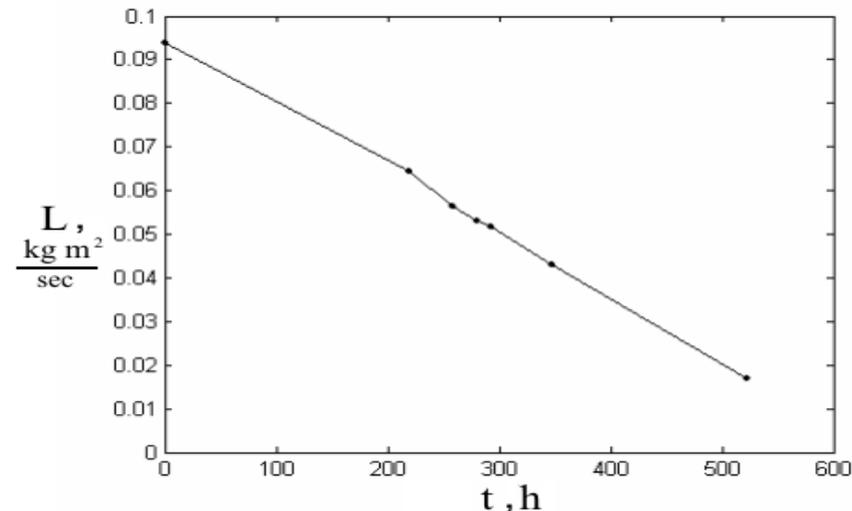
**Институт прикладной математики им.М.В.Келдыша РАН
АО Российские космические системы**

Предыстория: ТНС-0 №1

Запуск ТНС-0 №1 с борта МКС, март 2005 г.



Уменьшение кинетического момента



Цель миссии	Отработка связи через Globalstar
Наклонение	51.6 град
Высота орбиты	360 км
Питание	Две батареи
Масса	4.5 кг
Система ориентации	Пассивная магнитная

Наноспутник ТНС-0 №2

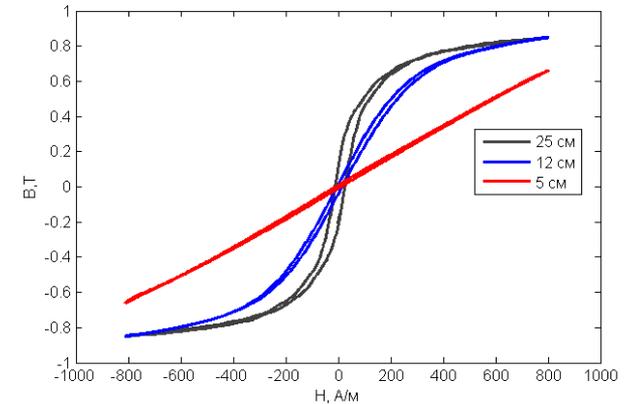
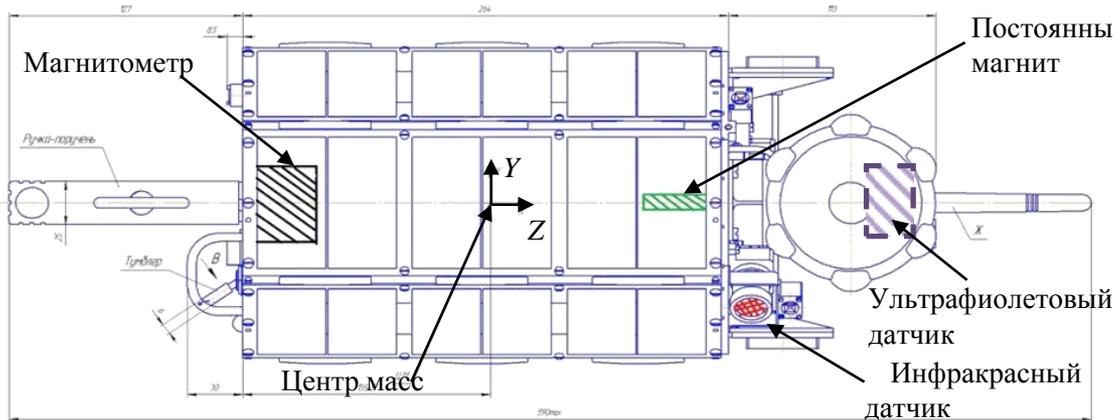
- **Цель миссии:**
летные испытания датчиков и элементов служебных систем
- **Система ориентации:**
 - пассивная магнитная - постоянный магнит, гистерезисные стержни
- **Датчики для определения ориентации:**
 - магнитометр
 - солнечные датчики - 6 фотодиодных, 1 ИК датчик, 1 УФ датчик)

$$J = \begin{bmatrix} 0.06153 & -0.00013 & -0.00033 \\ -0.00013 & 0.06669 & -0.00012 \\ -0.00033 & -0.00012 & 0.01287 \end{bmatrix} \text{ кг} \cdot \text{м}^2; m = 4.8 \text{ кг}$$

