

Оценка вклада последствий столкновений объектов размером более 1 см

А.И. Назаренко¹, anazarenko32@mail.ru

Научно-технологический центр «КОСМОНИТ», Роскосмос

Проблема

На последних сессиях IADC рассматривались результаты исследования последствий столкновений каталогизированных объектов на загрязнение ОКП [1]. Столкновения более мелких объектов не рассматривались. Автор полагает, что это объясняется двумя причинами:

1. Существующие модели фрагментации в недостаточной степени приспособлены к учету многообразных условий столкновений.
2. Большое число не каталогизированных объектов (миллионы) вызывает большие методические и вычислительные трудности моделирования столкновений.

Поэтому в нашей работе эти проблемы были рассмотрены в первую очередь.

Модель фрагментации

В основу модели фрагментации положено известное соотношение [2, 3] для числа образующихся частиц с массой более m

$$N(> m) = A \cdot (m/M)^B. \quad (1)$$

При катастрофическом столкновении $M = m_1 + m_2$ - масса сталкивающихся объектов.

В процессе анализа выявлен ряд некорректностей известных моделей. А именно:

- Обнаружена ошибка в известной формуле для определения массы максимального фрагмента $m_{\max} = M \cdot (1+B)/(-B)$. Правильная формула имеет вид

$$m_{\max} = M \cdot (1+B) / \left[1 + B \cdot (m_{\min} / m_{\max})^{B+1} \right]. \quad (2)$$

- Отсутствует обоснование выбора минимального размера фрагментов.

- Формула для определения выделившейся при столкновении энергии является частным случаем более общей формулы, применимой для различных условий столкновений

$$u = U/M = \frac{1}{2} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot V_{imp}^2. \quad (3)$$

Здесь $k_1 = m_1/M$, $k_2 = m_2/M$.

¹ Данная работа выполнена при поддержке Роскосмоса

При расчете энергии, необходимой для образования фрагмента, имеющего площадь поверхности разрушения S_j , мы используем допущение, что эта энергия пропорциональна площади поверхности разрушения, т.е.

$$u_j = S_j \cdot g . \quad (4)$$

Здесь g - некоторая константа, которая зависит от материала фрагмента.

Алгоритм расчета на модели последствий столкновения, учитывающий оценку выделенной энергии (u), состоит из следующих операций:

1. Вычисляются максимальная масса и размер фрагментов.
2. Организуется цикл по возможным (дискретным) значениям размеров фрагментов (d_{j-1}), начиная с самого крупного фрагмента;
3. Для каждого размера фрагментов в диапазоне (d_j, d_{j+1}) вычисляются значения средней площади поверхности разрушения S_j , объема и значение массы m_j . При этом используются допущения о возможной форме фрагментов и их удельном весе. Применяется случайный выбор этих параметров (метод Монте Карло);
4. Вычисляется оценка (4);
5. На основе модели вида (1) вычисляется число фрагментов N_j в рассматриваемом диапазоне размеров;
6. Вычисляется энергия $S(u_j) = u_j \cdot N_j$, необходимая для образования всех фрагментов размером (d_j, d_{j+1}).
7. В цикле по уменьшающимся размерам фрагментов суммируются оценки $Sum(u_j) = Sum(u_{j-1}) + S(u_j)$;
8. Цикл прекращается при выполнении условия $Sum(u_j) \geq u$.

Последний размер фрагментов d_j и есть наименьший их размер, который возможен при данной величине выделившейся при столкновении энергии (u).

Приведенный выше алгоритм был применен для адаптивного определения параметра g , который используется в формуле (4) для расчета затрат энергии на фрагментацию. В результате определялось такое значение параметра g , которое обеспечивает согласие результатов моделирования с данными эксперимента [4]. Результаты применения адаптивного уточнения параметра g представлены на рисунке 1. Показана левая граница размеров фрагментов (≈ 2 мм), соответствующая равенству выделившейся энергии (u) и затратам энергии на фрагментацию (красная кривая). Количество фрагментов размером более 2 мм оказалось близким к 1500.

