



Российская Академия Наук

Оценка рисков столкновения
функционирующего космического аппарата
с техногенными космическими объектами

Павлова Е.А.
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

28-я конференция РААКС
«Актуальные вопросы страхования авиационных и космических рисков»
4-6 октября 2023

Основные задачи и направления исследований



Оптический мониторинг околоземного космического пространства

Ведение базы данных об объектах и событиях на ВОКО и астероидах

Обнаружение и сопровождение астероидно - кометной опасности

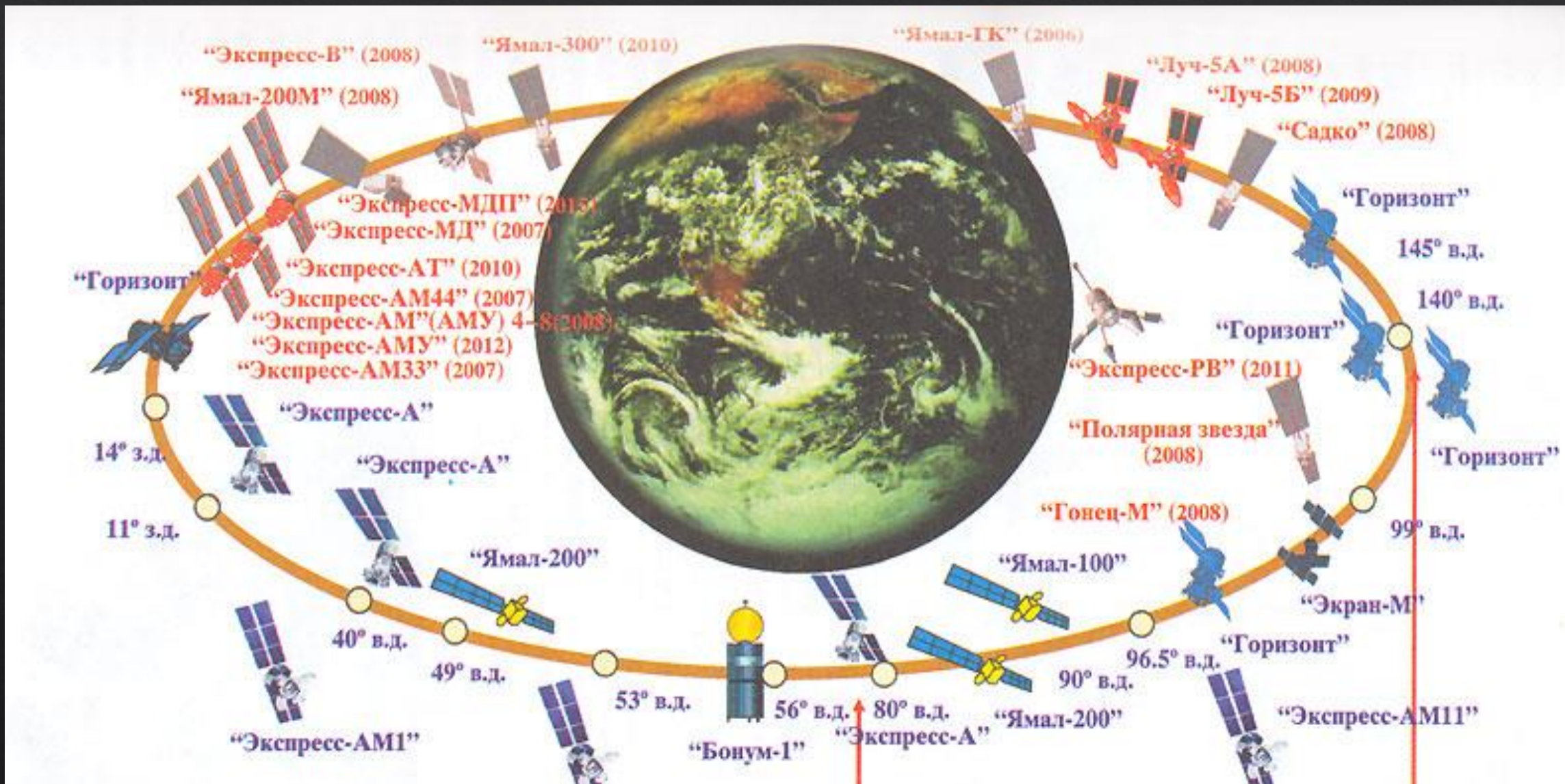
БНО космических полетов российских КА НСЭН

