

Прогноз засорённости ОКП на 200 лет и синдром Кесслера

А.И. Назаренко

Реферат. В статье излагаются результаты применения последней версии модели SDPA (Space Debris Prediction and Analysis) для прогноза техногенного загрязнения области низких орбит на 200 лет с учетом взаимных столкновений каталогизированных объектов. Показано, что уже в настоящее время этот источник образования космического мусора малых размеров является существенным. Сделан вывод, что *необратимый рост техногенного загрязнения ОКП из гипотезы (синдром Кесслера) превратился в реальность: он уже начался.*

Предшествующие работы. В конце 90-х годов были проведены доработки модели SDPA [1] в интересах выполнения долгосрочного прогноза уровня загрязнения ОКП. Особенность этих исследований в том, что в них основное внимание было уделено развитию методики учета последствий взаимных столкновений. Результаты выполненных исследований опубликованы в серии статей [2 - 13] и в монографии [11]. Они были представлены также на Научно-техническом подкомитете Комитета ООН по мирному использованию космического пространства [4].

Рассмотрим основы методики *учета взаимных столкновений КО*. Корректное решение данной задачи является исключительно трудной проблемой. Основные трудности обусловлены вероятностным характером задачи, зависимостью вероятности и условий столкновений от большого числа факторов, характеристики которых меняются во времени, и отсутствием достоверной модели оценки последствий столкновений.

Для оценки числа столкновений (N) КА сферической формы с площадью сечения F с мелкими частицами космического мусора используется дифференциальное уравнение

$$\frac{dN}{dt} = F \cdot \rho(t) \cdot \bar{V}_{rel}(t). \quad (1)$$

Здесь $\rho(t)$ - концентрация частиц, $\bar{V}_{rel}(t)$ - средняя скорость столкновения. Входящие в правую часть функции $\rho(t)$ и $\bar{V}_{rel}(t)$ могут сильно меняться в пределах

одного витка (в зависимости от широты и высоты точки), но обычно мало отличаются на разных витках, поскольку общий уровень техногенного загрязнения в течение года меняется медленно (на несколько процентов). Поэтому интегрирование уравнения (1) целесообразно сначала выполнять на интервале одного витка (T). В результате получим следующую оценку числа столкновений в единицу времени

$$\frac{N(t_0, t_0 + T)}{T} = F \cdot \frac{1}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} \rho(t) \cdot \hat{V}_{rel}(t) \cdot dt = F \cdot Q(t_0). \quad (2)$$

Это полный поток частиц через поверхность данного КА с площадью сечения F . В известной литературе широко применяется понятие удельного потока Q (cross-sectional area flux), который имеет смысл потока через поверхность КА с единичной площадью сечения. В (2) эта величина обозначена как $Q(t_0)$.

Учитывается возможность взаимных столкновений объектов, относящихся к разным по размеру группам - крупным (каталогизированным), средним (от 1 до 20 см) более мелким (например, от 0.1 до 1 см) и т.д. Концентрация частиц размером более произвольного значения d выражается в виде произведения некоторого безразмерного коэффициента $k(d)$ на концентрацию частиц размером более заданной величины d_0 :

$$\rho(d, t) = k(d) \cdot \rho(d_0, t). \quad (3)$$

Производная коэффициента $k(d)$ обозначена как $f(d) = dk(d)/dd$. Все КО размером более 0.1 см разбиты по размерам на 10 групп. Минимальные размеры объектов в каждой из групп равны:

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$d_i, \text{ м}$	0.001	0.0025	0.005	0.010	0.025	0.050	0.100	0.200	2.5	10

Для оценки числа взаимных столкновений в единицу времени объектов размером в диапазоне значений (D_1, D_2) , которые находятся в некоторой высотной области $(h, h + \Delta h)$, со всеми КО размером (d_1, d_2) выведена следующая формула

$$\frac{dN(h, h + \Delta h)_{Dd}}{dt} = F_{Dd} \cdot n(h, h + \Delta h)_{cat} \cdot Q(d_0, t). \quad (4)$$

Здесь $n(h, h + \Delta h)_{cat}$ - число каталогизированных объектов в диапазоне высот $(h, h + \Delta h)$,

$$F_{Dd} = \left[\frac{\pi}{4} \int_{D_1}^{D_2} \int_{d_1}^{d_2} (D + d)^2 \cdot f(d) \cdot dd \cdot f(D) \cdot dD \right]. \quad (5)$$

Результаты расчетов площади F_{Dd} приведены в таблице 1.

