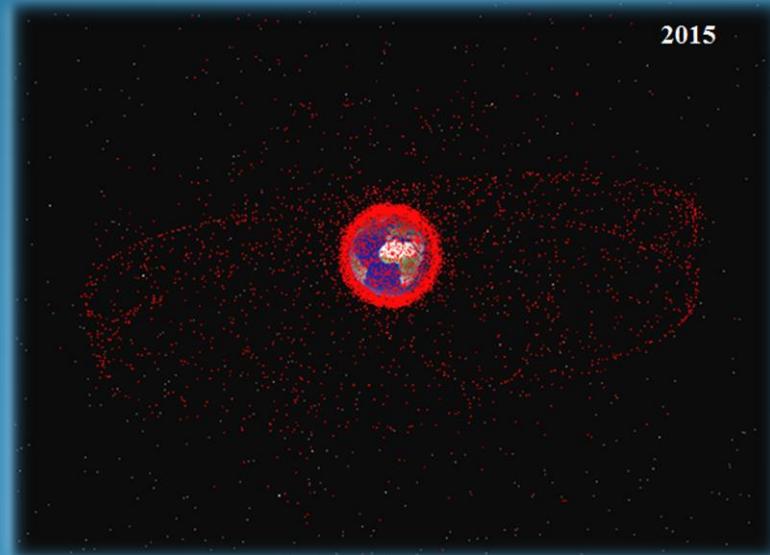




Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)

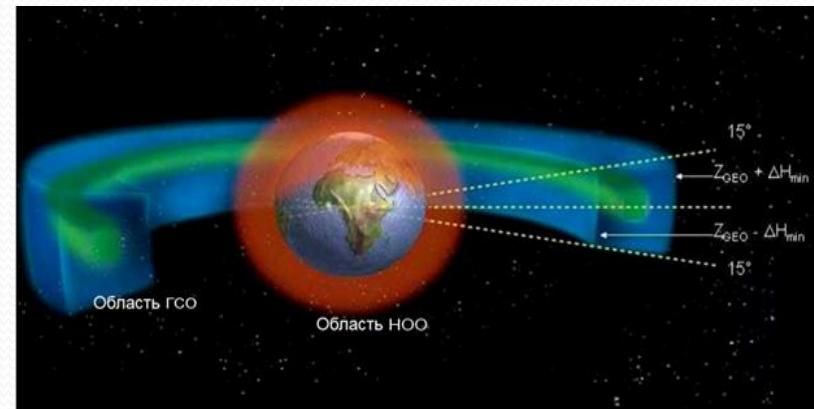
МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ ЭВОЛЮЦИИ  
ТЕХНОГЕННОГО ЗАСОРЕНИЯ НИЗКИХ ОКОЛОЗЕМНЫХ  
ОРБИТ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ АКТИВНОГО УДАЛЕНИЯ  
КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА



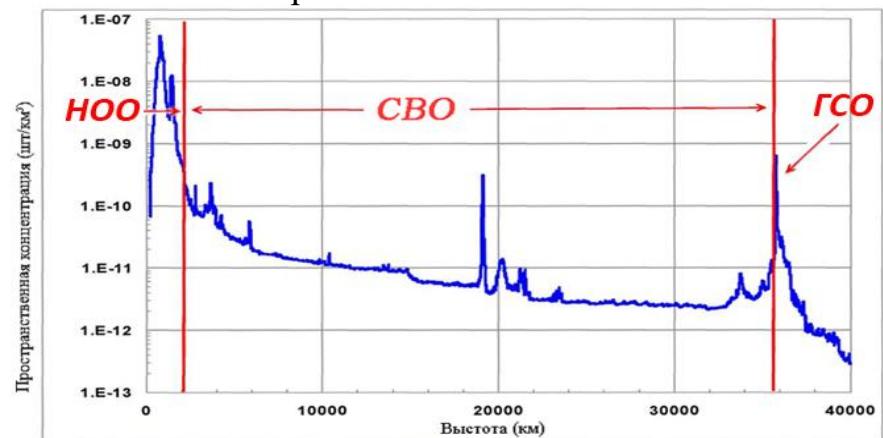
Усовик И.В.

# Области околоземного космического пространства

В настоящее время принято разделять ОКП на три области: область Низких Околоземных Орбит (НОО), область Средневысотных Орбит (СВО) и область Геостационарной Орбиты (ГСО). Области НОО и СВО представляют собой шаровые слои. НОО ограничивается высотой 2000 км над Землей, СВО от 2000 до  $\sim 35000$  км. Область ГСО представляет собой торообразную фигуру, ограниченную по высоте  $35786 \pm 200$  км и наклонениям  $0 \pm 15$  град.



Охраняемые области ОКП



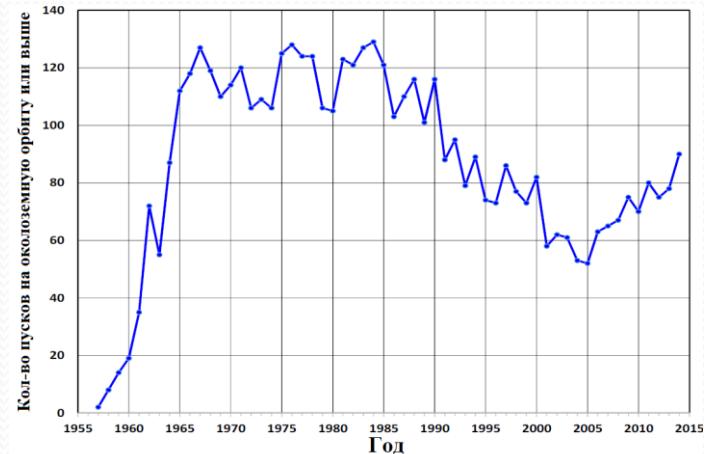
Зависимость концентрации наблюдаемых КО от высоты

# История запусков РН и засорения ОКП

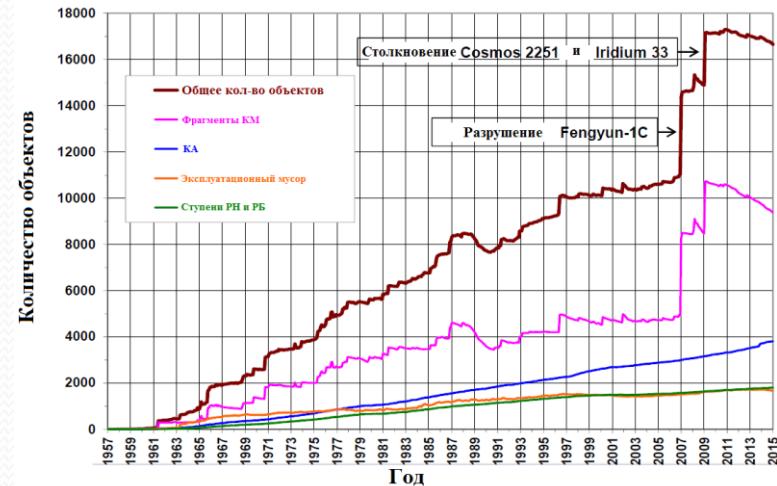
- На начало 2015 г. В каталогах космических объектах содержится информация об около 17000 объектов.
- Общая масса объектов в ОКП оценивается в ~ 7000 тонн
- ~4765 пусков ракет-носителей (РН)
- ~251 событие разрушения на орбите

По областям:

- НОО 77%, ГСО 6% ~10% в области высокоэллиптических орбит (ВЭО) 7% – на других орbitах, в том числе, в области навигационных спутниковых систем.
- По своему составу каталогизированные объекты включают 20% КА, из которых активно функционируют только 6%; 11% составляют ступени РН и разгонные блоки (РБ); 5% операционные элементы, образовавшиеся в процессе выведения КА на рабочие орбиты. 64% является продуктами разрушения КА, РН, РБ



Количество пусков РН по годам

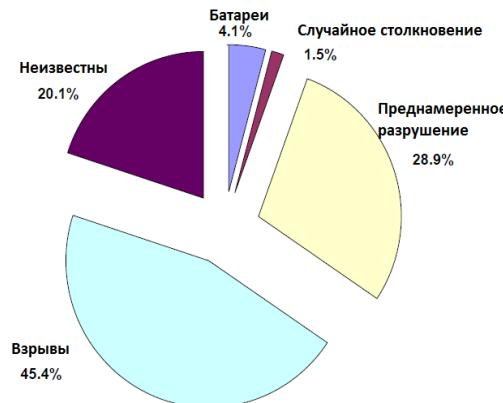
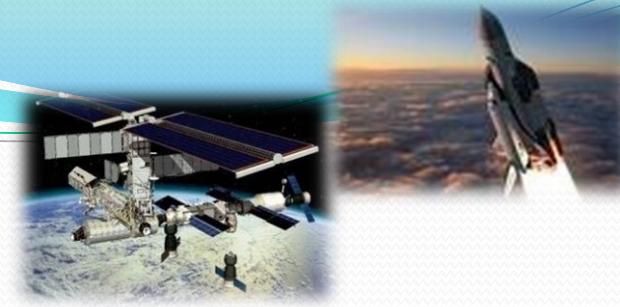


Количество КО разных типов по годам

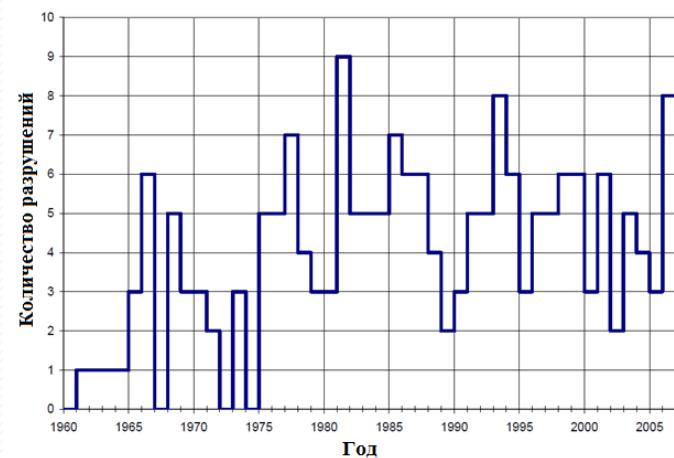
## Катастрофические события и их причины

В настоящее время событием, в результате которого образовалось наибольшее количество наблюдаемых фрагментов КМ, является преднамеренное разрушение Китайского спутника Fengyun-1C в 2007 г. Вторым по количеству образовавшихся фрагментов является столкновение КА Космос-2251 и Iridium 33 в 2009 г. До разрушения спутника Fengyun-1C среди событий, порождающих долгоживущий мусор, доминировали непреднамеренные взрывы.

- Случаев непреднамеренного взрыва, создавшего большое количество объектов, до сих пор находящихся на орбите, был взрыв советского космического аппарата Космос-1275. Взрыв батареи спутника привёл к возникновению 259 объектов, которые отслеживаются до сих пор.



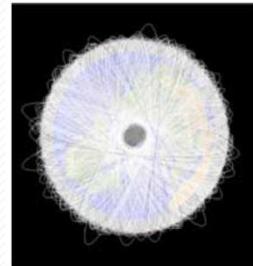
Распределение событий разрушения КО по причинам их возникновения



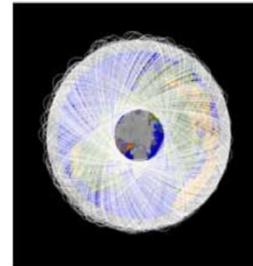
Количество разрушений КО по годам

# Крупнейшие катастрофические события

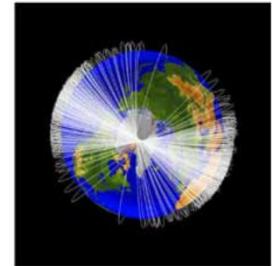
- В результате преднамеренного разрушения китайского спутника Fengyun-1C 11.01.2007 в ОКП каталогизировано около 200 фрагментов КМ;
- 10 февраля 2009 г. на высоте около 780 км произошло столкновение американского действующего спутника связи Iridium 33 и Российского неактивного КА Космос-2251. Более 2000 объектов отслеживаются в настоящее время;
- В результате этих двух событий техногенная засоренность ОКП в области НОО увеличилась на ~ 40%.



