

РАЗМНОЖЕНИЕ ФРАГМЕНТОВ НА ОКОЛОЗЕМНЫХ ОРБИТАХ: ПРОСТАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Паоло Фаринелла, Алессандро Корделли

В статье представлена и обсуждена простая математическая модель (из двух связанных нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка) для описания размножения фрагментов "космического мусора" на низких околоземных орбитах, образующихся в результате высокоскоростных разрушающих столкновений мелких фрагментов с искусственными спутниками Земли или другими крупными телами в околоземном космическом пространстве. Модель показывает, что в течение нескольких ближайших десятилетий этот механизм может стать основным источником "космического мусора". В последующем, если темп запуска спутников останется примерно таким же, как в настоящее время, то через 150 лет число находящихся на орбите спутников достигнет максимума (около 10^4) и затем резко упадет (примерно в 10 раз). При другом выборе альтернативных вариантов модели (например, при учете различий в массе тяжелого и легкого сталкивающихся объектов, при изменении скорости инъекции массы на околоземную орбиту, или при намеренном создании фрагментов "космического мусора") количественная картина может измениться (ускориться или замедлиться), но качественных изменений не произойдет, если только не будет принято специальных мер для предотвращения или ограничения столкновений.

Авторы статьи работают в Пизанском университете (Италия).

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время Космическое командование США осуществляет слежение более чем за 7 000 объектов на околоземной орбите при помощи 29 оптических и радиолокационных станций; 95 процентов из них превышают по своим размерам 10 сантиметров, а их общая масса составляет примерно $3 \cdot 10^6$ килограммов. Дополнительные исследования показывают, что на орбите может находиться еще около 2 тысяч объектов с размерами от 10 до 20 сантиметров и около 50 тысяч объектов с размерами от 1 до 10 сантиметров.¹ Именно эти неконтролируемые объекты и представляют особую опасность для космических операций.

Около 23 процентов от входящих в каталог космических объектов на околоземной орбите представляют собой полезные нагрузки² (всего 5 процентов из них относятся к активно функционирующим спутникам или зондам); около 10 процентов объектов - это конструкции последних ступеней ракет-носителей, и оставшиеся 67 процентов представляют собой так называемый "космический мусор" - либо обломки спутников и ракет-носителей, либо детали от них, сознательно сброшенные во время активного функционирования спутников.¹

На 1 января 1991 года более половины

отслеживаемых объектов и практически весь мелкий "космический мусор" образовались в результате около 100 событий фрагментации.³ Причина 24 таких событий неизвестна, 42 события были преднамеренными, 32 события были связаны с двигательными установками и два события явились результатом аварий в электрической сети или в системе управления.³ Несмотря на трудность однозначного доказательства, полагают, что по крайней мере три из событий неизвестной причины обусловлены непредусмотренными столкновениями.⁴

В течение последних десяти лет были внедрены несколько новых конструктивных решений, позволяющих уменьшить выброс фрагментов при работе двигательных установок и других штатных операциях (срабатывании пиротехнических устройств, выбросе тормозящих вращение грузов, открытии крышек и т.д.). С другой стороны, в течение многих лет преднамеренное разрушение космических объектов (спутников и ступеней ракет-носителей) рассматривалось как рутинная технологическая операция либо для проведения прочностных испытаний (как это было с последней ступенью ракеты-носителя "Сатурн-IV-B", разрушенной при управляемом повышении внутреннего давления 5 июля 1966 года), либо для разрушения секретных военных спутни-

ков после окончания их активного существования, либо для проведения испытаний противоспутникового оружия или систем защиты спутников.⁵ Три сознательных разрушения космических объектов (указанное выше испытание последней ступени ракеты "Сатурн-IV-B" и два испытания космического оружия, см. ниже) были проведены США, а оставшиеся 39 - Советским Союзом. Около 12 процентов преднамеренных разрушений космических объектов стали результатом испытаний советского и американского противоспутникового оружия, а почти все остальные связаны с разрушением советских спутников морской разведки или фоторазведки, для которых не удалось осуществить управляемого спуска.⁵