Таблица 1. Матрица значений F_{Dd} для КО разных диапазонов размеров, (кв. м)

i/i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	275.28	109.7	55.43	29.25	43.68	67.95	58.6	3092	12363
2	109.73	32.69	12.84	5.64	7.67	11.38	9.59	496.84	1982.7
3	55.43	12.84	3.80	1.27	1.47	2.00	1.60	80.06	318.26
4	29.25	5.64	1.27	0.30	0.27	0.30	0.22	9.97	39.26
5	43.68	7.67	1.47	0.27	0.18	0.16	0.09	3.66	14.16
6	67.95	11.38	2.00	0.30	0.16	0.10	0.05	1.39	5.16
7	58.60	9.59	1.60	0.22	0.09	0.05	0.02	0.30	1.03
8	3092	496.8	80.06	9.97	3.66	1.39	0.30	1.11	2.08
9	12363	1982	318.26	39.26	14.16	5.16	1.03	2.08	1.72

Приведенные результаты представляются весьма интересными и важными.

Во-первых, выражение (4) *характеризует пространственное распределение вероятности (среднего числа) столкновений в единицу времени.*

Во-вторых, из данных таблицы 1 видно, что при уменьшении рассматриваемых размеров КО число столкновений увеличивается на несколько порядков - как внутри данной группы, так и между группами.

Суммирование оценок (4) для разных высот приводит к следующей формуле для общего числа столкновений объектов заданных размеров в единицу времени

$$\frac{dN_{Dd}^{sum}}{dt} = F_{Dd} \cdot \sum_j n(h_j, h_j + \Delta h)_{cat} \cdot Q(d_0, t)_j. \quad (6)$$

При оценке суммарного числа столкновений объектов размером более заданного значения ($d > d_i$) в формулу (6) вместо F_{Dd} необходимо подставить сумму

$$\bar{F}_i = \frac{1}{2} \sum_{D>d_i} \sum_{d>d_i} F_{Dd} \cdot \quad (7)$$

В таблице 2 приведены значения \bar{F}_i для КО из разных диапазонов размеров.

Таблица 2. Оценки \bar{F}_i для КО из разных диапазонов размеров

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
\bar{F}_{i, M^2}	18988	3029	486.6	79.79	29.63	11.47	4.83	3.49	0.86

На основе модельных данных за 2000 г. в таблице 3 приведены оценки среднего числа столкновений за 1 год для КО разных размеров.

Таблица 3. Оценки среднего числа ожидаемых столкновений за 1 год

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9
N_{sum}	203	324	5.20	0.854	0.317	0.123	0.052	0.038	0.009

Эти данные еще раз свидетельствуют о том, что число (вероятность) взаимных столкновений очень сильно зависит от размеров КО. В частности, при уменьшении размеров от 10 см (j=7) до 0.1 см (j=1), т.е. на 2 порядка, число взаимных столкновений увеличивается в 4000 раз. Для частиц размером более 0.1 см получена оценка 200 столкновений в год. Из этих данных видно также, что в конце 90-х годов вероятность столкновения каталогизированных КО составляла 0.038 за 1 год. Т.е. одно столкновение происходило в среднем за 27.5 лет.

