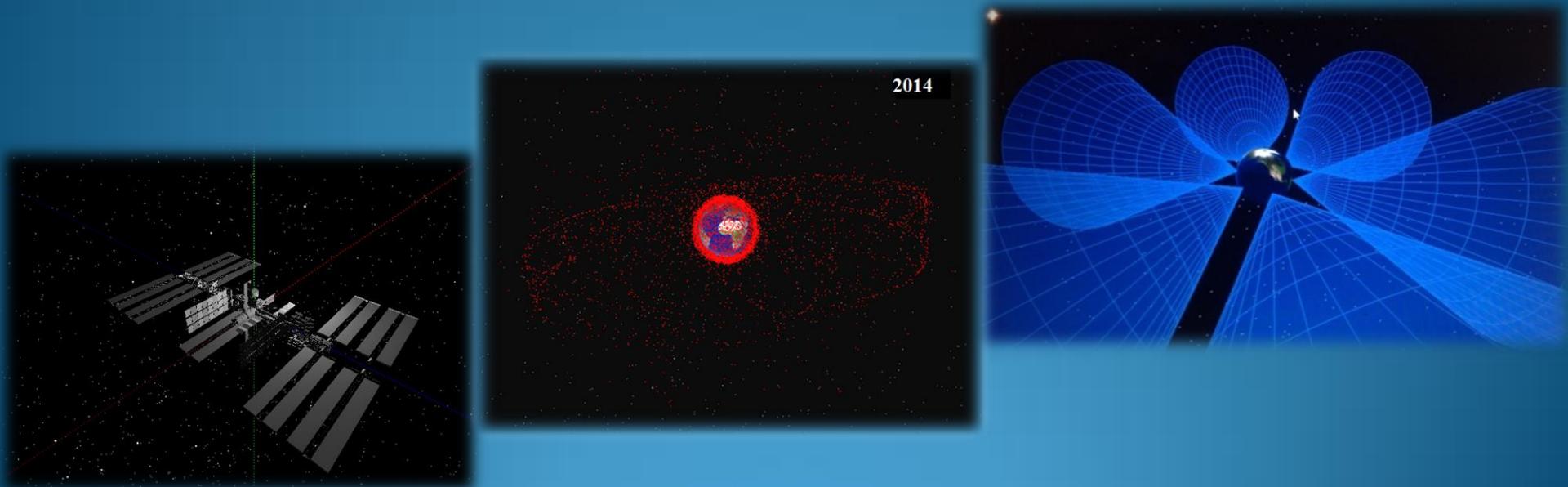


НТЦ «КОСМОНИТ»

ОАО «Российские космические системы»

Оценка числа столкновений в ОКП и их последствий



Назаренко А.И., Усовик И.В.

Москва 2015

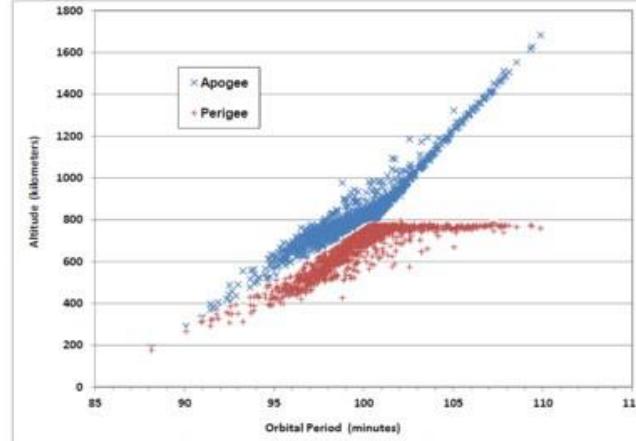
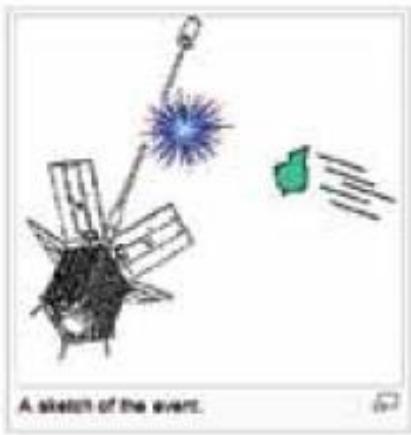
Оглавление

1. Известные случаи столкновений.
2. Методика оценки ожидаемого числа (вероятности) столкновений (алгоритм Д.Кесслера и его развитие).
3. Столкновения в области низких орбит.
4. Каскадный эффект.
5. Влияние мер по ослаблению техногенного засорения ОКП.
6. Сравнение с результатами зарубежных исследователей.
7. Столкновения в области геостационарных орбит.
8. Выводы и рекомендации.

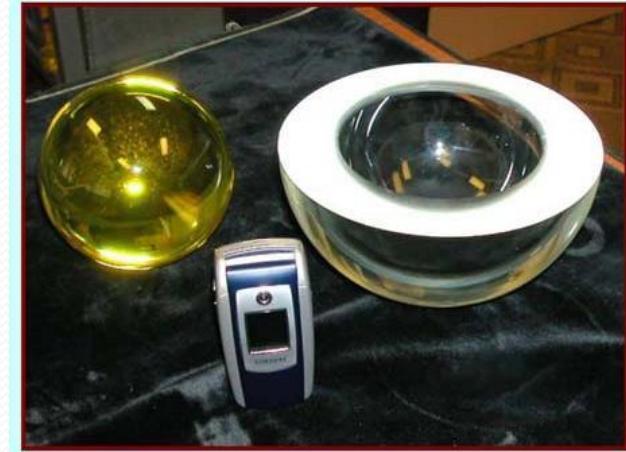
1. Известные случаи столкновений

Данные о столкновениях каталогизированных объектов

№ п/п	Время	КО 1	КО 2	Высота, км	Вес, кг
1	Июль 1996 г.	Cerise	КО № 18208	670	50+
2	Февраль 2009 г.	Iridium 33	«Космос-2251»	780	560+900
3	Январь 2013 г.	«Блиц»	Фрагмент	830	7,8+



