



Российская Академия Наук
Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша

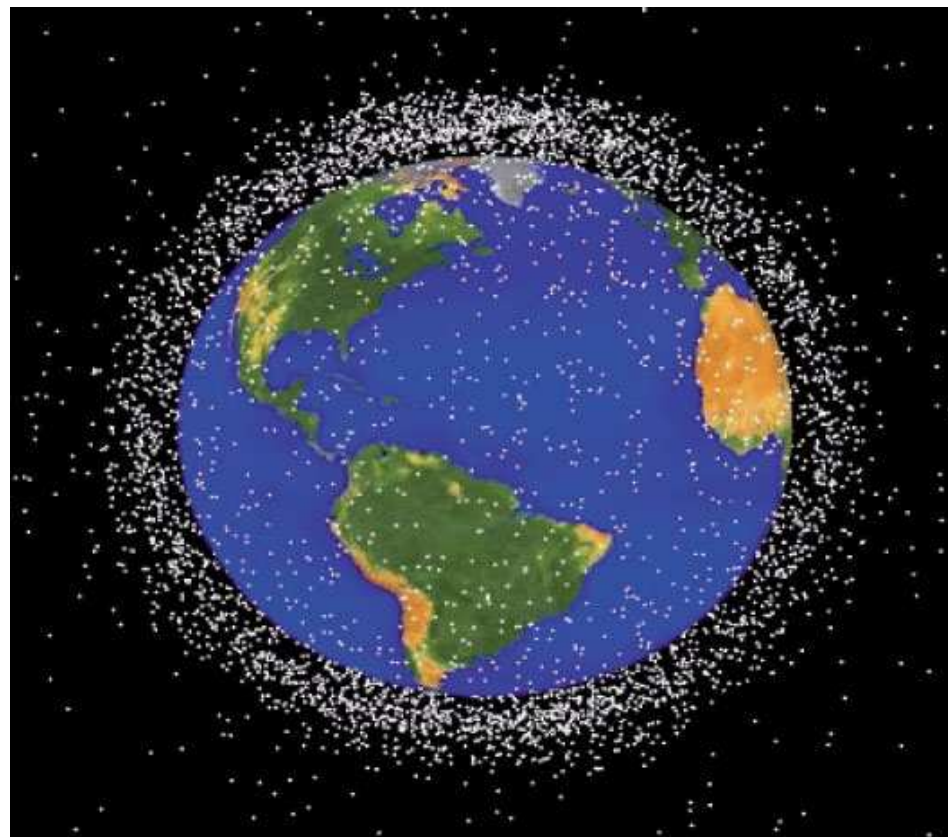
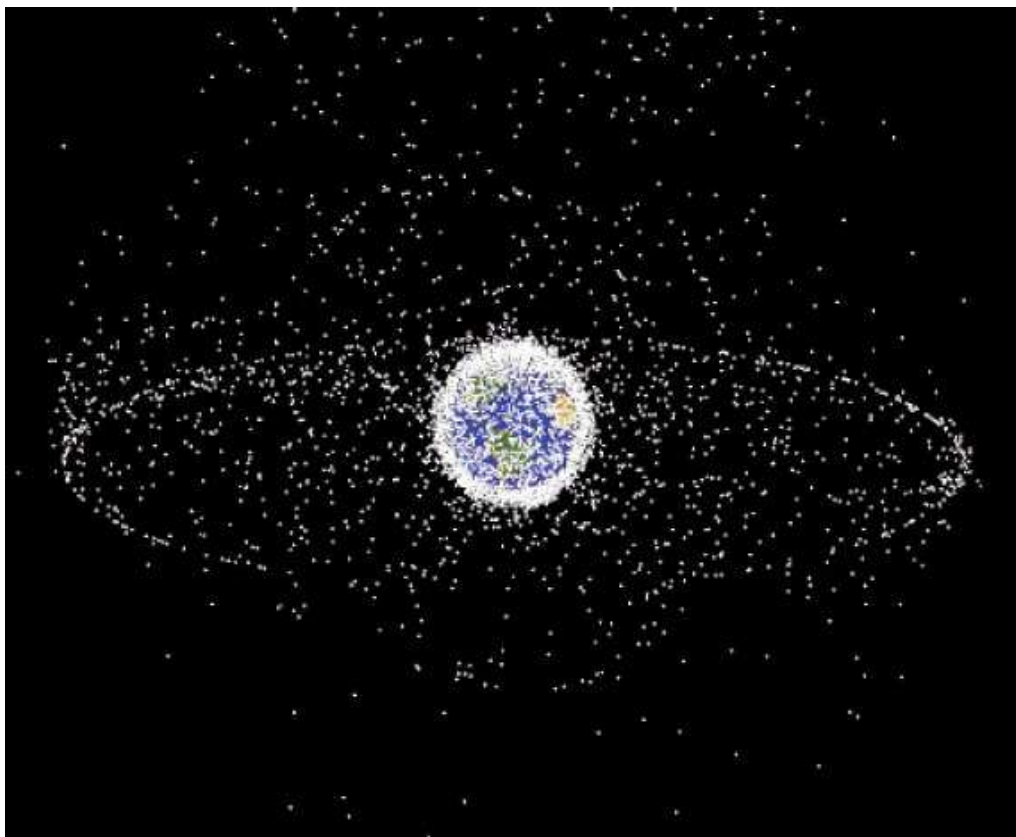
Основные результаты работы НСОИ АФН по исследованию техногенной засоренности ОКП

В.Агапов

«НАБЛЮДЕНИЕ ОКОЛОЗЕМНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ».

10-12 ноября 2011 г.

Космический мусор



- Все нефункционирующие КО искусственного происхождения
- В их числе: отработавшие ступени РН, нефункционирующие КА, фрагменты около 200 разрушений
- Около 20000 объектов размером более 10 см
- Около 600000 объектов размером 1-10 см

Актуальность проблемы «космического мусора»

- В июне 2007 г. на заседании Комитета ООН по использованию космического пространства в мирных целях приняты Руководящие принципы предупреждения образования космического мусора (документ A/62/20), разработанные в НТПК на основе документа Межагентского координационного комитета по космическому мусору (МККМ)
- На сессии Генеральной Ассамблеи ООН в ноябре 2007 г. Руководящие принципы предупреждения образования космического мусора одобрены на самом высоком международном уровне (документ A/RES/62/217 от 01.02.08). Принципы носят рекомендательный характер и представляют собой первый документ, определяющий «кодекс поведения» в космосе
- Начата работа в направлении выработки «правил дорожного движения» в космосе и контроля их соблюдения

Целый ряд аспектов (технических и юридических), связанных с проблемой космического мусора, требует дальнейшего внимательного изучения и анализа.

Резолюция Генеральной Ассамблеи ООН 62/217, 1 февраля 2008 г.

Генеральная Ассамблея,
.....

учитывая, что проблема космического мусора волнует все государства,
.....

26. одобряет руководящие принципы предупреждения образования космического мусора, принятые Комитетом по использованию космического пространства в мирных целях;

27. соглашается с тем, что добровольные руководящие принципы предупреждения образования космического мусора отражают существующую практику, выработанную рядом национальных и международных организаций, и призывает государства-члены применять эти руководящие принципы с помощью соответствующих национальных механизмов;

28. считает, что государствам-членам крайне необходимо уделять больше внимания проблеме столкновений космических объектов, в том числе с ядерными источниками энергии, с космическим мусором и другим аспектам проблемы космического мусора, призывает продолжать национальные исследования по этому вопросу, **разрабатывать усовершенствованные технологии наблюдения за космическим мусором и собирать и распространять данные о космическом мусоре**, считает также, что, по мере возможности, информацию по этому вопросу следует представлять Научно-Техническому подкомитету, и согласна с необходимостью международного сотрудничества для расширения соответствующих и доступных стратегий сведения к минимуму воздействия космического мусора на будущие космические полеты;

Компоненты задачи мониторинга ОКП для изучения обеспечения безопасности космической деятельности в условиях техногенной засоренности

- **Наблюдения** объектов в ОКП (детерминированные и статистические), определение их орбитальных характеристик и физических свойств, источников образования
- **Выявление и прогнозирование развития опасных ситуаций**
- **Контроль выполнения мероприятий по снижению засоренности**
- **Моделирование** состояния засоренности ОКП и его динамики на длительных интервалах времени с учетом различных сценариев космической деятельности, оценка эффективности предлагаемых мероприятий по снижению засоренности и очистке ОКП

Организационная основа работ по космическому мусору в РАН

- В 2001 г. впервые образована экспертная рабочая группа Совета РАН по космосу по проблеме космического мусора (Распоряжение Президиума РАН №10103-142 от 28.02.2001 г.)
 - на ИПМ им М.В. Келдыша возложены обязанности по проведению работ по сбору, хранению, обработке и анализу информации по космическому мусору в специальном Центре, созданном на базе Баллистического центра ИПМ
- Распоряжение Президиума РАН №10310-54 «О создании Единой информационной системы фундаментальных космических исследований» от 28.01.2008
- Решение руководителей Роскосмоса (№АП-56 от 02.07.08) и РАН (№69 от 17.10.08) об организации взаимодействия при решении задач АСПОС ОКП
- Положение об информационном взаимодействии между Роскосмосом (Центральным ядром АСПОС ОКП) и РАН (Сегментом АСПОС ОКП в ИПМ им. М.В.Келдыша)

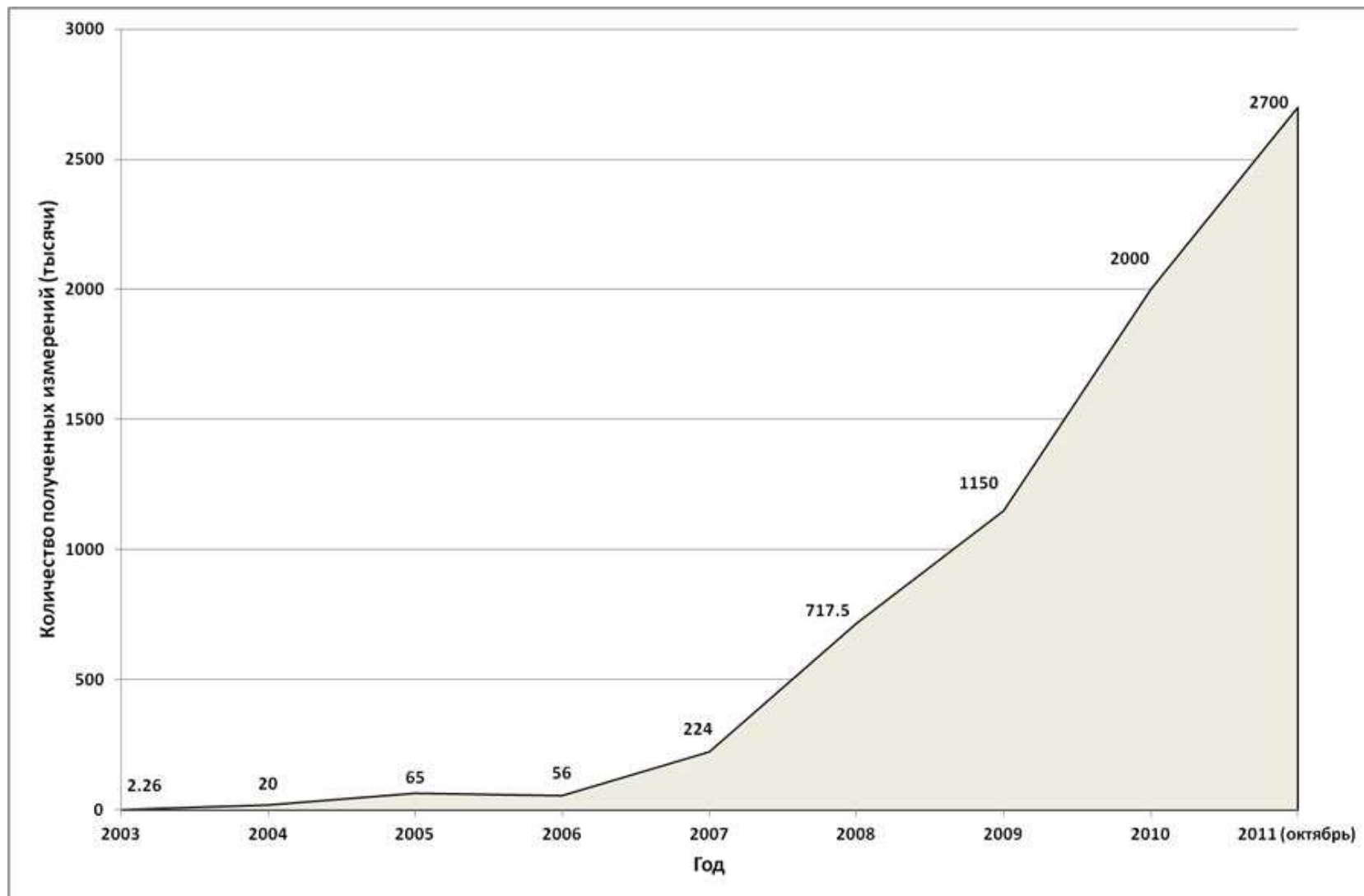
Цели исследований, проводимых под руководством ИПМ им.М.В.Келдыша РАН