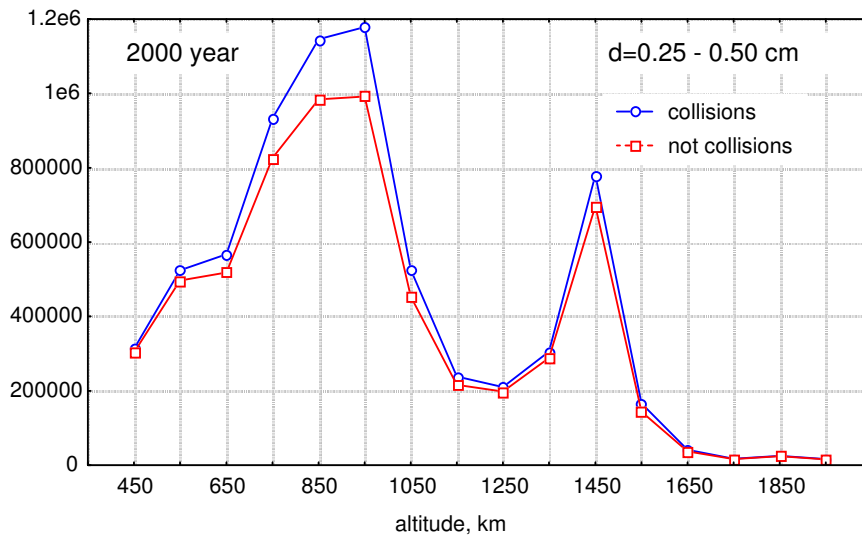


Рисунок 1. Сравнение высотных распределений числа КО размером 0.25 – 0.5 см

На рисунке 1 приведено сравнение высотных распределений числа КО в 100-км высотном слое в 2000 г, полученных на модели с учетом и без учета столкновений КО разных размеров. Из этих данных видно, что максимальный вклад последствий столкновения достигался в интервале высот 800 – 1000 км и составлял 20 % от общего уровня загрязнения этого высотного слоя частицами упомянутого размера.

После получения изложенных результатов прошло более 10 лет. За это время уровень техногенного загрязнения ОКП существенно увеличился [14, 15]. Поэтому актуальным является выполнение новых прогнозов обстановки с учетом изменившейся обстановки и с учетом взаимных столкновений КО разных размеров.

Учет случайного характера столкновений. При учете последствий столкновений важную роль играет методика учета их случайного характера. При решении такого рода задач широко применяется метод Монте-Карло (случайный выбор параметров).

Комментарий. В России основателем научной школы по использованию метода Монте-Карло [16] для решения различных прикладных задач является член-корр. АН СССР Николай Пантелеймонович Бусленко (1922-1977). Автор данной статьи познакомился с ним 50 лет назад. Николай Пантелеймонович обучал автора применению метода Монте-Карло для решения одной из прикладных производственных задач. По результатам этой работы была подготовлена и опубликована большая статья в сборнике «Проблемы кибернетики» № 9 за 1963 г.



Н.П. Бусленко

При выборе числа реализаций необходимо учитывать случайные факторы, от которых зависят последствия столкновений. Анализ показывает, что число таких факторов не менее 6. Перечислим основные:

1. Размеры сталкивающихся КО.
2. Удельные веса сталкивающихся объектов.
3. Разнообразие форм объектов.

4. Высота точки столкновения.
5. Угол между векторами скорости КО.
6. Направления разлета фрагментов.

В случае если каждый из перечисленных факторов имеет 10 существенно разных значений, необходимое число реализаций оказывается не менее 10^6 . Непосредственное применение метода Монте-Карло для случайного выбора условий столкновения в процессе прогнозирования техногенного загрязнения ОКП не позволяет получить достаточно большое число реализаций. Повторение прогнозов делает такой подход чрезвычайно трудоемким.

В модели SDPA метод Монте-Карло применяется специфическим образом. *Для выполнения прогнозов, на основе применения специальной автономной программы ("Frag2010.pas") определяются усредненные характеристики последствий одного столкновения.* Эффективность такого подхода обусловлена стабильностью характеристик перечисленных факторов во времени. Для каждого из возможных сочетаний значений этих факторов выполняется обращение к стандартной процедуре модели фрагментации и определяются орбитальные параметры фрагментов разного размера. Общее число сочетаний перечисленных факторов составляет $260 \cdot 10^6$. Результаты усредняются с учетом априорных статистических характеристик каждого из факторов. Очевидно, что применение такого числа реализаций позволяет получить более достоверные результаты по сравнению с применением случайного выбора в процессе прогнозирования техногенного загрязнения ОКП. Затраты машинного времени на получение усредненных характеристик последствий 1-го столкновения составляют ≈ 30 мин. С использованием этого результата само прогнозирование обстановки на 100 лет занимает не более 1-2 мин.

На рисунке 2 представлено полученное высотное распределение числа КО разных размеров, образовавшихся в результате одного столкновения КО размером более 20 см. Это высотное распределение фрагментов столкновения учитывается

в правых частях эволюционных уравнений в процессе их интегрирования в качестве дополнительного источника образования КМ. Такая технология не требует многократного выполнения прогнозов. Кроме того, она позволяет учитывать фрагменты малого размера.

