Актуальные вопросы моделирования техногенного загрязнения околоземного космического пространства.

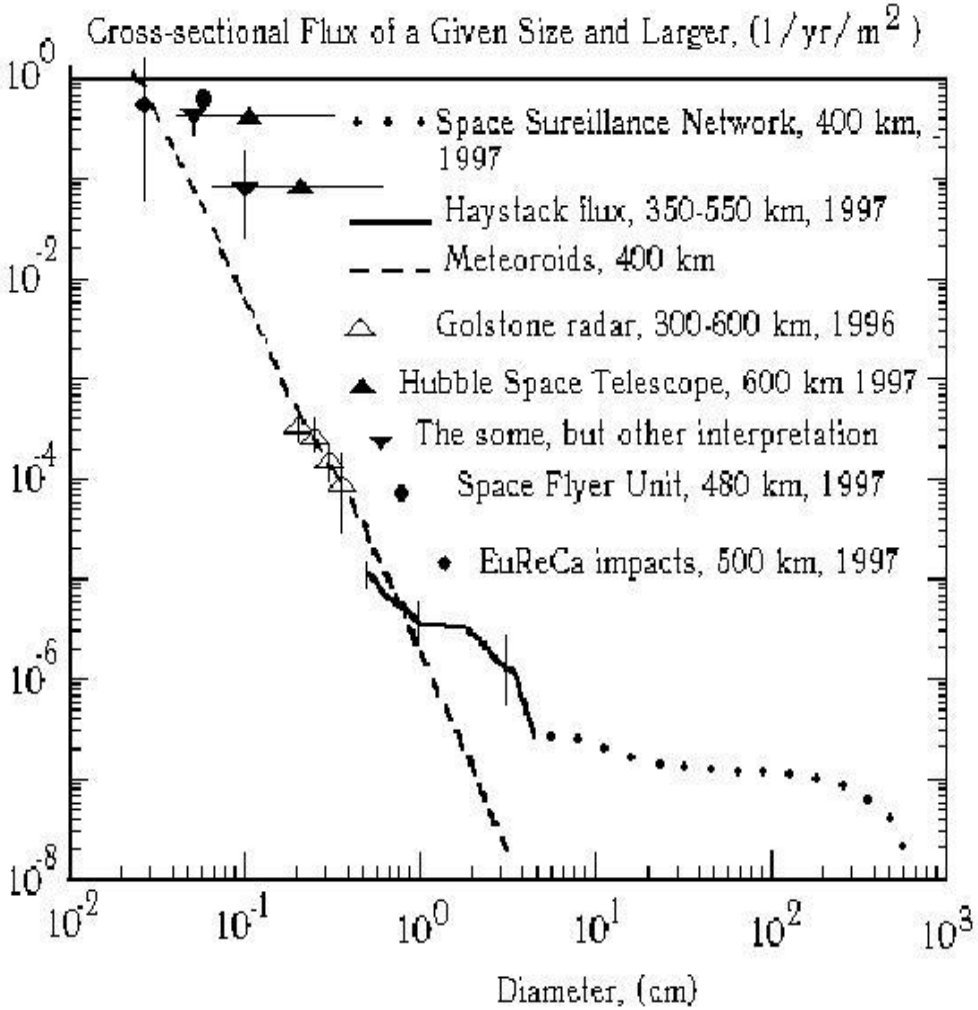
А.И. Назаренко
Центр космических наблюдений Росавиакосмоса

Резюме

Основная трудность решения связанных с КМ прикладных задач вызвана недостатком экспериментальных данных. Поэтому для определения характеристик техногенного загрязнения в различных точках упомянутого пространства привлекается дополнительная (априорная) информация. ***Эффективное использование экспериментальных данных и априорной информации – основная проблема моделирования космического мусора (КМ).***

В докладе кратко изложены данные о трех моделях космического мусора: ORDEM2000 (NASA), MASTER'99 (ESA) и SDPA (модель автора). ***Обсуждаются особенности применяемых методов моделирования и их сравнительные характеристики, а также основные проблемные вопросы совершенствования моделей .***

1. Введение



В многомерной области **“время – высота – размеры КМ”** ***измерения были проведены только в относительно не-больших локальных регионах***.