Выявление опасных событий в высокоорбитальной области ОКП

Разработка новых технологических и программных решений в области контроля ОКП

✓ Распоряжением Президиума РАН №10103-142 от 28.02.2001 г. на ИПМ им. М.В. Келдыша РАН возложены обязанности по проведению работ по сбору, хранению, обработке и анализу информации по техногенным космическим объектам (космическому мусору)

Космические аппараты российской орбитальной группировки на ГСО



Состояние околоземного космического пространства



**Более 26 000 объектов
на околоземных
орбитах**

**92% объектов -
космический мусор**



Определение «космического мусора»

Космический мусор – это все находящиеся на околоземной орбите космические объекты **техногенного (искусственного)** происхождения (включая фрагменты или части таких объектов), которые **завершили** свое активное функционирование

Нефункционирующие аппараты Верхние ступени ракет-носителей и разгонные блоки	Операционные фрагменты космических аппаратов и РН (типа заглушек тормозных двигателей, крышек приборов)	Фрагменты разрушений	Различные частицы защитных покрытий и изоляции, отделяющиеся от КА в результате воздействия факторов космической среды на элементы ее конструкции <i>...и другие</i>
---	---	-----------------------------	--

Виды опасных ситуаций в космосе



Степень угрозы в зависимости от размера космического мусора



Риски, связанные со столкновением КА с КО



Столкновение
с каталогизированным
космическим объектом



**Предсказывается
заранее**

(на основе информации
об орбитах объектов
и ошибках их определения)



**Проведение маневра
уклонения**

Столкновение
малоразмерными
ненаблюдаемыми
объектами



**Прогнозируются
статистические
характеристики процесса**

(кол-во столкновений в год,
распределение величин и
направлений относительных
скоростей и тд.)

10 февраля
2009 г.

День, когда
произошло первое
столкновение двух
искусственных спутников
на орбите Земли

КА «Iridium» и КА «Космос- 2251»





Предполагаемое «внешнее воздействие» на телекоммуникационный спутник «Экспресс-АМ11», 2006 год

Последствия:

- потеря функциональности аппарата
- телевизионное вещание федеральных каналов для жителей Сибири и Дальнего Востока стало временно недоступным

Международная сеть оптических телескопов



Пункты ЦКП МСОТ
● — постоянные наблюдения
● — отдельные набл. кампании

Автоматизированный пункт наблюдения ИПМ с телескопами апертурой 20-40 см (п. Мульты, Республика Алтай)



База данных орбитальных параметров с оценкой точности

База данных ИПМ им. М.В. Келдыша РАН содержит полный архив регулярно обновляемых параметров движения КО с ковариационными матрицами ошибок. Ковариационные матрицы ошибок позволяют оценить степень неопределенности любого параметра, зависящего от орбитальных параметров КО:

$$K_p = \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{q}} K_q \left(\frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{q}} \right)^T$$