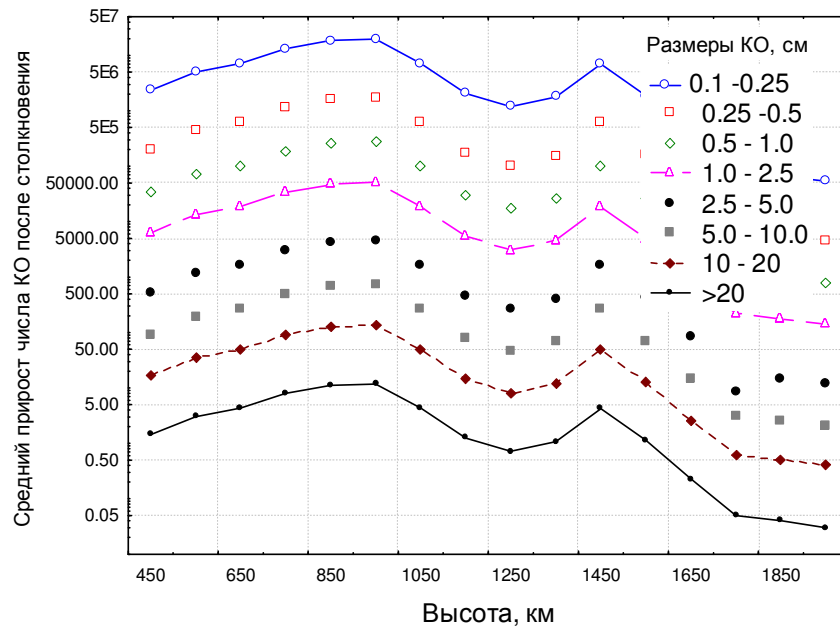


Рисунок 2. Распределение числа фрагментов 1-го столкновения по высоте

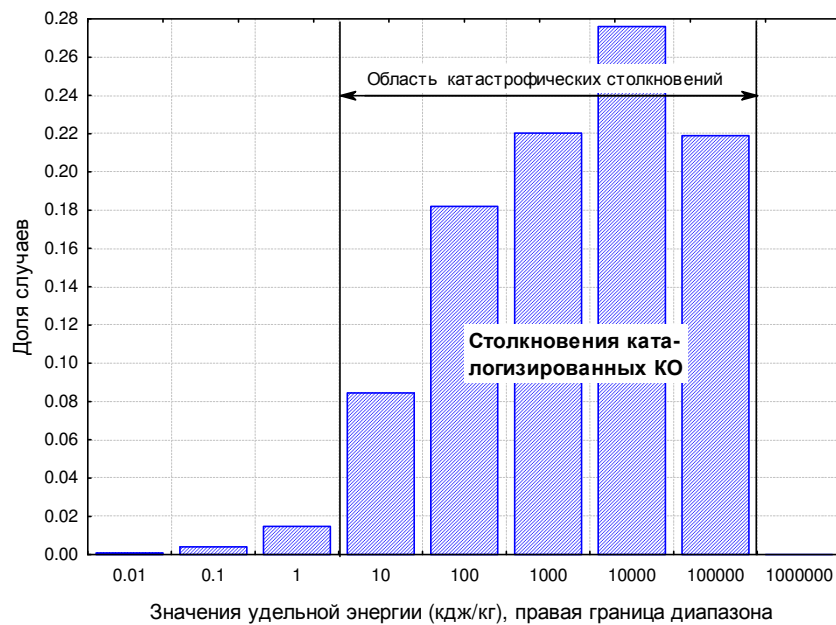


Рисунок 3. Возможные значения удельной энергии столкновений

На рисунке 3 представлена гистограмма оценок т.н. удельной энергии столкновений. Эта величина рассчитывается по формуле [11]

$$u = \frac{1}{2} \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{(m_1 + m_2)^2} \cdot V_{col}^2, \quad (8)$$

где m_1 , m_2 - массы объектов, V_{col} - относительная скорость при столкновении.

В известных публикациях принято считать, что катастрофическими являются столкновения, при которых удельная энергия превышает значение 1000 дж/кг=1 кдж/кг. Из приведенной гистограммы видно, что при столкновениях каталогизированных КО (размером более ≈ 20 см) подавляющее большинство столкновений являются катастрофическими. Они приводят к разрушению обоих объектов.

Комментарий. Применяемая в модели SDPA методика долгосрочного прогнозирования техногенного загрязнения ОКП не свободна от ряда упрощающих допущений. В частности, это касается «прореживания» обращений к программе для определения усредненных характеристик последствий одного столкновения, введения ограничения на нижнюю границу размеров сталкивающихся КО и размеров фрагментов, а также ряда других упрощений. Тем не менее, результаты применения модели SDPA для прогноза обстановки по точности не уступают зарубежным аналогам и являются существенно более полными, так как учитывают фрагменты столкновений малого размера.

Актуальной является проблема дальнейшего совершенствования методики учета последствий столкновений, как основного источника загрязнения ОКП в будущем.