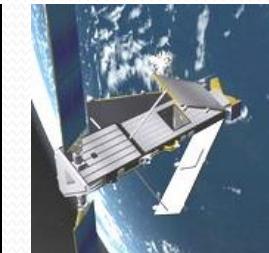
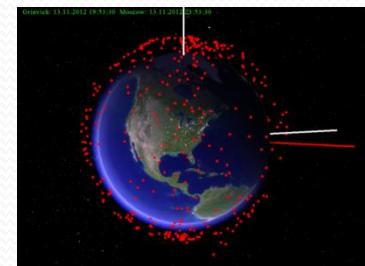
Fengyun-1C



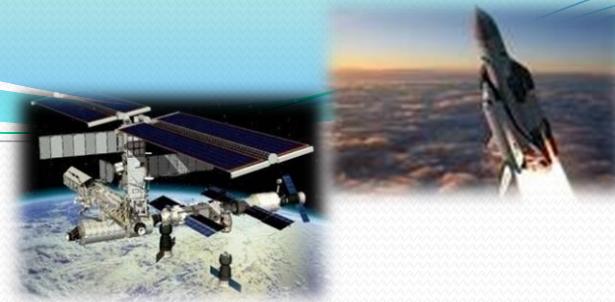
Cosmos 2251



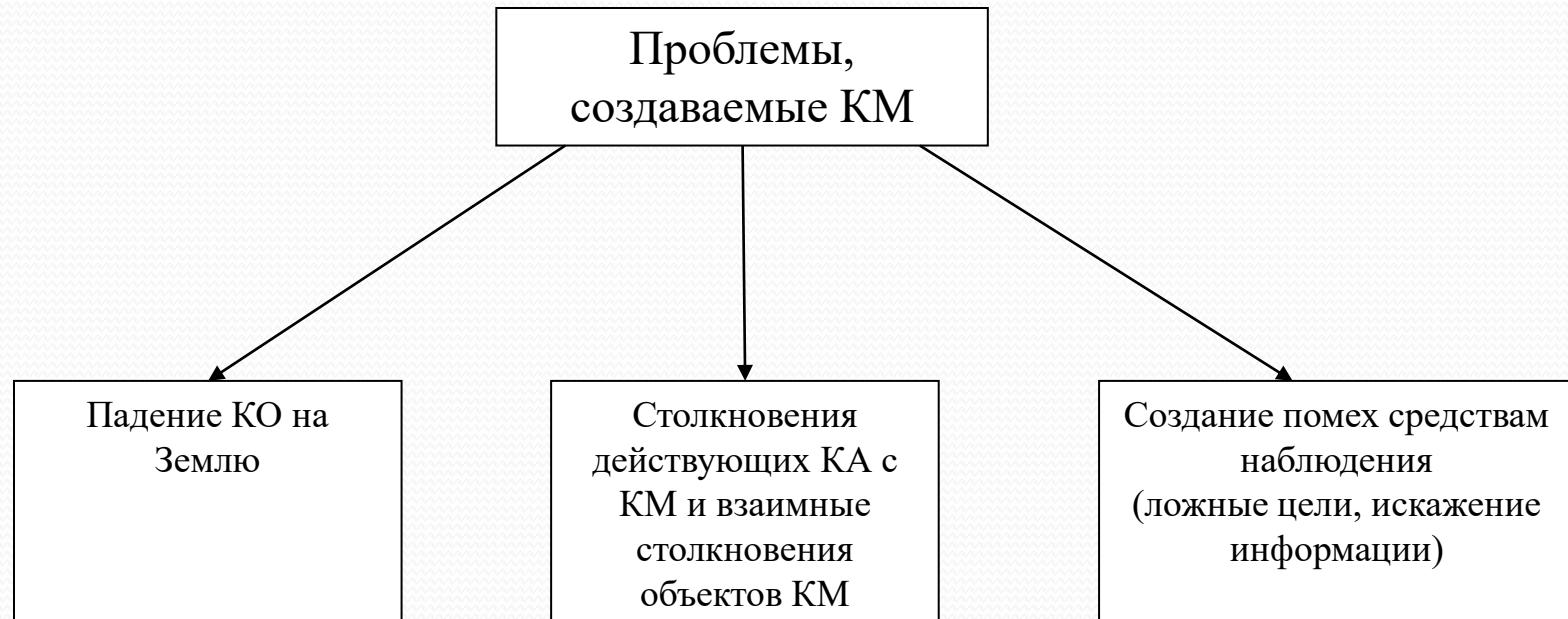
Iridium 33



Последствия катастрофических разрушений КО



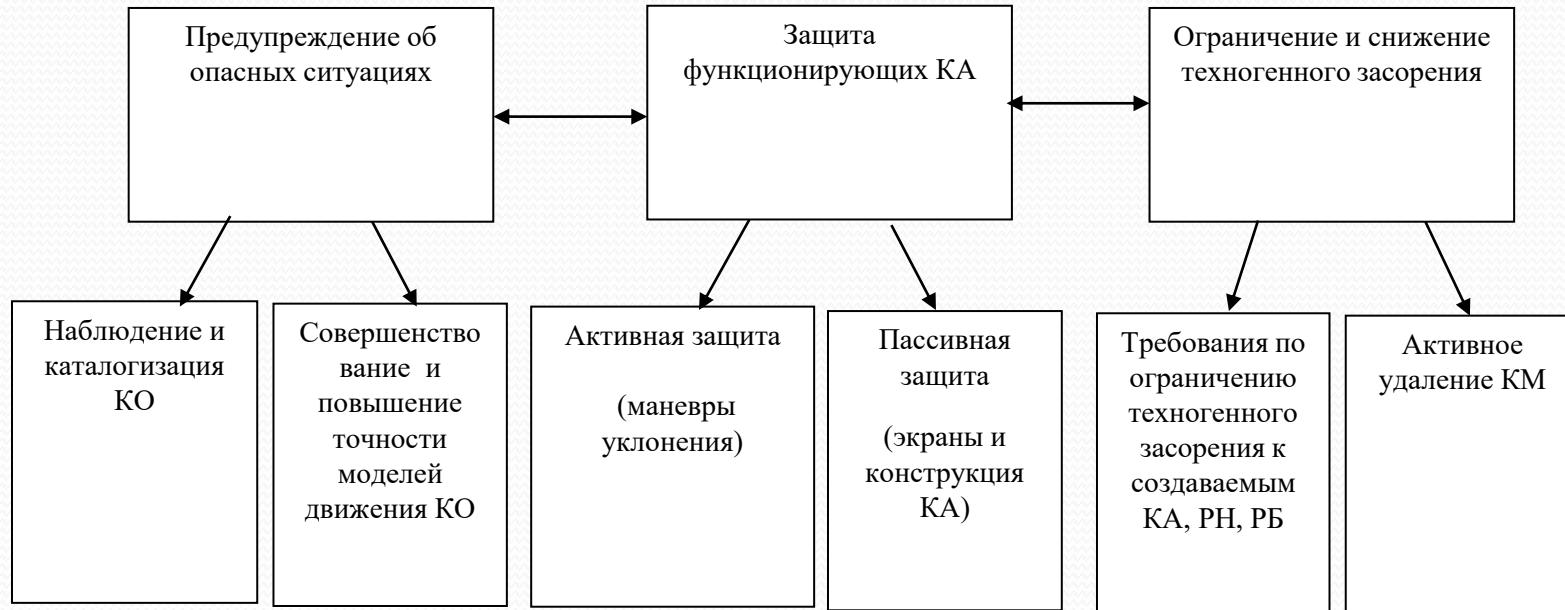
## Проблемы, создаваемые КМ





# Методы решения проблем

## Решение проблем





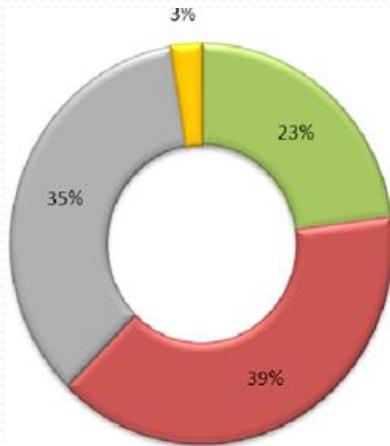
## Методы управления будущей космической средой



Можно выявить всего **два фундаментальных средства управления будущим состоянием техногенного засорения: предотвращение образования и удаление КМ.** С принятием международных руководящих принципов предотвращения образования КМ, таких как принципы МККМ и Комитета по космосу Организации Объединенных Наций, с реализацией мер по снижению образования КМ, были сокращены темпы роста количества нового КМ из многих ключевых источников. Национальным механизмом решения задачи ограничения техногенного засорения является введенный в действие 1 января 2009 г. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 52925-2008 «Изделия космической техники. Общие требования к космическим средствам по ограничению техногенного засорения околоземного космического пространства». Требования этого стандарта гармонизированы с требованиями «Руководящих принципов ООН по предупреждению образования космического мусора». Однако последние исследования говорят о недостаточности применения данных мер в долгосрочном периоде, поэтому многие специалисты во всем мире приходят к выводу о необходимости «очистки» ОКП.

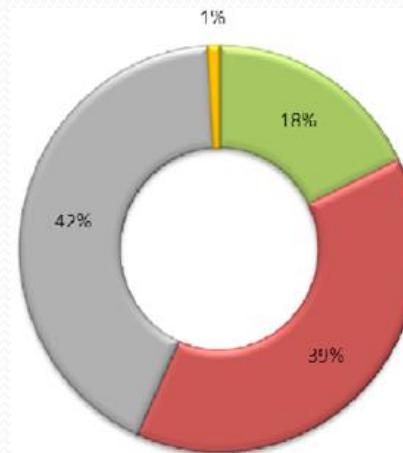


## Выполнение мер по ограничению



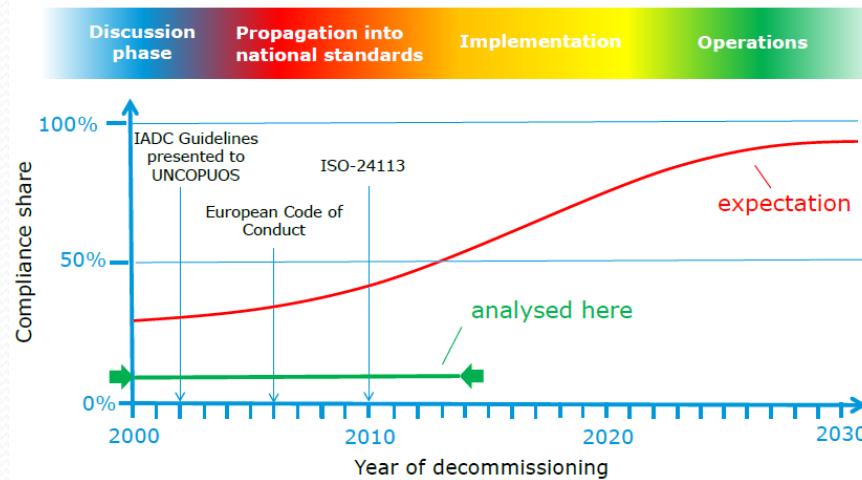
- Соответствуют
- Не соответствуют
- Сгорели
- Не вошли в исследование

КА

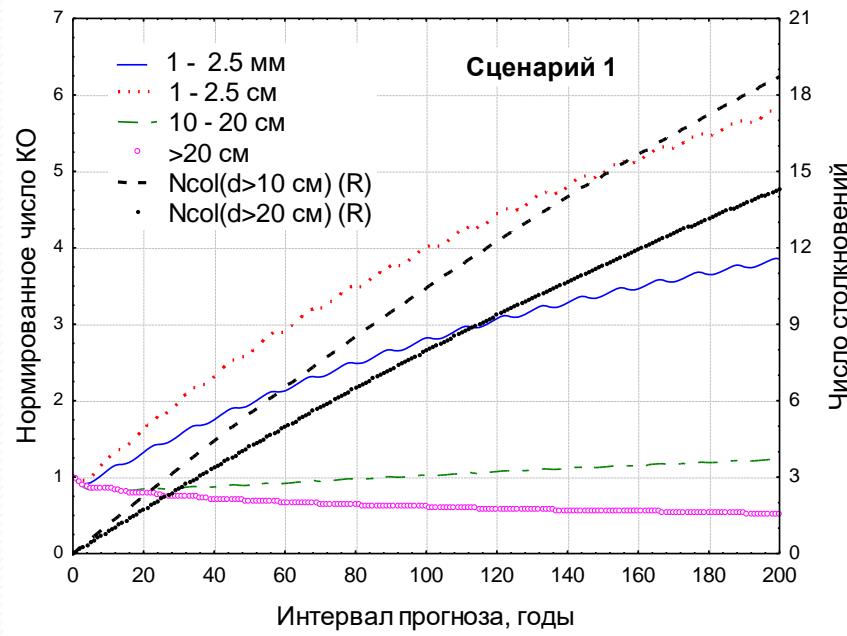
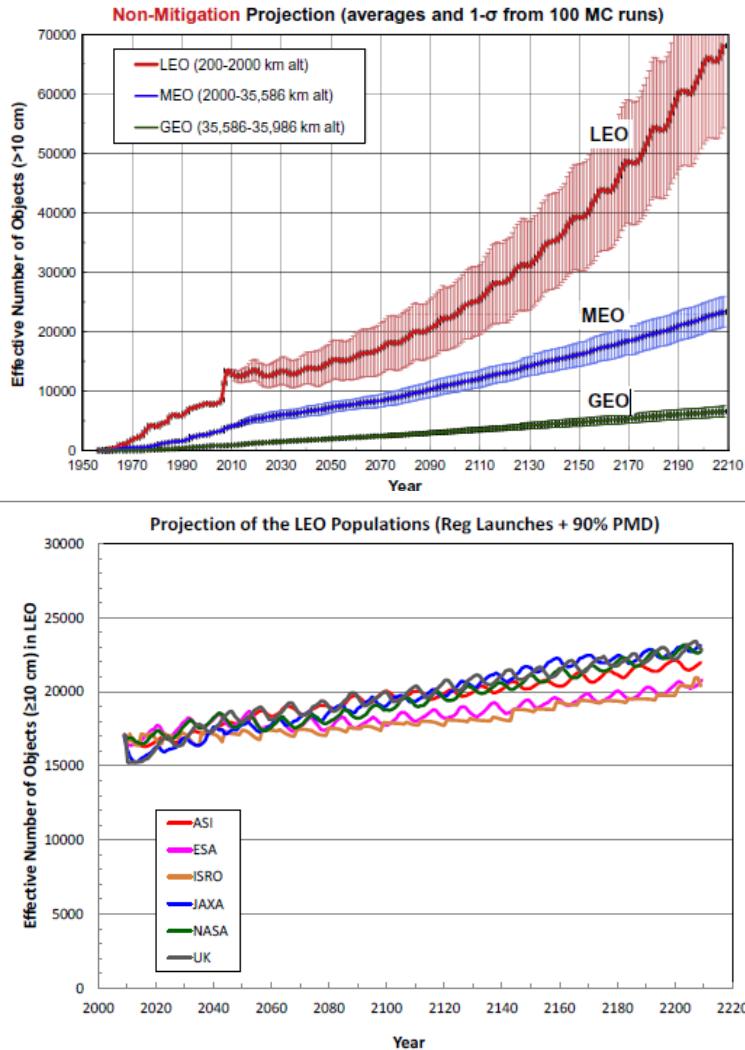
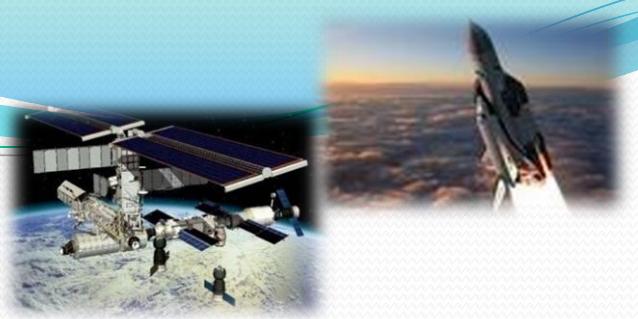