\bar{q} – вектор параметров движения КО

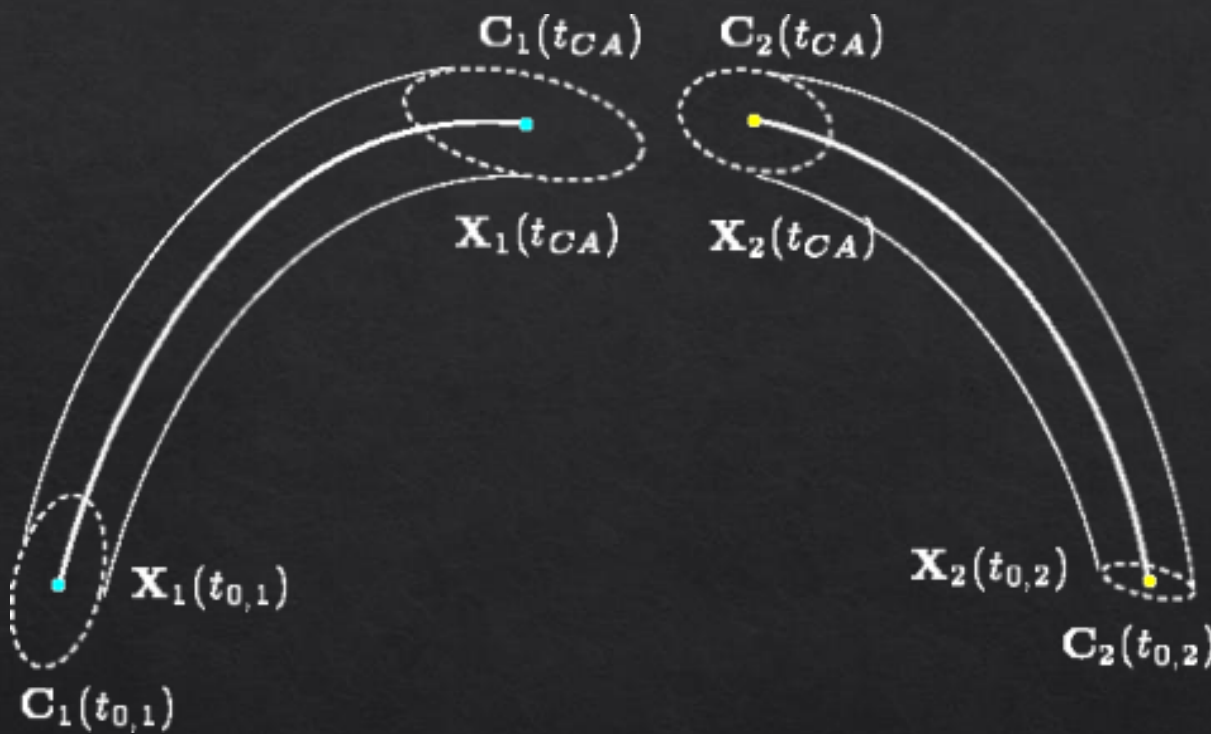
$\bar{p} = \bar{p}(\bar{q})$ – вектор параметров, точность определения которых необходимо оценить

K_q – ковариационная матрица ошибок вектора \bar{q}

K_p – ковариационная матрица ошибок вектора \bar{p}

Оценка ошибок является ключевой информацией при выявлении и анализе опасных сближений КА