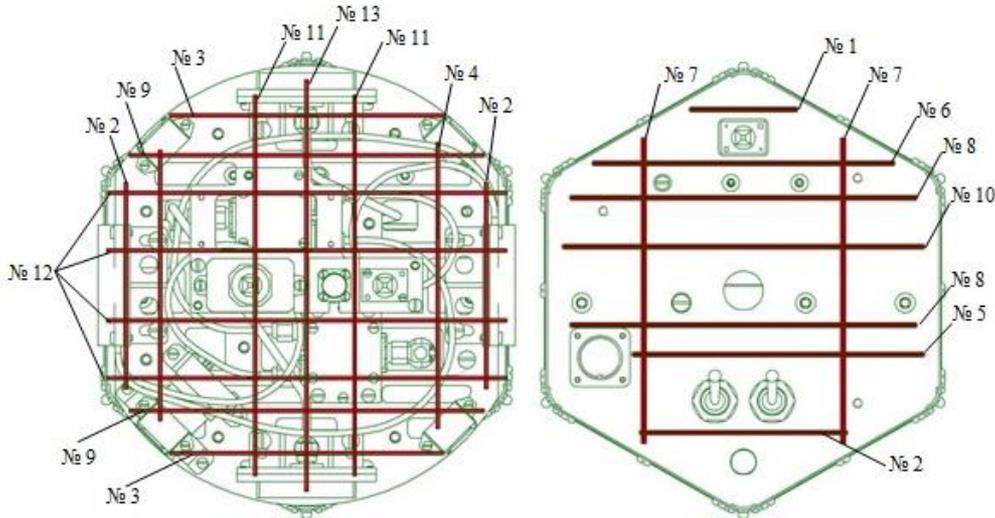


Выбор параметров системы ориентации

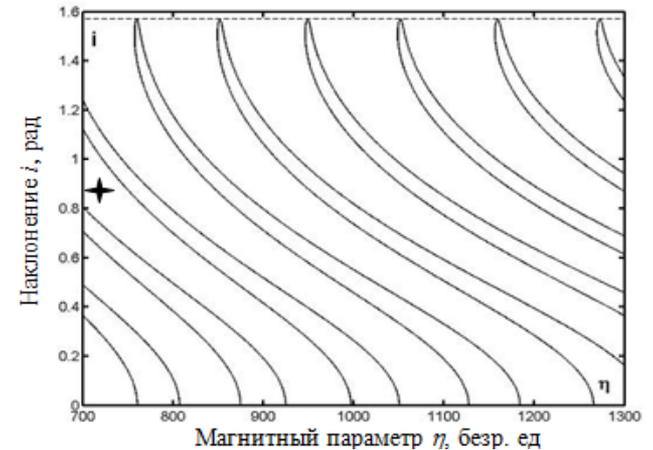
Гистерезисные петли для стержней разной длины



Расположение гистерезисных стержней на основаниях корпуса



Кривые ветвления в окрестности $\eta=1000$ и значение магнитного параметра для ТНС-0 №2



Тестирование датчиков в лаборатории в ИПМ

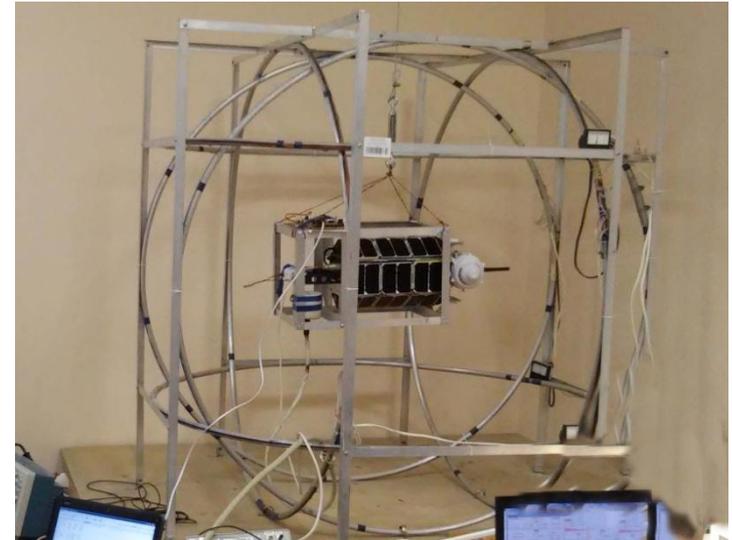
Цели тестирования:

- Нахождение смещения нуля измерений магнитометра
- Экспериментальная оценка магнитного момента постоянного магнита
- Проверка работоспособности солнечных датчиков, их калибровка

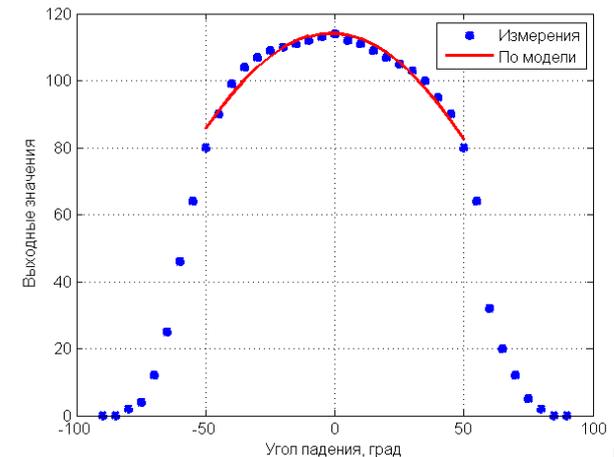
Тестирование солнечных датчиков с помощью имитатора Солнца



THC-0 №2 в имитаторе магнитного поля

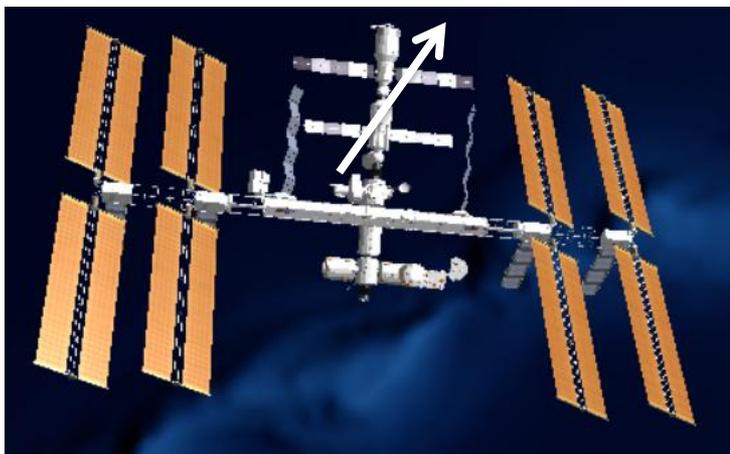


Зависимость выходных значений фотодиодного датчика от угла падения пучка света



Ручной запуск с МКС 17.08.2017

Направление запуска с МКС



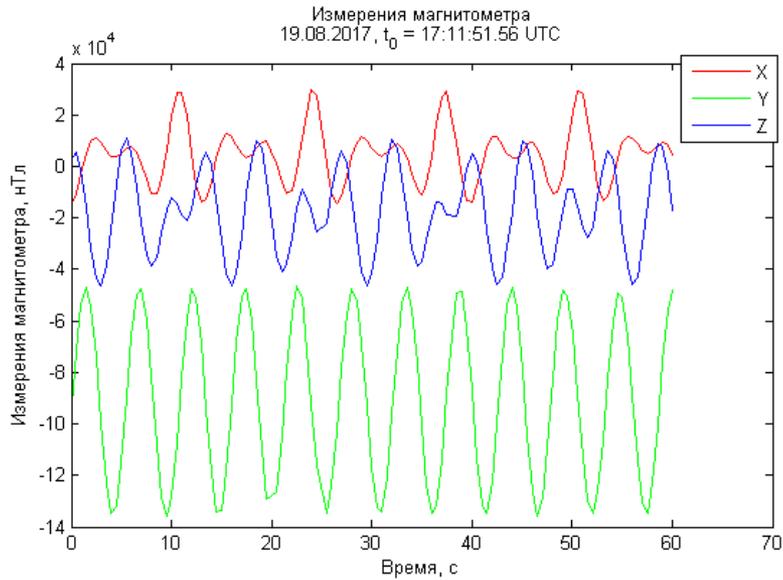
Наземная отработка ручного запуска



NASA TV

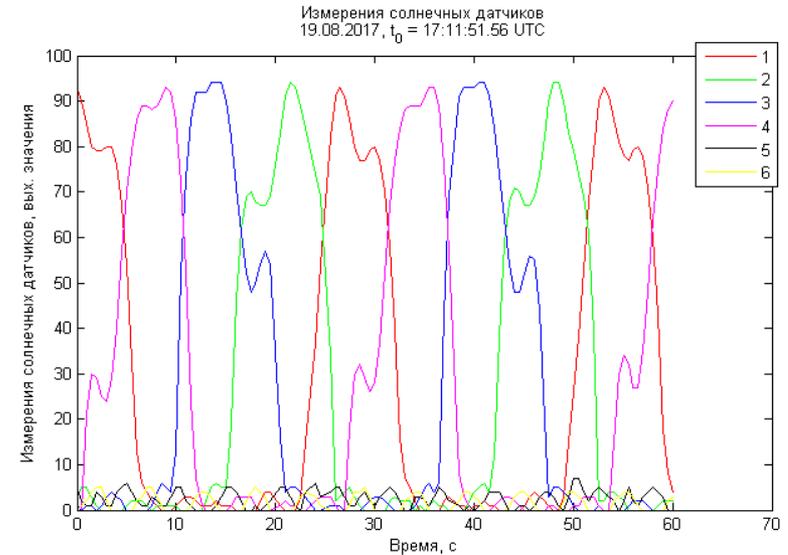


Первая телеметрия

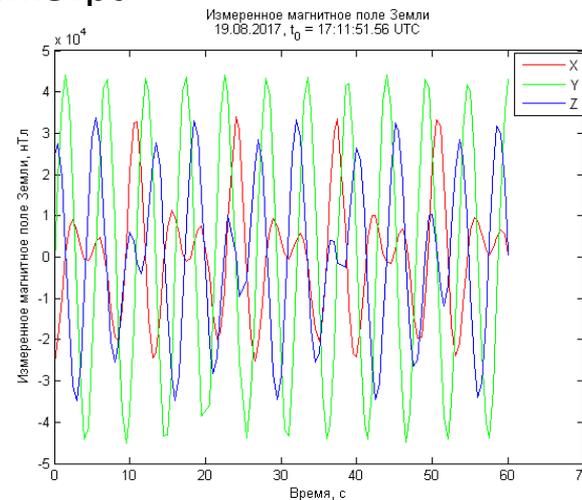


Измерения магнитометра

Измеренное с помощью магнитометра магнитное поле Земли



Измерения фотодиодных солнечных датчиков