By the third anniversary of the accidental collision of the Russian Cosmos 2251 spacecraft and the U.S. Iridium 33 spacecraft, 2126 debris had been identified in the U.S. Space Surveillance Network, or these 1650 objects had been catalogued between 200 km and 1700 km above the surface of the Earth. The above graphic depicts the distribution of debris orbits (a symbol for each apogee and perigee) in February 2012. More than 160 additional debris from the collision were being tracked but had not yet been officially catalogued.



Вероятной причиной аварии КА «Блиц» является его столкновение с мелким фрагментом космического мусора массой ≈ 0.035 г и размером менее 2.5–5.0 мм. Результаты моделирования показывают, что на высоте полета КА «Блиц» число объектов размером менее 2.5 – 5 мм на 4 – 5 порядков превышает число каталогизированных объектов.

2. Методика оценки числа столкновений

D.J. Kessler "Derivation of the Collision Probability between Orbiting Objects: The Lifetimes of Jupiter's Outer Moons". *Icarus*, Vol. 48, 1981, pp. 39-48.

D.J. Kessler and B. G. Cour-Palais (1978). "Collision Frequency of Artificial Satellites: The Creation of a Debris Belt". *Journal of Geophysical Research* 83: 63.

Концентрация 1-го КО в точке (R, β)

$$S(R, \beta) = \frac{1}{2\pi^3 Ra[(\sin^2 i - \sin^2 \beta)(R - q)(q' - R)]^{1/2}}$$

Число столкновений 2-КО в единицу времени

$$N/t = \int_{\text{volume}} S_1 S_2 V \sigma dU.$$



The collision rate between all satellites, dC/dt , is given by

$$dC/dt = \frac{1}{2} \int S^2 \bar{V} \bar{A}_{cc} dU \quad (2)$$

where C is the number of collisions between satellites, \bar{A}_{cc} is an average collision cross-sectional area of the satellites, and dU is an element of volume. Thus both an average velocity and a collision cross-sectional area are required. These distributions and their resulting averages will be discussed now.

Развитие методики (статистический подход)

1. Концентрация $\rho(r, \beta) = \frac{N_\Sigma \cdot F(\beta)}{2\pi^2 \cdot r^2 \cdot \Delta h} \sum_{h_p} \sum_e \Delta \tau(h_p, e) \cdot \Phi(h_p, e, r) \cdot p(h_p) \cdot p(e) \cdot \Delta h_p \cdot \Delta e$

2. Статистические распределения вектора скорости $p(A)$, $p(Vt)$, $p(Vr)$.

3. Удельный поток КМ относительно заданного объекта $\bar{Q} = \frac{1}{T} \cdot \int_{t=0}^T \rho(t) \int_{A=0}^{2\pi} p(t, A) V_{rel}(t, A) \cdot dA \cdot dt$

4. Распределение направлений потока $pQ_{rel}(Az) = \frac{V_{rel}(Az) \cdot pV_{rel}(Az)}{\int V_{rel}(Az) \cdot pV_{rel}(Az) \cdot dAz}$

5. Число столкновений в единицу времени

$$dN(h, h + \Delta h)_{Dd} / dt = F_{Dd} \cdot n(h, h + \Delta h)_{cat} \cdot \bar{Q}(d, t)$$
$$F_{Dd} = \left[\frac{\pi}{4} \int_{D_1}^{D_2} \int_{d_1}^{d_2} (D + d)^2 \cdot f(d) \cdot dd \cdot f(D) \cdot dD \right]$$

6. Прогнозирование высотного распределения

$$p(h, t) = u(t, t_0) \cdot p(h_0, t_0) + \int_{\xi=t_0}^t u(t, \xi) \cdot p(h, \xi)_{new} \cdot d\xi$$
$$dh/dt = S_b \cdot \rho_{atm}(h, t) \cdot f(a, e, i)$$

3. Столкновения в области низких орбит

В таблице представлены итоговые данные о числе объектов в области высот до 2000 км в конце 2012 г, полученные с учетом и без учета взаимных столкновений.

№ диапаз.	1	2	3	4	5	6	7	8
С учетом	960E+6	110E+6	23.8E+6	5.576E+6	604E+3	106E+3	9568	13146
Без учета	67.6E+6	5.03E+6	0.878E+6	0.319E+6	63.0E+3	22.1E+3	4233	12634
Отношение	14.2	21.8	27.1	17.5	9.6	4.8	2.26	1.04