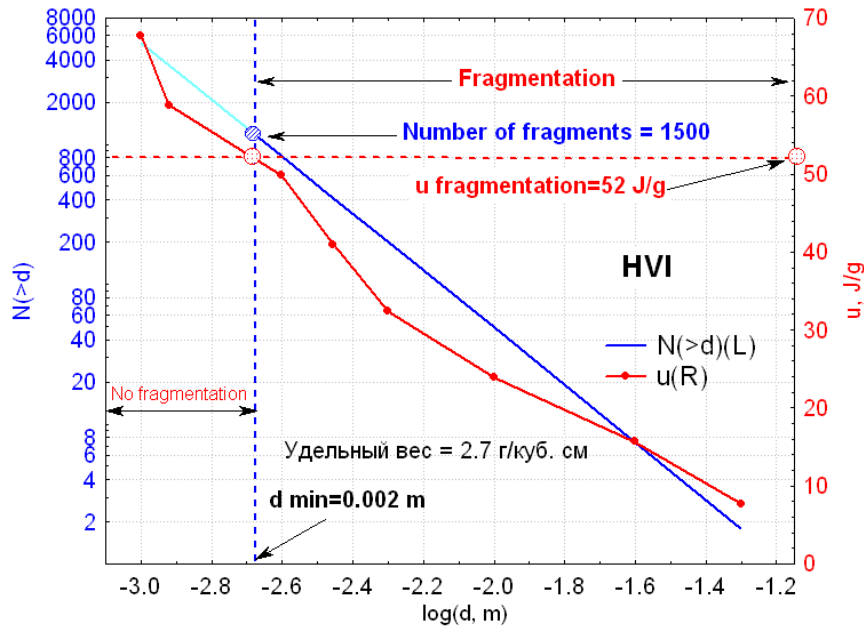


Рисунок 1. Моделирование высокоскоростного столкновения (HVI)

Левее указанной границы размеров *фрагменты не образуются*. Соответствующий участок кривой $N(>d) = f[\log(d)]$ окрашен в синий цвет. Это как раз тот диапазон размеров, для которого по данным эксперимента число фрагментов не увеличивается по мере уменьшения их размеров.

Выполнена коррекция модели фрагментации КА на основе данных о столкновении КА Космос 2251 и Иридиум 33. В частности, определены параметры алгоритма для учета многообразия форм фрагментов, а также для определения скорости их разлета. Определена доля выделившейся при столкновении энергии ($k_v=0.1$), которая тратится на приращение скорости фрагментов

$$\Delta V = k_v \cdot u / V . \quad (5)$$

Принятие решения, является ли данное столкновение катастрофическим или нет, осуществляется следующим образом. На основе данных о размерах ударника и цели вычисляются значения минимальной удельной энергии u_1 и u_2 , необходимой для фрагментации соответственно ударника и цели. Не катастрофическим считается столкновение, для которого выполняются условия $(0.9 \cdot u < u_2)$ и $(0.9 \cdot u > u_1)$. В этом случае разрушается только ударник.

Методика

Алгоритм расчета усреднённых последствий столкновений состоит из следующих основных операций [5, 6].

- 1) Выбираются два объекта разного размера.
- 2) Выбирается высота столкновения в диапазоне высот от 400 до 2000 км (с шагом 100 км), и возможный угол θ между направлениями векторов скорости объектов (в диапазоне от 0° до 360° с шагом 2°).

- 3) Последствия столкновений рассчитываются путем обращения к стандартному программному модулю фрагментации и усредняются с учётом всех возможных основных влияющих факторов (случайных обстоятельств). При этом учитываются следующие вероятности:
- $p(h)$ - вероятность столкновения на заданной высоте.
 - $p(\theta)$ - вероятность столкновения при данном угле θ между скоростями.
 - $p(d1)$ и $p(d2)$ – доли объектов данного размера.
 - $p(d, A/m)$ – вероятность того, что объект данного размера будет иметь такой баллистический коэффициент.