Найденное смещение поля магнитометра

$$\mathbf{V}_{смещ} = [5.8 \quad -90.8 \quad -20.9] \cdot 10^3 \text{ нТл}$$

Методика определения углового движения

Уравнения движения

Модель измерений магнитометра

$$\mathbf{J}\dot{\boldsymbol{\Omega}} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{J}\boldsymbol{\Omega} = \mathbf{M}_{mag} + \mathbf{M}_{grav} + \mathbf{M}_{gist}$$

$$\mathbf{V}_{изм} = \mathbf{A}\mathbf{V}_o + \mathbf{V}_{смещ}$$

$$\dot{\Lambda} = \frac{1}{2} \mathbf{C}\Lambda \quad \Lambda = (\mathbf{q}, q_0)$$

Вектор начальных условий

$$\xi = [q_1(t=0), q_2(t=0), q_3(t=0), \omega_1(t=0), \omega_2(t=0), \omega_3(t=0)]^T$$

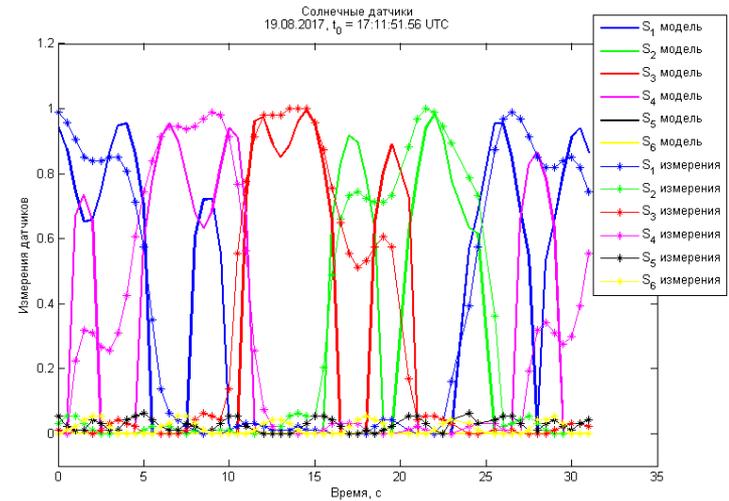
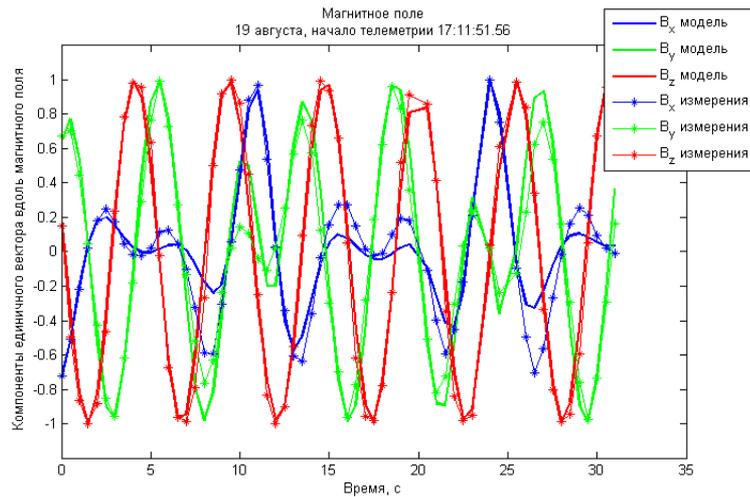
Задача нахождения вектора начальных условий сводится к минимизации функции