Около 10 процентов всех отслеживаемых фрагментов связано с испытаниями противоспутникового оружия. Советский Союз начал такие испытания в 1968 году и закончил их в 1982 году (правда, в 1985 году им был проведен довольно странный эксперимент, похожий на испытания противоспутникового оружия).⁶ В среднем при каждом из советских испытаний образовывалось по 50 - 100 фрагментов, включенных в каталог.⁵ Единственное американское испытание противоспутникового оружия было проведено в сентябре 1985 года, во время которого при помощи запущенного с самолета миниатюрного ракетного снаряда-перехватчика с автономным наведением был разрушен спутник "Solwind". В этом случае на орбите осталось около 200 вошедших в каталог фрагментов, которые находились на орбите в среднем по несколько лет. Примерно через один год после этого испытания был проведен эксперимент в рамках программы СОИ, во время которого было организовано столкновение полезной нагрузки в ее собственной ракетой-носителем; во время этого столкновения образовалось несколько сотен обнаружимых фрагментов, большая часть из которых через несколько дней вошла в плотные слои атмосферы, и лишь 18 обломков было включено в каталог.⁵

Размножение мелкого "космического мусора", обнаружимого или нет, оказывает все большее влияние на проведение космических операций, конструирование и эксплуатацию космических аппаратов, и на общую стоимость проектов. Например, при создании транспортного космического корабля "СпейсШаттл" воздействие "космического мусора" не считалось серьезной угрозой. Однако, в течение первых 30 полетов этого корабля, в 18 из этих полетов ударами различных фрагментов было повреждено 27 иллюминаторов, 13 из которых пришлось

заменить. Скорее всего, большая часть иллюминаторов была повреждена во время взлета или посадки, но по крайней мере один из случаев (самый серьезный и наиболее изученный), был однозначно связан с ударом фрагмента "космического мусора".⁷

Для больших космических аппаратов и конструкций, которые должны находиться в космосе в течение нескольких лет или даже десятилетий (как, например, для проектируемой орбитальной станции "Фридом"), возможность столкновения с фрагментами "космического мусора" уже сейчас представляет серьезную опасность, заметно превышающую опасность столкновения с микрометеоритами эквивалентной массы. Более того, в лабораторных экспериментах по высокоскоростным ударам было обнаружено, что при таких ударах образуется значительно больше мелких осколков, с размерами менее 10 сантиметров (вплоть до десятых долей миллиметра), чем при ударах с малой скоростью.⁸ Кинетическая энергия, высвобождаемая при ударе частицы с массой в несколько граммов при средней скорости столкновения в 10 километров в секунду (около 10^5 джоуля), примерно эквивалентна энергии взрыва ручной гранаты и может уничтожить незащищенный спутник⁹ или естественное скальное тело сравнимых размеров.¹⁰

Следовательно, столкновения между объектами на орбите будут сопровождаться образованием облаков большого количества фрагментов, что приведет к возникновению своеобразной цепной реакции, в результате которой вероятность новых столкновений будет значительно возрастать. В одной из наших ранних оценок мы показали, что даже при прекращении запусков новых спутников количество "космического мусора" будет возрастать со временем, что в конце концов должно привести к образованию пояса фрагментов, аналогичного поясу астероидов.^{11,12} В другой работе было показано, что населенность околоземного космического пространства, необходимая для начала цепной реакции увеличения числа фрагментов, на два-три порядка величины превосходит современное ее значение, и что такая ситуация может возникнуть через 20 - 50 лет при сохранении текущего уровня космической активности.¹³ В отчете Европейского космического агентства указывается, что:¹⁴

"... самоподдерживаемое воспроизводство "космического мусора" представляет собой отдаленную опасность. Тем не менее, она является наиболее серьезной угрозой, которая может остановить всю космическую деятельность. Этот механизм требует дальнейшего

детального исследования."