- Соответствуют
- Не соответствуют
- Сгорели
- Не вошли в исследование

РБ и РН



# Прогноз без учета активного удаления

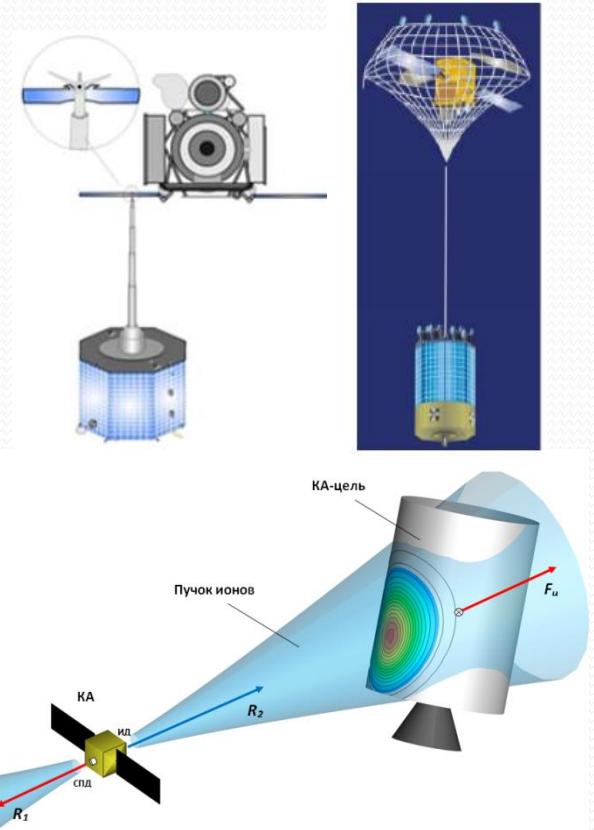
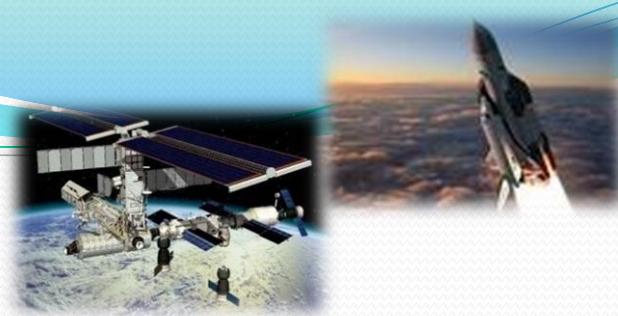
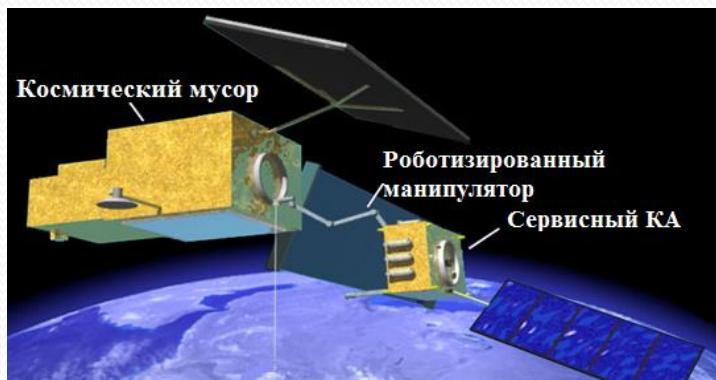


# Перспективные методы активного удаления КМ

Среди перспективных методов стыковки в настоящее время выделяют:

- использование роботизированного манипулятора,
- захват сетью,
- захват гарпуном,
- дистанционное воздействие пучком ионов.

Для создания управляющих сил предлагается использовать различные активные (ДУ) и пассивные устройства (надувные баллоны, солнечные паруса и т. п.)



Перспективные методы удаления КМ



## Постановка задачи

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие взаимосвязанные задачи исследований в работе:

- 1) разработать методику оценки долговременной эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит при реализации активного удаления космического мусора на основе раздельного моделирования и статистической модели КМ;
- 2) сформировать набор частных математических моделей космического мусора и модифицировать для использования в методике;
- 3) разработать программно-математическое обеспечение для оценки долговременной эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит при реализации активного удаления космического мусора для объектов размером более 10 см;
- 4) провести оценку долговременной эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит объектами размером более 10 см для различных сценариев, сравнительный анализ результатов для подтверждения работоспособности методики и программно-математического обеспечения. Выявить области низких околоземных орбит, для которых активное удаление космического мусора наиболее актуально в будущем.

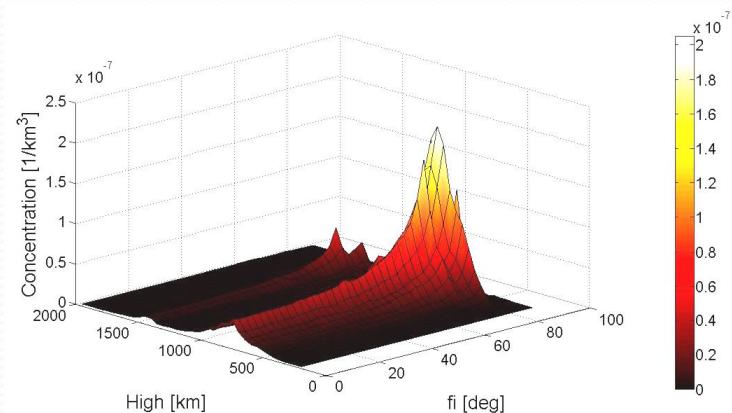
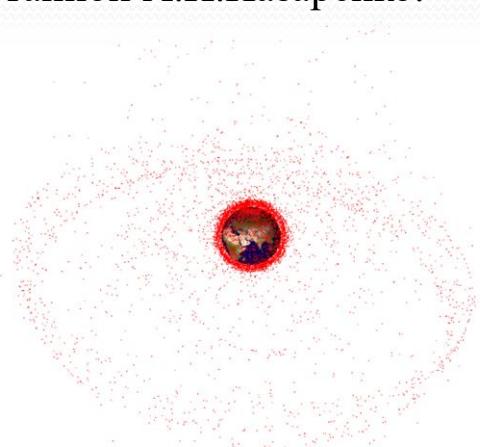


## Возможные методы решения задачи

В настоящее время для решения задачи оценки эволюции техногенного засорения с учетом взаимных столкновений и активного удаления космического мусора и используется методика, основанная на применении «поштучного» описания космических объектов и моделирования с использованием метода Монте-Карло.

С учетом современных вычислительных мощностей использование данной методики позволяет решать данную задачу, однако для набора статистики одно вычисление долгосрочного прогноза может занимать до 2-х суток.

В качестве альтернативы, предлагается разработать методику оценки эволюции техногенного засорения с учетом активного удаления космического мусора на основе отечественной статистической модели космического мусора SDPA, разработанной А.И.Назаренко.





## Модель космического мусора

Для описания техногенного засорения будем использовать следующие распределения:

- $P(\Omega)$ ,  $P(\omega)$ ,  $P(U)$  – распределения объектов по долготе восходящего узла, аргументу перицентра и аргументу широты с достаточной точностью можно считать равномерно распределенными на интервале от 0 до 360 град.
- $P(hp,e,i)$ ,  $P(hp,kb)$  – многомерные распределения объектов по высоте перигея, эксцентриситету, наклонениям и значениям баллистического коэффициента. Исследования показали, что для области НОО использование данных распределений достаточно для решения различных прикладных задач, связанных с оценкой и прогнозом техногенного засорения.
- $\rho(h,Sh)$  – зависимость концентрации объектов от высоты и широты.
- $P(Vr)$ ,  $P(Vt)$ ,  $P(Az,h,Sh)$  – распределение радиальной, тангенциальной скорости и азимутальное распределение направления тангенциальной скорости в зависимости от высоты и широты.



## Эволюционное уравнение прогноза распределения КМ по высоте перигея

- На рисунке представлены значения распределения  $p(h_p, t)$  при двух значениях аргумента  $h$  и  $h+\Delta h$ . Количество объектов в этом интервале высот перигея равно

$$N(t)_{h, h+\Delta h} = p(h, t) \cdot \Delta h$$

- Рассмотрим, что произойдет с распределением  $p(h, t)$  через некоторое время, а именно в момент времени  $t+\Delta t$ .
- Часть объектов в окрестности высоты  $h$  снизится настолько, что их высота перигея станет меньше высоты  $h$ .

$$N(t, t + \Delta t)_{h+\Delta h}^{(1)} = V(h, t) \cdot \Delta t \cdot p(h, t)$$

- Часть объектов в окрестности высоты  $>h+\Delta h$  снизится настолько, что их высота перигея станет меньше высоты  $h+\Delta h$ .

$$N(t, t + \Delta t)_{h+\Delta h}^{(2)} = V(h + \Delta h, t) \cdot \Delta t \cdot p(h + \Delta h, t)$$

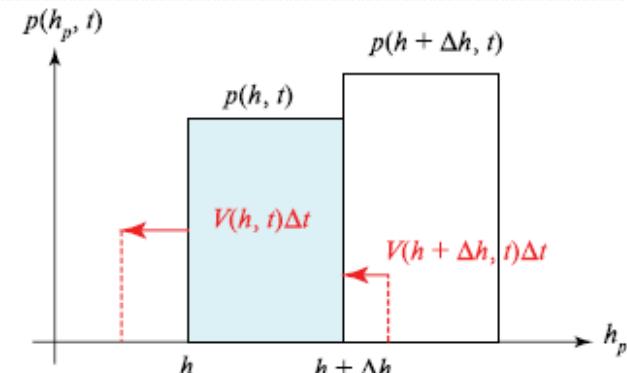
- В результате запусков и последствий разрушений добавляются КО.

Количество этих объектов равно

$$N(t, t + \Delta t)_{h+\Delta h}^{(3)} = p(h, t)_{new} \cdot \Delta h \cdot \Delta t$$

- количество объектов в рассматриваемом интервале высот перигея в момент времени  $t+\Delta t$

$$N(t + \Delta t)_{h, h+\Delta h} = N(t)_{h, h+\Delta h} - N(t, t + \Delta t)_{h+\Delta h}^{(1)} + N(t, t + \Delta t)_{h+\Delta h}^{(2)} + N(t, t + \Delta t)_{h+\Delta h}^{(3)}$$



$$\frac{dp(h, t)}{dt} = \frac{\partial V(h, t)}{\partial h} p(h, t) + p(h, t)_{new} = A(t) p(h, t) + p(h, t)_{new}.$$

$$p(h, t + \Delta t) = \frac{N(t + \Delta t)_{h, h+\Delta h}}{\Delta h}$$



## Определение скорости снижения высоты перигея

$$\bar{\delta}a = -4\pi \cdot (k_b \cdot \rho \cdot p) \frac{a^2}{p} \cdot \exp(-z) \cdot \left\{ I_0(z) + 2eI_1(z) + \frac{3}{4}e^2 \cdot [I_0(z) + I_2(z)] + \dots \right\}$$

$$\bar{\delta}e = -4\pi \cdot (k_b \cdot \rho \cdot p) \cdot \exp(-z) \cdot \left\{ I_1(z) + 0.5e[I_0(z) + I_2(z)] + \frac{1}{8}e^2 \cdot [3I_1(z) + I_3(z)] + \dots \right\}$$

$$\begin{aligned} \bar{\delta}h = (1 - e) \cdot \bar{\delta}a - a \cdot \bar{\delta}e = -4\pi \cdot (k_b \cdot \rho \cdot p) \frac{a}{1 + e} \cdot \exp(-z) \cdot \\ \cdot \{I_0(z) - I_1(z) + e \cdot [I_1(z) - 0.5 \cdot I_0(z) - 0.5 \cdot I_2(z)] + \dots\} \end{aligned}$$

Для расчета плотности верхней атмосферы используем модель из ГОСТ Р 25645.166-2004

$$\rho = \rho_n K_0 (1 + K_1 + K_2 + K_3 + K_4)$$

$$\rho_n = \rho_0 \exp (a_0 + a_1 h + a_2 h^2 + a_3 h^3 + a_4 h^4 + a_5 h^5 + a_6 h^6)$$

Для описания циклов солнечной активности используется модель из ГОСТ 25645.302-83

$$\bar{F}_{10.7}^{\text{год}} = a \bar{W}^{\text{год}} + b,$$



# Модель космического мусора

Расчет концентрации КО по высоте и широте:

$$\rho(h, \varphi) = \frac{\Delta N(h, h + \Delta h, \varphi, \varphi + \Delta\varphi)}{2\pi(R + h)^2 \cos(\varphi) \Delta h \Delta\varphi} \quad \Delta N(h, h + \Delta h, \varphi, \varphi + \Delta\varphi) = N_{\Sigma} \int_i \int_{h_p} \int_e \Delta P(h_p, e, i) p(h_p, e, i) dh_p dedi$$