$$\Phi(\xi) = \sum_{i=1}^N \left(\left| \tilde{\mathbf{b}}_{изм}^i - \mathbf{b}_{изм}^i \right| \right)^2$$

$\mathbf{b}_{изм}^i$ - это единичный вектор вдоль геомагнитного поля, вычисленный по измерениям после исключения постоянного смещения

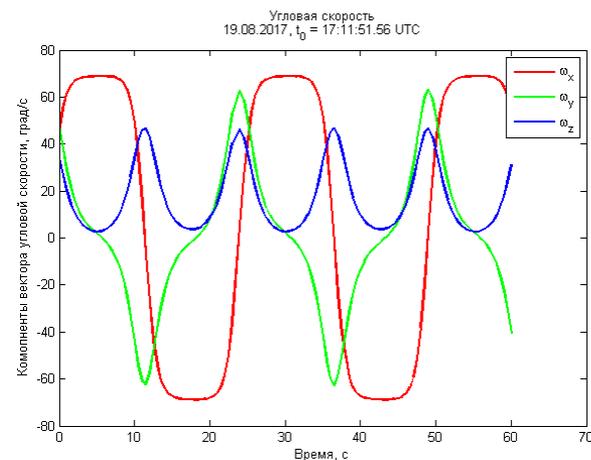
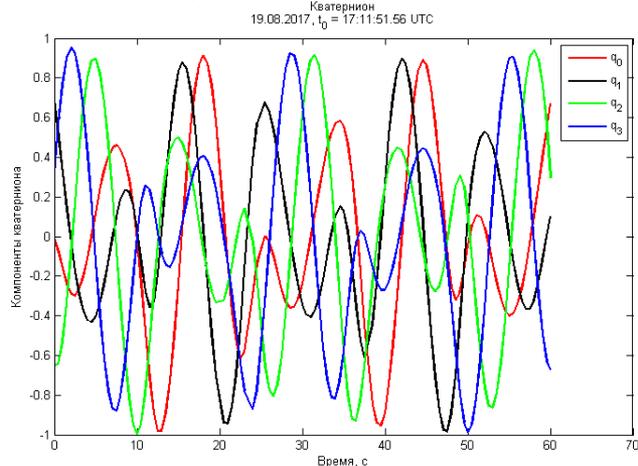
$\tilde{\mathbf{b}}_{изм}^i$ - это единичный вектор вдоль геомагнитного поля, вычисленный согласно модели IGRF

Результаты обработки измерений



Измеренный и прогнозируемый по модели движения вектор вдоль магнитного поля Земли