Вероятность столкновения объектов в каком либо высотном слое пропорциональна квадрату концентрации объектов в данном высотном слое. Это распределение представлено на рисунке 2.

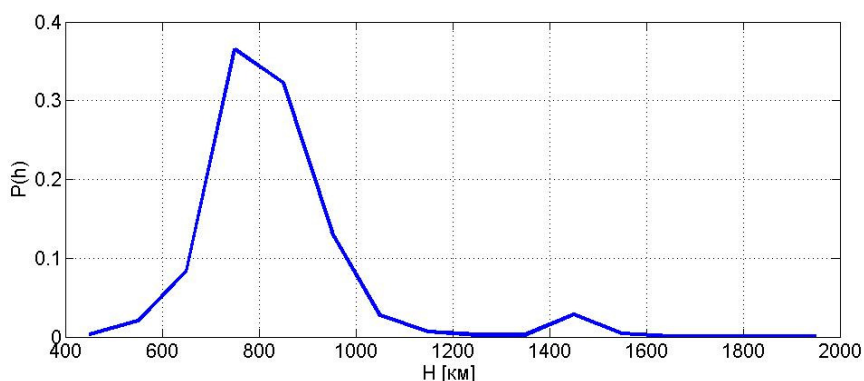


Рис.2. Вероятность столкновения в высотном слое в предположении, что эта вероятность пропорциональна квадрату концентрации.

Эти данные относятся к началу 2012 года. Видно, что наиболее ожидаемым районом столкновений является диапазон высот от 700 до 1000 км. В нем происходит 82% всех столкновений.

Выходными данными являются распределения $p(d, h)$ числа ежегодно образующихся фрагментов разного размера по высоте. При этом используется сетка разбиения фрагментов по размерам с минимальным размером фрагментов, равном 1 мм.

Особенностью применения изложенного алгоритма по сравнению с предшествующим моделированием последствий столкновений [6] является существенное расширение диапазона размеров сталкивающихся объектов. В связи с этим, а также для удобства сравнения с предшествующими результатами, все возможные столкновения разбиты на 3 типа (группы):

Группа 1. Взаимные столкновения КО в диапазоне размеров от 1 см до 20 см.

Группа 2. Взаимные столкновения каталогизированных КО размером более 20 см.

Группа 3. Столкновения КО в диапазоне размеров от 1 см до 20 см с каталогизированными КО размером более 20 см.

В результате моделирования последствий столкновений для всех трех упомянутых типов были определены вероятности возможных столкновений в каждой группе. Они представлены в таблице 1.

Таблица 1. Вероятности столкновений разных типов

№ группы, i	1	2	3
Вероятность P_i	0.967272	0.000269	0.032259

Сумма этих вероятностей равна 1.0. Важной особенностью этих оценок является то, что *вероятность взаимных столкновений не каталогизированных КО размером от 1 до 20 см в ≈ 3600 раз больше вероятности взаимных столкновений каталогизированных КО.*

В процессе применения изложенного выше алгоритма результаты относились к той или иной группе. Построено три распределения $p(d,h)_i$, относящихся к этим группам. Эти распределения получены при условии, что произошло 1 столкновение КО размером более 1 см.

Для примера на рисунке 3 приведено распределение $p(d,h)$ для последствий столкновений 1-го типа.