Сближения между космическим аппаратом и каталогизированным космическим объектом



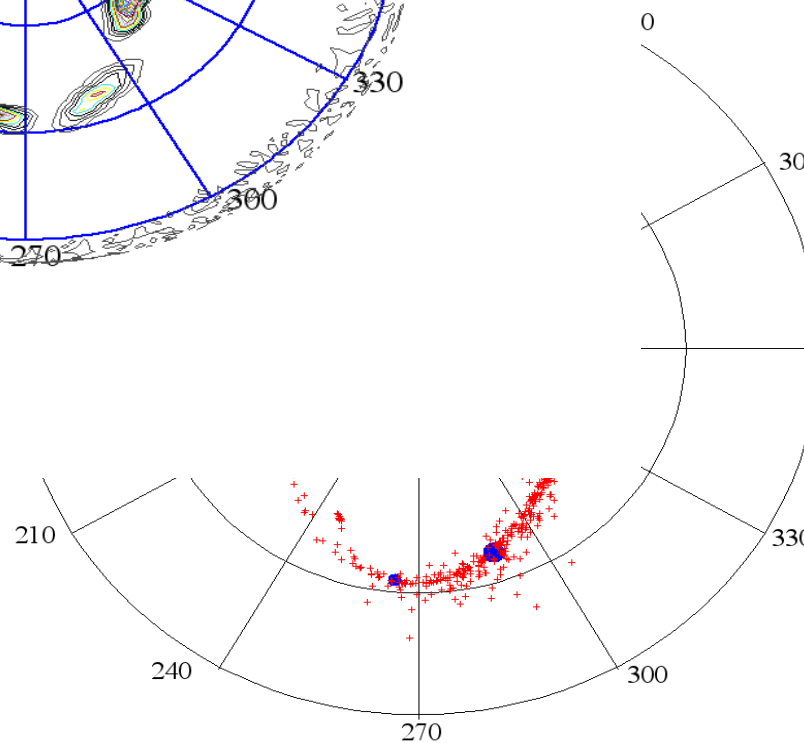
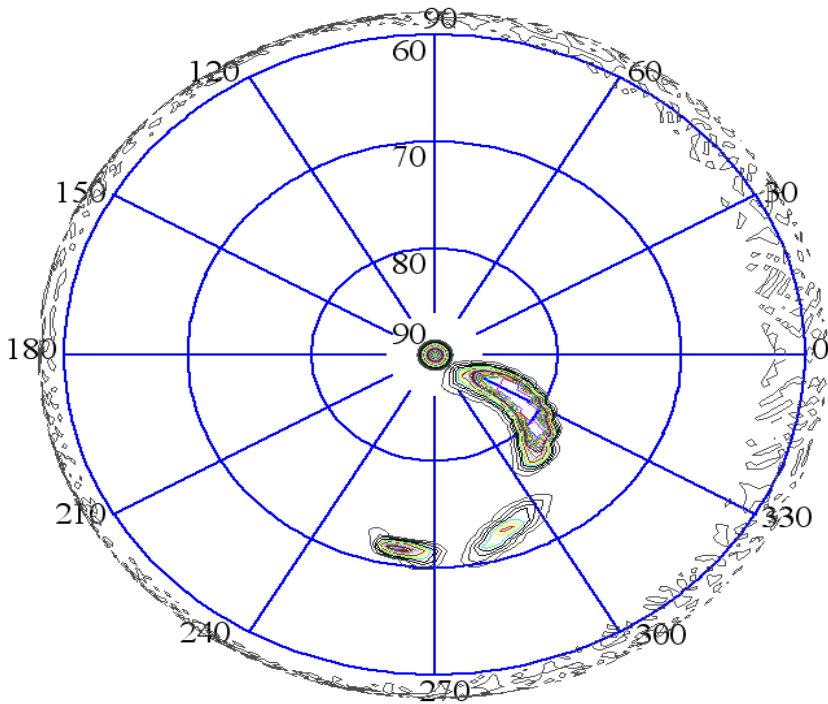
Операторы КА вынуждены находить баланс между значением \bar{P}_c и затратами топлива на выполнение маневров уклонения

Для каждого сближения прогнозируется
- траектории объектов ($X_1(t_{CA}), X_2(t_{CA})$),
- ассоциированные с ними параметры ошибок ($C_1(t_{CA}), C_2(t_{CA})$)

Прогнозные параметры траектории вместе с информацией о размере и об ориентации объектов определяют **расчетную вероятность** $P_c(X_1, X_2, C_1, C_2, d_1, d_2, \dots)$

Оператором КА определяется **стратегия уклонения** и, в частности, пороговое значение \bar{P}_c , характеризующее необходимость проведения маневра уклонения

Анализ и моделирование распределения плотности объектов в ОКП



**Статистическое описание фрагментов
Распределение значимых фазовых параметров
в виде смеси нормальных распределений**

$$f(a, e, i, \Omega, \omega, M) \rightarrow f(r \times v, a) \rightarrow \sum N(q_i, C_i)$$

- При описании распределения сохраняется информация о долготном распределении объектов (существенно для КО на высоких орбитах)
- Емкое описание локализации объектов в фазовом пространстве
- Универсальный инструмент для аппроксимации сложных распределений орбитальных параметров КО