Измерения и прогноз измерений солнечных датчиков



Кватернион ориентации

Компоненты угловой скорости

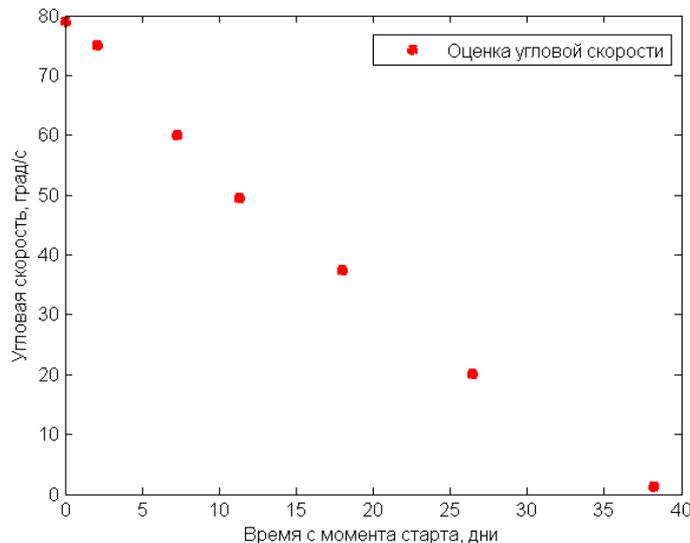
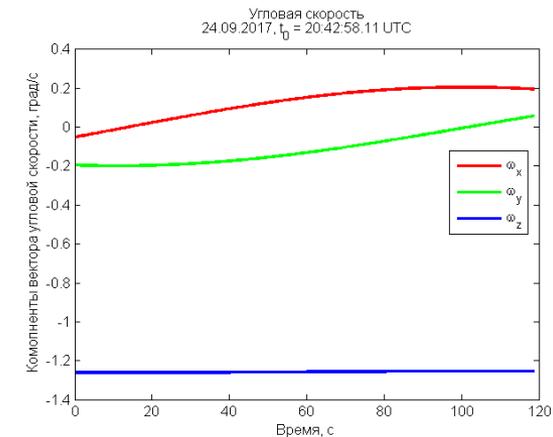
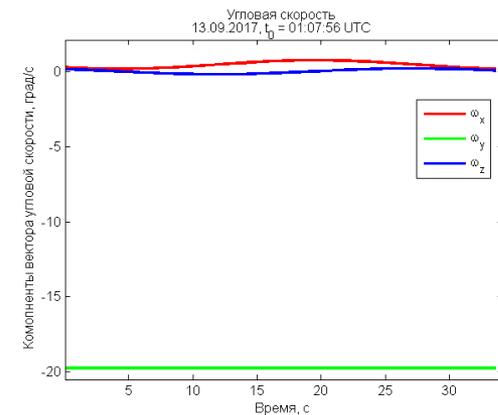
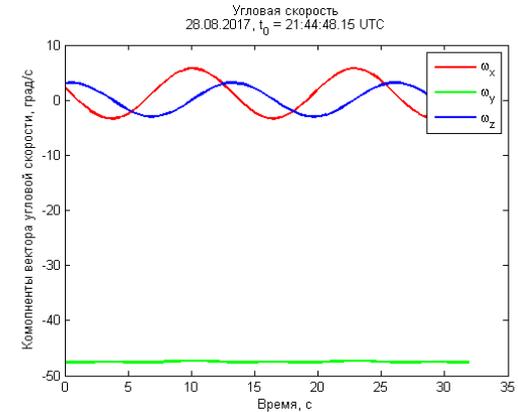
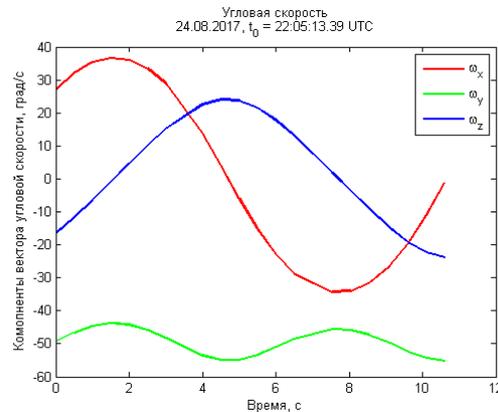


Динамика демпфирования

угловой скорости

- Для отрезков телеметрии были получены оценки углового движения КА
- Постепенно превалирующей компонентой угловой скорости стала компонента вокруг оси с наибольшим моментом инерции
- Время демпфирования составило около 36 дней