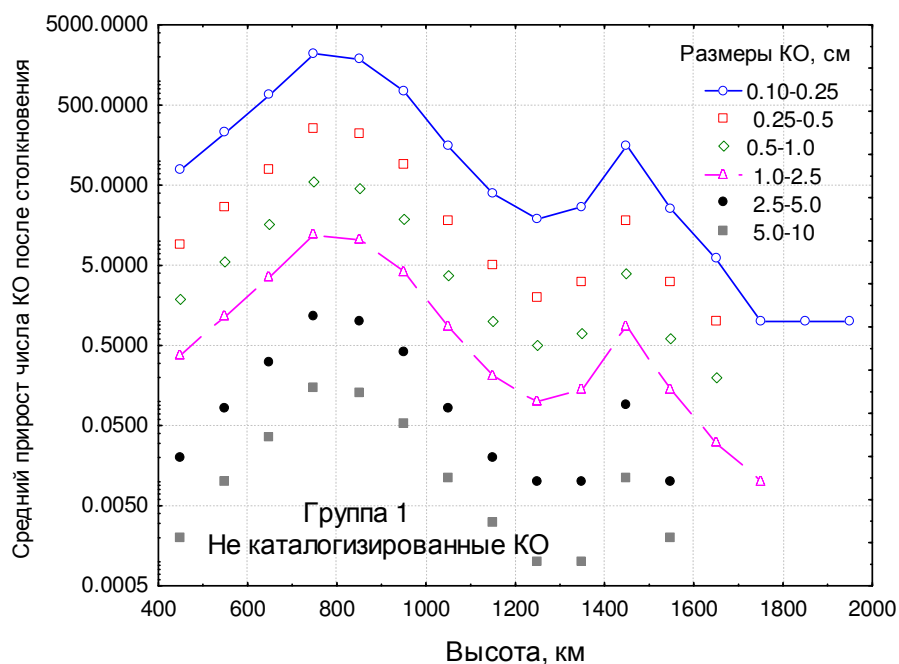


Рис. 3. Прирост числа объектов при столкновениях КО из 1-й группы (2012)

Испытания модели фрагментации проводились на основе сравнения результатов расчета, полученных с использованием новой модели и с использованием модели, разработанной в 2010. Установлено, что оценки по моделям 2010 г. и 2012 г. отличаются только минимальными размерами фрагментов. По оценкам модели 2012 г. минимальный размер в 100 раз больше. Это является следствием учета затрат энергии на разрушение. Такое же отличие имеет место при сравнении результатов моделирования с тестовым примером НАСА [7] для катастрофических столкновений.

Результаты моделирования

Пусть вероятность столкновений каталогизированных КО в единицу времени равна некоторому значению P_{cat} . Сравним для примера число фрагментов размером 0.10-0.25 см, которое образуется на высоте 700 - 800 км, при условии, что на интервале времени $1/P_{cat}$ произошло одно столкновение каталогизированных КО. На этом же интервале ожидаемое число столкновений 1-го типа будет в $P_1 / P_2 = 3600$ раз больше, а столкновений 3-го типа - в $P_3/P_2=120$ раз больше. Соответствующие оценки приведены в таблице 2.

Таблица 2. Число фрагментов размером 0.10-0.25 см на высоте 700 – 800 км, которое образуется на интервале $1/P_{cat}$ (при одном столкновении каталогизированных КО)

Тип столкновений i	1	2	3
Число фрагментов N_i	$7.90 \cdot 10^6$	$0.87 \cdot 10^6$	$1.39 \cdot 10^6$
Отношение N_i / N_2	9.1	1.0	1.6

Из этих данных видно, что «вклад» столкновений 1-го и 3-го типа в образование мелких фрагментов намного больше «вклада» столкновений 2-го типа (соответственно в 9.1 раз и на 60%).

Методика вероятности столкновений P_{cat} состоит в следующем [5, 6]. Среднее число столкновений N_{col} объектов разных размеров в единицу времени равно произведению

$$N_{col} = \bar{F}_{Dd} \cdot \left[0.5 \cdot \sum_j n(h_j, h_j + \Delta h) \cdot \bar{Q}(h_j) \right]. \quad (6)$$

Здесь множитель 0.5 применяется для того, чтобы взаимные столкновения не учитывать два раза. При малых значениях $N_{col} \ll 1$ эту величину можно трактовать как вероятность столкновений. В общем случае эта величина имеет смысл среднего числа столкновений в единицу времени.

Для каталогизированных КО используемые в формуле (6) величины определяются следующим образом.