$\Delta P$  - вероятность попадания КО  
в область  $(h, h + \Delta h, \varphi, \varphi + \Delta\varphi)$

$$\Delta P = \Delta\tau(\varphi, \varphi + \Delta\varphi) \Delta\tau(h, h + \Delta h)$$

$$\Delta\tau(\varphi, \varphi + \Delta\varphi) = \Delta t/T$$

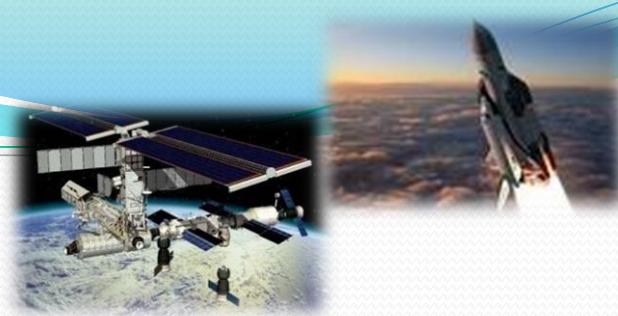
$$\Delta t = \frac{T}{\pi} \Phi(h_p, e, h) \frac{\cos\varphi}{\sqrt{\sin^2 i - \sin^2 \varphi}}$$

$$\Phi(h_p, e, h) = \frac{(1 - e)^2}{\sqrt{1 - e^2}} \left( \frac{h + R}{h_p + R} \right)^2$$

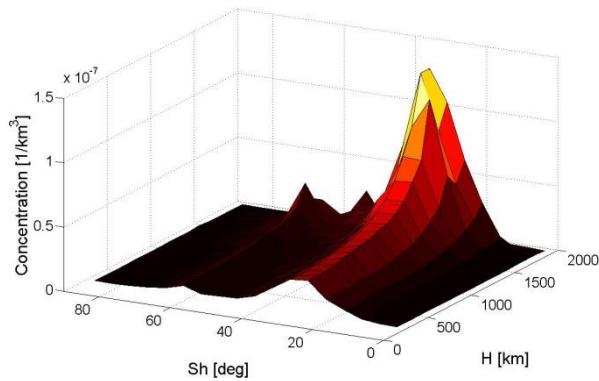
$$\Delta\tau(h, h + \Delta h) = \Delta t(h_p, e)/T$$

Положение заданной точки в ОКП

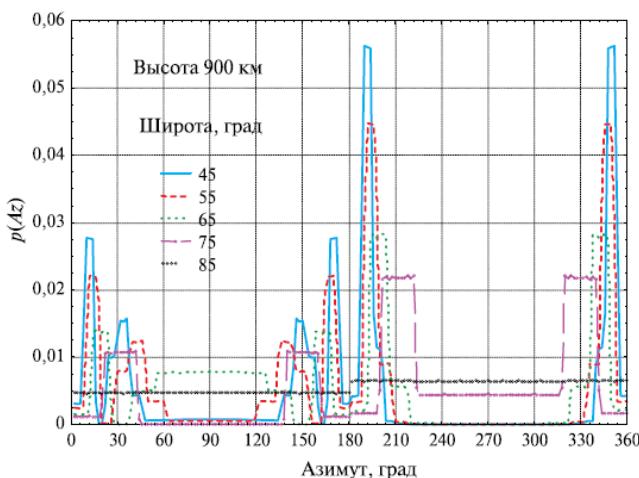




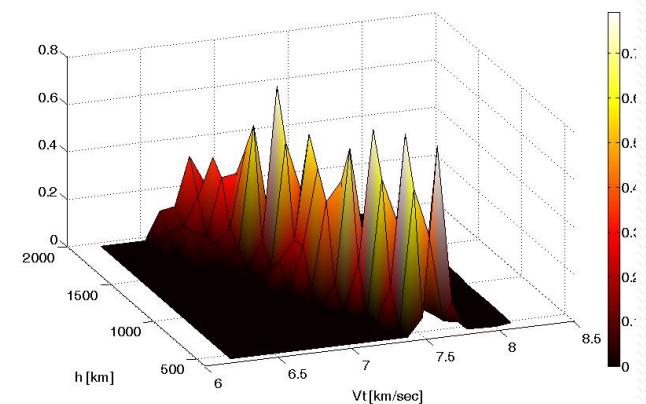
# Описание техногенного засорения



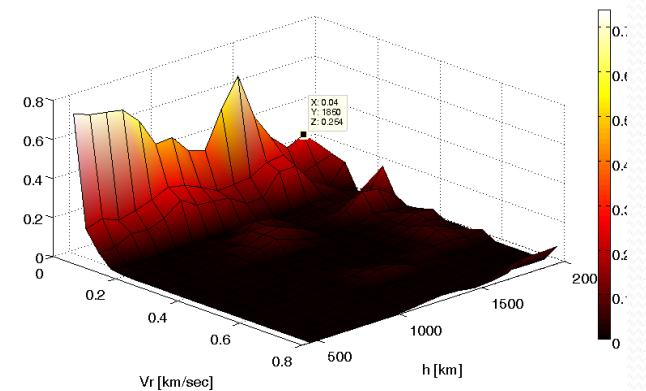
Зависимость концентрации от высоты и широты



Зависимость азимутального распределения  
для заданной высоты и разных широт



Распределения тангенциальной скорости от высоты

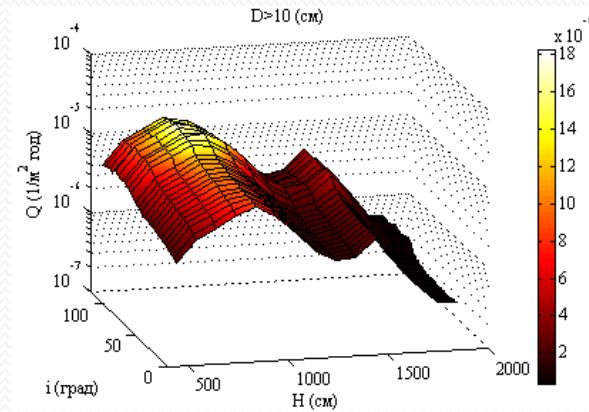


Распределения радиальной скорости от высоты



## Модель расчета количества столкновений

- С использованием представленных выше распределений для КО, располагающегося на определенной орбите в области НОО, можно рассчитать значение потока КМ  $Q$  [ $1/m^2\text{год}$ ] – количество столкновений сферического КА на заданной орбите с площадью сечения  $1\text{ m}^2$  с другими объектами .
- Если среднее значение потока определено, то достаточно точную оценку числа столкновений КО с КМ на большом интервале времени можно вычислить по формуле.
- С использованием данной характеристики для множества возможных объектов можно рассчитать ожидаемое количество столкновений в единицу времени как отдельно, так и для групп объектов с определенными параметрами .



Зависимость значений  $Q$  для околокруговых орбит

$$\bar{Q} = \frac{1}{T} \int_{t=0}^T \rho(t) \int_{A=0}^{2\pi} p(t, A) V_{rel}(t, A) dA dt.$$

$$N = S \bar{Q}(t - t_0).$$

$$N_{\Sigma} = \sum_{i=1}^M S_i \bar{Q}_i(t - t_0)$$



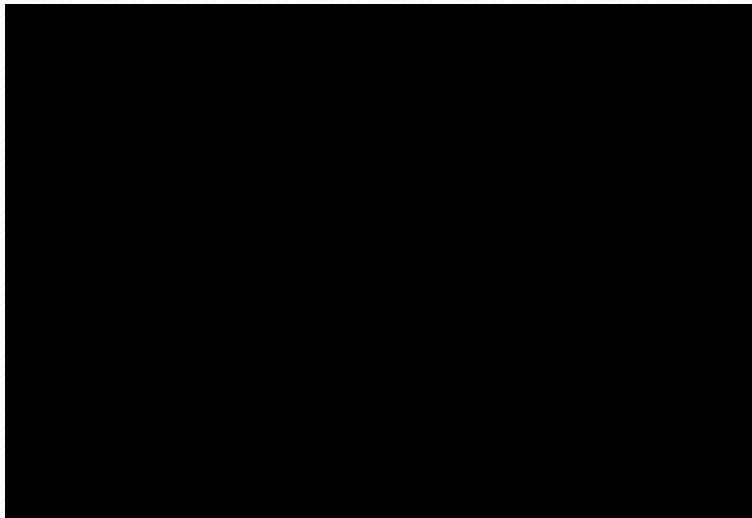
## Модель расчета последствий столкновений

$$u = \frac{U}{M} = \frac{1}{2} k_1 k_2 V_{imp}^2,$$

$$k_1 = m_1/M; k_2 = m_2/M.$$

$$M = m_1 + m_2$$

$$\Delta V = k_v * u$$



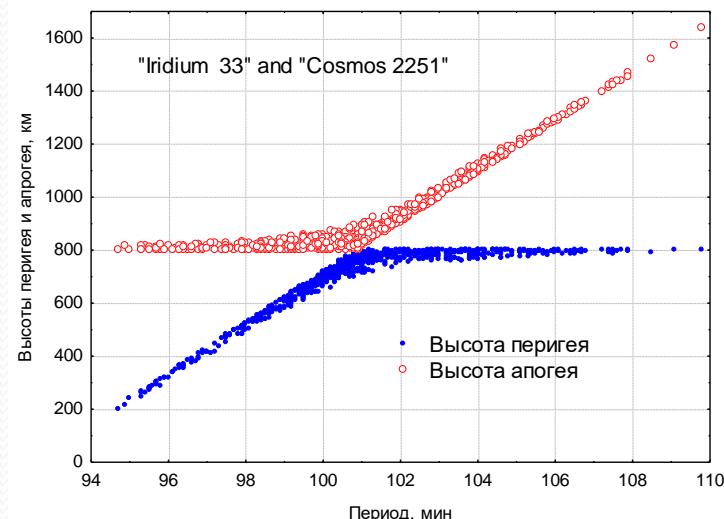
$$N(>m) = A \left( \frac{m}{M_e} \right)^B$$

– количество объектов после столкновения

$$A=0.4 \text{ и } B= -0.68, k_v = 0.1$$

$$\Delta h \approx 4a \frac{\Delta V_\tau}{V}$$

– приращение высоты перигея





## Основы методики оценки эволюции

- Все множество объектов  $X$  состоит из 3-х подмножеств  $D$  – космический мусор,  $ADR$  – объекты, к которым может быть применена операция активного удаления,  $NEW$  – новые запущенные объекты.

$$X = D \cup ADR \cup NEW$$

- Множество  $X$  и подмножество  $D$  будем описывать с использованием статистической модели КМ и предусмотренных в ней распределений для решения задач оценки количества взаимных столкновений и последствий столкновений.
- Подмножества  $ADR$  и  $NEW$  будем описывать дополнительно с использованием полной информации о каждом объекте, аналогично подходу с «поштучным» описанием объектов, для того чтобы учитывать активное удаление объектов КМ и меры по ограничению техногенного засорения в процессе моделирования.



## 2. Последовательность шагов методики

- Исходными данными о популяции космических объектов выступают следующие параметры каждого объекта размером более 10 см с высотой перигея менее 2000 км:
  - тип объекта: РБ, КА, крупный операционный мусор, КМ;
  - масса объекта;
  - диаметр объекта;
  - характерная площадь объекта;
  - большая полуось;
  - эксцентриситет;
  - наклонение.

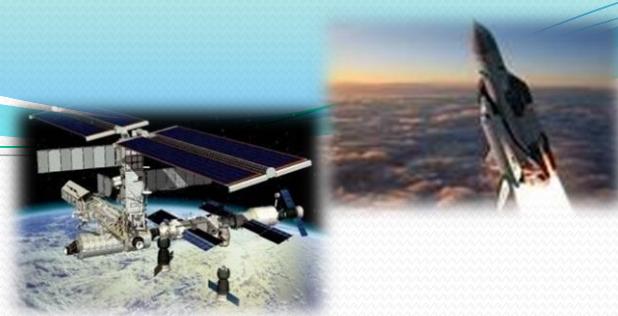
(Исходные данные так же могут быть заданы в виде требуемых распределений для подмножества  $D$  и списка с параметра каждого объекта из подмножеств  $ADR$  и  $NEW$ )

- На основании исходных данных о популяции космических объектов с учетом критерия удаления все объекты разделяются на два подмножества  $D$  и  $ADR$ .
- Для объектов из подмножества  $D$  строятся соответствующие распределения трех элементов орбиты, характеризующих ее высоту, эллиптичность и наклонение, а также распределение баллистических коэффициентов объектов, масс объектов.
- Каждый объект подмножества описывается отдельно с использованием 7 параметров, описанных выше. На основании данных 7 параметров всегда можно построить соответствующие распределения, аналогичные распределениям подмножества  $D$ .