Риски столкновения с малоразмерными фрагментами



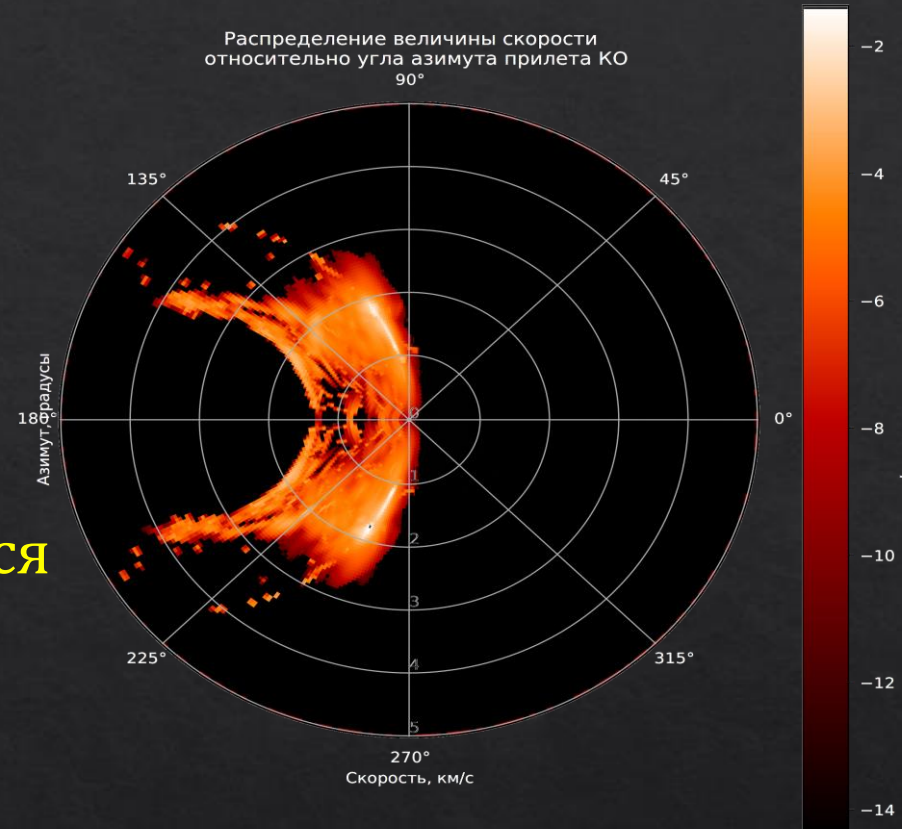
Модели статистического распределения космического мусора, разрабатываемые в ИПМ