- определение фактической населённости высоких околоземных орбит и физических свойств находящихся на них объектов
- определение вероятных источников образования обнаруженных объектов
- верификация существующих моделей распределения космического мусора
- оценка опасности, которую представляют фрагменты для КА на высоких орбитах в настоящем и будущем
- отработка технологий изучения объектов космического мусора на различных орбитах с помощью оптических инструментов
- совершенствование используемых моделей движения

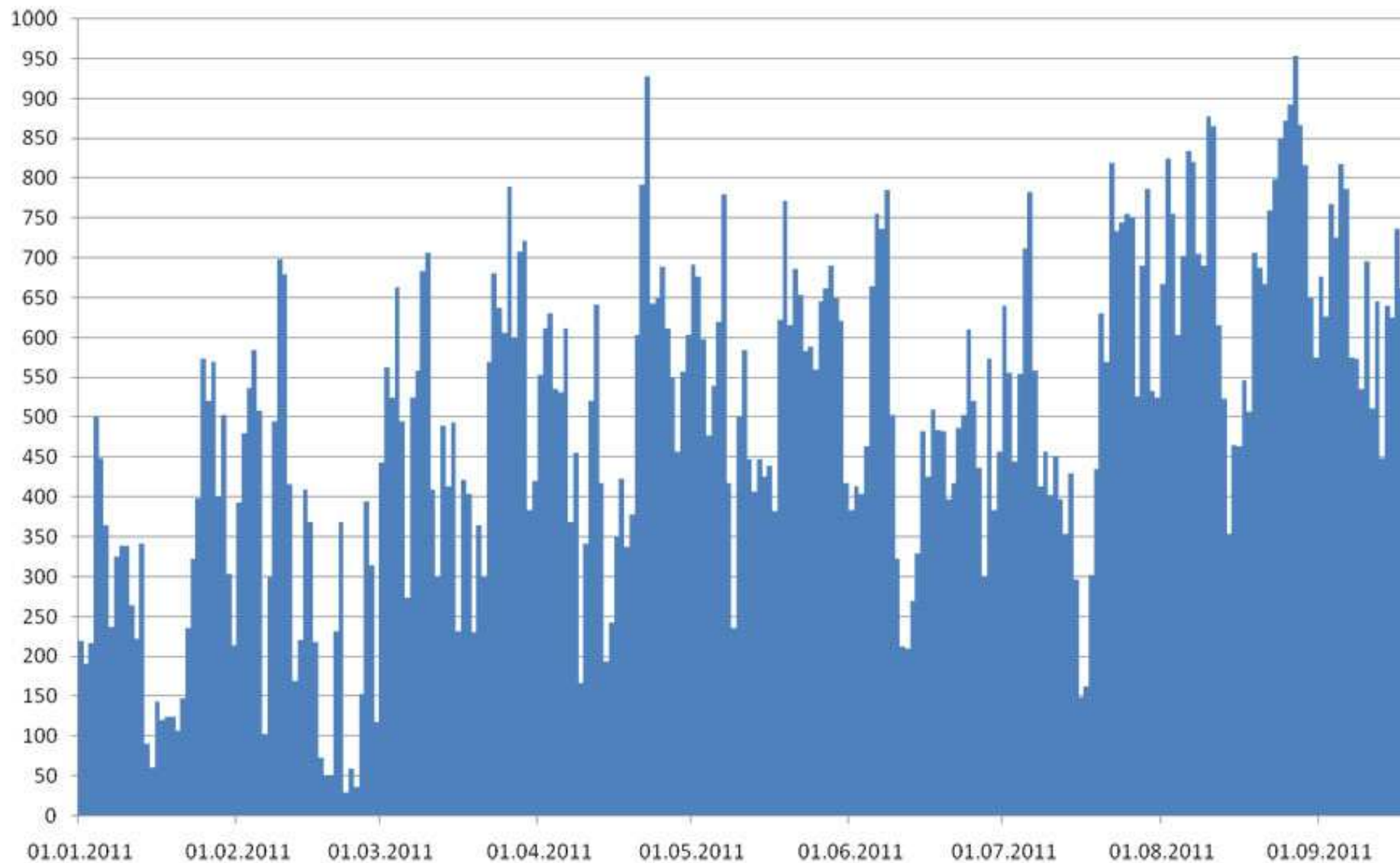
Особенности наблюдений объектов на высоких орбитах

- Только оптические средства эффективны, но они имеют известные ограничения (погода, наблюдения только в темное время суток, помехи от фоновых источников света)
- Большая пространственная область видимых положений объектов на небесной сфере
- Широкий диапазон видимого блеска потенциально опасных объектов (от 7 до 21 зв. величины) в сочетании с его переменностью и с переменной угловой скоростью видимого движения (от единиц угл. сек в сек до 2° в сек)
- Невозможность ведения непрерывных наблюдений объектов в области ГСО. Возможность организации эффективных обзоров
- Необходимость пространственно-временного поиска объектов на сложных орбитах (ВЭО с перигеем ниже 400 км) или со сложными физическими свойствами (большое и переменное отношение площади к массе)

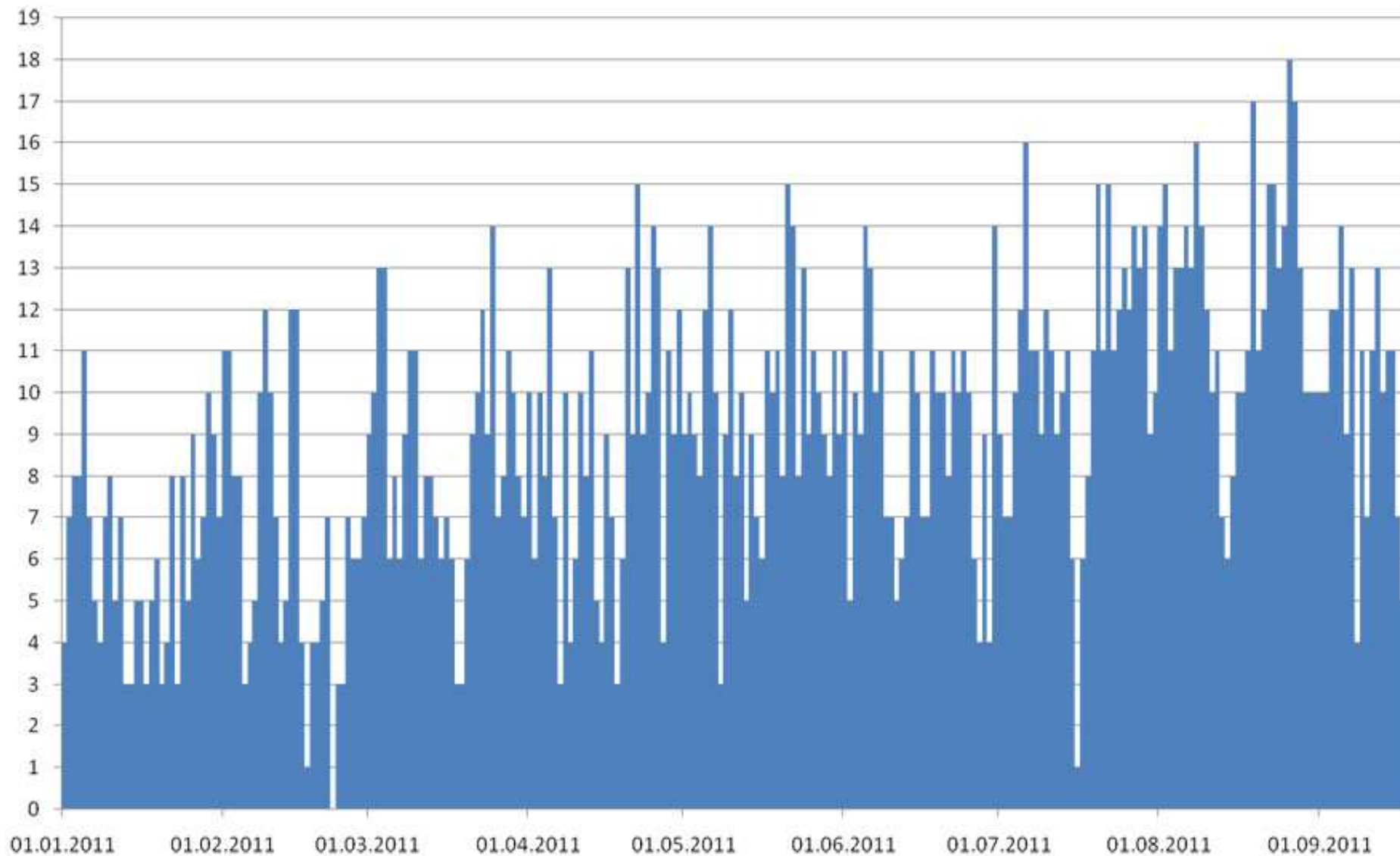
Рост количества измерений, получаемых сетью НСОИ АФН



Количество наблюдаемых объектов в 2011 г. (по ночам)