Это обстоятельство характеризует основную трудность достоверной оценки пространственно-временного распределения КМ.

2. Модели

Модели	MASTER'99 (. . . . .)	ORDEM2000 (EVOLVE)	SDPA-E (SDPA2000)
ОС	Windows	Windows	Windows
Высоты	200 – 38800 км	200-2000 км	300-2000 км 35400-36200 км
D минимум	0.001 мм	0.01 мм	1 мм
Источники	конкретные	сумма	сумма
Концентрация	да	да	да
Удельный поток относит. КА	да	да	да
Отн. скорость	(да)	да	да
Подход	Детерминиров.	Смешанный	Стохастический

3. Определение концентрации

MASTER'99.

Число ячеек 680000

Для 5% точности необходимо >272 000 000 прогнозов

$$\rho_n(r_i, \alpha_k, \beta_j)_{KO} = \frac{\Delta t_{n(ijk)}}{V_{ijk} \cdot T}$$

ORDEM2000

n ячеек 16×18=288

n прогнозов =288×8000≈ ≈ 2 300 000

$$\rho(r, \beta)_{KO} = F(r, \beta, \quad r_p, r_a, i)$$

SDPA2000

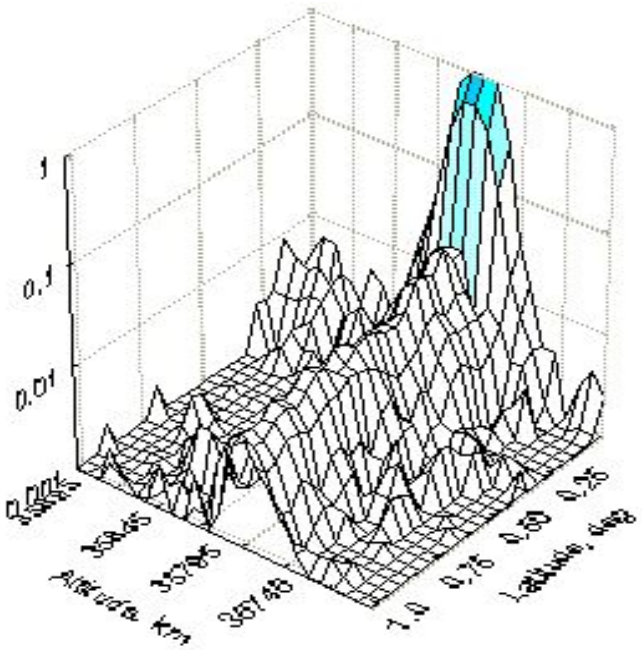
n ячеек 16×18=288

$$\rho(r, \beta)_{\Sigma} = F[r, \beta, \quad N_{\Sigma}, p(h_p), p(e), p(i)]$$

$$\Delta t(r, h_p, e) = \ldots$$

Число прогнозов для расчета $\Delta t(\ldots) = n(r) \cdot n(h_p) \cdot n(e) = 16 \times 16 \times 8 \approx 2000$