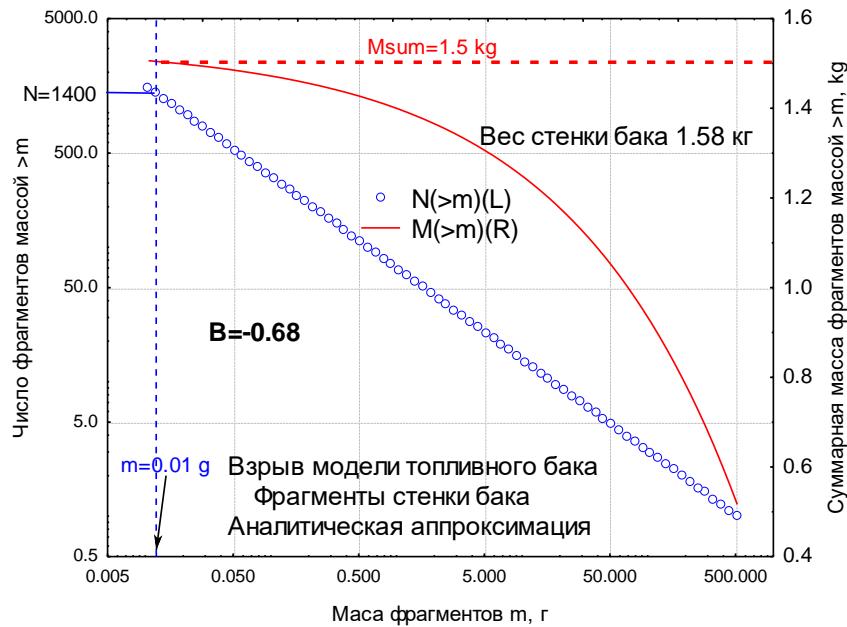
Эволюция числа столкновений, jd=8

На рисунке представлены суммарные оценки среднего числа взаимных столкновений каталогизированных КО (**группа 2. jd=8**) на интервале времени с 1990 г. по 2012 г. Суммарное число взаимных столкновений (математическое ожидание) достигло значения 2.7. Для объектов из других групп оно составило 9660 (**группа 1, jd=4..7**) и 323 (**группа 3**).

4. Каскадный эффект

Модификация модели фрагментации

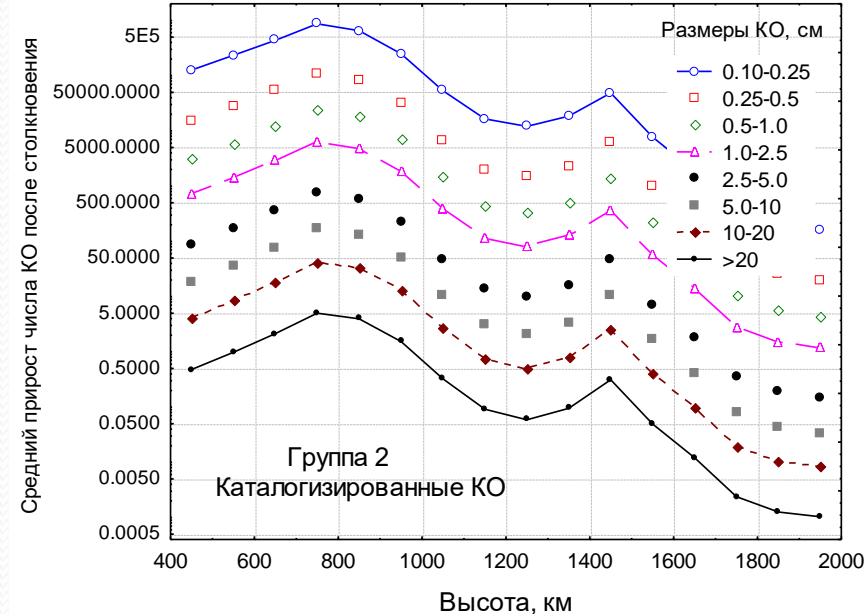
Удельная энергия столкновения:



$$N(>m) = A \cdot (m/M_e)^B$$

$$u = U/M = \frac{1}{2} \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{(m_1 + m_2)^2} \cdot V_{imp}^2$$

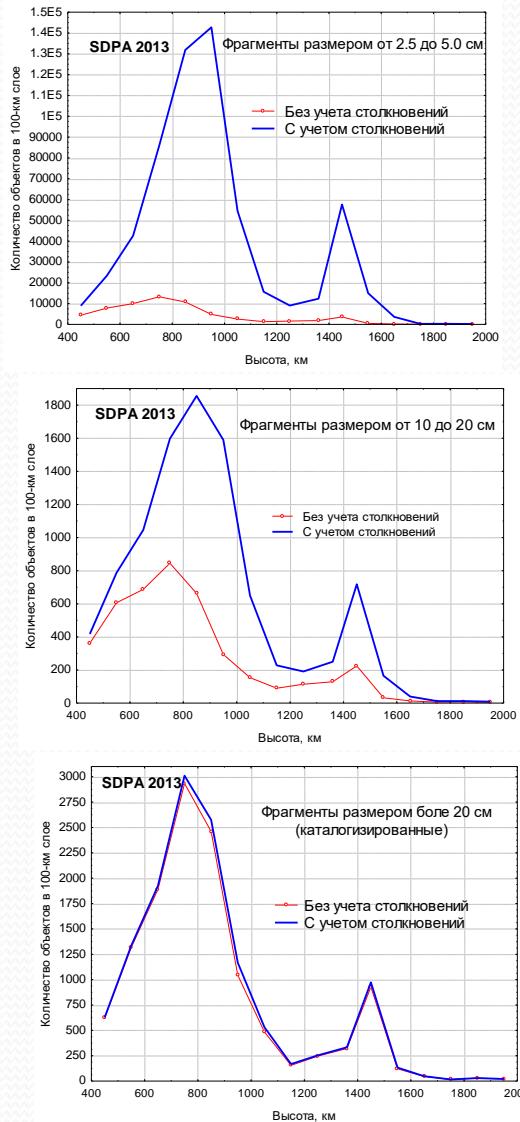
$$u_j = k \cdot S_j$$



Сравнение оценок максимальных концентраций (км^{-3}) в 2010 и 2013 гг.