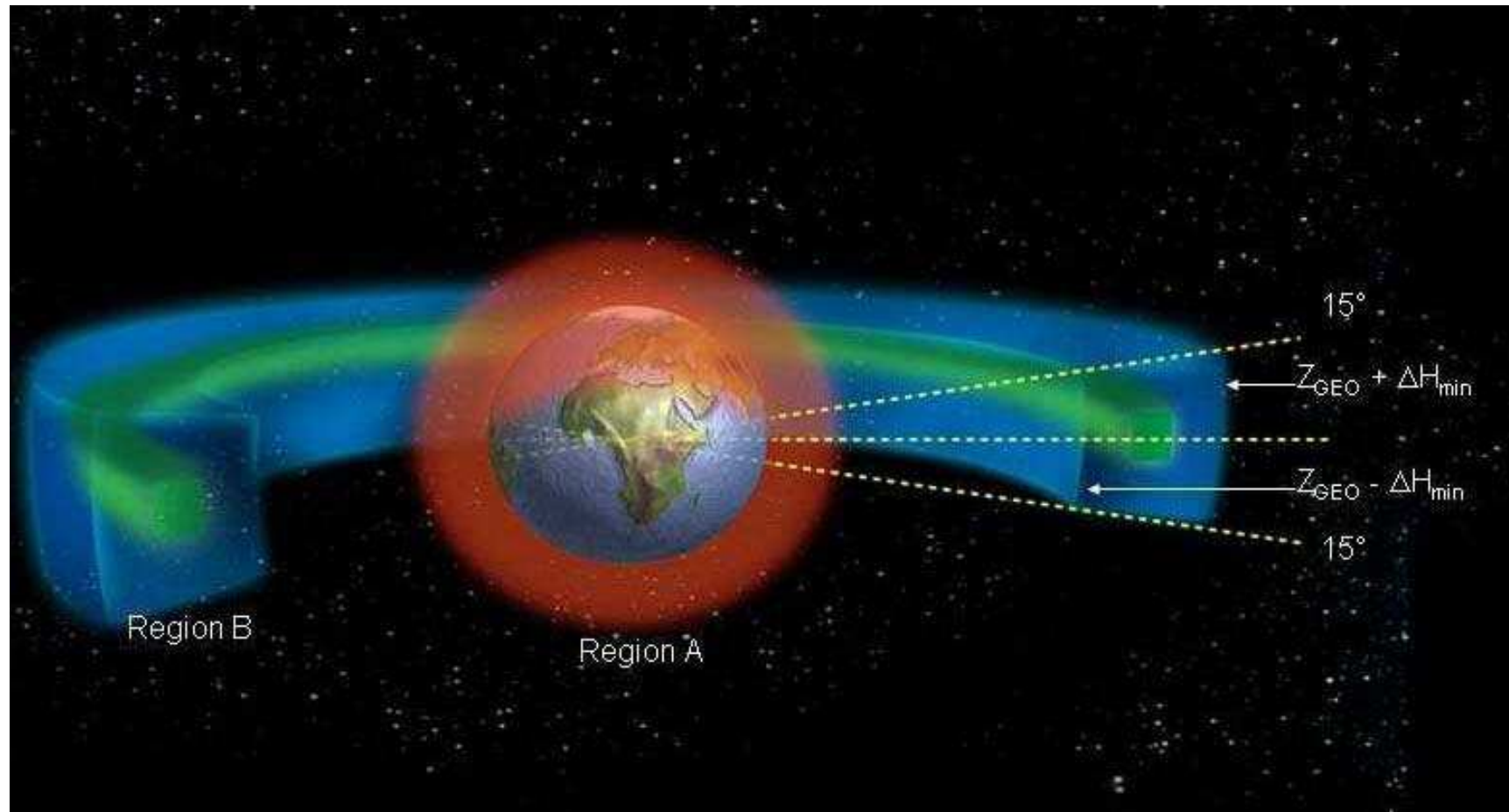
Количество работавших инструментов в 2011 г. (по ночам)



Полнота контроля области ГСО сетью НСОИ АФН

- Всего сетью НСОИ АФН на начало 2011 г. отслеживалось 1557 объектов в области ГСО (по сравнению с 1016 объектами для которых данные предоставляются СККП США посредством специального Web-сервиса SpaceTrack), включая
 - космические аппараты – 922
 - 404 - функционирующие
 - 518 – не функционирующие
 - ступени РН, РБ, апогейные ДУ – 257
 - более чем 15 различных типов (модификаций)
 - фрагменты и объекты неизвестного типа – 378
 - (только 20 фрагментов в области ГСО официально каталогизировано системой ККП США)
- За 2011 г. обнаружено 96 новых объектов в области ГСО (общее количество достигло 1653 на 01.10.2011 г.)

Защищаемые области околоземного пространства



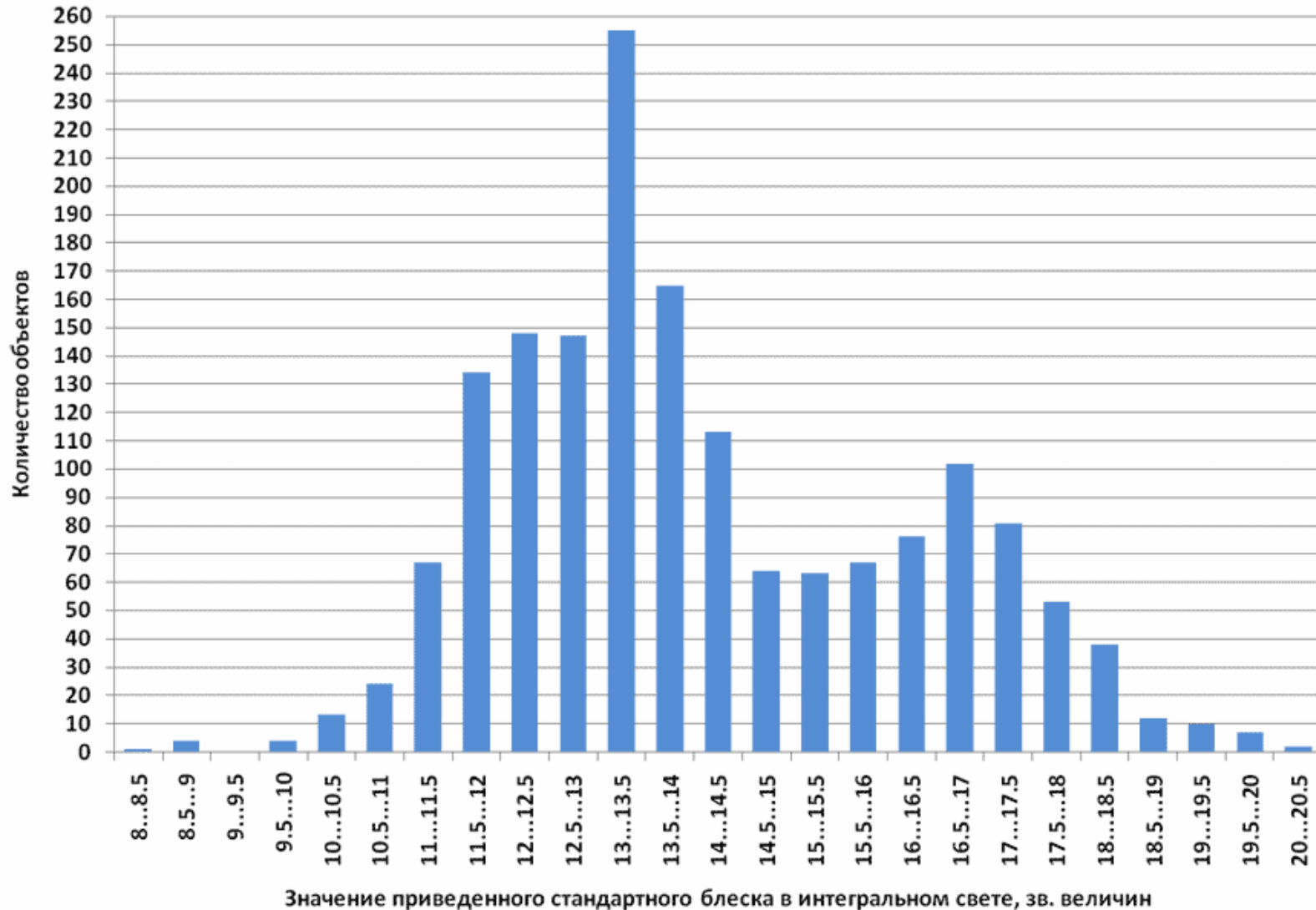
В документах ООН выделены защищаемые области ОКП, одна из которых – область ГСО

Популяция защищаемой области ГСО в 2010 г.

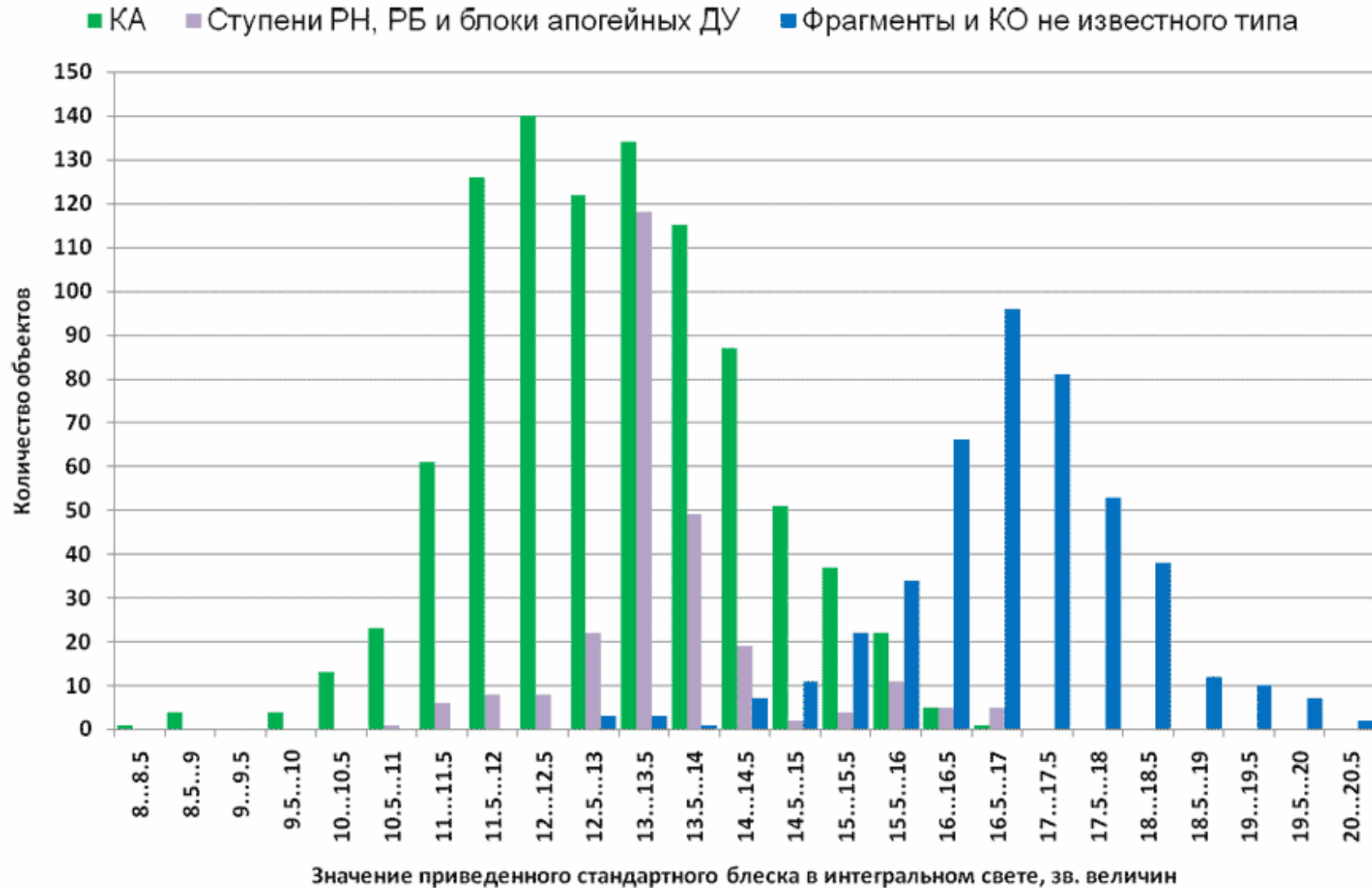
Тип объекта	Общее количество	Диапазон наклонов, °	Диапазон эксцентриситетов	Диапазон периодов, мин
Функционирующие КА	391	0.0-16.3	0.0000-0.1067	1435.52-1436.14
Не функционирующие КА	282	0.3-21.1	0.0000-0.1804	1197.7-1458.2
<i>включая постоянно находящиеся в защищаемой области ГСО</i>	<i>212</i>	<i>0.8-15.3</i>	<i>0.0000-0.0039</i>	<i>1430.4-1445.2</i>
Верхние ступени РН, РБ и апогейные ДУ	174	0.2-23.1	0.0003-0.1784	1197.6-1766.0
<i>включая постоянно находящиеся в защищаемой области ГСО</i>	<i>67</i>	<i>1.2-15.3</i>	<i>0.0003-0.0044</i>	<i>1428.9-1444.1</i>
Фрагменты и объекты не установленного типа	250	0.2-20.6	0.0009-0.2045	1161.2-1617.3
<i>включая постоянно находящиеся в защищаемой области ГСО</i>	<i>13</i>	<i>10.9-14.4</i>	<i>0.0009-0.0042</i>	<i>1433.1-1439.7</i>
ИТОГО	1097	0.0-23.1	0.0000-0.1784	1197.6-1766.0
<i>включая постоянно находящиеся в защищаемой области ГСО</i>	<i>683</i>	<i>0.0-15.3</i>	<i>0.0000-0.1067</i>	<i>1428.9-1445.2</i>