\bar{F}_{Dd} - оценка средней площади двух сталкивающихся каталогизированных КО. По данным монографии [5] для каталогизированных КО $\bar{F}_{Dd} = 3.49$ кв.м.

$n(h, h + \Delta h)$ - число каталогизированных объектов в диапазоне высот $(h, h + \Delta h)$.

$\bar{Q}(h_j) = \bar{\rho}(h_j) \cdot \bar{v}_{rel}(h_j)$ - среднее значение плотности потока на данной высоте, равное произведению средней концентрации на среднее значение относительной скорости.

В результате по данным каталога на начало 2012 г (13100 объектов) получена оценка

$$P_{cat} = N_{col} = 0.218 \text{ столкновений в год.} \quad (7)$$

В процессе прогнозирования обстановки эта вероятность (среднее число столкновений) меняется. Для вычисления данной величины в произвольный момент времени удобно воспользоваться приближенным соотношением

$$N_{col}(t) = N_{col}(t_0) \cdot \frac{\left[\sum_j n(h_j, h_j + \Delta h) \cdot \bar{Q}(h_j) \right](t)}{\left[\sum_j n(h_j, h_j + \Delta h) \cdot \bar{Q}(h_j) \right](t_0)} \approx N_{col}(t_0) \cdot \left[\frac{\rho(h, t)}{\rho(h, t_0)} \right]^2. \quad (8)$$

Здесь в качестве высоты надо выбирать высоту, где концентрация является максимальной. В соответствии с данными рисунка 2 эта высота находится в диапазоне от 700 до 900 км.

Рассмотрим, как определяется вероятность столкновений для не каталогизированных КО. В этом случае целесообразно воспользоваться представленными в таблице 1 вероятностями столкновений КО разных типов (из разных групп), которые получены при условии одного столкновения КО размером более 1 см, и оценкой (7) вероятности столкновения каталогизированных КО. Из этого следует, что оценки среднего числа столкновений объектов 1-го и 3-го типа за год в начальный момент t_0 равны:

$$N_{col}^{(1)}(t_0) = P_{cat} \cdot \frac{P_1}{P_2} = 783, \quad (8)$$

$$N_{col}^{(3)}(t_0) = P_{cat} \cdot \frac{P_3}{P_2} = 26. \quad (9)$$

Для оценки вклада последствий столкновений в уровень загрязнения ОКП мелкими фрагментами был выполнен прогноз обстановки с 1990 по 2010 г.

В таблице 3 приведены оценки числа объектов в диапазоне высот от 400 до 2000 км в исходный момент времени, а также в 2010 г.

Таблица 3. Число объектов разных размеров

Год	Номер диапазона и соответствующие размеры КО, см							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	0.1-0.25	0.25-0.5	0.5-1.0	1.0-2.5	2.5-5.0	5.0-10	10-20	>20
Модель, 1990	76.75·10 ⁶	5.66·10 ⁶	975000	144500	28000	8960	2830	5320
Прогноз, 2010	597.0·10⁶	67.7·10⁶	14.6·10⁶	3.3·10⁶	352000	59800	6350	5110
Модель, 2010	193.6·10 ⁶	14.5·10 ⁶	2.45·10 ⁶	367000	71150	22600	7060	13120
Отношение	3.1	4.7	5.9	9.0	5.1	2.6	0.90	0.39

Прогноз был выполнен при предположении, что в интервале времени с 1990 г по 2010 г единственным источником образования космического мусора были случаи фрагментации КО в результате взаимных столкновений. Во второй строке таблицы представлены результаты прогноза обстановки с 1990 г по 2010 г с учетом взаимных столкновений объектов размером более 1 см, в третьей строке – соответствующие данные модели SDPA за 2010 г, а в последней строке – отношение прогнозных и модельных оценок за 2010 г.

Полученные результаты являются довольно неожиданными. Они свидетельствуют об очень сильном влиянии взаимных столкновений на засоренность ОКП фрагментами размером от 1 мм до 5.0 см. По сравнению с оценками модели SDPA за 2010 г прогнозное число фрагментов указанного размера оказалось в 5 – 9 раз больше.