В этой статье будет рассмотрена простая математическая модель цепной реакции размножения "космического мусора", характеризующая основные качественные особенности этого явления и чувствительность механизма к значениям различных контролируемых параметров.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Наша модель очень похожа на модели, применяемые в экологии для описания взаимодействия между различными популяциями живых организмов или при моделировании боевых действий между армиями (так называемые модели Ланчестера). Мы предположим, что существует две популяции объектов на околоземных орбитах: N крупных объектов (спутников) с поперечным сечением в несколько квадратных метров и массой в несколько сот килограммов, и n фрагментов, или маленьких объектов, способных, тем не менее, вызвать катастрофическое разрушение спутников. Для основного из рассматривавшихся нами вариантов популяция фрагментов характеризуется типичными размерами порядка одного сантиметра и массой в несколько граммов (как отмечалось ранее, при относительной скорости столкновения в 10 км/сек и отношении масс малого и большого объектов порядка 10^{-5} большие объекты будут практически полностью разрушены); тем не менее, в дальнейшем нами будет рассмотрен вариант с более прочными и ударостойкими спутниками. При анализе взаимодействия этих двух популяций мы будем считать, что частота столкновений пропорциональна произведению двух количеств объектов nN (с постоянным коэффициентом χ); при столкновении один из спутников исчезает, но появляется большое число новых фрагментов α . И, наконец, мы предполагаем, что каждый год на орбите появляется A новых спутников (фактически величина A представляет собой разность между числом спутников, выведенных на орбиту, и числом спутников, вошедших в плотные слои атмосферы), и, кроме того, во время запуска и вывода спутников на орбиту будут возникать так называемые "первичные" фрагменты.

Эти предположения соответствуют системе из двух дифференциальных уравнений первого порядка:

$$dN/dt = A - \chi nN \quad (1)$$

и

$$dn/dt = \beta A + \alpha \chi nN \quad (2)$$

Похожая модель производства фрагментов "космического мусора" на основе одного дифференциального уравнения была независимо предложена в недавней работе Тэйлента¹⁵; несмотря на некоторые различия между предположениями о рождении и уничтожении фрагментов, используемыми при составлении уравнений, результаты Тэйлента похожи на наши результаты, полученные на основе уравнений (1) и (2), которые мы рассмотрим ниже.

Значения констант, использованных в наших уравнениях и в их начальных условиях, основаны на довольно реалистичных (хотя и весьма приблизительных) оценках. В нашей "стандартной" модели мы полагаем, что:

1.) $A = 100$. Это значение соответствует по порядку величины современной частоте вывода крупных объектов (спутников или последних ступеней ракет-носителей) на орбиту.

2.) $\chi = 3 \cdot 10^{-10}$. Это совпадает с известными оценками скорости столкновений на низких околоземных орбитах (в соответствии с рис. 4.2 из работы¹⁴ вероятность столкновения составляет $10^{-5} \text{ м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ для объектов с размерами более 1 см) и принятия во внимание наличия на околоземной орбите примерно 50 тысяч небольших фрагментов (см. ниже). Эта величина может быть также определена простым расчетом для частицы в "ящике": число столкновений на единицу поперечного сечения за год пропорциональна средней скорости столкновений (примерно 10 км/сек), поделенной на объем оболочки околоземного пространства, в котором располагаются сталкивающиеся объекты ($6 \cdot 10^8 \text{ км}^2 \times 1800 \text{ км} \approx 10^{12} \text{ км}^3$).

3.) $\alpha = 10^4$. Эта оценка определяется типичным распределением масс фрагментов при высокоскоростных ударах. Поскольку при таких ударах общее число фрагментов с массой больше m примерно пропорционально $1/m$, то, если фрагмент с наибольшей массой будет равен нескольким десяткам килограммов, примерно 10^4 фрагментов будут обладать массой, большей нескольких граммов. Эта величина согласуется с известными экспериментальными результатами (см., например, работу¹⁰).