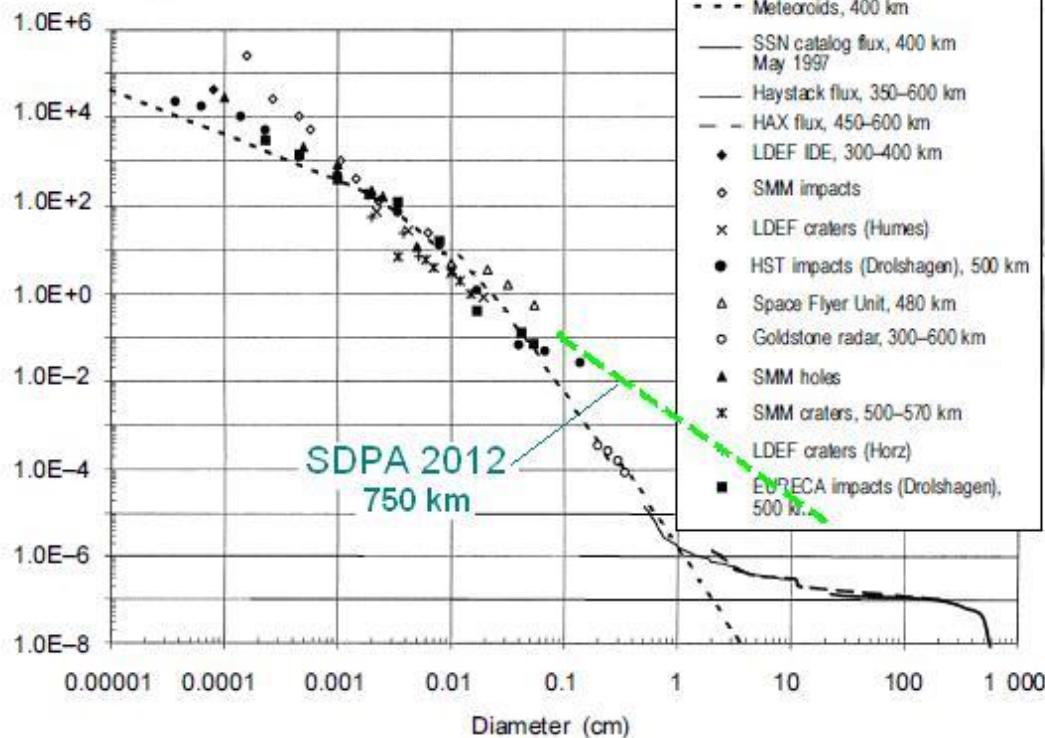
№ диапазона	1	2	3	4	5	6	7	8
SDPA2013	6.36E-3	8.33E-4	1.99E-4	5.31E-5	6.14E-6	1.13E-6	9.30E-8	1.36E-7
SDPA2010	1.08E-3	9.11E-5	1.67E-5	2.81E-6	5.68E-7	1.89E-7	6.14E-8	1.27E-7
Отношение	5.89	9.14	11.87	18.89	10.51	5.95	1.51	1.07

Влияние столкновений на распределения по высоте и размерам



Каскадный эффект – уже начался

Cross-sectional flux of a given size and larger
(number/m²·yr)