Для объектов размером от 10 до 20 см прогнозные и модельные оценки согласуются достаточно хорошо, а для каталогизированных КО (размером более 20 см) прогнозные оценки оказались в 2.5 раза меньше. Этот результат является естественным следствием малой вероятности взаимных столкновений каталогизированных КО, а также большим вкладом запусков новых КА и непредвиденными их разрушениями, которые не учитывались при прогнозе обстановки.

В таблице 4 представлены оценки среднего числа взаимных столкновений на интервале прогноза. Оценки относятся к трем типам столкновений, рассмотренным выше.

Таблица 4. Среднее число взаимных столкновений на интервале прогноза

№ группы	1	2	3
Число столкновений	2330	0.65	78

Напомним, что к 1-й группе относятся взаимные столкновения объектов размером от 1 см до 20 см. Ожидаемое число такого рода столкновений на интервале времени с 1990 по 2010 г превысило 2000.

Для наглядного представления о вкладе взаимных столкновений на рисунках 4 и 5 приведены высотные распределения фрагментов размером от 1 до 2.5 мм и от 1 до 2.5 см, соответствующие рассмотренным выше вариантам.

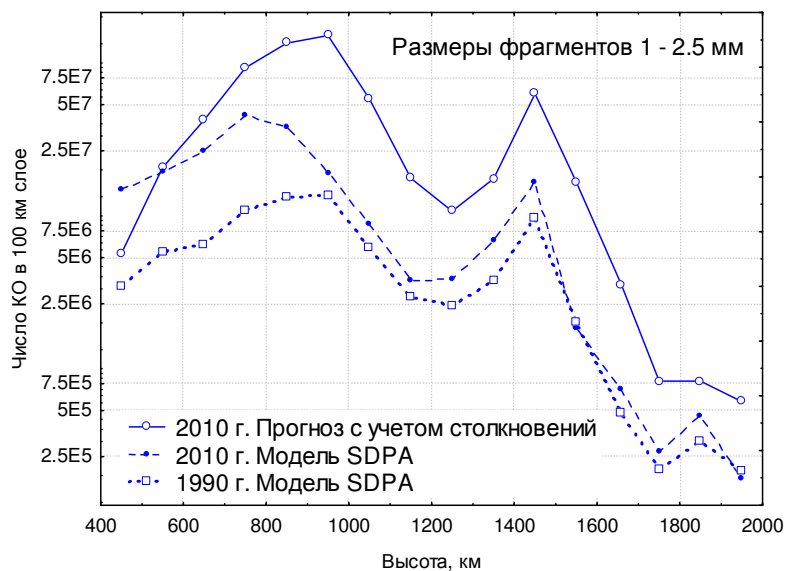


Рис. 4. Сравнение высотных распределений фрагментов размером 1.0 – 2.5 мм. Из этих данных видно, что наибольшие отличия результатов прогноза с учетом столкновений от модельных данных имеют место в диапазоне высот от 700 до 1100 км, где оценки числа фрагментов отличаются в 10 раз. Это является естественным следствием максимальной концентрации КО на этих высотах. Кроме того, видно ослабление влияния торможения в атмосфере по мере роста высоты. На малых высотах фрагменты сильно тормозятся и быстро сгорают. На больших высотах этот процесс идет намного медленнее. Поэтому там наблюдается накопление фрагментов.