Проблема: оптимизация разбиения ОКП на ячейки



$$\sigma\left(\frac{\delta\rho}{\rho}\right) \approx \frac{1}{\sqrt{N}}$$

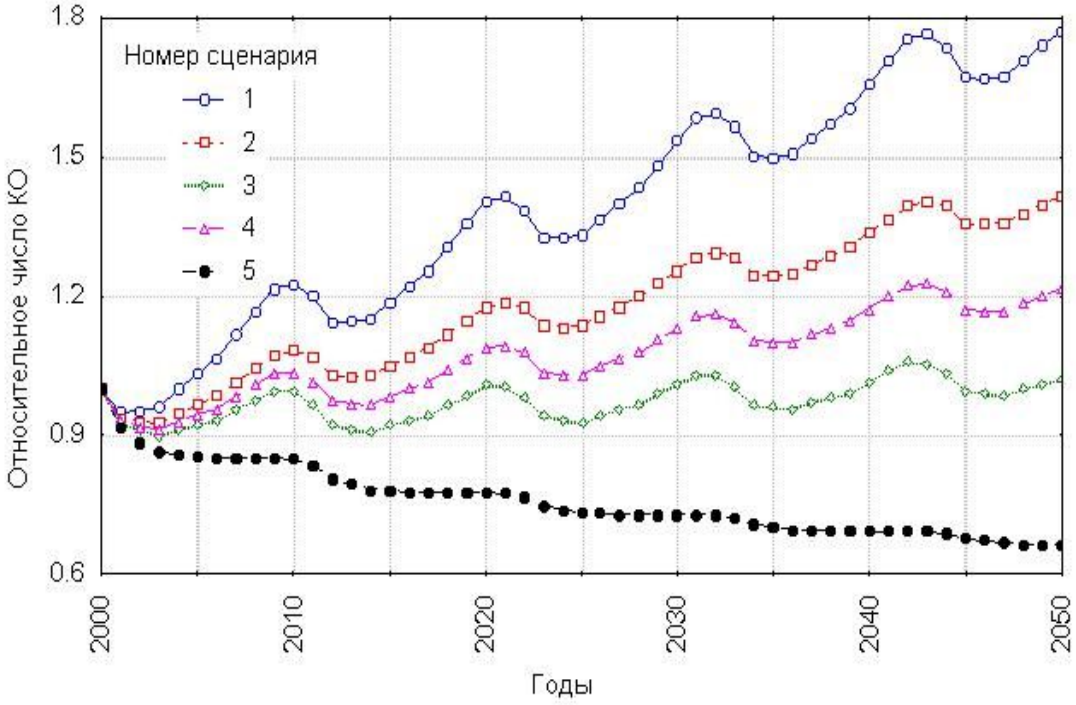
$$p(h_p, e, i) \neq p(h_p) \cdot p(e) \cdot p(i)$$

Оценки концентрации (ρ) в ГЕО при различных размерах ячеек по высоте и широте

Δh, км	100	100	100	100	25	10	10
Δb, гр	1. 0	0. 5	0. 25	0. 1	0. 25	0. 10	0. 05
ρ, км$^{-3}$	4.15E-9	7.36E-9	1.38E-8	3.12E-8	4.58E-8	1.04E-7	2.56E-7

4. Прогнозирование техногенного загрязнения

$$\frac{\partial p(t,h)}{\partial t} = V(t,h)\left[\frac{\partial p(t,h)}{\partial h} - \frac{p(t,h)}{H(t,h)}\right] + dp(t,h,\ldots)$$



Прогноз числа КО размером более 1 см

$$dp(t,h) = \ldots$$

Сценарии:

1: как было;

2: 1+без сопутствующих деталей;

3: 1+без взрывов;

4: (запуски + меры 2 и 3)×0.5;

5: все меры (2 и 3)

Данные о номинальном ежегодном приросте числа КО в области высот до 2000 км

КА: **52.0;**

РН: **61;**

технологические КО размером >20см: **100**

Номинальное ежегодное число взрывов: **3**

Среднее число КО d>20см на 1 взрыв: **39**

Отношение числа КО размером более 1 см к номинальному приросту числа КО размером d>20см: ***k(d)*=54.5.**

Результаты прогноза на интервале 1960 - 2000.