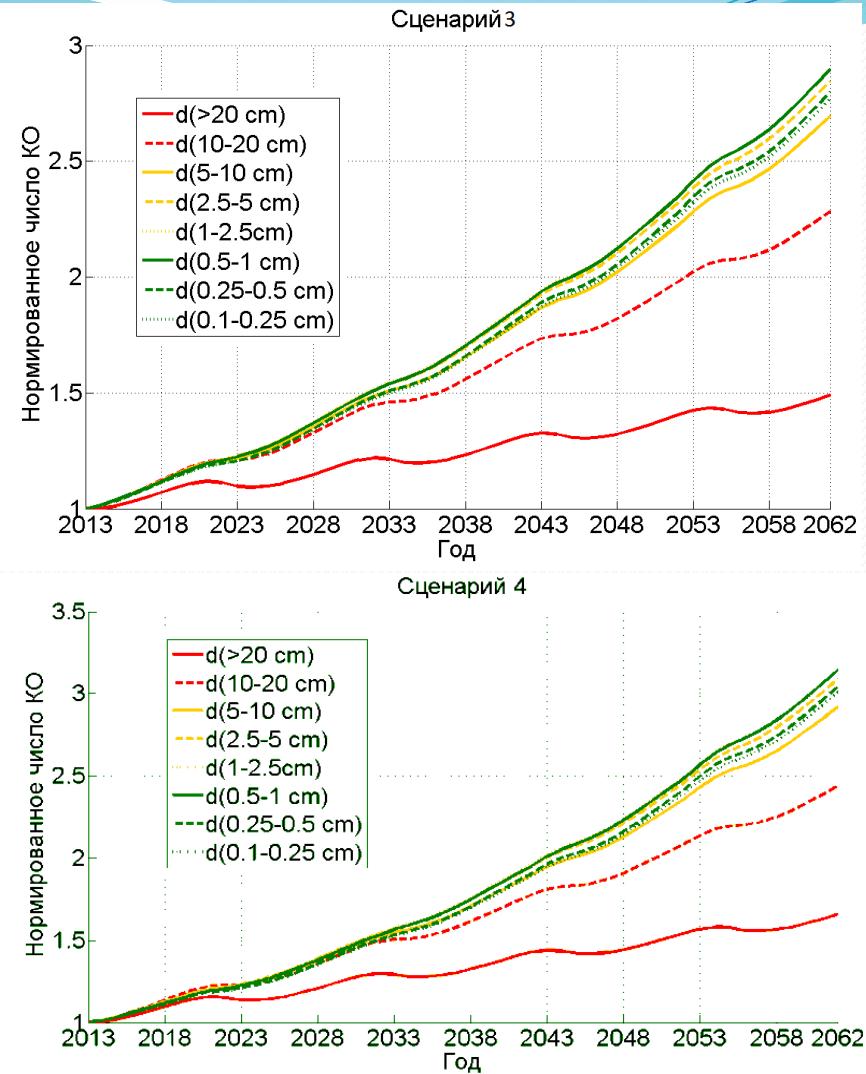
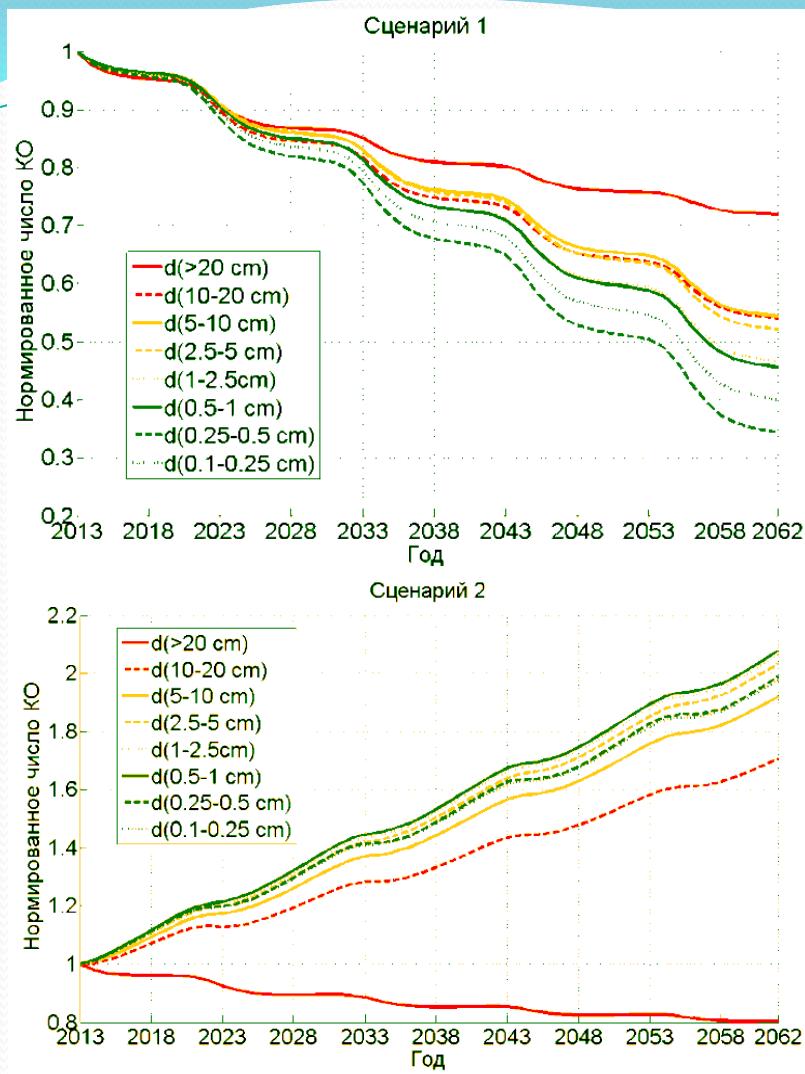


Characteristics of space debris flux according to the data of various sources and the SDPA estimates with accounting for mutual collisions

5. Влияние мер по ослаблению техногенного засорения ОКП.