Возможные будущие сценарии техногенного загрязнения ОКП. При разработке возможных будущих сценариев техногенного загрязнения ОКП целесообразно учесть следующие обстоятельства.

- Наличие документов, в том числе нормативных, в которых излагаются меры, направленные на ослабление техногенного загрязнения ОКП [17 – 25]. Эти

меры основаны на результатах многочисленных исследований. Они одобрены международным сообществом.

- Имеются результаты долгосрочных прогнозов техногенного загрязнения ОКП, выполненных зарубежными специалистами.
- Автором статьи накоплен определенный опыт исследований по проблеме прогнозирования обстановки.

С учетом изложенного для выполнения долгосрочных прогнозов на основе модели SDPA здесь применены два *сценария*:

Сценарий 1. Полное прекращение всех запусков на интервале прогноза при исключении возможности взрывов КА и РН («идеальный» сценарий).

Сценарий 2. Продолжение запусков со средней интенсивностью при исключении возможности взрывов КА и РН и без применения уводов КА и РН (пессимистический сценарий).

Эти сценарии в максимальной степени учитывают такие меры по ослаблению техногенного засорения ОКП, как предотвращение образования космического мусора в процессе штатной эксплуатации КС и предотвращение возможного разрушения КС в результате взрывов. Во всех сценариях учитываются последствия взаимных столкновений каталогизированных КО (размером более ≈ 20 см).

Прогноз засорённости ОКП на период до 2210 г. При выполнении данного исследования была модифицирована применяемая ранее модель фрагментации спутников при столкновении [26]. Параметры модели были скорректированы таким образом, чтобы обеспечивалось приемлемое согласие с известными данными о последствиях столкновения КА Иридиум 33 и Космос 2251 10 февраля 2009. Эта информация предоставляет уникальную возможность уточнить параметры модели фрагментации по экспериментальным данным.

Комментарий. Для настройки параметров моделей фрагментации по экспериментальным данным обычно применяются результаты наземных испытаний (стрельба мелкими частицами по тестовым конструкциям). Очевидно, что ус-

ловия и последствия столкновений больших объектов существенно отличаются от условий наземных экспериментов. На Земле их имитировать невозможно. Именно поэтому данные о столкновении упомянутых спутников являются уникальными.

Для 1-го сценария основные результаты прогноза представлены на рисунке 4.