Значения концентрации (**ρ**)частиц разных размеров

***d*,** см	от 0.5 до 1.0	от 1.0 до 2.5	от 2.5 до 5.0	от 5.0 до 10.0	от 10.0 до 20	>20
ρ_{max}, км$^{-3}$	**6.4E-6**	**1.0E-6**	**2.1E-7**	**7.1E-8**	**2.3E-8**	**5.4E-8**

Моделирование фрагментов разрушений (взрывов)

	ORDEM&MASTER	SDPA
1. Случаи разрушений	все	$\xi \times p(h_p)_{cat}$
2. Орбит. эл.	конкретные	$p(h_p)_{cat}$, $k(d)$
3. Характеристики энергия	$N(m)$, $\Delta V_{max}(m)$	$\Delta V_{max}(m)$
4. Случайный выбор	ΔV, направление	ΔV, направление
5. Расчет элементов	Для каждого фрагмента	$\Delta\, p(h_p)$, $p(e)$
6. Прогноз	поштучный	$p(h_p,d)$

Моделирование последствий столкновений

ORDEM&MASTER

Столкновения КО размером > 10 см

SDPA

Столкновения КО размером > 0.1 см

Вклад последствий столкновений

Накопленное число столкновений КО (N_c) размером более d

d, см	>0.1	>0.25	>0.5	>1.0	>2.5	>5.0	>10	>20
N_c	6200	592	122	15.6	6.30	2.67	1.48	**0.96**

Роль априорной информации при прогнозе:

Учет вековых возмущений (атмосфера);
Распределение баллистических коэффициентов КО;
Распределение скорости разлета фрагментов при взрыве;
Распределение высот взорвавшихся КО;
Модель фрагментации при столкновениях.

Проблемные вопросы прогнозирования:

1. Повышение достоверности результатов моделирования на основе уточнения априорной информации;
2. Настройка параметров модели по измерениям;
3. Учет последствий столкновений более мелких КО в том числе и микрометеоритов;
4. Выработка рекомендаций по предотвращению монотонного роста техногенного загрязнения.

5. Удельный поток КМ относительно КА

Мгновенное значение (все модели): $Q(t) = \rho(t) \cdot V_{rel}(t)$ (1)

ORDEM

$$\overline{Q}_{\Sigma} = \sum_{l} \rho_{KA}(t_l) \cdot \Delta U_l \cdot \sum_{m} Q(t_l)_m = \sum_{l} \rho_{KA}(t_l) \cdot \Delta U_l \cdot \overline{Q}(t_l) \quad (2)$$

$$\overline{Q}(t_l) = \rho_{l,\Sigma} \cdot \sum_{m} \rho(t_l)_m \cdot V_{rel}(t_l)_m / \rho_{l,\Sigma} = \rho_{l,\Sigma} \cdot \overline{V}_{rel}(t_l) \quad (3)$$

$$\rho_{KA}(t_l) \cdot \Delta U_l = \Delta t_l / T \quad (4).$$

Подстановка (4) в (2) дает:

MASTER

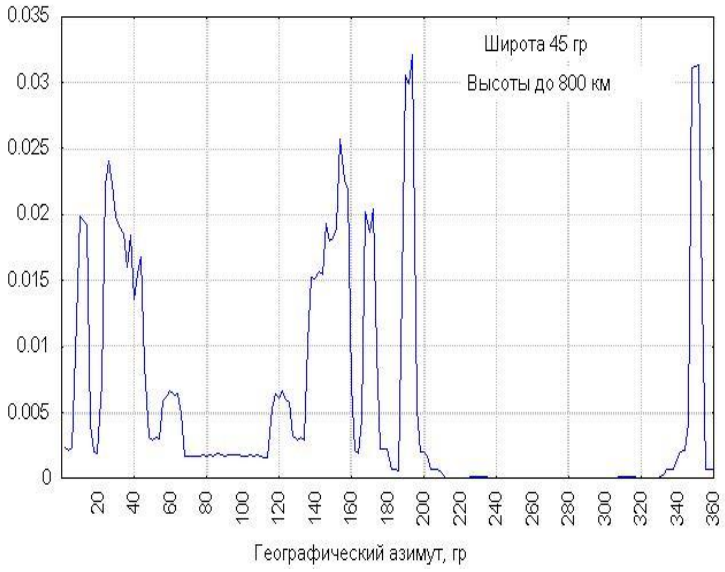
$$\overline{Q}\Sigma = \frac{1}{T} \cdot \sum_{l} \overline{Q}(t_l) \cdot \Delta t_l \quad (5)$$