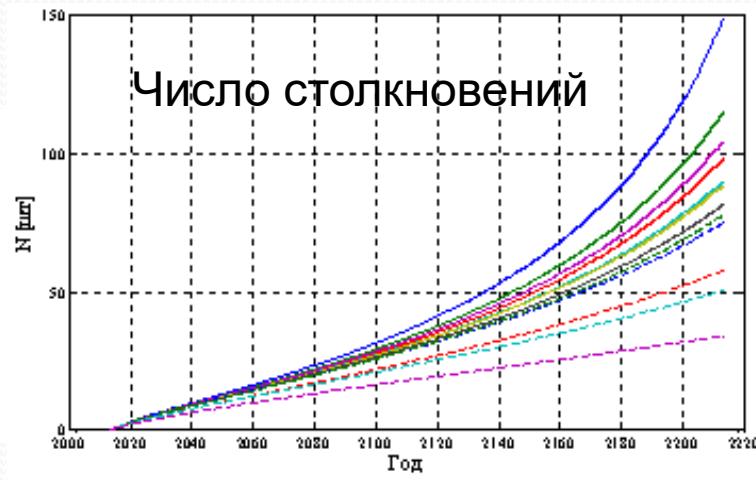
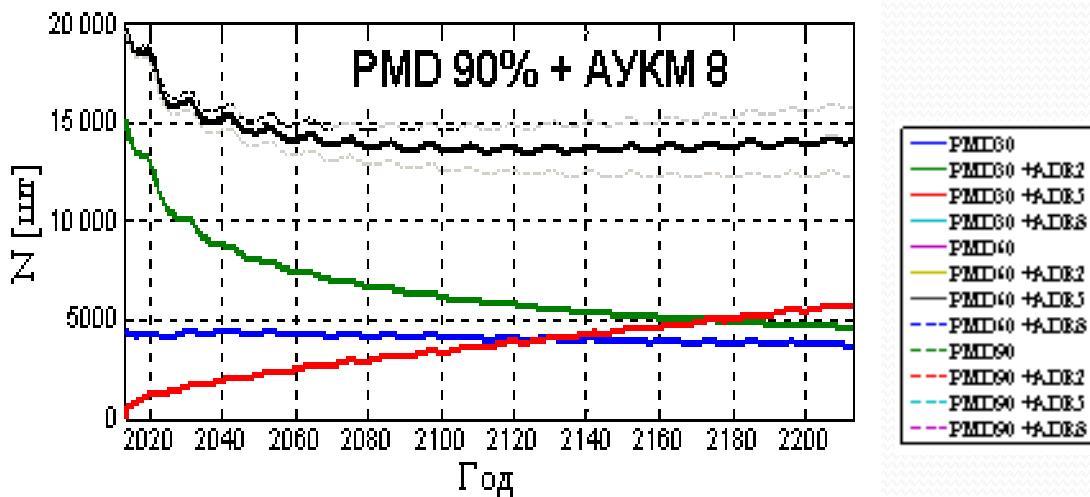
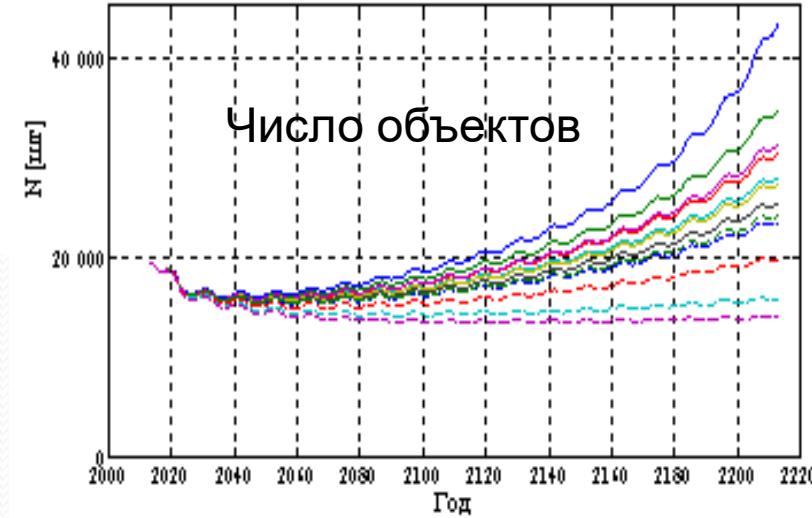
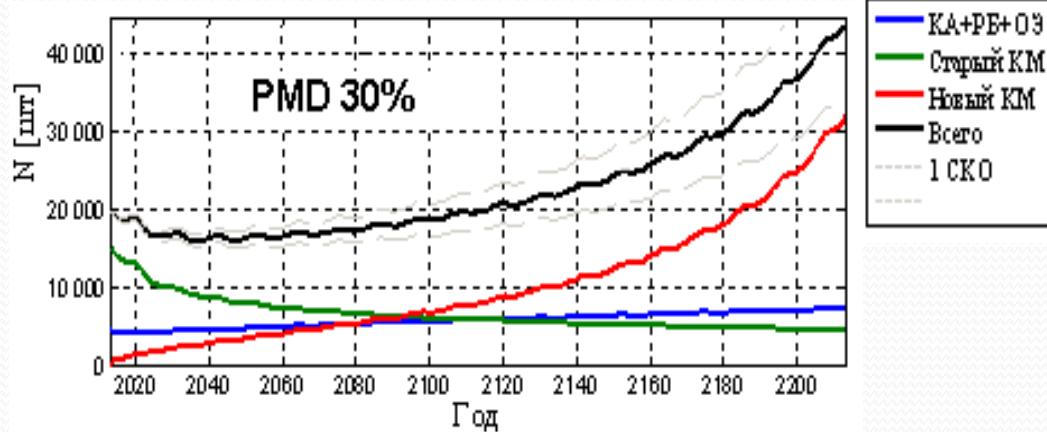
- Принятие адекватных административных и технических решений в ответ на угрозы, вызванные космическим мусором, является одной из задач, которую необходимо решать уже сейчас. Для обоснованности принимаемых решений необходимо иметь прогнозы загрязнения околоземного космического пространства при различных сценариях его дальнейшего освоения.
- С использованием Российской модели космического мусора Space Debris Prediction Analysis (SDPA), были проведены расчеты эволюции КМ для различных сценариев дальнейшей космической деятельности, на интервале прогноза 50 лет, что соответствует времени активного освоения космического пространства.
- Разработанные сценарии представлены в таблице:

Источники КМ	Сценарии			
	1. Идеальный	2. Реальный только столкновения	3. Реальный оптимистический	4. Реальный пессимистический
Новые запуски	нет	нет	как раньше	как раньше
Взрывы КА и РН	нет	нет	нет	есть
Столкновения	нет	$d > 1\text{cm}$	$d > 1\text{cm}$	$d > 1\text{cm}$