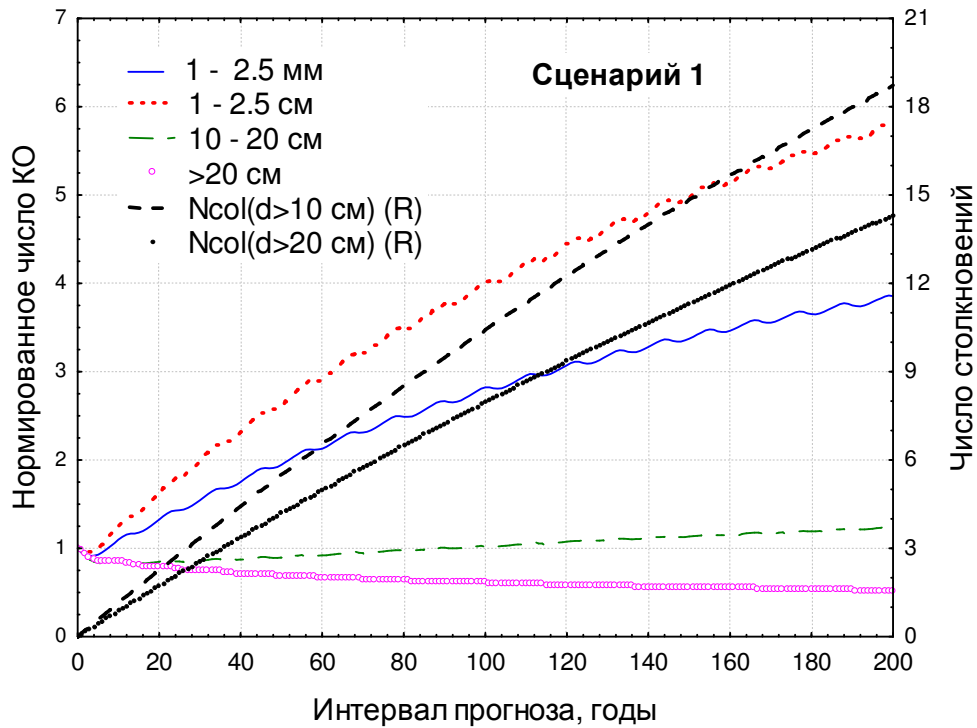


Рисунок 4. Изменение числа КО при сценарии 1

Для 4-х диапазонов размеров здесь приведены оценки числа КО, которые будут находиться в ОКП на интервале прогноза, а также оценки числа столкновений КО размером более ≈ 20 см (каталогизированных) и более 10 см. Из этих данных видно, что на интервале прогноза число КО размером более ≈ 20 см уменьшится в 2 раза. Этот эффект объясняется диссипативным влиянием торможения КО в атмосфере, в результате которого их высота опускается настолько, что они прекращают орбитальный полет. Данный эффект приводит к постепенному уменьшению ежегодного прироста числа столкновений. Тем не менее, число столкновений будет монотонно расти и через 200 лет достигнет значения 14. Эти столкновения приведут к росту числа КО меньшего размера. Если для КО размером от

10 до 20 см этот рост будет незначительным (на 24%), то рост числа более мелких фрагментов будет существенным: *их количество увеличится в 4 – 6 раз!*

Изложенный здесь результат, а именно, значительный рост числа мелких КО на интервале прогноза в результате столкновений представляется весьма важным. На рассмотренном интервале времени он является *неизбежным*. Даже полное прекращение запусков новых КА и исключение других источников образования космического мусора не могут в обозримом будущем остановить этот процесс роста числа мелких КО в результате столкновений. Тем не менее, изложенные выше результаты демонстрируют возможность предотвращения экспоненциального роста числа мелких фрагментов – наблюдается тенденция к стабилизации числа фрагментов столкновений. Это достигается на основе полного прекращения запусков КА и РН.

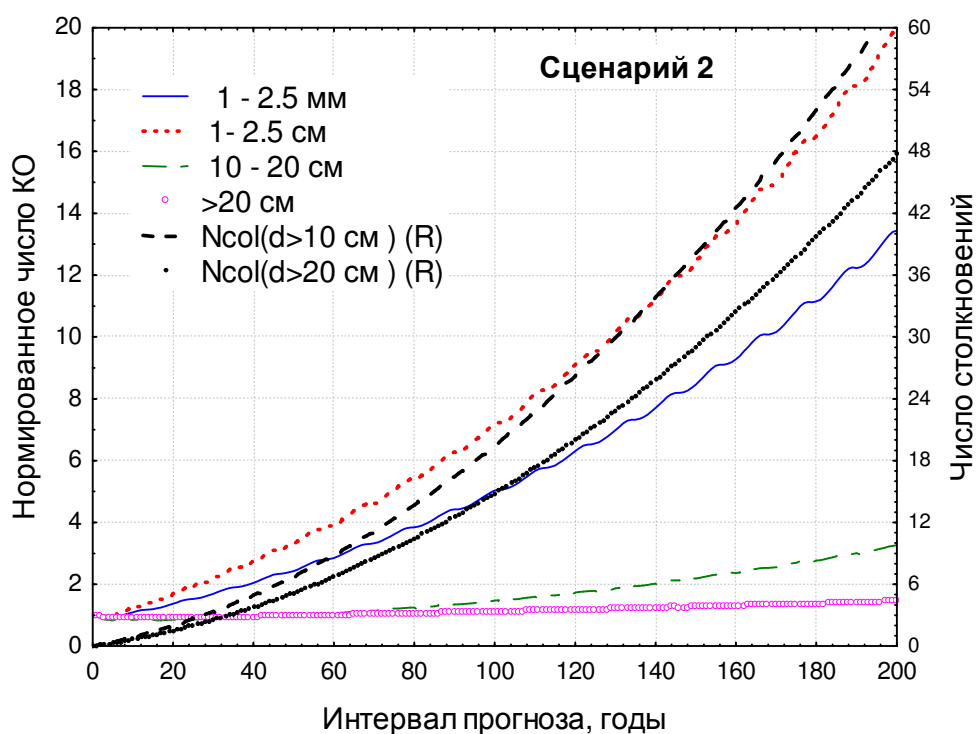


Рисунок 5. Изменение числа КО при сценарии 2

Для 2-го сценария основные результаты прогноза представлены на рисунке 5. Как и следовало ожидать, при этом сценарии рост числа каталогизированных КО (размером более ≈ 20 см) будет продолжаться. Через 200 лет их количество

увеличится в ≈ 1.5 раза. Как следствие, будет расти ежегодный прирост числа столкновений, и через 200 лет общее число столкновений каталогизированных КО достигнет значения 48, что в 3.4 раза больше соответствующей оценки для сценария 1. Число КО размером от 10 до 20 см увеличится в 3.2 раза, а увеличение числа более мелких фрагментов будет очень существенным: *их количество увеличится в 13 – 20 раз!* Характерной особенностью данных рисунка 4 является экспоненциальный рост числа столкновений и числа мелких фрагментов космического мусора на интервале прогноза. Этот результат еще раз подтверждает необходимость принятия кардинальных мер по предотвращению образования нового космического мусора.