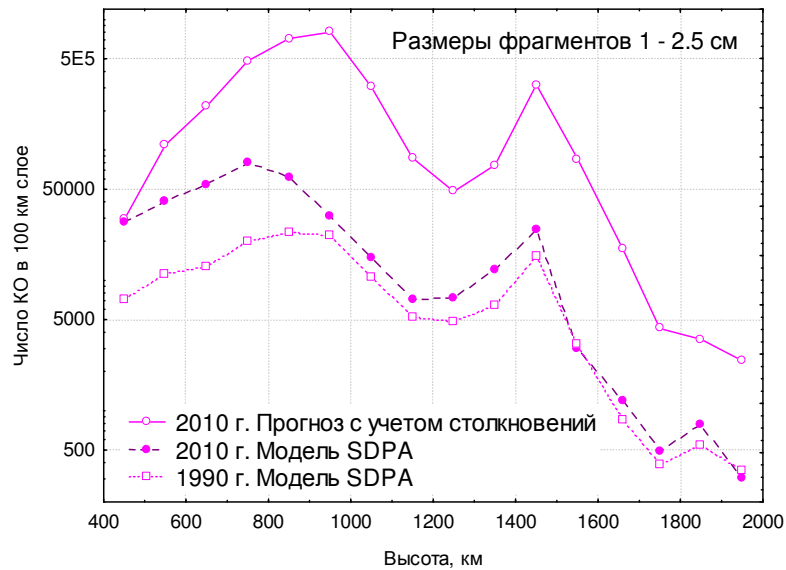


Рис.5. Сравнение высотных распределений фрагментов размером 1.0 – 2.5 см

Комментарий.

Данные о высотном распределении фрагментов столкновений, а именно большое их количество на высотах более 700 км, не согласуются с модельными данными. Возможное объяснение этого факта заключается в практическом отсутствии измерений мелких фрагментов космического мусора на этих высотах. Поэтому в моделях этот результат не нашел отражения. Кроме того, во всех моделях космического мусора данный источник образования фрагментов малого размера не рассматривался. Материалы данного отчета являются, по-видимому, первыми оценками вклада последствий взаимных столкновений объектов разных размеров в загрязнение ОКП фрагментами размером более 1 мм.

На рисунке 6 представлен типичный пример изменения числа мелких фрагментов столкновений на интервале прогноза, а именно, число образовавшихся фрагментов, сгоревших и оставшихся в ОКП.

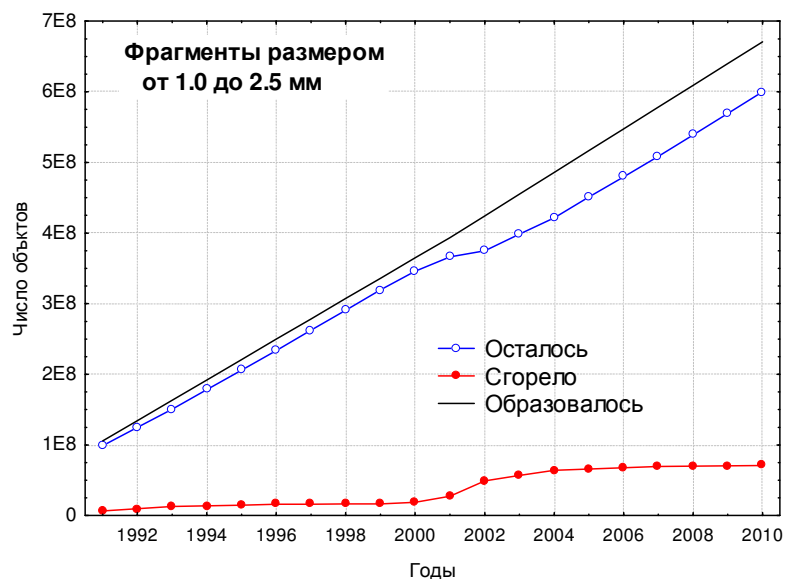


Рисунок 6. Изменение числа фрагментов размером 1-2.5 мм на интервале прогноза

Из этих данных видно, что на интервале прогноза ежегодно образовывалось $\approx 30\,000\,000$ фрагментов размером от 1.0 до 2.5 мм. В результате влияния торможения в атмосфере $\approx 10\%$ из них сгорело. Вариации числа сгоревших объектов объясняются изменением интенсивности торможения в связи с 11-летним циклом солнечной активности.

Полученные результаты полезно сравнить с данными приведенного ниже известного рисунка 7, на котором представлены обобщенные оценки потока КО различных размеров, построенные на основе проведенных измерений космического мусора [8].