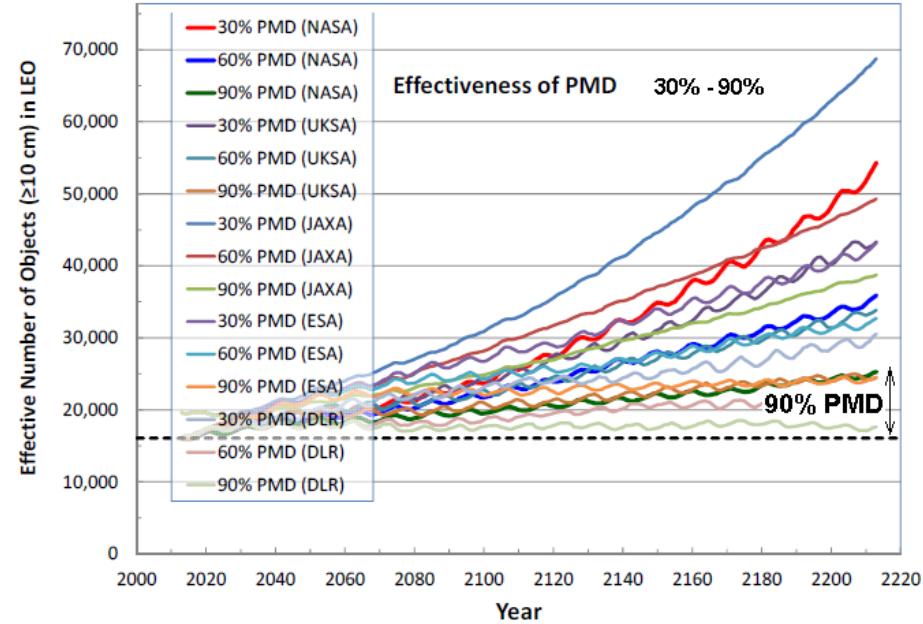
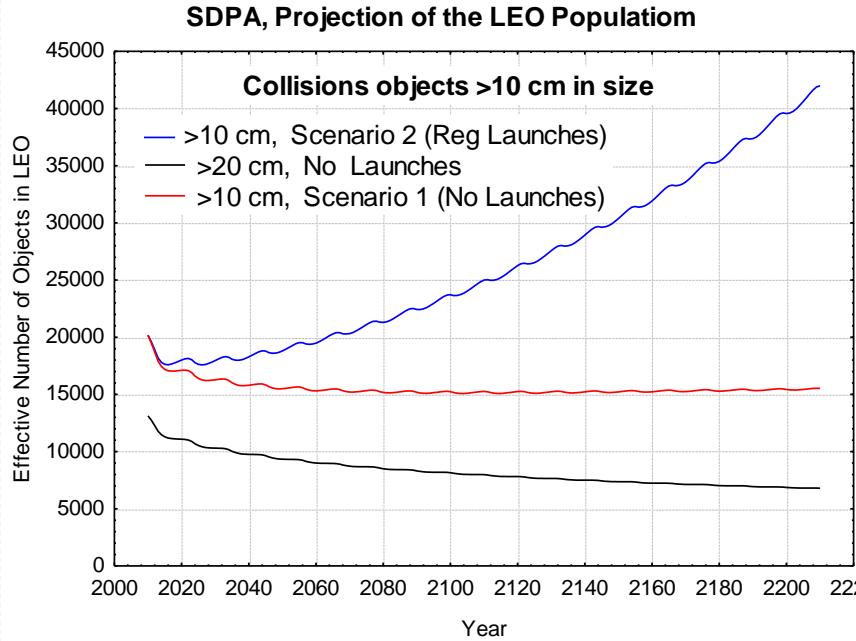


1. Результаты моделирования показали, что в будущем основным источником образования нового КМ, будут являться взаимные столкновения.
2. Популяция мелких объектов будет увеличиваться независимо от принимаемых мер.

Post Mission Disposal (PMD) и Активное Удаление Космического Мусора (АУКМ)



6. Сравнение с результатами зарубежных исследователей



- Здесь представлены результаты прогнозирования по модели SDPA для двух граничных сценариев и по моделям других космических агентств при различных сценариях, учитывающих меры по ограничению техногенного засорения.
- Как видно из данных графиков, а также графиков на предыдущем слайде, результаты наших прогнозов хорошо согласуются с зарубежными.

7. Столкновения в области геостационарных орбит

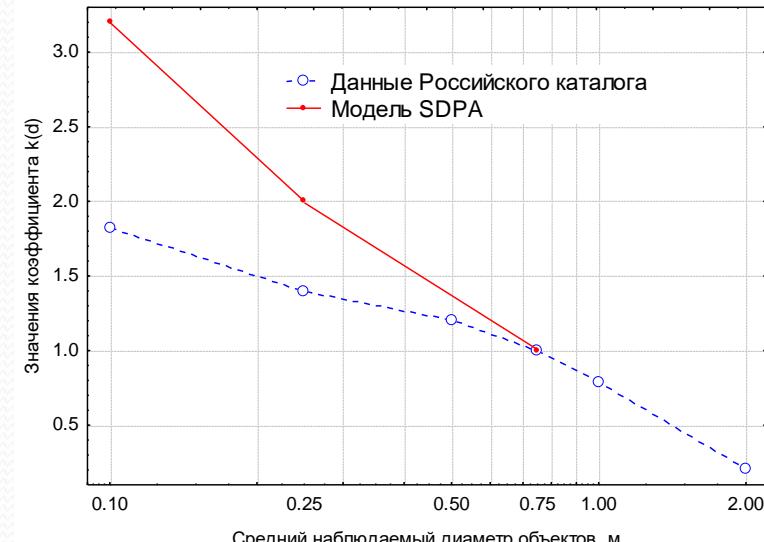


Зависимость концентрации известных КО от высоты

Результаты определения средней скорости столкновений:

0.615 км/сек ($d > 75$ см)

Вероятность взаимных столкновений каталогизированных объектов размером более 75 см составляет **0.00627 за год**. Это означает, что средний интервал между такими столкновениями равен ≈ 160 лет. Вероятности столкновений каталогизированных КО с объектами размером от 2.5 см до 75 см на 2-3 порядка меньше.