Таким образом, при сохранении интенсивности прироста числа каталогизированных КО на пережном уровне число мелких не каталогизированных объектов будет экспоненциально расти. Это означает, что *лавинообразный рост техногенного загрязнения ОКП из гипотезы (синдром Кесслера) превратился в реальность: он уже начался.* Возможность предотвращения экспоненциального роста числа мелких фрагментов может быть достигнута при обнулении прироста числа новых КО крупного размера. Однако в реальных условиях данная мера может оказаться недостаточной, так как методика оценки последствий столкновений, примененная на данном этапе исследований, не учитывает «вклад» столкновений объектов размером менее 20 см.

Изложенные выше результаты прогноза техногенного загрязнения ОКП *необходимо учитывать при конструировании новых КА и планировании их запусков.* Исследование возможностей предотвращения роста техногенного загрязнения ОКП необходимо продолжить.

Заключение.

В журнале *Orbital Debris Quarterly News (NASA)* за апрель 2010 г опубликованы тезисы доклада [27] «Синдром Кесслера: значение для будущих операций в космосе». Авторы делают вывод: «...результаты всех новейших исследований под-

тверждают, что сейчас мы вступаем в период, когда возрастающий при столкновениях уровень техногенного загрязнения ОКП будет контролируемым. При отсутствии возможностей уклонения от столкновений, управление будущей обстановкой требует, чтобы мы полностью применяли все текущие меры по предотвращению загрязнения ОКП ко всем отслужившим срок КА и РН. Дополнительно, вероятно, потребуется постоянно удалять некоторые объекты с орбиты».

Изложенные выше материалы по прогнозу обстановки на 200 лет, в основном, согласуются с выводами упомянутой статьи. А именно, полное прекращение образования новых каталогизированных КО (сценарий 1) приводит к предотвращению экспоненциального роста КМ. При этом рост числа крупных (каталогизированных) объектов прекращается. Однако в упомянутой статье (и других последних публикациях по этой проблеме) данные о более мелких фрагментах космического мусора не рассматриваются. Кроме того, в реальных условиях данная мера может оказаться недостаточной, так как методика оценки последствий столкновений, примененная на данном этапе исследований, не учитывает «вклад» столкновений объектов размером менее 20 см. Поэтому, как показано выше, *даже в этом случае неконтролируемый рост числа мелких фрагментов столкновений будет продолжаться еще очень долго.* Таким образом, ввод авторов статьи о синдроме Кесслера, что рост загрязнения ОК будет контролируемым («the orbital debris environment will increasingly be controlled by random collisions») не является убедительным. Исследования по этой проблеме целесообразно продолжить.

Список публикаций

1. Технический доклад о космическом мусоре, Организация Объединенных Наций, Нью-Йорк, 1999.
2. A.I. Nazarenko. The forecast of technogeneous contamination of the near Earth space with various measures of its mitigation. 17-th IADC meeting, Darmshtadt, October 1999.
3. A.I. Nazarenko, N.P. Morozov. Comparison of the forecasts with the UN COPUPS figure (1999) and conclusion concerning LEO end-of-life disposal. 17-th IADC meet-

ing, Darmshtadt, October 1999.

4. A.I. Nazarenko. The forecast of technogeneous contamination of the near-Earth space with various measures of its mitigation. Committee on the peaceful uses of outer space. Document presented by the Russian Federation. A/AC.105/C.1/1999/CRP.4 23 February 1999.

5. A.I. Nazarenko, N. Morozov. Influence of Russian Orbital Debris Mitigation Measures on the LEO Environment. Proceedings of the 18th Meeting of the Inter-Agency Space Debris Coordination Committee. Colorado Springs, CO, June 2000.

6. A.I. Nazarenko, N.N. Smirnov, A.B. Kiselev. The Space Debris Evolution Modeling Taking Into Account Satellite's Collisions. Proceedings of the US/European Celestial Mechanics Workshop, Poznan, Poland, July 2000.