Функционирующие КА - 35.6% общей популяции защищаемой области ГСО (57.2% объектов постоянно находящихся в этой области)

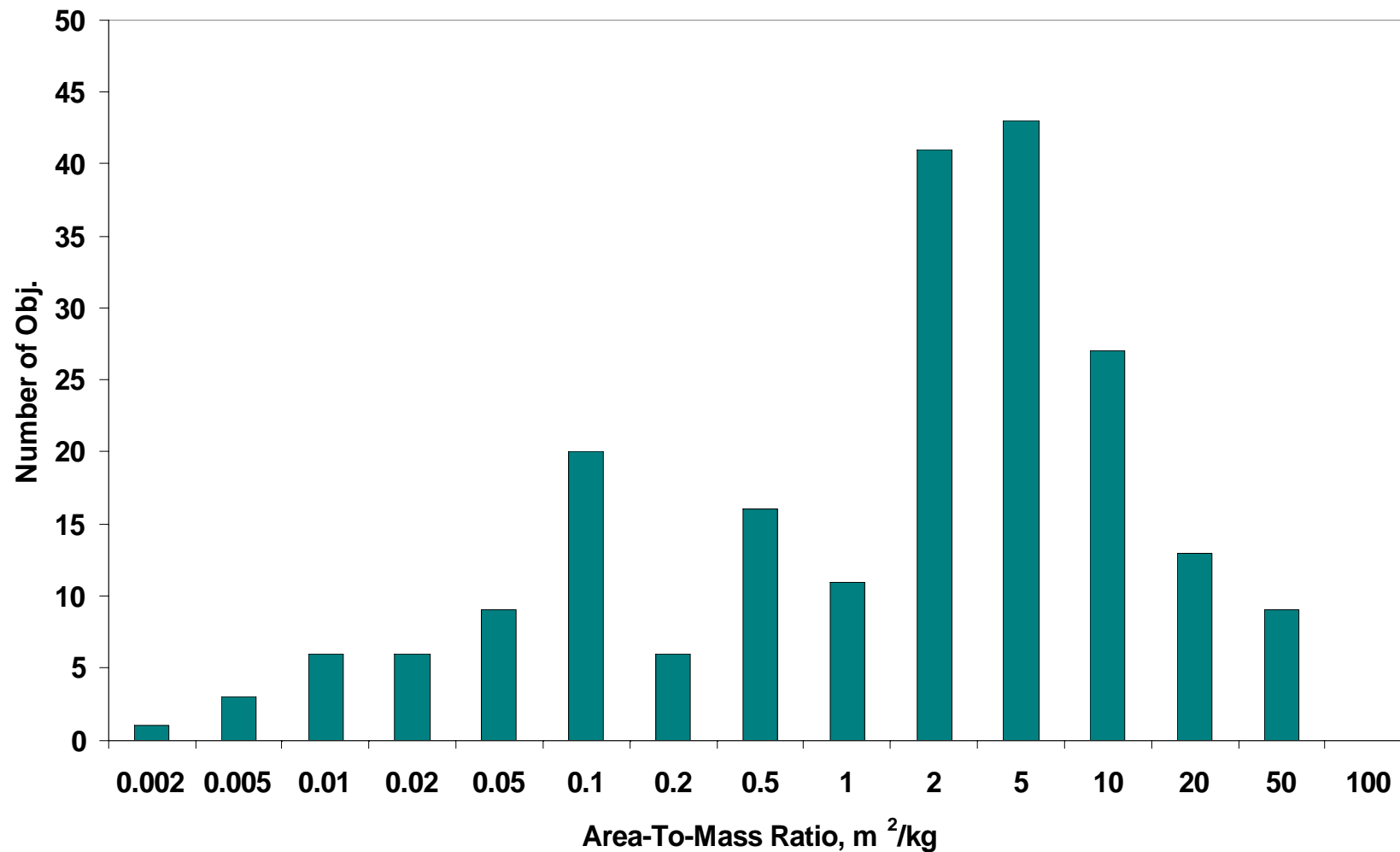
Распределение ГСКО по стандартному блеску $D=40000$ км, $\varphi=0^\circ$, модель диффузной сферы (1650 объектов)



Распределение ГСКО по стандартному блеску $D=40000$ км, $\varphi=0^\circ$, модель диффузной сферы (1650 объектов)

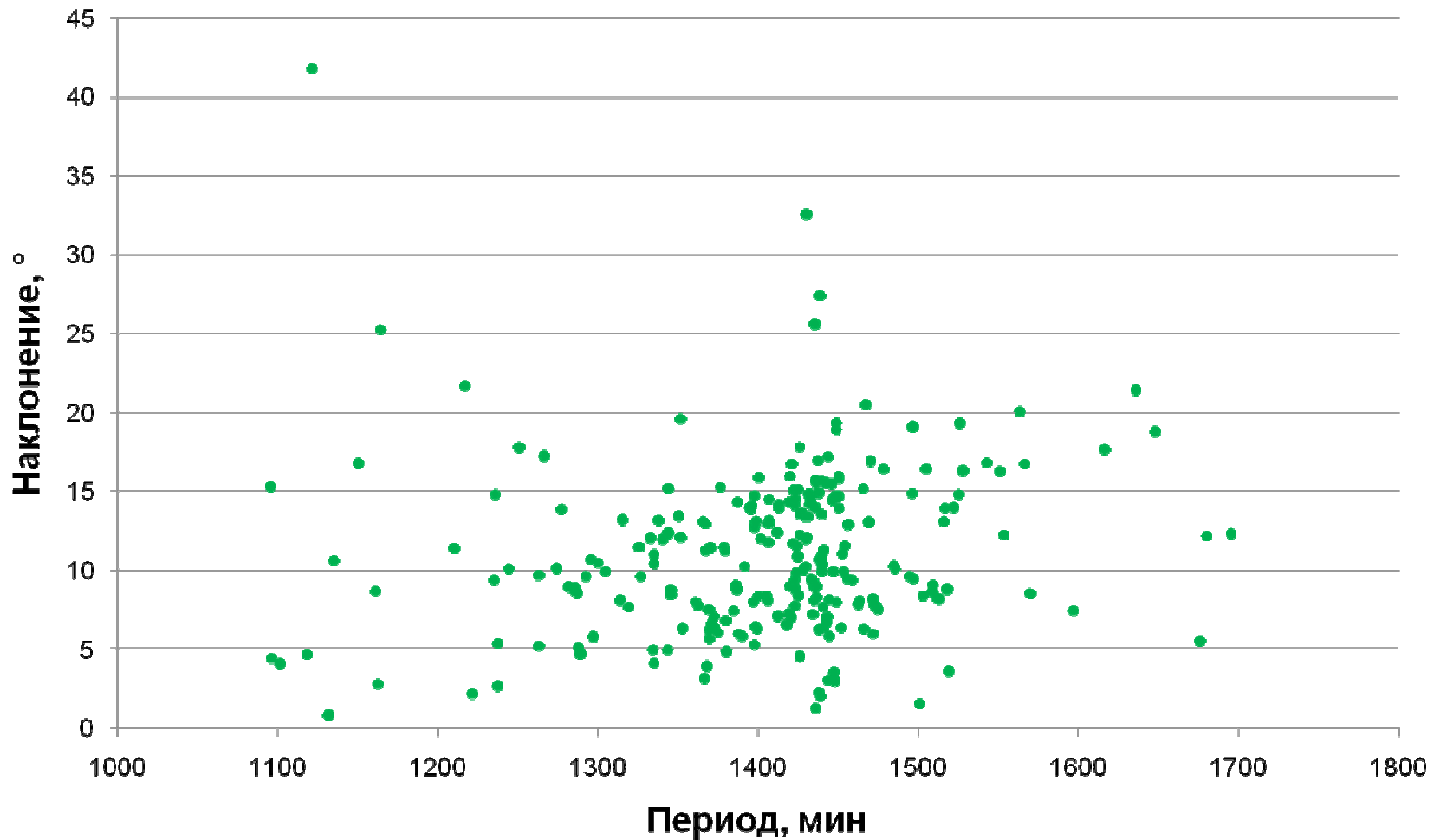


Характеристики обнаруженных высокоорбитальных фрагментов



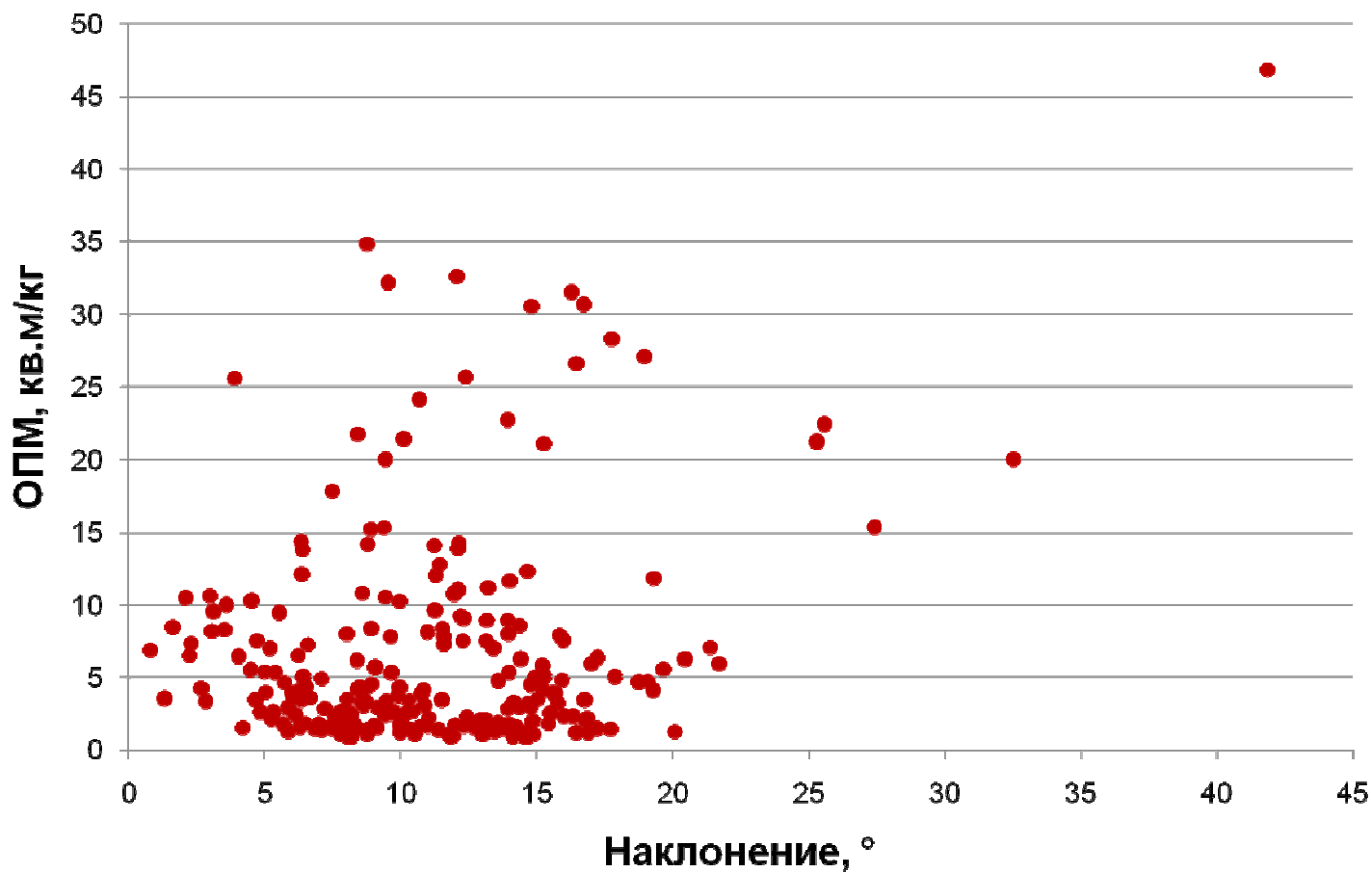
Распределение отношения площади к массе для 211 фрагментов