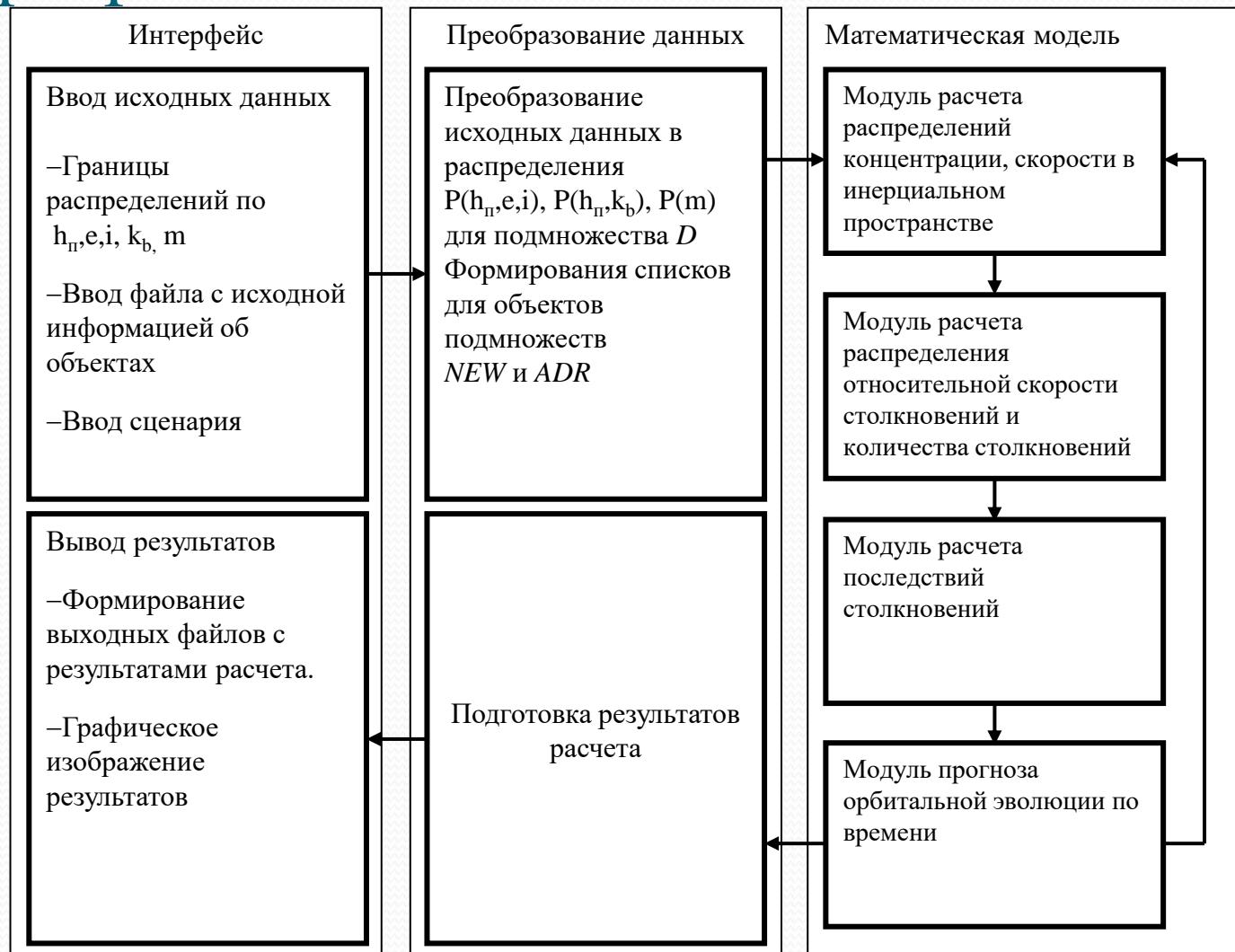


## 2. Последовательность шагов методики

- Прогнозирование ведется с шагом один год по времени.
- Задаются объекты  $NEW$ , аналогично объектам группы  $ADR$ , при этом каждому объекту присваивается дополнительный параметр с годом запуска, для учета мер по ограничению техногенного засорения.
- Зная распределения для объектов из 3 подмножеств, путем их суммирования строятся распределения общего множества  $X$ .
- С использованием распределений множества  $X$  и статистической модели КМ рассчитываются оценки количества и последствий столкновений на интервале 1 год, которые описываются аналогичными распределениями и добавляются в распределения подмножества  $D$ .
- Проводится прогноз орбитальной эволюции объектов из подмножеств на один год. Для подмножества  $D$  используется подход статистической модели КМ, в которой прогнозируется распределение высот перигея объектов. Для подмножеств  $ADR$  и  $NEW$  прогнозируются орбитальные параметры большой полуоси и эксцентриситета каждого объекта отдельно, с учетом допущения, что наклонение не имеет вековых возмущений и его значение сильно не изменяется под действием возмущающих ускорений, а угловые распределения имеют равномерное распределение и их прогнозировать для решения данной задачи не нужно. По окончании шага мы имеем перестроенные распределения подмножества  $D$  и параметры объектов подмножеств  $ADR$  и  $NEW$ .
- Если на данном шаге учитывается активное удаление КМ, согласно критерию удаления из подмножества  $ADR$  удаляется заданное количество объектов, после чего перстраиваются распределения объектов данного подмножества.
- Если на данном шаге учитываются меры по ограничению техногенного засорения для объектов из подмножества  $NEW$ , запущенных в заданном году ранее, согласно учитываем мерам каждый объект из множества  $NEW$  либо удаляется из него, либо ему задаются требуемые согласно мерам ограничения орбитальные параметры.
- Переходим к следующему шагу по времени.



### 3. Программный комплекс



### 3. Программный комплекс

Программа для расчета эволюции космического мусора.

Файл Справка

Данные для расчета | Результаты | Поиск приюста | Моделирование столкновений

D [cm]	H [км]	S	e	dKd	N [шт]
10	150	0.005	0.001	1	19630
	250	0.01	0.0035		
	350	0.02	0.0075		
	450	0.03	0.015		
	550	0.04	0.04		
	650	0.05	0.08		
	750	0.1	0.2		
	850	0.15	0.4		
	950	0.5			
	1050				
	1150				
	1250				
	1350				
	1450				
	1550				
	1650				
	1750				
	1850				
	1950				

Начальные параметры для расчета

Число диапазонов размеров 1

Число диапазонов высот 19

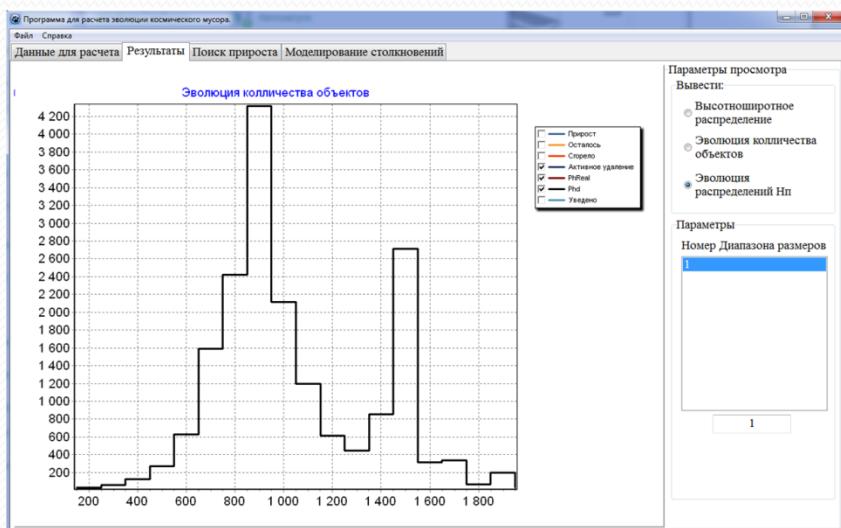
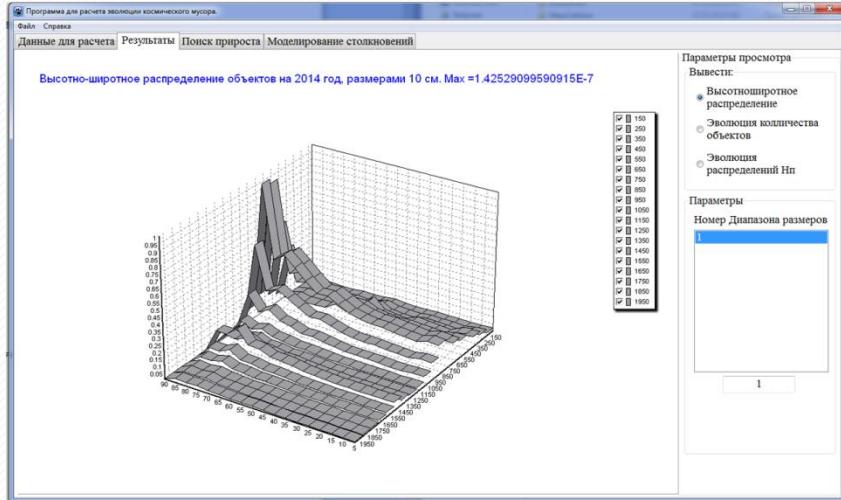
Число диапазонов баллистических коэффициентов 10

Число диапазонов эксцентриситетов 8

Параметры моделирования

Произвести расчёт

Год начала и окончания моделирования 2013 2213



FormModelizedParam

Параметры распределений, характеризующих КМ

Учитывать прирост вызванный новыми запусками (или усредненный прирост от всех факторов)

Учитывать взаимные столкновения

Учитывать последствия взрывов

Учитывать активный увод

Учёт времени активного существования после которого спутники уводятся 0

PMD % 90

Параметры

Параметры

Параметры

Параметры

Параметры

Параметры



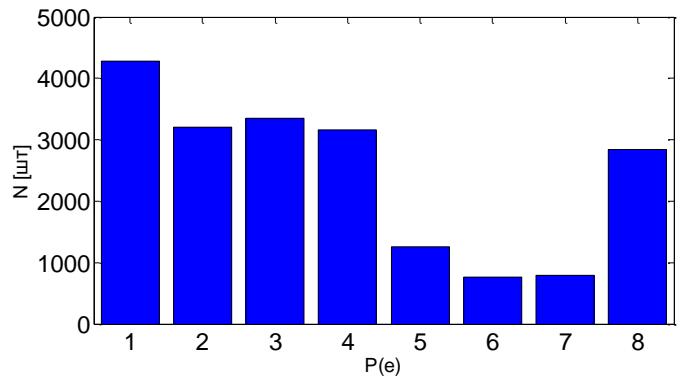


## 4. Сценарий

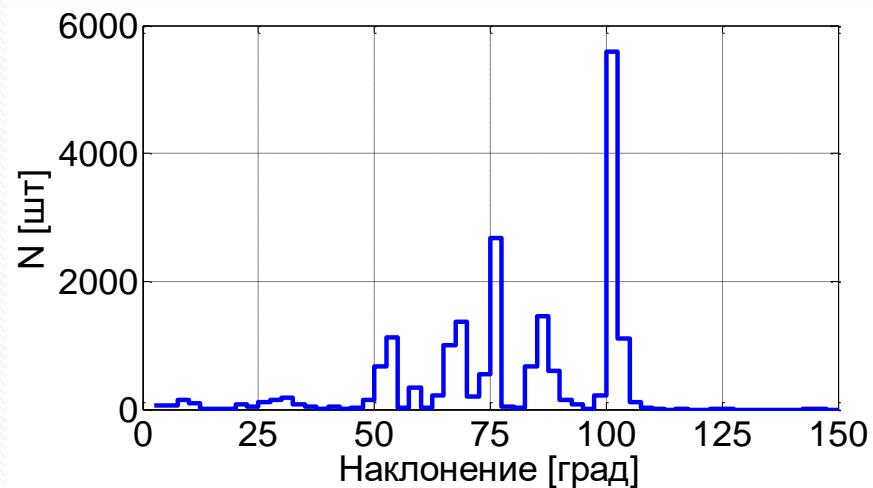
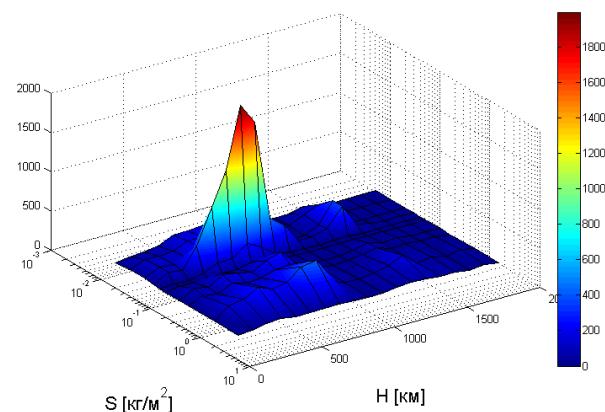
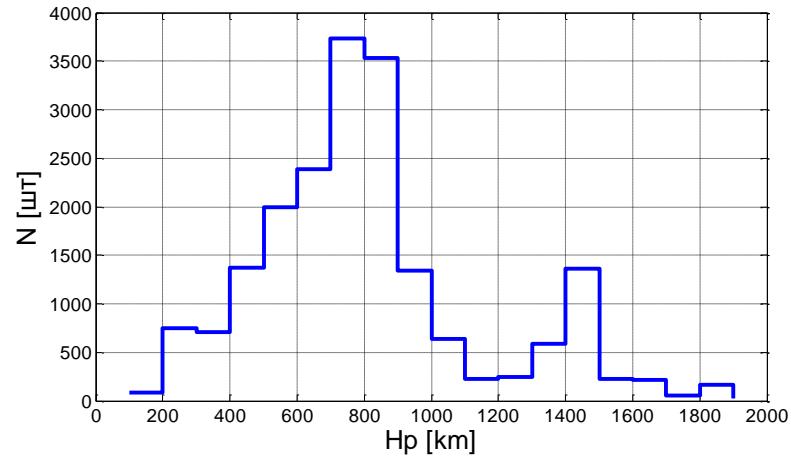
- Исходные данные о количестве объектов и запускаемых объектах представлены ESA.
- Объекты для удаления выбираются по критерию  $\max(M_i P_i)$ , в расчетах критерий  $\max(M_i S_i Q_i)$ .
- Интервал прогноза – 200 лет.
- Базовые сценарии: 30%, 60%, 90% из новых запускаемых объектов соответствуют правилу 25 лет.
- Активное удаление КМ начинается с 2025 г. в количестве 2,5,8 объектов.
- Всего рассматривается 12 сценариев.