7. N.N. Smirnov, A.I. Nazarenko, A.B. Kiselev, V.F. Nikitin. LEO Technogeneous Contamination Evolution Modeling with Account of Satellite's Collisions. 51st International Astronautical Congress, Rio de Janeiro, Brazil, October 2000, IAA-00-IAA.6.4.10.

8. А.И. Назаренко, Н.П. Морозов. Эволюция техногенного загрязнения околоземного космического пространства. Международный форум по предотвращению милитаризации космического пространства. Москва. Апрель 2001.

9. N.N. Smirnov, A.I. Nazarenko, A.B. Kiselev, Modelling of the space debris evolution based on continua mechanics. 2001 European Space Agency, (Special Publication) ESA SP1 (473), pp. 391–396.

10. N.N. Smirnov, A.B. Kiselev, A.I. Nazarenko, Mathematical Modeling of Space Debris Evolution in the Near Earth Orbits 2002 Moscow University Mechanics Bulletin, Allerton Press. (Vestnik Moskovskogo Universiteta. Ser.1 Matematika Mekhanika) (4), pp.33–41.

11. 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. Smirnov. Taylor & Francis Inc. 2002.

12. Smirnov N.N., Nazarenko A.I. Kiselev A.B. Continuum model for space debris evolution with account of collisions and orbital breakups. *Space Debris Journ.* No 2 (2000), 249-271, 2004.

13. N.N. Smirnov, A.B. Kiselev, A.I. Nazarenko, V.F. Nikitin, Global Changes in Low Earth Orbits/Recent Global Changes of the Natural Environment, vol.2, Scientific World Publ., Moscow, 2006, pp.617–689.

14. A.I. Nazarenko, Results of updating the parameters of the space debris model (SDPA) in 2007, Fifth European Conference on Space Debris, ESA SP-672, 2009.

15. Satellite Collision Leaves Significant Debris Clouds. ODQN, Volume 13, Issue 2, April 2009.

16. Н.П. Бусленко, Ю.А. Шрейдер. Метод статистических испытаний (Монте-Карло) и его реализация на ЦВМ. –М.: Физматгиз, 1961, 226 с.
17. Общие требования по ограничению техногенного засорения околоземного космического пространства. *Отраслевой стандарт*. Российское авиационно-космическое агентство. ОСТ 134-1023-2000.
18. Space Debris Mitigation Guidelines. 62nd Session UNCOUOS June, 2007 (Ref. Doc.isA/62/20).
19. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 5295-2008. Изделия космической техники. Общие требования к космическим средствам по ограничению техногенного засорения околоземного космического пространства. Госстандарт 2008.
20. J.-C. Liou, N. L. Johnson and N. M. Hill. Controlling the Growth of Future LEO Debris Populations with Active Debris Removal. 59th International Astronautical Congress 29 September –3 October 2008, Glasgow, Scotland.
21. Loginov, S, Yakovlev, M., Mikhailov, M., Popkova, L. NATIONAL STANDARD OF THE RUSSIAN FEDERATION FOR SPACE DEBRIS MITIGATION. *Proc. '5th European Conference on Space Debris'*, Darmstadt, Germany 30 March – 2 April 2009, (ESA SP-672, July 2009).
22. Y.Makarov, D. Gorobets, M.I Yakovlev. RUSSIA SPACE DEBRIS AND CHALLENGES TO SAFETY OF SPACE ACTIVITY. *The International Interdisciplinary Congress on Space Debris*, Montreal, May 7-9, 2009.
23. H. Klinkrad and N.L. Johnson. SPACE DEBRIS ENVIRONMENT REMEDIATION CONCEPTS. *Proc. '5th European Conference on Space Debris'*, Darmstadt, Germany 30 March – 2 April 2009, (ESA SP-672, July 2009).
24. J._C. Liou. An Updated Assessment of the Orbital Debris Environment in LEO. *Orbital Debris Quarterly News*. Volume 14, Issue 1, January 2010.
25. IADC report AI 27.1 “Stability of the Future LEO Environment” Status Review. 28th IADC Meeting 9-12 March 2010, Thiruvananthapuram, India
26. А.Б. Киселев. Численное моделирование процессов деформирования и разрушения при взрывном нагружении // Препринт механико-математического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. - 1996. - № 6. - 36 с.
27. D. J. KESSLER, N. L. JOHNSON, J.-C. LIOU, AND M. MATNEY. The Kessler Syndrome: Implications to Future Space Operations. 33rd Annual American Astronautical Society, Rocky Mountain Section, Guidance and Control Conference 6-10 February 2010, Breckenridge, Colorado.