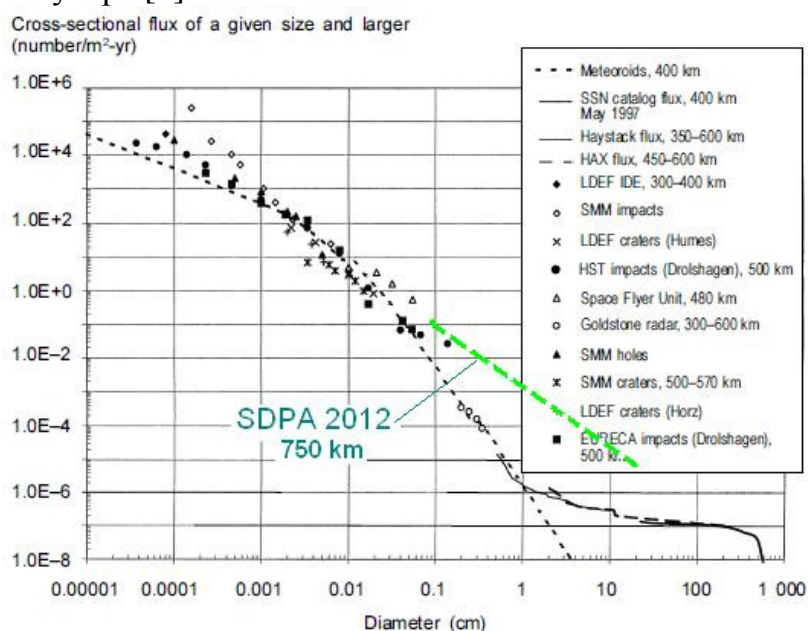


Рисунок 7. Характеристики потока космического мусора по данным различных источников и оценки с учетом взаимных столкновений

Здесь представлены обобщенные данные об измерениях потока космического мусора. Показаны области, где были проведены измерения. Характерной особенностью этих данных является монотонный рост числа объектов по мере уменьшения их размеров. Дополнительно зеленой пунктирной линией нарисована полученная зависимость. Максимальное отличие этих оценок от данных радиолокационных измерений является 10-ти кратным. При оценке этого факта надо иметь в виду, что данные измерений получены на относительно небольших высотах, а также, что они получены до 2000 г. Поэтому согласие полученных оценок с обобщенными данными об измерениях потока следует считать приемлемым.

Таким образом, основным источником образования мелких фрагментов являются взаимные столкновения не каталогизированных объектов. Вклад этого источника в образование космического мусора размером от 1 мм до 10 мм на порядок больше вклада взаимных столкновений каталогизированных КО.

Литература

1. IADC report AI 27.1" Stability of the Future LEO Environment ” Status Review.8th IADC Meeting 9-12 March 2010, Thiruvananthapuram, India
2. D.J. Kessler and B.G. Cour-Palais. Collision Frequency of Artificial Satellites: The Creation of Debris Belt. Journal of geophysical research, Vol. 83. A6, June 1978.
3. H. Sdunnus, H. Klinkrad. An Introduction to the ESA Reference Model for Space Debris and Meteoroids. *First European conference on space debris, ESA SD-01, 1993.*
4. Y. Tsuruda, T. Hanada et al. Comparison between new impact test results and the NASA standard breakup model, IAC-06-B6.3.8.
5. A.I. Nazarenko. The solution of Applied Problems Using the Space Debris Prediction and Analysis Model. Chapter 4. *Space Debris. Hazard Evaluation and Mitigation.* Edited by Nickolay N. Cmirnov. Taylor and Francis Inc. 2002
6. AI. Nazarenko. The forecast of near-Earth space contamination for 200 years and the Kessler Syndrome. Site “<http://www.satmotion.ru>”.
7. P. Krisko. Proper Implementation of the 1998 NASA Breakup Model. ODQN v.15, i. 4.
8. Technical report on space debris, OOH 1999.