1	#	-----	#										
2	#	Created by	Institute of	Aerospace Systems, Technisch Universität Braunschweig (October, 2013)									
3	#	-----	#										
4	#	Descriptive #											
5	#	Initial population for epoch 1/1/2013 for objects with Lc equal to or larger than 10 cm											
6	#	-----	#										
7	#												
8	#	ID: 1 = R/B, 2 = P/L, 3 = MRO, 4 = DEB											
9	ID	Mass	Diameter	Area	a	e	i	RAAN	AoP	M	LA-DATE		
10	#	[kg]	[m]	[m <sup>2</sup> ]	[km]	[--]	[deg]	[deg]	[deg]	[deg]	[yyyy:yyyy]		
11	2	7.10E+03	5.68E+00	25.3441	6788.5	0.0014	51.6	113.06	169.18	113.06	2012.965		
12	2	4.58E+03	5.91E+00	27.4302	6727.5	0.0011	43.4	5.72	57.87	5.72	2012.943		
13	2	9.40E+02	3.93E+00	12.145	7076	0.0001	98.2	166.18	196.19	57.87	2012.918		
14	2	7.29E+03	5.00E+00	19.6153	6788.5	0.0014	51.6	91.76	343.16	72.16	2012.831		
15	2	7.22E+03	5.68E+00	25.3441	6788.5	0.0014	51.6	199.85	37.36	312.79	2012.809		
16	2	4.50E+01	6.59E-01	0.3415	6995.5	0.0224	64.6	26.33	231.26	147.92	2012.7		
17	2	1.00E+00	1.32E-01	0.0137	7012	0.0208	64.6	295.76	309.7	327.14	2012.7		
18	2	1.00E+00	1.32E-01	0.0137	7009	0.0211	64.6	175.87	149.6	255.23	2012.7		
19	2	1.00E+00	1.32E-01	0.0137	7006.5	0.0215	64.6	110.46	329.3	113.1	2012.7		
20	2	4.00E+00	1.85E-01	0.0268	7004.5	0.0219	64.6	27.72	298.83	281.72	2012.7		
21	2	4.00E+00	1.85E-01	0.0268	7003	0.0221	64.6	104.47	252.68	252.03	2012.7		
22	2	4.00E+00	1.85E-01	0.0268	7003	0.0221	64.6	202.41	45.45	61.4	2012.7		

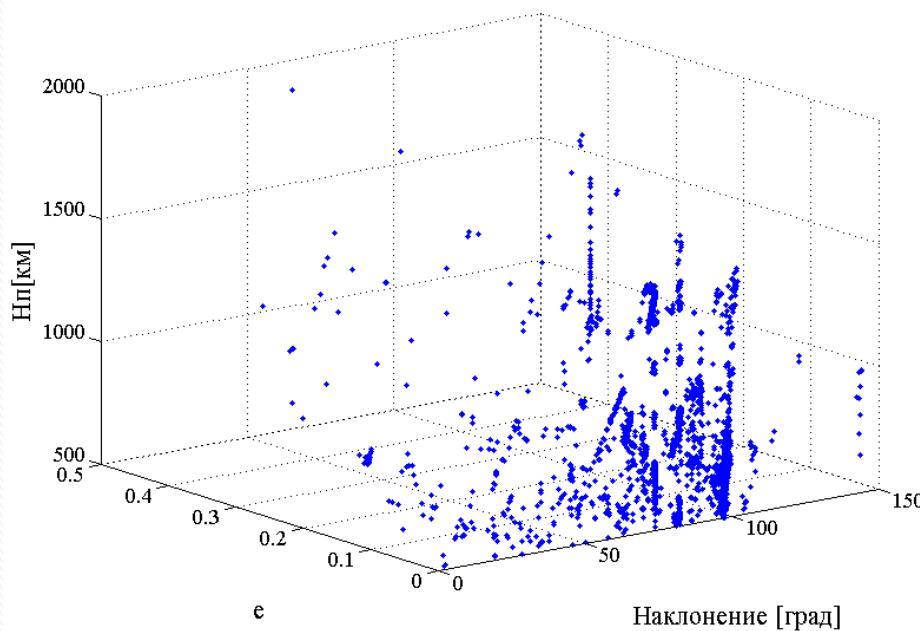
## 4. Исходные данные об объектах размером > 10см, предоставленные ESA



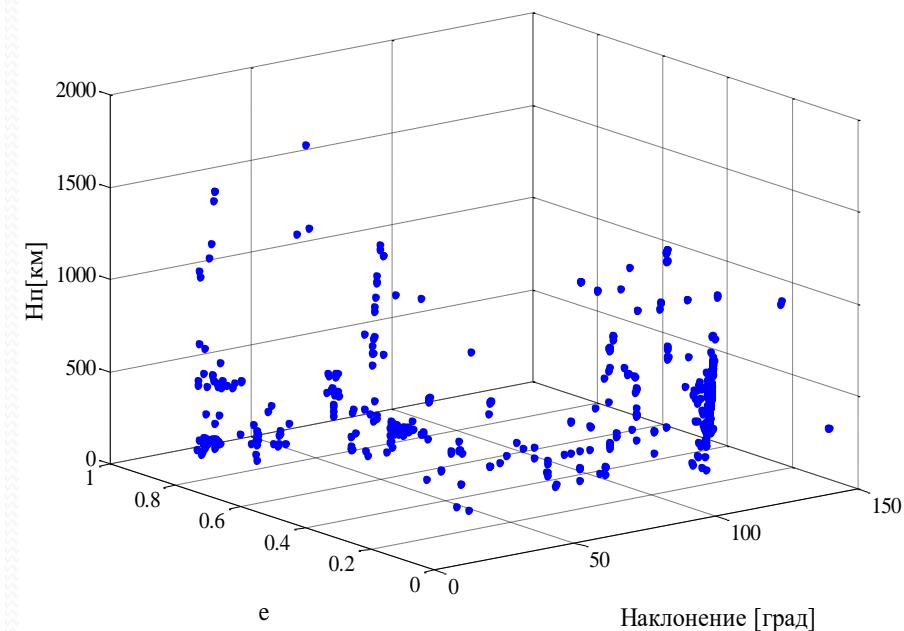
№ диапазона	1	2	3	4	5	6	7	8
Эксцентриситет	0.0010-0.0035	0.0035-0.0075	0.0075-0.0150	0.015-0.040	0.04-0.08	0.08-0.20	0.20-0.40	>0.40



## 4. Формирование подмножеств *ADR* и *NEW*

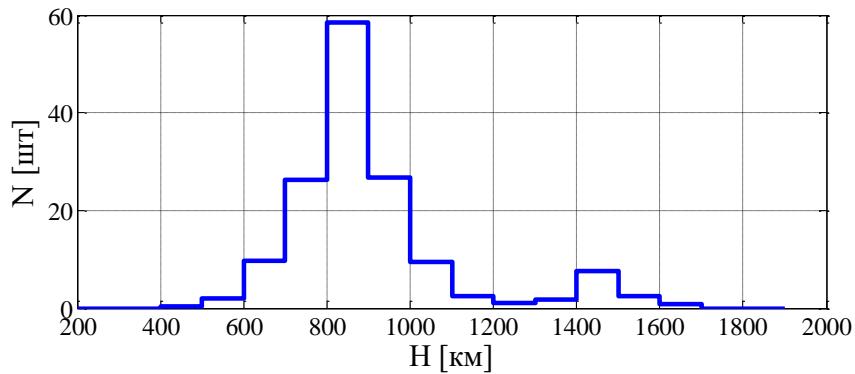
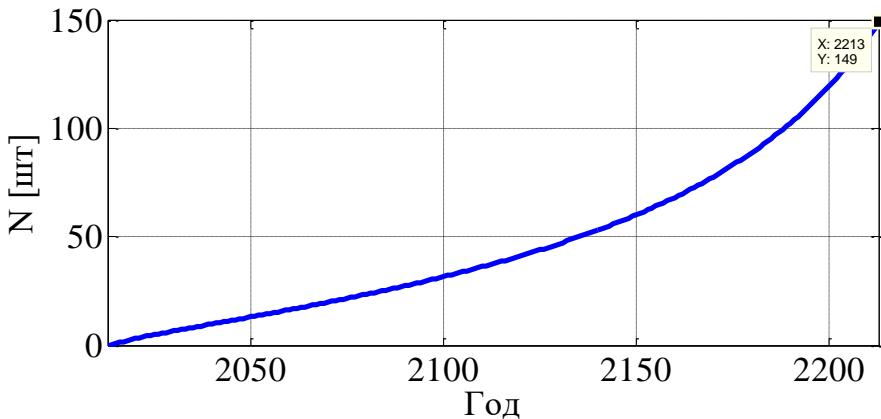
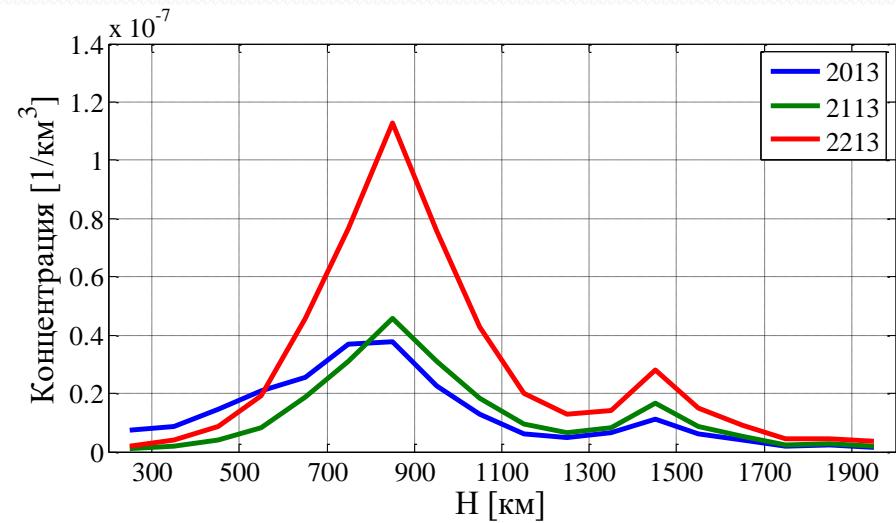
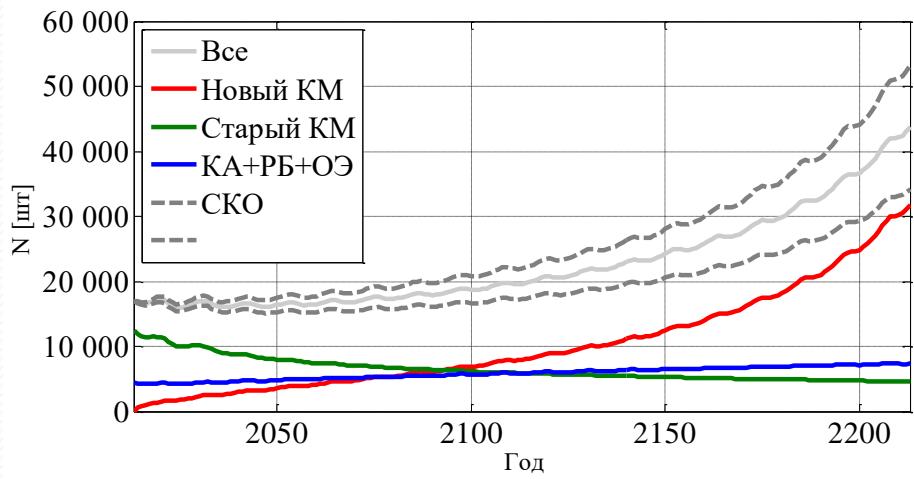


Объекты удовлетворяющие требованиям  
активного удаления по сценарию  
исследования



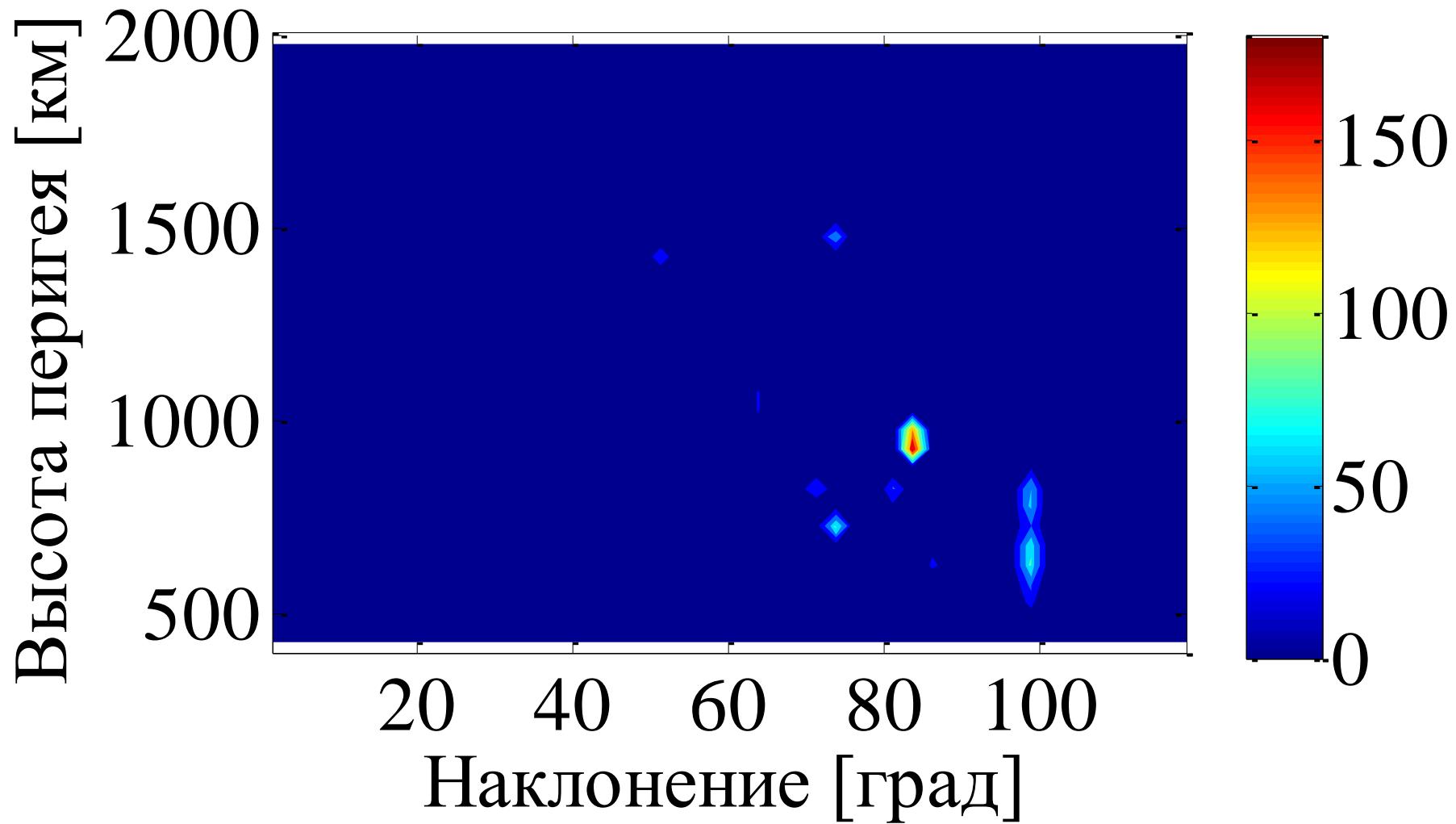
Запускаемые объекты по исходным данным  
ЕКА