Угловая скорость для разных отрезков времени

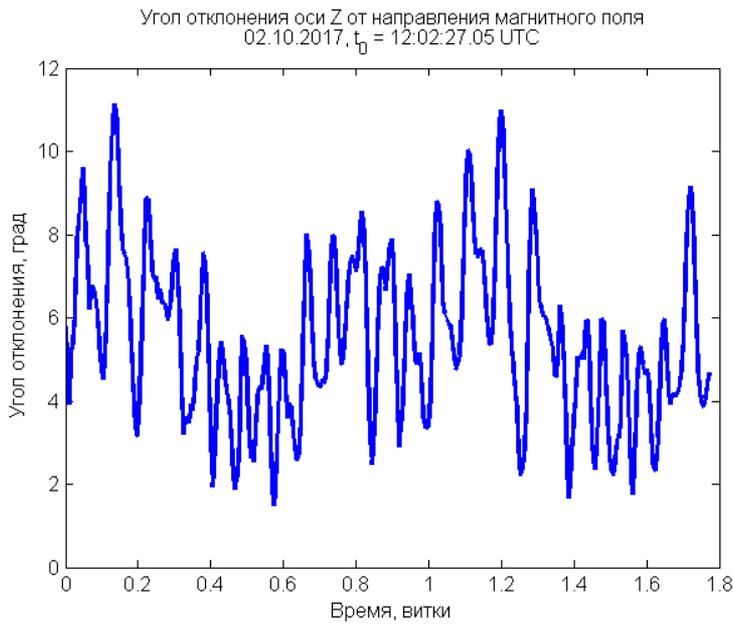
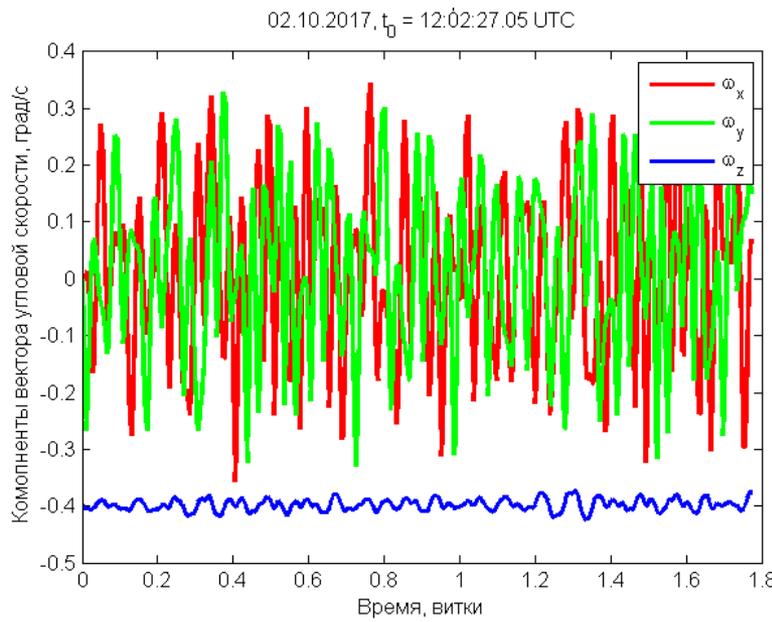
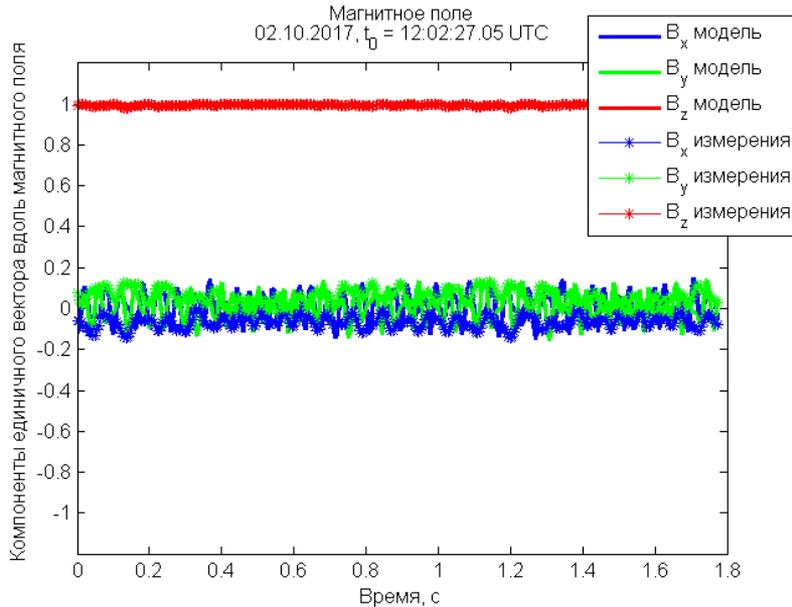