Прогноз ожидаемого потока малоразмерных фрагментов через поверхность КА

Оценка величины и направление скорости

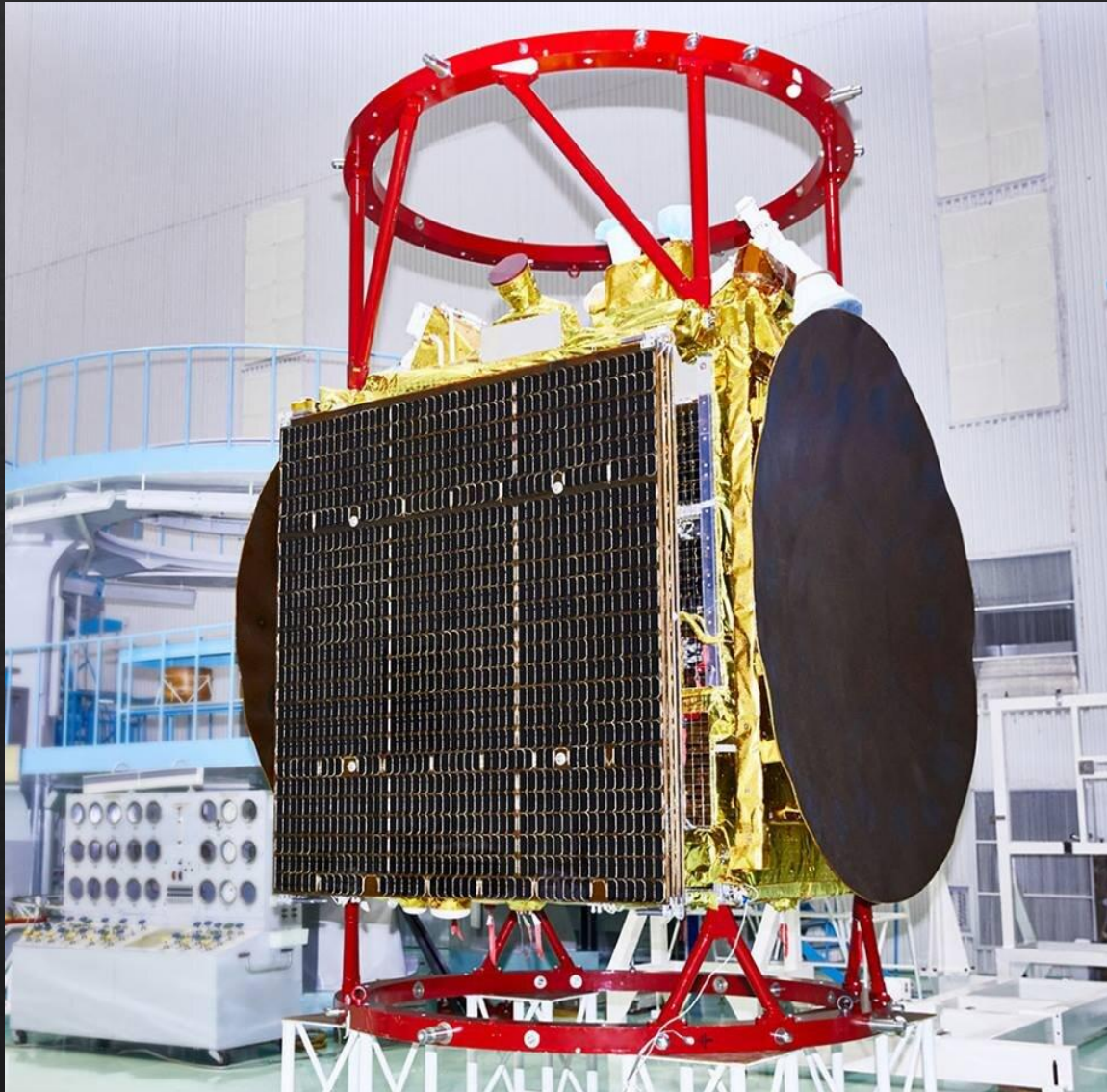
Тип сталкивающихся фрагментов



Столкновение с ненаблюдаемыми фрагментами в ОКП нельзя предотвратить.

- Количество столкновений может быть снижено путем изменения орбиты КА
- Знание распределения направлений и величин скорости прилета фрагментов позволяет уменьшить риск путем защиты наиболее важных элементов борта КА.