Характеристики обнаруженных фрагментов с большим ОПМ

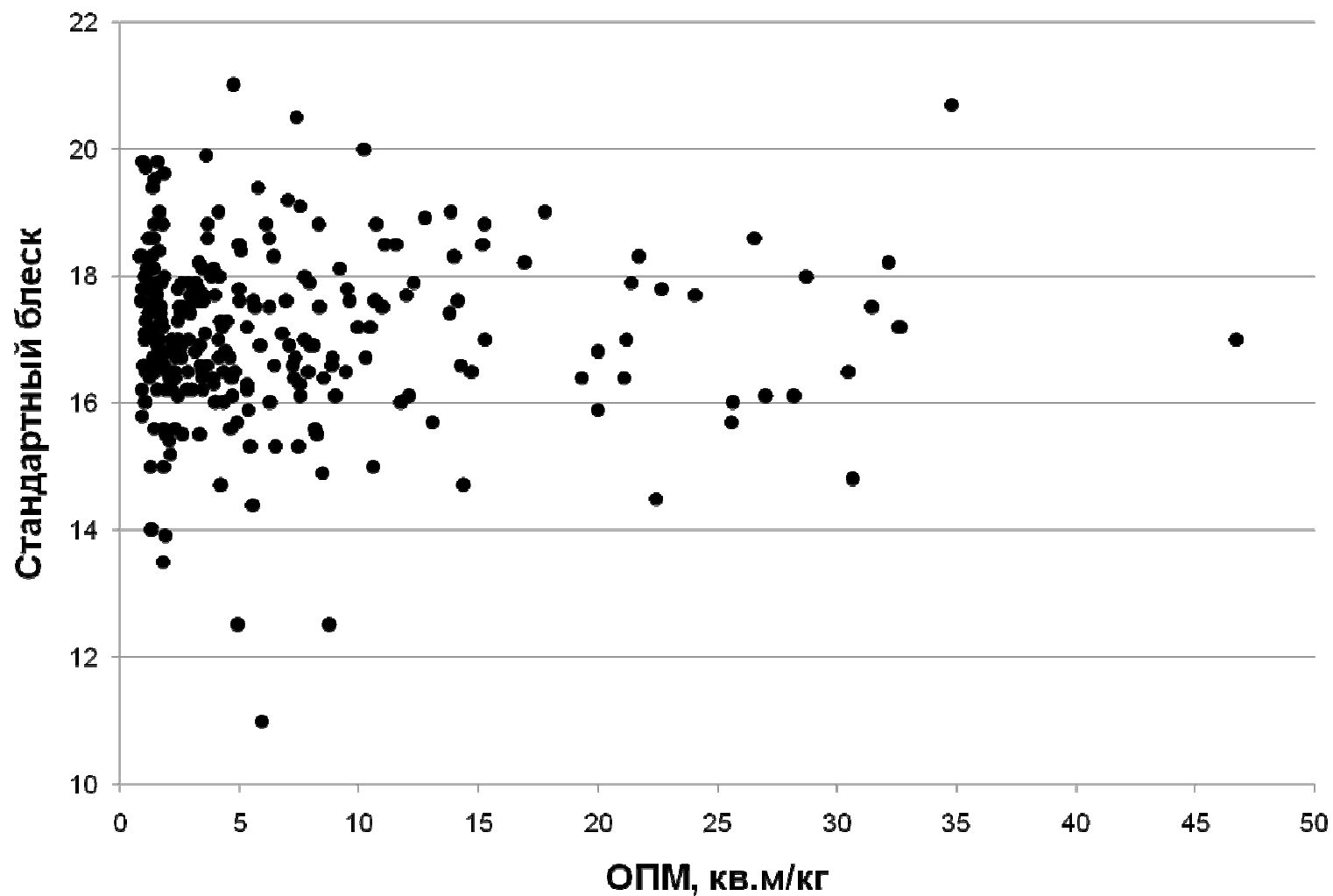


Распределение объектов с большим ОПМ по периоду и наклонению

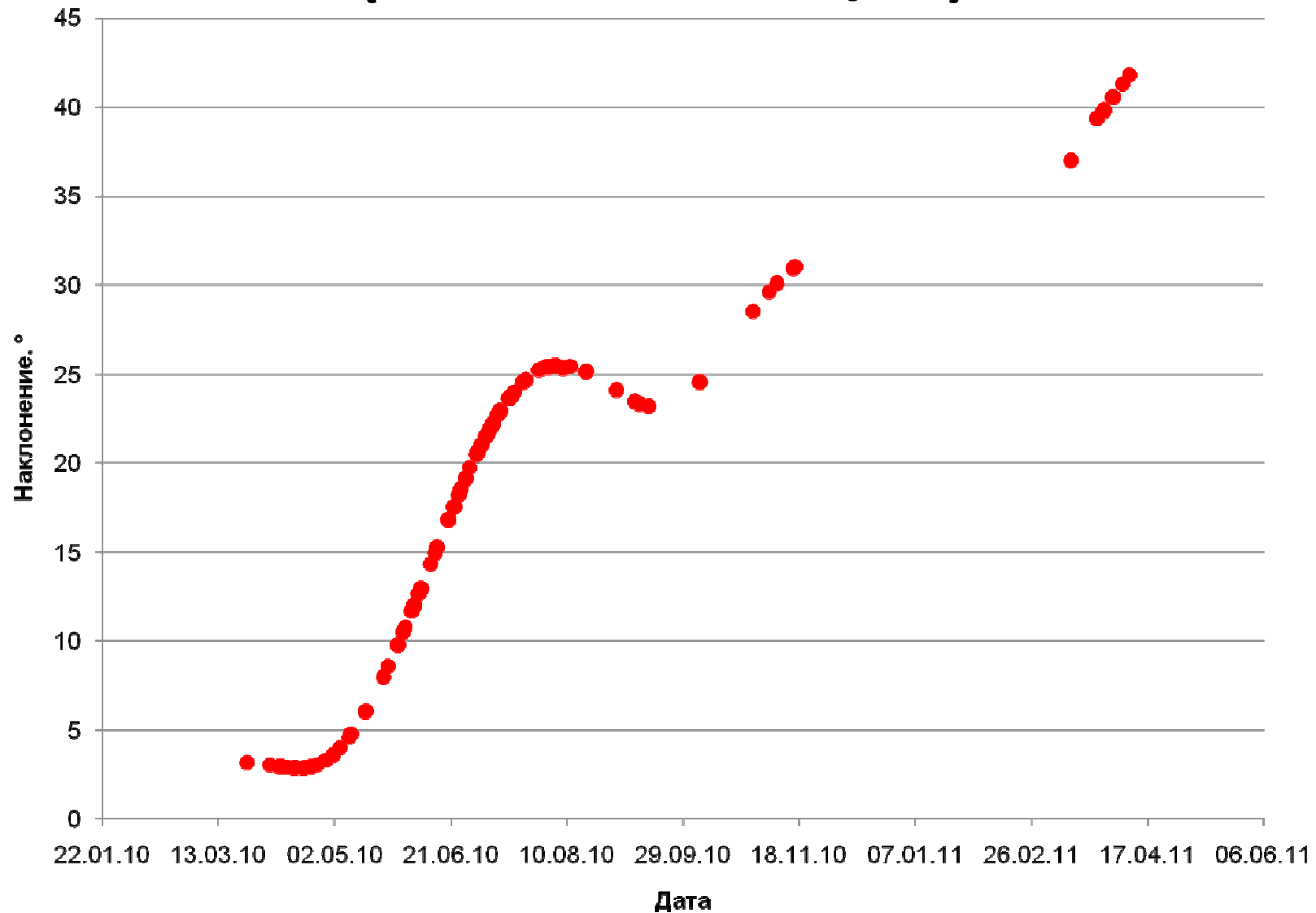
Распределение объектов с большим ОПМ по наклонению и ОПМ



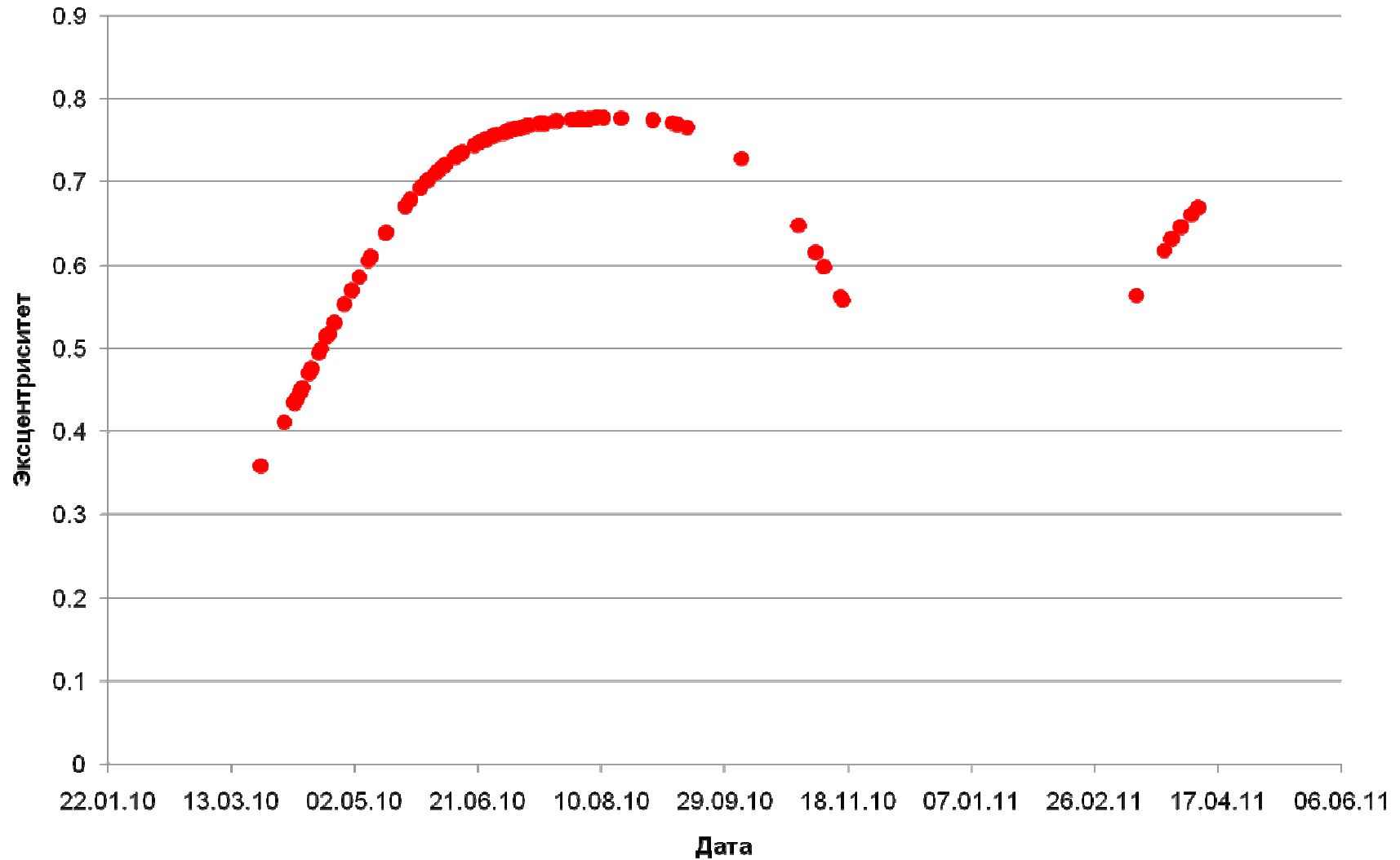
Распределение объектов с большим ОПМ по значению ОПМ и стандартному блеску