Динамика демпфирования угловой скорости



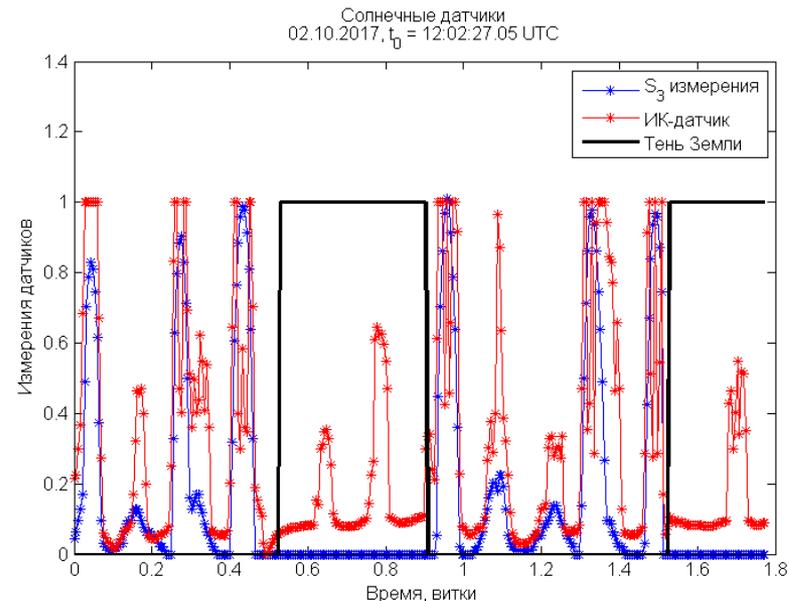
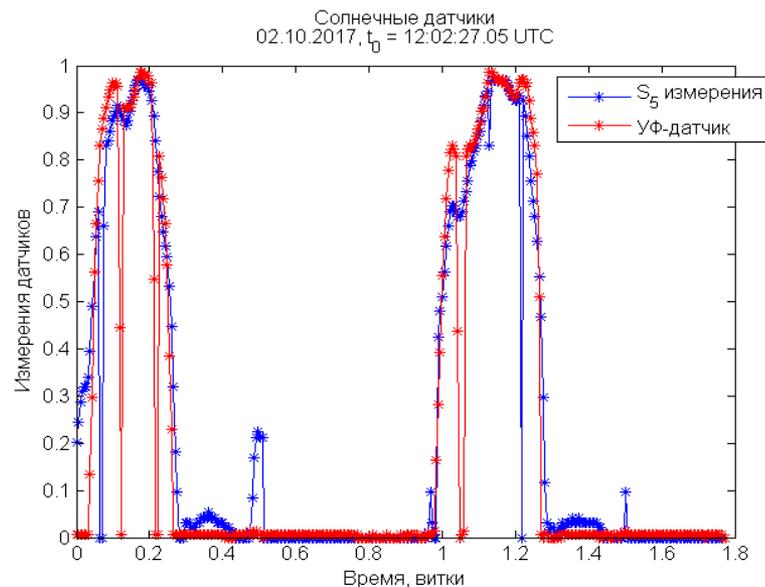
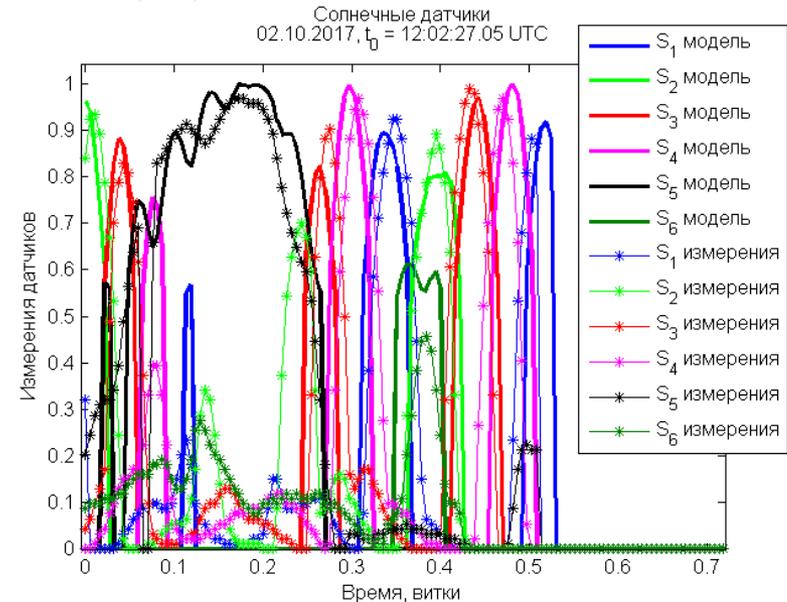
Установившееся движение

- С помощью сохранения измерений на бортовую память и последующего сброса на Землю во время сеанса связи получена телеметрия почти за 2 витка
- В результате обработки получено, что продольная ось не отклоняется больше 12 градусов относительно направления магнитного поля



Работа солнечных датчиков

- Оси двух фотодиодных датчиков и УФ, ИК датчиков совпадают, что позволяет оценить адекватность измерений
- По совместным измерениям можно оценить вклад альбедо Земли в измерения фотодиодных датчиков – он составляет около 30 процентов



Заключение

- По телеметрическим данным с помощью обработки измерений удалось оценить угловое движение ТНС-0 №2
- По этим данным была проведена оценка времени, которое ушло для демпфирования угловой скорости и достижения спутником магнитной ориентации
- В результате после окончания переходных процессов наноспутник ТНС-0 №2 вращается относительно этого направления с угловой скоростью 0.4 град/с, а амплитуда колебаний продольной оси относительно вектора магнитного поля достигает 11 градусов, период колебаний около 9 минут

Исследование поддержано Российским научным фондом, грант № 17-71-20117



Спасибо за внимание!