## 4. Результаты



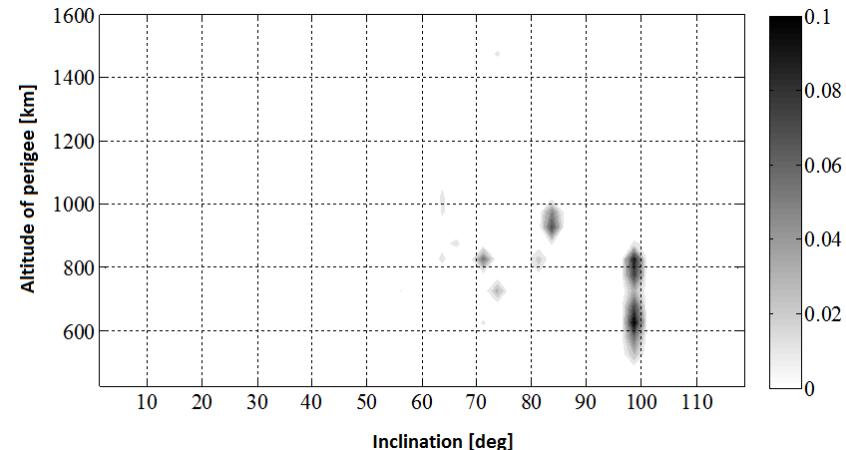
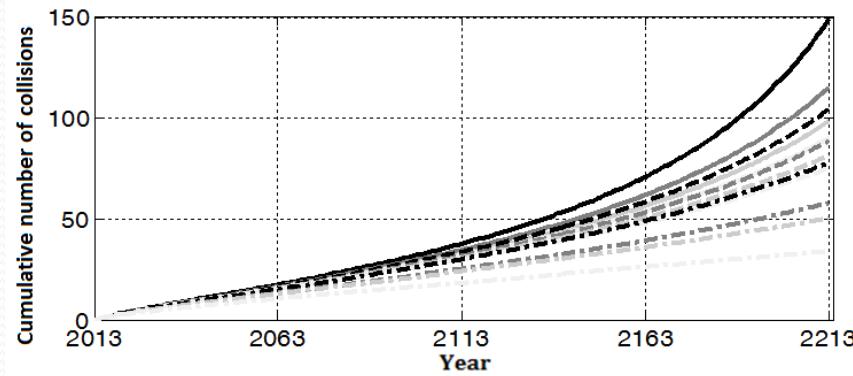
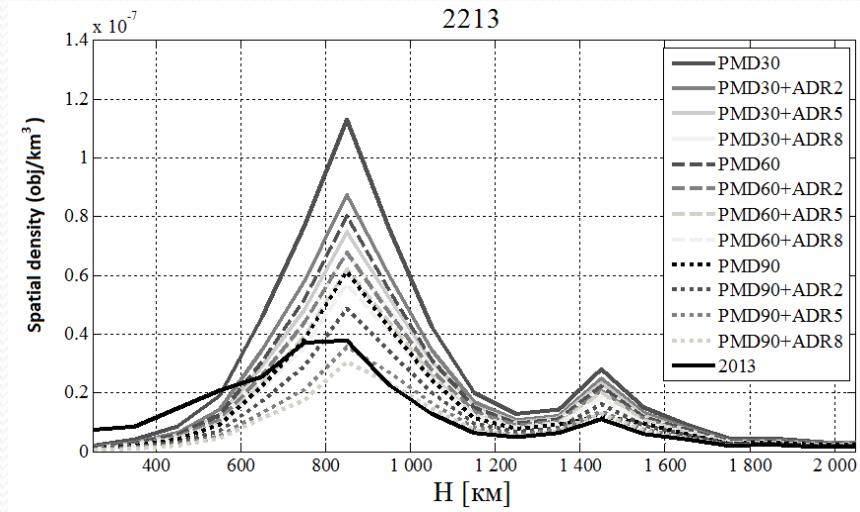
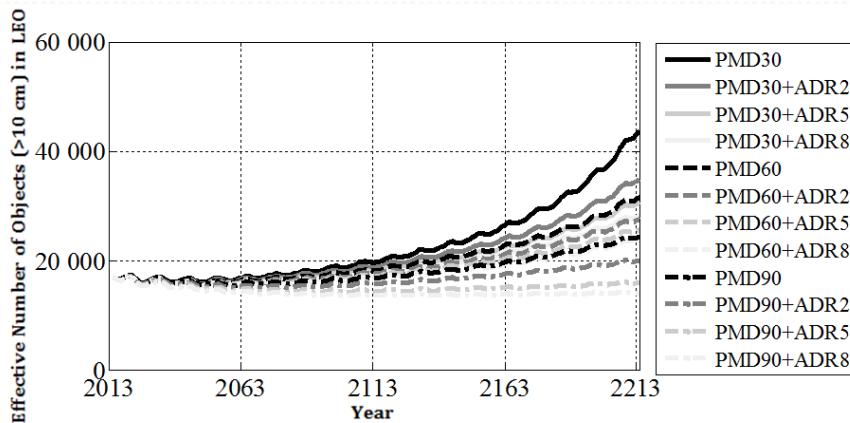


## 4. Результаты

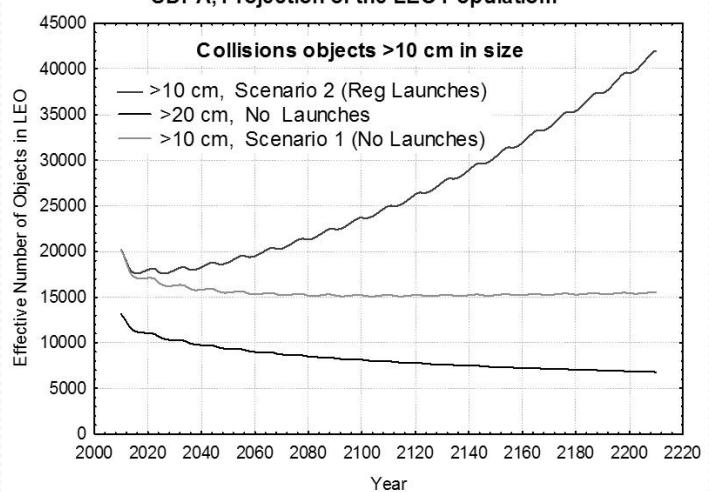
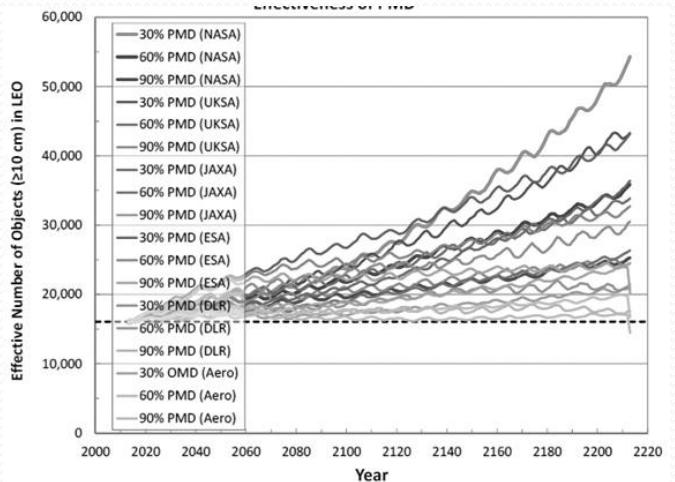
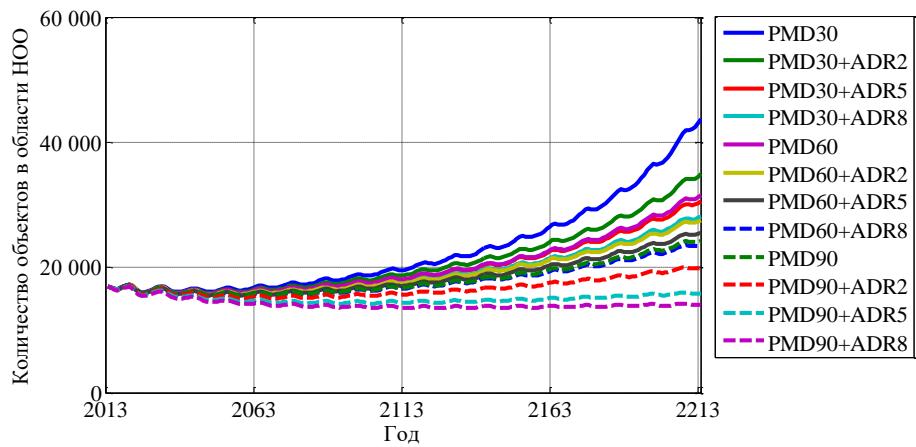




## 4. Результаты

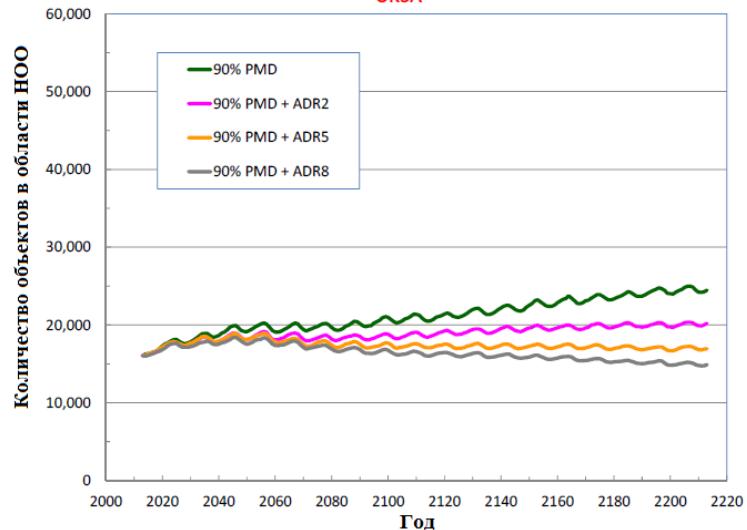
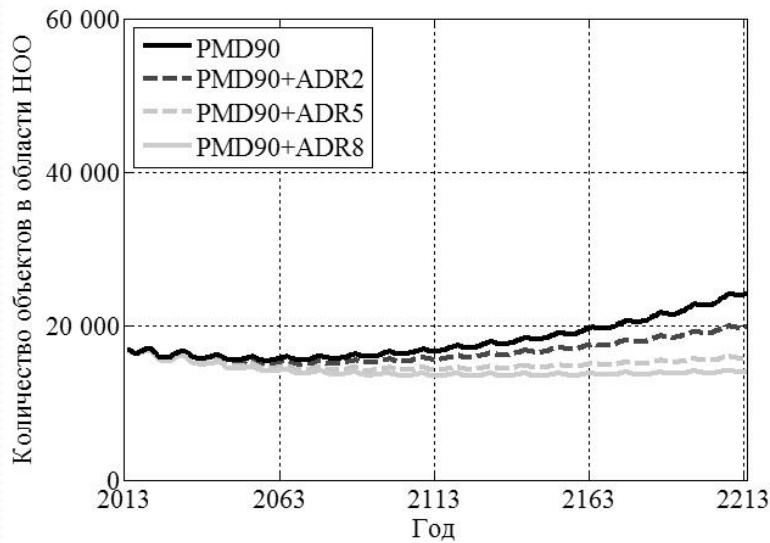
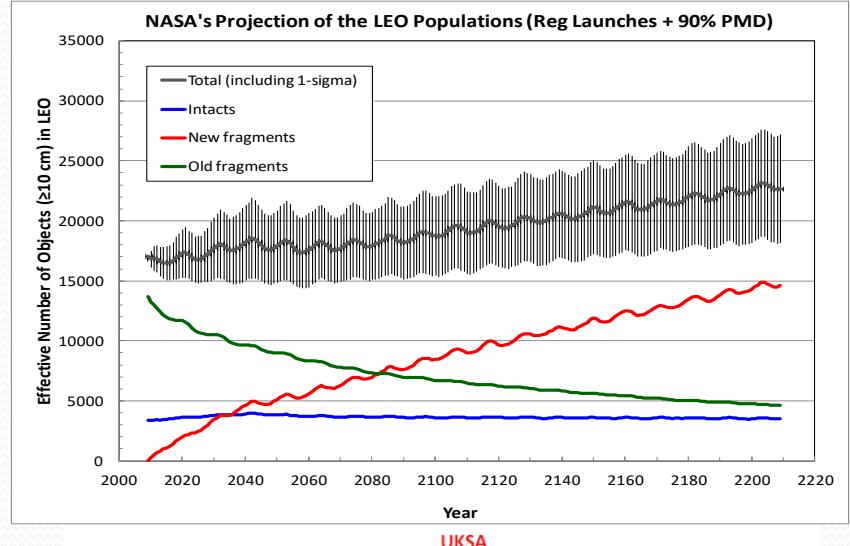
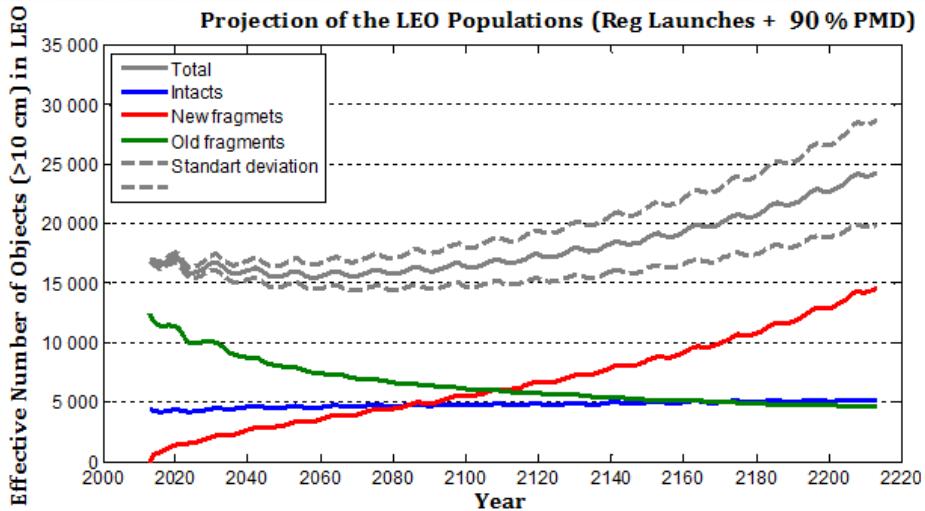