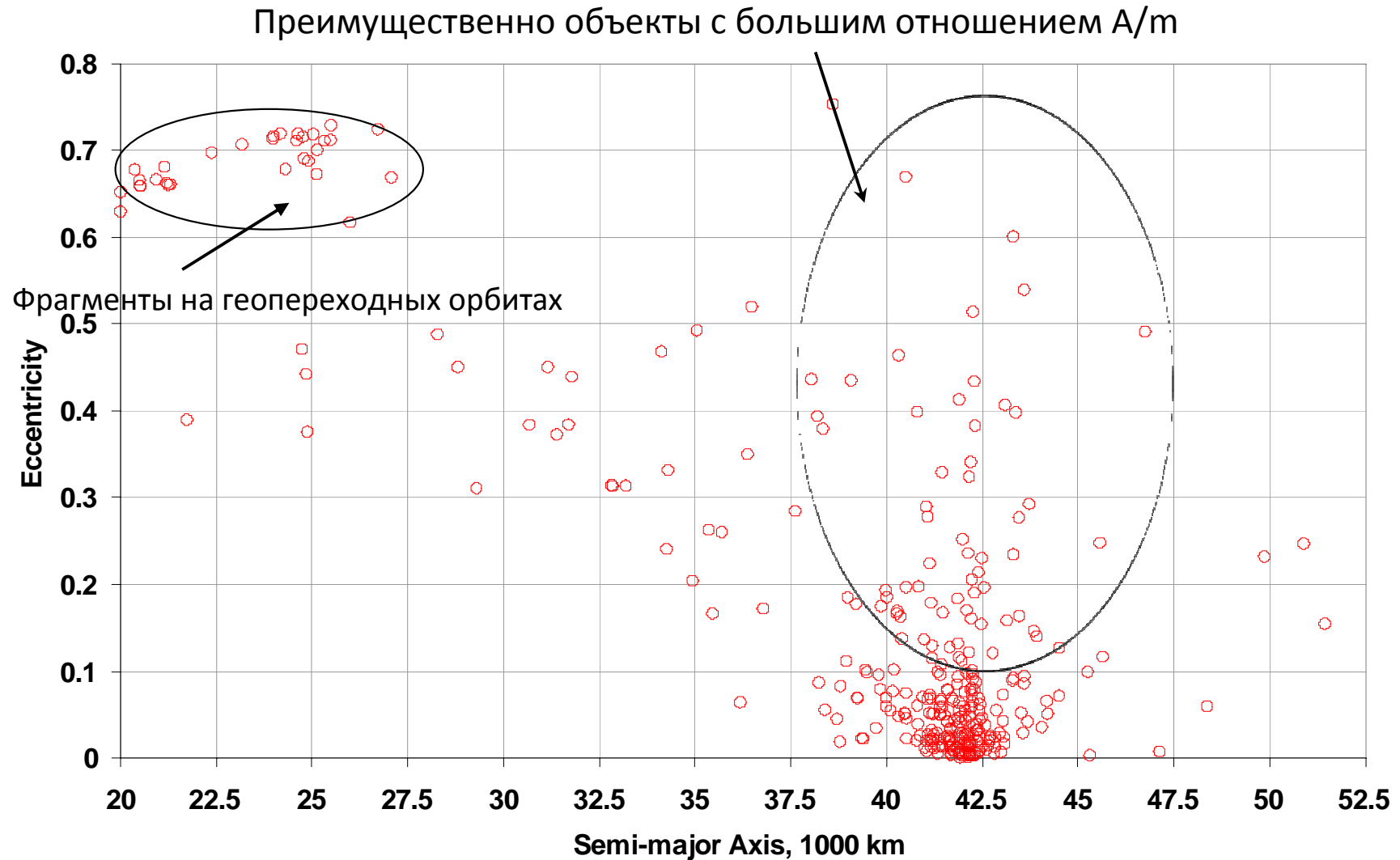
Эволюция наклонения объекта 90200 (ОПМ ~50 кв.м/кг)



Эволюция эксцентриситета объекта 90200 (ОПМ ~50 кв.м/кг)