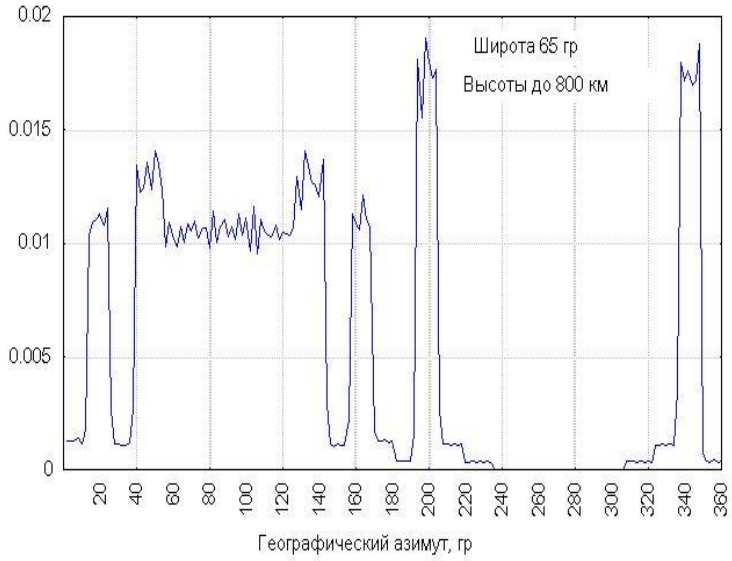
$\overline{V}_{rel}(t)$ =?

SDPA

$$\overline{V}_{rel}(t) = \sum_{j} p(t, Az_j) \cdot V_{rel}(t, Az_j) \cdot \Delta Az_j \quad (6)$$

Распределения величины и направления скорости столкновений





$\overline{V}_{rel} = \overline{V}_{KM} - \overline{V}_{KA}$ - Относительная скорость

$\boldsymbol{A}$ - ее отклонение относительно направления $\boldsymbol{V_{KA}}$

$pV_{rel}(A)$ - статистическое распределение направлевлений, построенное на множестве частиц

pQrel(A) and pVrel(A) distributions as well as the angular dependence of the relative velocity

SDPA2000 ORDEM2000

$$pQ_{rel}(A) = \frac{pV_{rel}(A) \cdot V_{rel}(A)}{\int_A pV_{rel}(A) \cdot V_{rel}(A) \cdot dA}$$

Collision velocity for SOs of different sizes, km/s

Estimate	>1 mm	>1 cm	>10cm
ORDEM2000	7.74	7.77	7.69
Vv, km/s	8.62	7.74	7.87
Vq, km/s	10.53	10.01	10.20
SDPA2000	10.56	10.56	10.56

I believe that the results presented above are quite important. They testify rather convincingly, that in calculating the average values of collision velocity (the "Average impact velocity") in the ORDEM2000 model the averaging is carried out over the **set of possible directions of the relative velocity**, ***rather than over the set of directions of possible collisions.***

6. Comparison of debris flux model data for manned missions

Data on the flux of SD of different sizes relative to the ISS

7. Общие проблемные вопросы моделирования космического мусора

1. Совершенствование методики моделирования на основе комплексного учета различных источников загрязнения.
2. Повышение достоверности моделей на основе использования новых (будущих) измерений. Регулярная настройка параметров моделей по текущей информации.
3. Обеспечение доступности компьютерных моделей для их широкого использования при проектировании и эксплоатации КА. Software, информация в Интернете.
4. Как организовать систематическую работу по п.п. 1, 2, 3? Кто должен быть заказчиком:

   государственная организация или

   некая коммерческая (частная) фирма?