## 4. Сравнительный анализ результатов

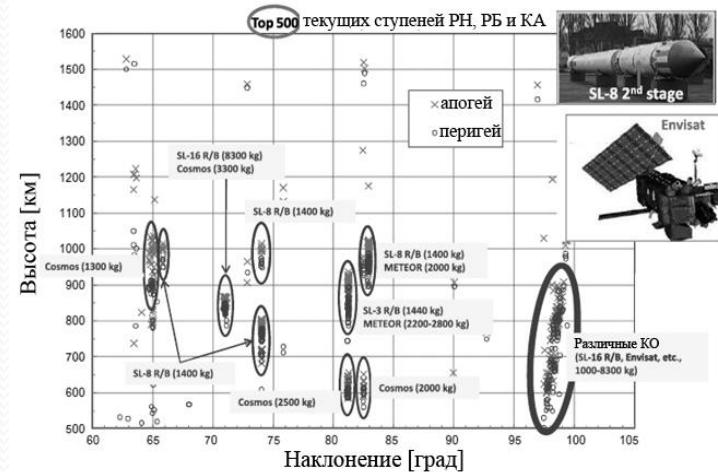
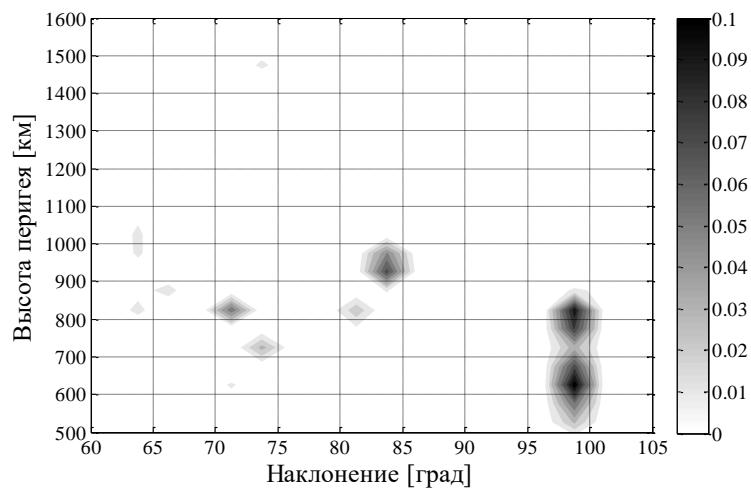
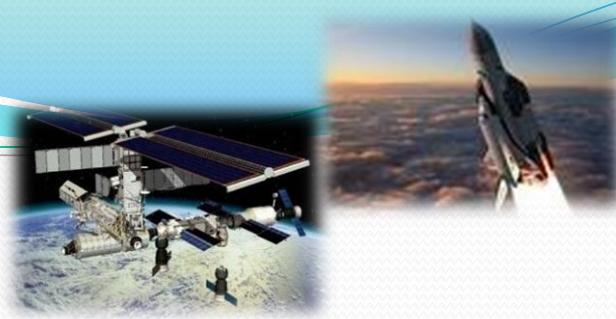




## 4. Сравнение результатов с аналогичными



## 4. Рекомендации по областям для активного удаления КМ



На основании результатов расчета по исследуемым сценариям можно выделить 3 области по высотам и наклонениям, для которых активное удаление наиболее актуально в настоящее время:

1.  $h = 800-850$  км  $i = 71,25^0$
2.  $h = 650-800$  км  $i = 98,75^0$
3.  $h = 900-950$  км  $i = 83,75^0$



## Заключение и выводы

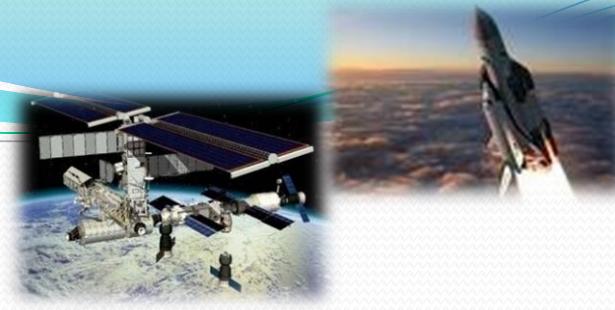
Разработаны:

- методика оценки долговременной эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит при реализации операций активного удаления космического мусора, основанная на раздельном моделировании и статистической модели КМ;
- частные математические модели космического мусора для решения задачи оценки долгосрочной эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит объектами размером более 10 см при реализации активного удаления
- Разработано программно-математическое обеспечение для оценки эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит при реализации активного удаления КМ для объектов размером более 10 см.;

Анализ результатов оценки влияния активного удаления космического мусора на долгосрочную эволюцию техногенного засорения области низких околоземных орбит при различных сценариях показал, что для стабилизации и снижения техногенного засорения области низких околоземных орбит необходимо помимо соблюдения мер по ограничению техногенного засорения удалять более 5 крупных объектов в год с наибольшим значением произведения массы на вероятность столкновения в будущем. Были выделены 3 области по высоте и наклонению, для которых активное удаление наиболее актуально в ближайшем будущем:

- $h = 800-850$  км  $i = 71,25^0$ ;
- $h = 650-800$  км  $i = 98,75^0$ ;
- $h = 900-950$  км  $i = 83.75^0$ .

# Список работ, опубликованных автором по теме диссертации



## Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

### Статьи в журналах Перечня ВАК РФ

1. Усовик И.В., Малышев В.В., Дарнопых В.В. Методика оценки эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит с учетом взаимных столкновений и активного удаления космического мусора // Вестник Московского авиационного института. – 2015. – Том 22, №3. – С. 54-62.

2. Усовик И.В. Анализ характеристик потока космического мусора на низких околоземных орбитах с использованием уточненной модели // Космонавтика и ракетостроение . – 2014. – Выпуск № 3(76). – С. 97-102.

3. Усовик И.В., Дарнопых В.В. Автоматизированный программный комплекс для параметрического анализа и оптимизации планирования целевого функционирования космических систем ДЗЗ [Электронный ресурс] // Труды МАИ. – 2014. – Выпуск № 65. – Режим доступа: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=35841>.

### Статьи в зарубежном издании, индексируемом в базе данных Scopus

4. Nazarenko A.I., Usovik I.V., Gravitation effect on a flux of sporadic micrometeoroids in the vicinity of near-Earth orbits // Acta Astronautica. – 2013 – Vol. 84(2013). – P. 153-160.

### Другие публикации

5. Космический мусор. В 2 кн. Кн. 1. Методы наблюдения и модели космического мусора / Под науч. ред. д.т.н., проф. Г.Г. Райкунова. Агапов В.М., Головко А.В., Усовик И.В. и др. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 248 с.

6. Усовик И.В. Методика прогнозирования техногенного засорения низких околоземных орбит с учетом взаимных столкновений и активного удаления космического мусора // Сборник тезисов «XIII Международная конференция Авиация и космонавтика». – М.: МАИ, 2014. – С. 194.

7. Усовик И.В. Системный анализ проблемы активного удаления космического мусора // Сборник тезисов «XX Международная конференция Системный анализ, управление и навигация». – Евпатория, 2015. – С.43.

8. Usovik I.V., Loginov S.S., Mikhailov M.A., Yakovlev M.V. The last results of activity Russian Federation in the field of modeling space debris and space debris mitigation measures in the near-earth space // 65-th International Astronautical Congress. – Toronto, Canada, 2014.

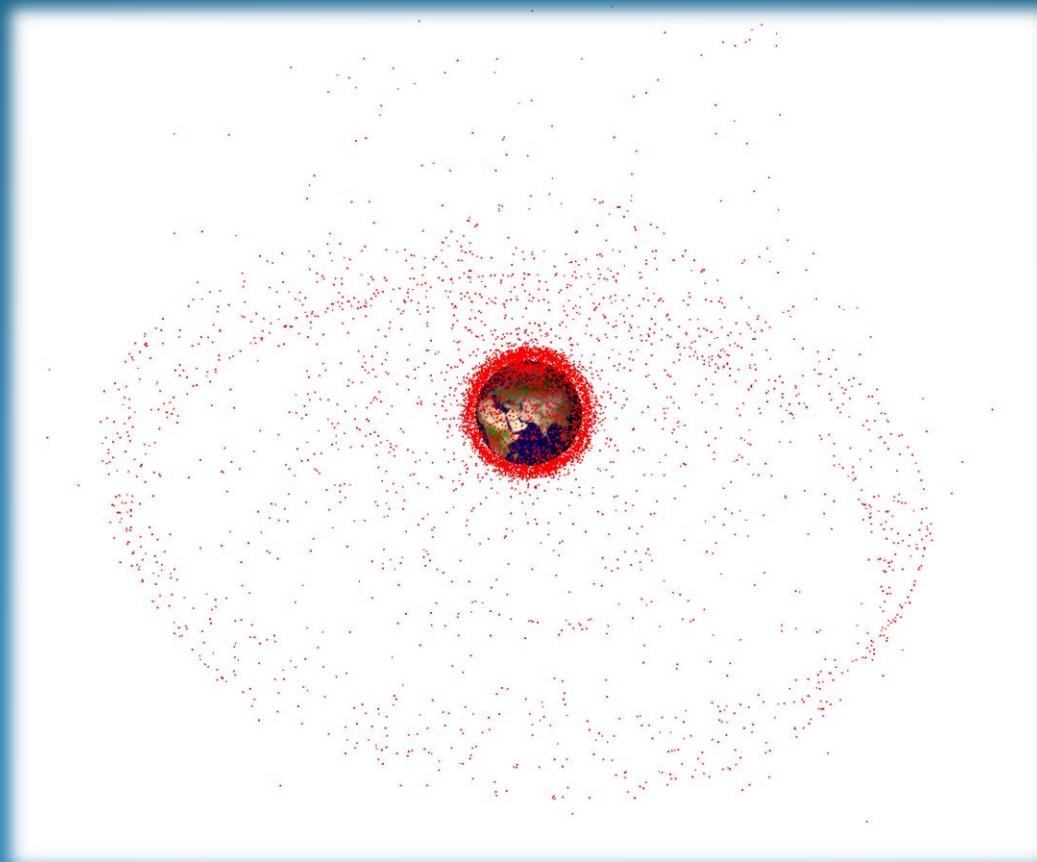
9. Nazarenko A.I., Usovik I.V. The Analysis of Pollution of a Space in the Field of LEO at Various Scenarios of its Further Development // Proceedings of the Six European Conference on Space Debris. – Darmstadt , Germany, 2013.

10. Nazarenko A.I., Usovik I.V. Space Debris Evolution Modeling with Allowance for Mutual Collisions of Objects Larger than 1 cm in Size. // Proceedings of the Six European Conference on Space Debris. – Darmstadt , Germany, 2013.



# Московский авиационный институт

(национальный исследовательский университет)



Спасибо за внимание!



## Основные положения, выносимые на защиту

1. Методика оценки долговременной эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит при реализации активного удаления КМ, основанная на раздельном моделировании и статистической модели КМ.
2. Частные компоненты статистической модели КМ:
  - расчета статистических распределений КМ;
  - оценки частоты столкновений;
  - оценки последствий столкновений;необходимые для оценки долговременной эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит объектами размером более 10 см при реализации активного удаления.
3. Программно-математическое обеспечение для оценки долговременной эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит объектами размером более 10 см при реализации активного удаления КМ.
4. Результаты сравнительного анализа и рекомендации по областям низких околоземных орбит для активного удаления КМ.



## Научная новизна результатов

1. В работе получены следующие результаты, обладающие новизной и научной значимостью:
2. методика оценки долговременной эволюции техногенного засорения области низких околоземных орбит при реализации активного удаления космического мусора, основанная на раздельном моделировании и статистической модели КМ;
3. частные компоненты статистической модели космического мусора для оценки долговременной эволюции техногенного засорения области низких околоземных орбит объектами размером более 10 см при реализации активного удаления;
4. программно-математическое обеспечение для оценки долговременной эволюции техногенного засорения области низких околоземных орбит объектами размером более 10 см при реализации активного удаления космического мусора.



## Практическая значимость результатов исследования

1. Разработанные методика и программно-математическое обеспечение обладают практической значимостью для принятия административных решений в области ограничения и снижения техногенного засорения.
2. Получены оценки влияния активного удаления космического мусора на долгосрочную эволюцию техногенного засорения области низких околоземных орбит при различных сценариях;
3. Выявлены области низких околоземных орбит, для которых в первую очередь необходимо проводить операции активного удаления космического мусора для стабилизации и снижения техногенного засорения в долгосрочной перспективе.