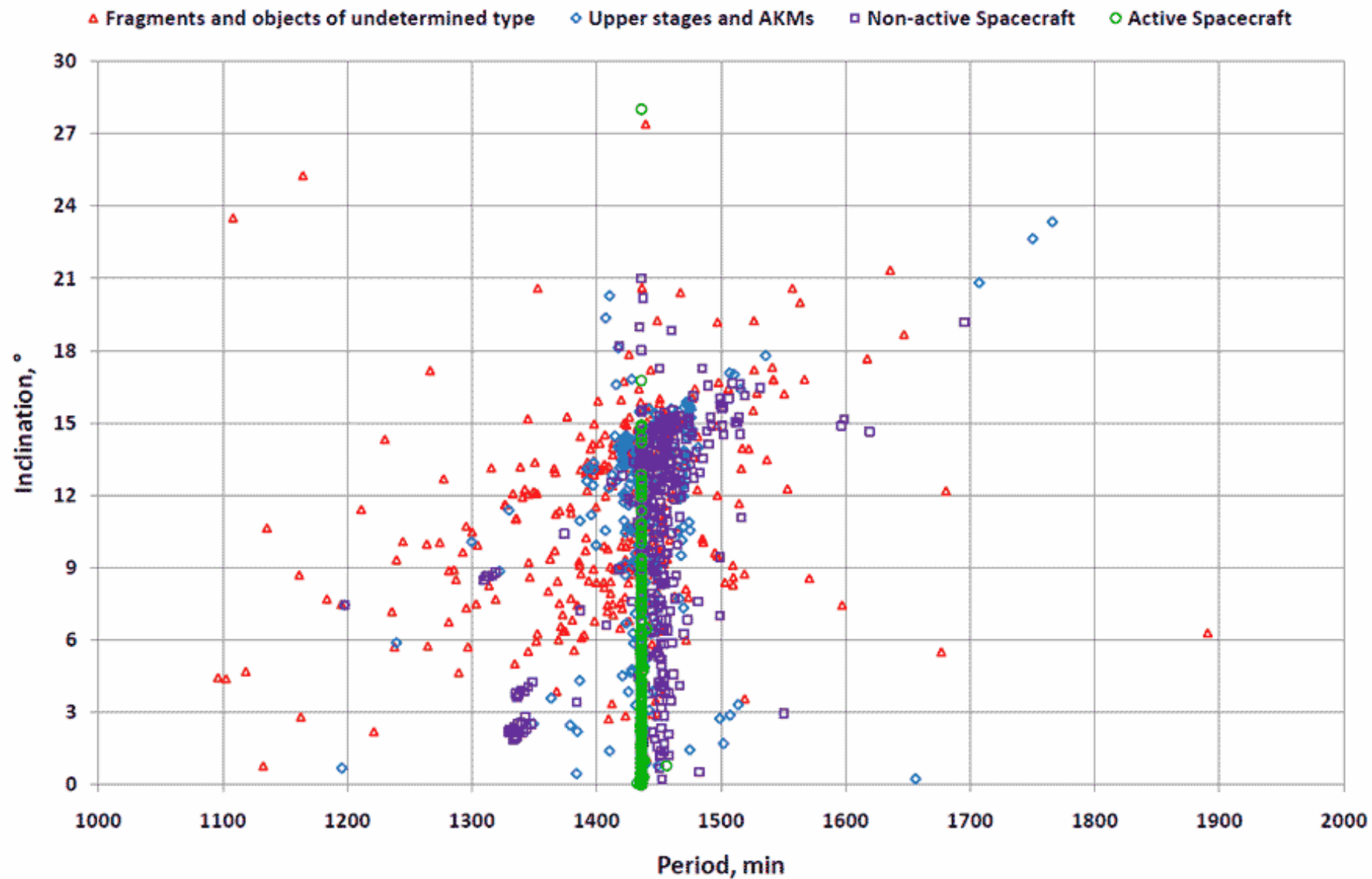


Характеристики обнаруженных высокоорбитальных фрагментов

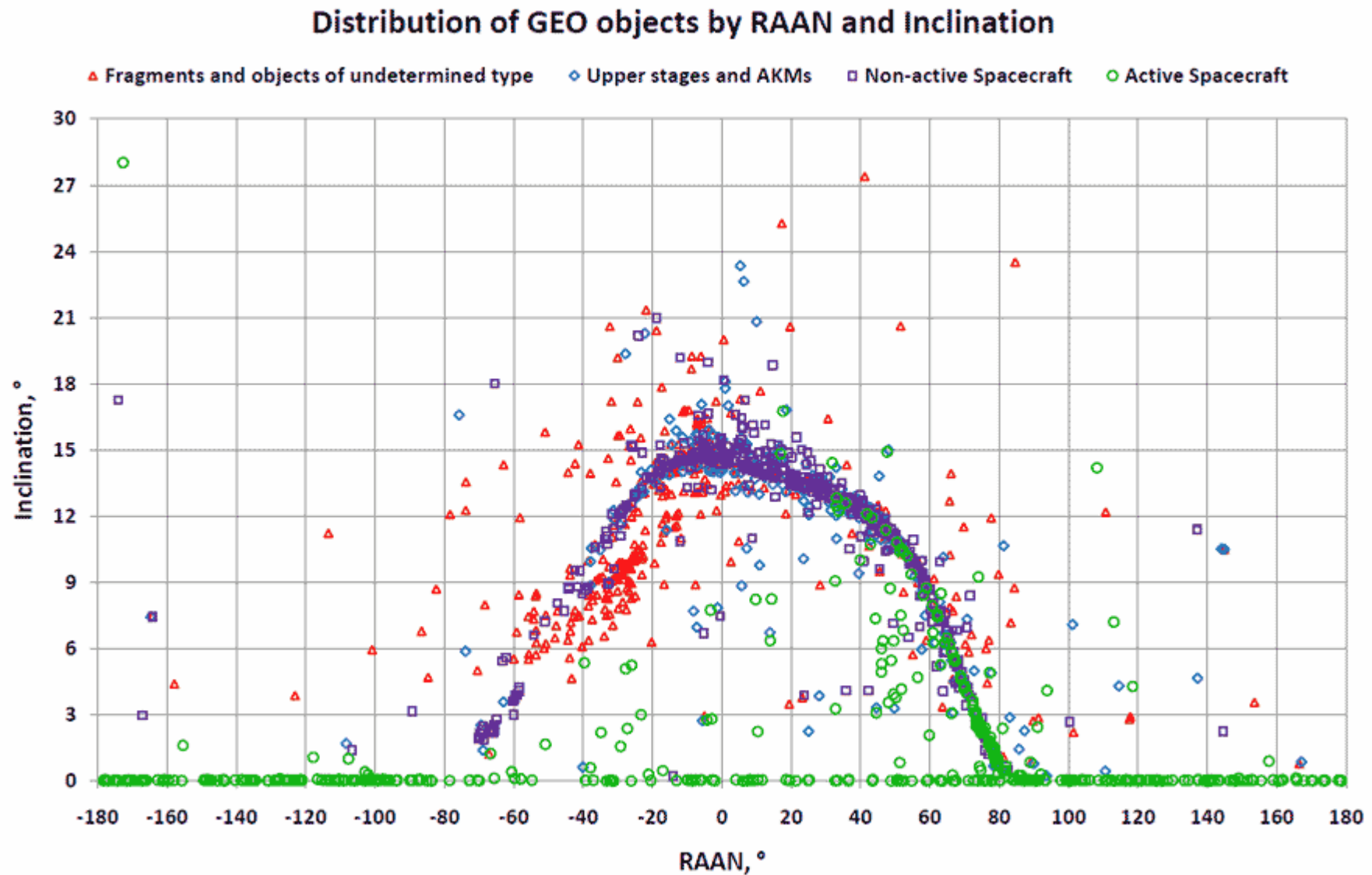


Распределение большой полуоси и эксцентриситета для 336 фрагментов

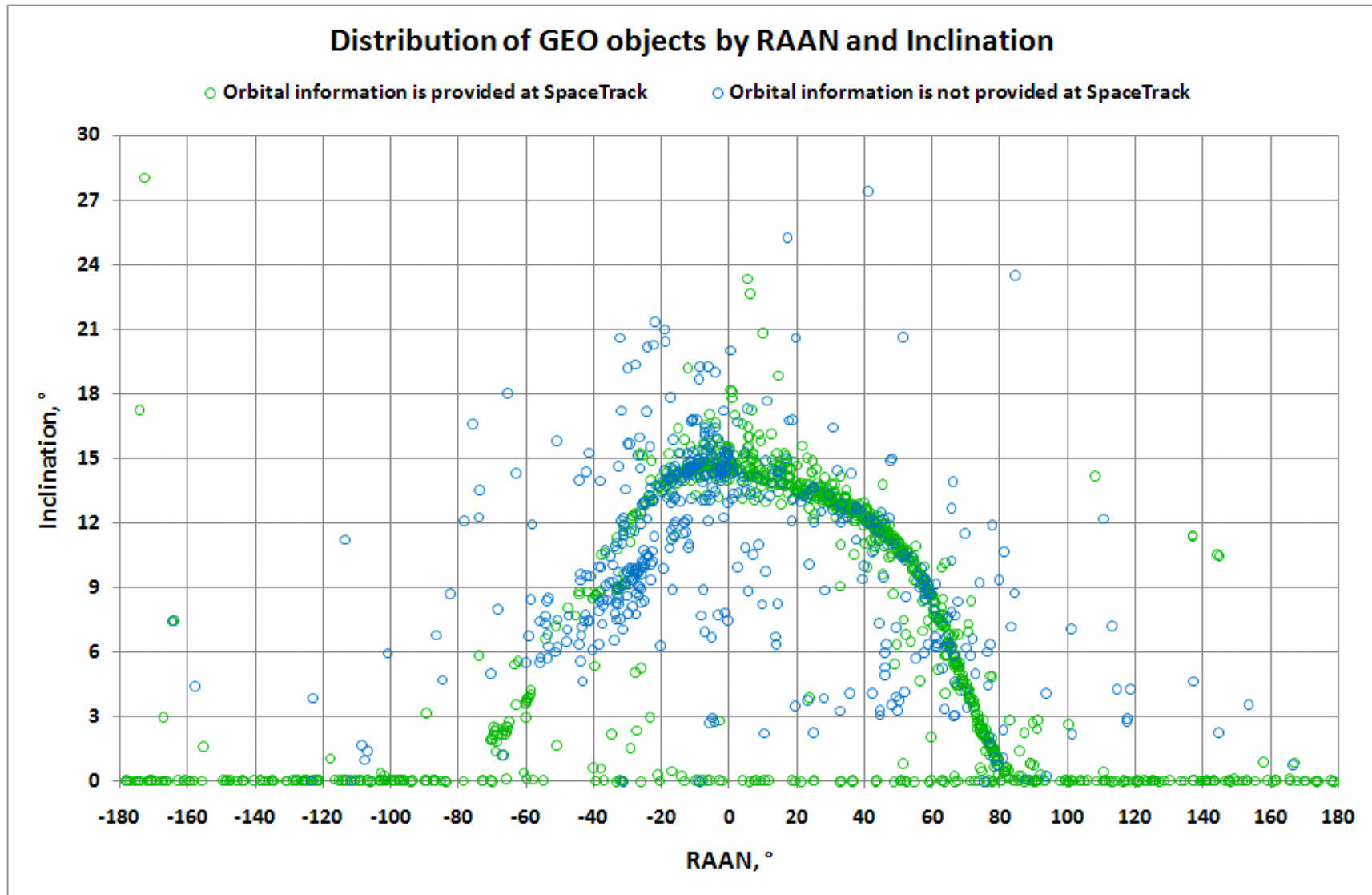
Распределение отслеживаемых объектов в области ГСО по периоду и наклонению



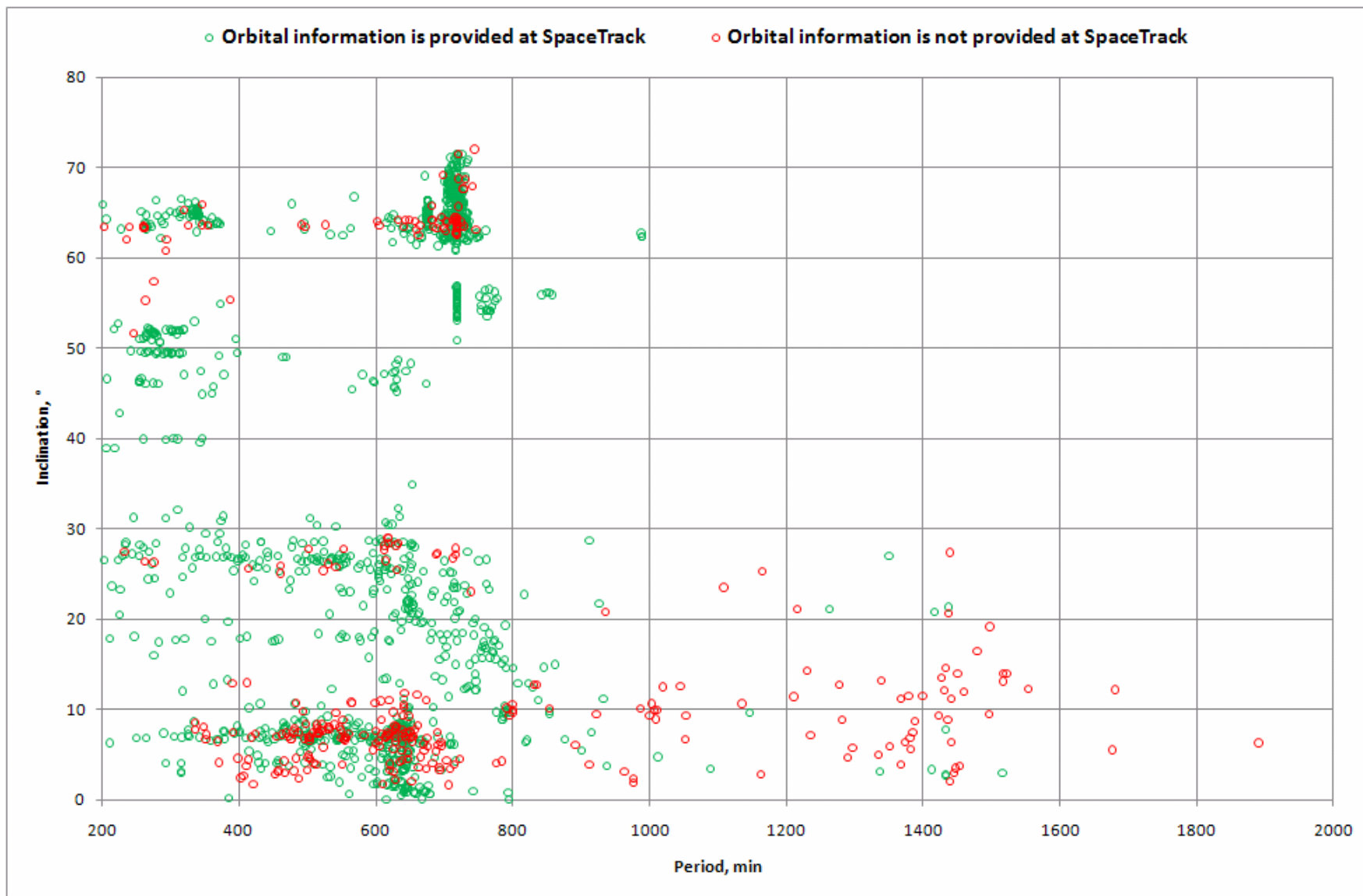
Распределение отслеживаемых объектов в области ГСО по ДВУ и наклонению



Распределение отслеживаемых объектов в области ГСО по ДВУ и наклонению



Распределение отслеживаемых объектов в области ВЭО и СВО по ДВУ и наклонению



Работы в интересах АСПОС ОКП

В ИПМ им. М.В.Келдыша создан Сегмент АСПОС ОКП мониторинга опасных ситуаций в области ГСО, ВЭО и СВО.

Основные решаемые задачи:

- мониторинг объектов в области ГСО, ВЭО и СВО; выявление объектов риска и возможных опасных ситуаций, связанных с этими объектами; сбор измерительной информации, обеспечивающей требуемую точность количественных оценок риска
- выявления фактов нарушения существующих международных рекомендаций по снижению техногенной засоренности
- поддержание в актуальном состоянии базы данных по всем техногенным объектам в областях ответственности

Контроль сближений на ГСО. Электро-Л

- Потенциально опасные сближения возникают не реже 1 раза в месяц
- Прогнозирование сближений осложняется ежесуточной динамикой КА Электро-Л (разгрузка кинетических моментов гироскопов с использованием микродвигателей), приводящей к изменению орбиты
- Выявлен случай, когда проведение штатной коррекции орбиты КА Электро-Л без предварительного анализа изменений в орбитальном окружении после коррекции привело к возникновению потенциально опасного сближения через 4 суток после коррекции
- Получение дополнительных измерений и уточнение параметров орбиты сближающихся объектов во всех случаях позволило исключить необходимость проведения дополнительных маневров и расхода топлива КА

Наблюдение объектов «риска столкновения» при решении задач АСПОС ОКП в области ГСО. Пример выявленного сближения.