Нормированная зависимость числа КО от их размеров

0.719 км/сек ($d < 75$ см);

8. Выводы и рекомендации

- 1. Оценка влияния взаимных столкновений КМ в области низких орбит свидетельствует о невозможности обеспечения “*Stability of the Future LEO Environment*” в части объектов КМ размером менее 10 см.*
- 2. Реализация мер по ослаблению техногенного засорения ОКП (90% PMD и АУКМ 8) позволит избежать каскадного эффекта для КМ размером более 10 см.*
- 3. Экспериментальное подтверждение каскадного эффекта на высотах 700 – 1000 км является актуальной задачей.*

Печальная история о космическом мусоре

**Скажи-ка дед наш, ведь не сразу
Узнали в мире про заразу
С названием Space Debris.
Да дети. Это долго длилось,
Не сразу четко проявилось,
Пока настолько накопилось,
Что беды начались.**

После победы в сорок пятом
Мы были радостью объяты:
Народ наш молодец!
Однако были и другие,
Они Россию не любили,
Кулак в кармане затаили:
И вам придет конец!

Но были люди в наше время,
Великое, святое племя –
Участники войны.
Они броню не продавали,
Случайных милостей не ждали,
Они секретный способ знали,
И были тем сильны.

Защита от врагов – ракета.
Спасибо авторам за это.
Все дело – в дальности стрельбы.
Она летает за полмира,
Не то, что прежняя мортира.
Теперь уж злобная задира
Не выдержит борьбы.

На этом бы остановиться,
Спокойно жить и не стремиться
Подняться выше всех.
О космосе мечтали люди.
Решений не было «на блюде».
Хотя такой полет был чудом,
Мы верили в успех.

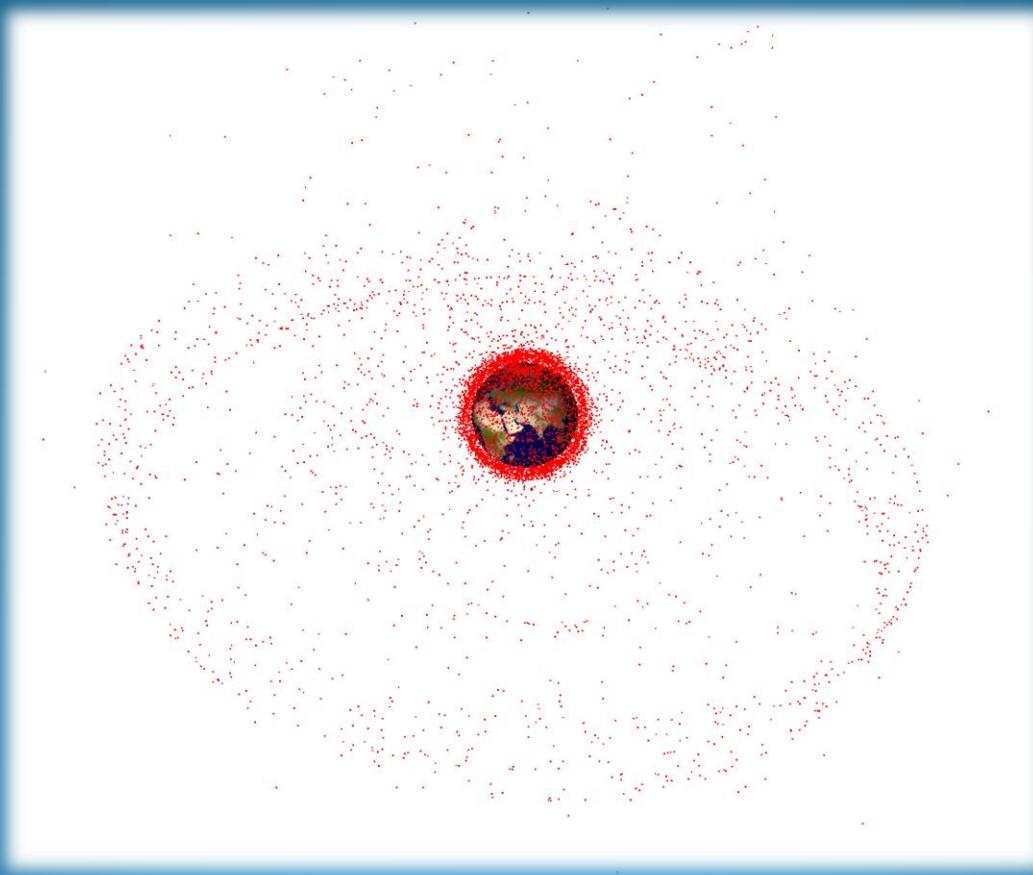
Как только спутники создали,
Открылись всем такие дали . . .
И гонка началась.
Возникли новые задачи:
Разведка, космос, связь в придачу.
И, несмотря на неудачи
Она продолжилась.

Сейчас их тысячи летают
И множество задач решают,
Но вот настал момент,
Когда случилось столкновение
Двух спутников, их разрушение
На мелкие осколки за мгновение –
И это - прецедент.

**Беда здесь в том, что столкновения
Приводят к росту загрязнения
Пространства над Землей.
Процесс идет без замедления,
Нет средств его предотвращения
И в результате, без сомнения,
Возникнет плотный слой.**

**Да, были люди в наше время,
Какое-то чудное племя,
Их лозунг: «Все сейчас».
Какая ждет судьба обломки?
Останется ли что потомкам?
Иль будут жить они в потемках?
Не думали об этих «мелочах».**

НТЦ «КОСМОНИТ»
ОАО «Российские космические системы»



Спасибо за внимание!

Москва 2015