Выведение КА «Ангосат-1» в декабре 2017 года

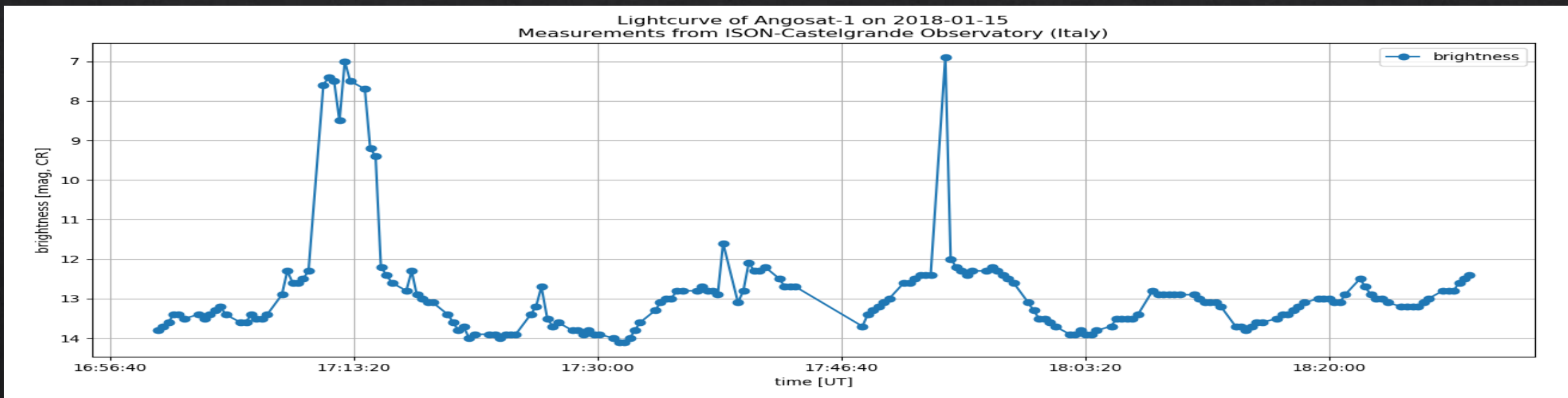
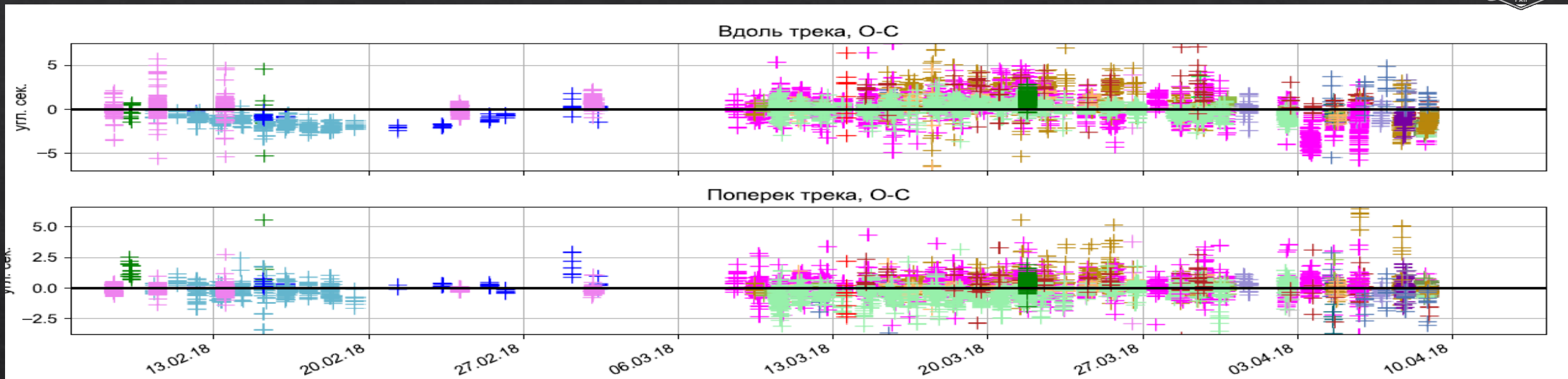


КА «Ангосат-1» перед запуском



Запуск КА «Ангосат-1», снятый телескопом ИПМ

Нештатная ситуация с КА «Ангосат-1»



Информационные возможности, полезные страховым компаниям



- **Объективный контроль** состояния высокоорбитальных космических аппаратов
- **Независимая оценка рисков** столкновения действующих космических аппаратов с объектами «космического мусора»
- **Возможность выявления** внешних источников возникновения аварийной ситуации (объектов космического мусора)
- **Оперативное информирование** о нештатных ситуациях в космическом пространстве

Объективная оценка состояния космического аппарата при возникновении нештатных ситуаций может быть полезной страховым компаниям для оценки условий возмещения ущерба



Российская Академия Наук

Благодарю за внимание!

Контактная информация:

E-mail: elena@keldysh.ru

Тел.: +7 968 619 25 14