Сближение функционирующего КА Экспресс 4А («защищаемый объект») и не функционирующего КА Космос-2319 («объект риска столкновения»), выявленное в Сегменте АСПОС ОКП в ИПМ:

09.09.2011 16:20:41.2 UTC, min расстояние - 1.91 км

компоненты вектора относительного положения в проекциях на оси орбитальной СК, связанной с КА Экспресс 4А:

$$dR = 1.68 \text{ км}, dN = 0.89 \text{ км}, dB = 0.08 \text{ км}$$

СКО ошибок вектора состояния обоих КА на момент сближения (в проекциях на оси орбитальной СК соответствующего объекта):

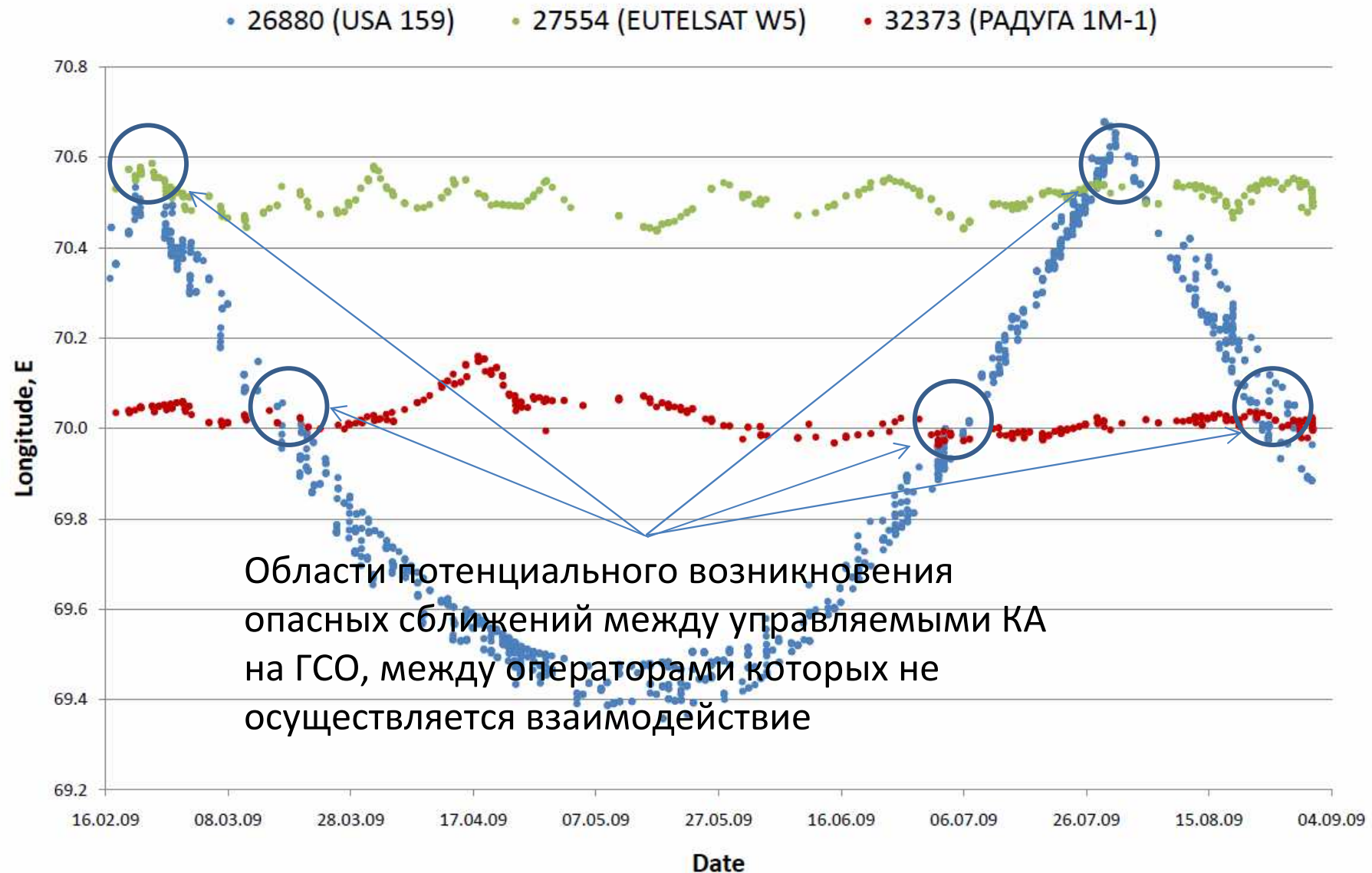
Экспресс 4А:

$$sR = 0.07 \text{ км}, sN = 0.13 \text{ км}, sB = 0.05 \text{ км}$$

Космос-2319:

$$sR = 0.11 \text{ км}, sN = 0.20 \text{ км}, sB = 0.08 \text{ км}$$

Возникновение потенциально опасных ситуаций. Пример – функционирующие КА на ГСО в окрестности 70 в.д.



Работы в интересах АСПОС ОКП. Контроль выполнения рекомендаций по снижению засорённости

Руководящие принципы предупреждения образования космического мусора

Руководящий принцип 1: Ограничение образования мусора при штатных операциях

Руководящий принцип 2: Сведение к минимуму возможности разрушений в ходе полетных операций

Руководящий принцип 3: Уменьшение вероятности случайного столкновения на орбите

Руководящий принцип 4: Избежание преднамеренного разрушения и других причиняющих вред действий

Руководящий принцип 5: Сведение к минимуму возможности разрушений после выполнения программы полета, вызываемых запасом энергии

Руководящий принцип 6: Ограничение длительного существования космических аппаратов и орбитальных ступеней ракет-носителей в районе низкой околоземной орбиты (НОО) после завершения их программы полета

Руководящий принцип 7: Ограничение длительного нахождения космических аппаратов и орбитальных ступеней ракет-носителей в районе геосинхронной орбиты (ГСО) после завершения их программы полета

Контроль выполнения

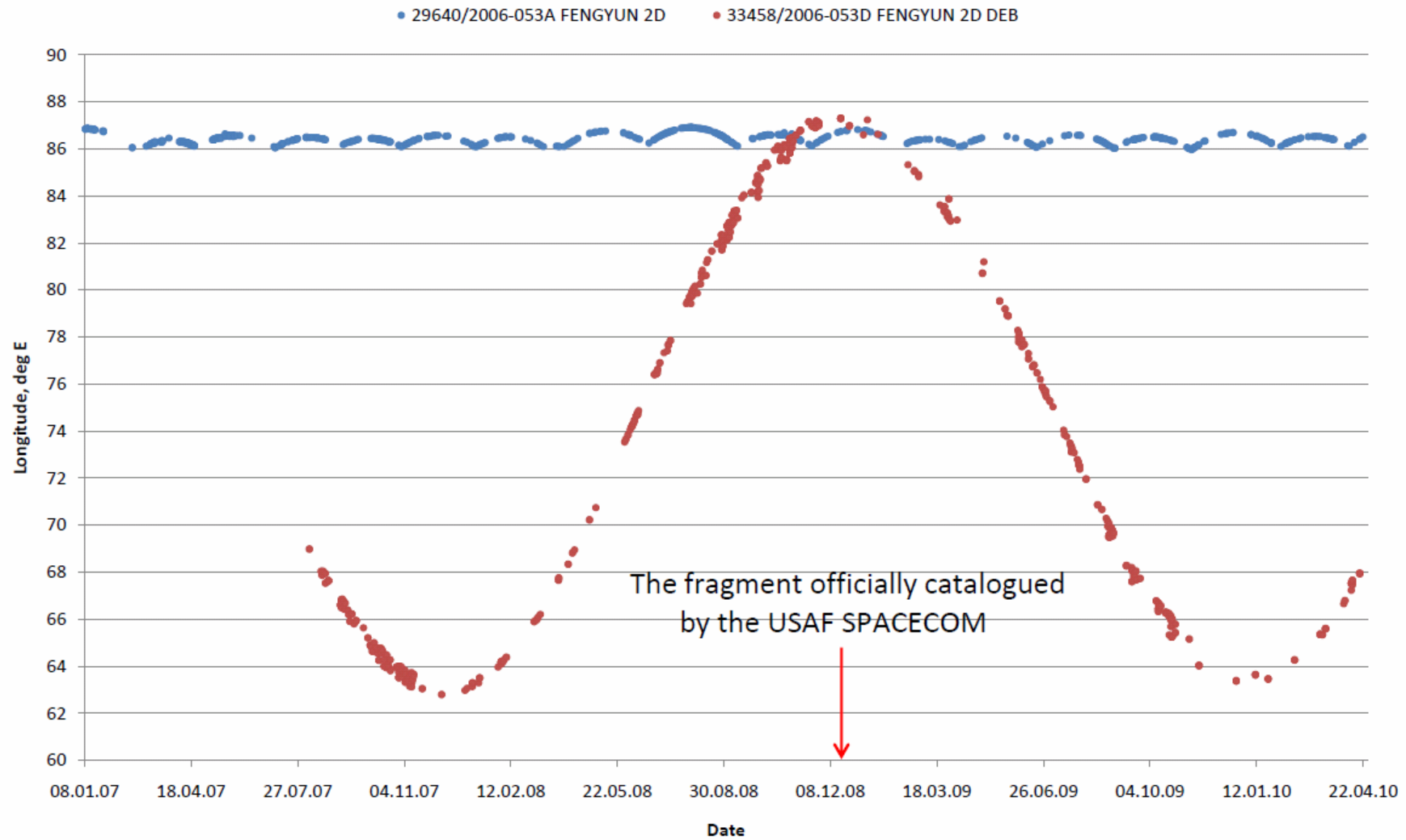
Руководящего принципа 1. Примеры

В течение 6 лет работы сеть НСОИ АФН обнаружила около двух десятков слабых ранее не известных объектов в области ГСО, которые представляют собой операционные (технологические) фрагменты, отделенные в ходе штатных операций (некоторые – совсем недавно). Среди них:

- крышка системы охлаждения аппаратуры наблюдения КА MSG 2 cooler cover (обнаружена сетью НСОИ АФН непосредственно сразу после отделения, официально каталогизирована КК ВВС США несколько месяцев спустя)
- солнцезащитные крышки ИК-телескопов КА типа «Имеюс» (DSP)
- фрагмент КА FENGYUN 2D (крышка системы охлаждения?) (официально каталогизирован КК ВВС США через 1.5 года после обнаружения объекта сетью НСОИ АФН)
- фрагмент КА FENGYUN 2E (крышка системы охлаждения?) (обнаружен сетью НСОИ АФН в июле 2009, до сих пор официально не каталогизирован)
- в марте 2010 г. в области ВЭО обнаружены фрагменты, идентифицированные с пуском 2009-067 (Блок ДМ-SL с КА INTELSAT 15)

Фрагмент КА FENGYUN 2D

ISON tracking history for FENGYUN 2D and it's operational fragment



Обеспечение реализации и контроль выполнения Руководящего принципа 3

Во избежание случайных столкновений функционирующих КА друг с другом или с другими не функционирующими объектами необходимо получение как можно более точной орбитальной информации, требуемой при анализе ситуации и принятии решения о её парировании

Сегмент АСПОС ОКП в ИПМ и НСОИ АФН обеспечивают:

- регулярные наблюдения КА на ГСО, размещающихся в одной точке, но управляемых разными операторами
- проведение регулярного поиска и слежения за нефункционирующими объектами, пересекающими защищаемую область ГСО
- выявление потенциально опасных сближений и оценку их параметров

Контроль выполнения Руководящего принципа 7

Длительное постоянное или периодическое нахождение отработавших КА и ступеней РН (РБ) в защищаемой области ГСО может явиться следствием:

- недостатка топлива в баках ступени РН (РБ) после отделения КА на целевой орбите
- недостатка топлива в баках КА в конце срока активного функционирования для проведения маневра увода на орбиту захоронения с рекомендуемыми параметрами
- аварии (аномалии) бортового оборудования, приведшей к невозможности проведения маневров
- некорректного выбора параметров орбиты захоронения вследствие невозможности (или некорректности) оценки неуправляемого движения относительно центра масс на длительных интервалах

Контроль выполнения Руководящего принципа 7

Основываясь на потоке измерений от сети НСОИ АФН и постоянно обновляемой орбитальной информации Сегмент АСПОС ОКП в ИПМ способен решать следующие задачи:

- подтверждать факт проведения (не проведения) завершающих операций в конце срока активного функционирования
- проводить оценку долгосрочной эволюции объекта, включая вариации модуля и направления вектора светового давления вследствие изменения ориентации объекта
- контролировать, удовлетворяет ли орбита увода отработавшей ступени РН (РБ) или КА рекомендациям, изложенным в Руководящих принципах