4.) $\beta = 70$. Большая часть "первичных" фрагментов образуется при взрывах, сопровождающих работу ракетных двигателей второй и третьей ступеней. По-видимому, основная часть фрагментов, находящихся на орбите в настоящее время, имеет именно это происхождение. Если мы предположим, что в год будет происходить два непреднамеренных взрыва (а всего с начала запусков

искусственных спутников произошло 58 таких взрывов), и в каждом из таких взрывов образуется несколько тысяч фрагментов с массой более одного грамма, то мы получим именно такую оценку величины v . Мы должны также иметь в виду, что в число "первичных" фрагментов могут входить различные объекты, сбрасываемые с ракет или полезных нагрузок при штатных операциях (например, при распаковке полезных нагрузок, разделении ступеней, сбрасывании топливных баков или крышек, и т.д.).

5.) $N(0) = 2 \cdot 10^3$. Эта величина совпадает с современным количеством находящихся на орбите полезных нагрузок и отработанных ступеней ракет-носителей, с учетом того, что несколько сотен таких объектов находятся на более высоких и менее населенных орбитах вне плотно населенной оболочки орбит с высотами между 200 и 2000 километров.

6.) $n(0) = 5 \cdot 10^4$. Как уже отмечалось, эта величина представляет собой текущую оценку количества фрагментов с массой более одного грамма, находящихся на околоземной орбите (следует учесть, однако, что эта оценка справедлива с точностью до множителя 2).

Кроме описанной выше "стандартной" модели, мы рассмотрим четыре альтернативных модели. Согласно первой модели, частота запусков будет линейно увеличиваться со временем таким образом, чтобы за 50 лет частота запусков возросла вдвое (иначе говоря, $A(t) = A + 2t$, где время t выражено в годах). Во второй модели уравнение (2) будет включать дополнительный член B , характеризующий влияние преднамеренных взрывов или столкновений. Мы будем предполагать, что $B = 10^4$, что примерно соответствует одному взрыву или столкновению в год. В третьей, "оптимистической", модели предполагается, что в результате новых обязательств или соглашений количество "первичных" фрагментов будет сведено до минимума (иначе говоря, $v = 0$). И, наконец, мы проверим предположение о том, что спутники могут быть разрушены только при столкновениях с более крупными фрагментами, чем предполагалось ранее (при типичных размерах фрагментов в несколько сантиметров и при массах около 10 граммов); в этом случае мы будем считать, что $n(0) = 2 \cdot 10^4$, $\alpha = 10^3$ и $v = 20$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Мы провели численное интегрирование уравнений (1) и (2) с рассмотренными выше начальными условиями на временных интервалах продолжительностью в 500 лет

и дольше. На самом деле, вполне достаточно проинтегрировать одно уравнение, поскольку, как легко заметить, что:

$$\alpha N(t) + n(t) = (\alpha + v)At + \alpha N(0) + n(0) \quad (3)$$

На рис. 1 и 2 показаны результаты расчетов в "стандартной" модели. При их анализе можно выделить следующие основные особенности:

- ♦ В начальной стадии выполняются условия $xnN \ll A$ и $xnN \ll vA$. Поэтому столкновения не очень существенны, и количество спутников и фрагментов возрастает с увеличением времени приблизительно линейно.
- ♦ Когда величина pN становится больше величины $vA/\alpha x$, что происходит примерно при времени $t = 40$ годам (для $p = 4 \cdot 10^5$ и $N = 6 \cdot 10^3$), то скорость генерации фрагментов при столкновениях становится больше скорости генерации "первичных" фрагментов, после чего количество фрагментов начинает расти экспоненциально. Но если величина A остается большей, чем xnN , то доля разрушенных при столкновениях спутников остается сравнительно небольшой, и рост общего числа спутников остается приблизительно линейным (см. рис. 1).
- ♦ В момент времени $t = 150$ годам, величина pN становится сравнимой с $A/x \approx 3 \cdot 10^{11}$ ($N \approx 1,5 \cdot 10^4$, $p \approx 2 \cdot 10^7$). Количество спутников достигает максимума, и после этого начнет быстро уменьшаться (из-за того, что спутники будут разрушаться быстрее, чем выводиться на орбиту). В то же самое время количество фрагментов будет продолжать расти вплоть до времени $t = 180$ годам (см. рис. 2).
- ♦ И, наконец, в момент времени $t = 300$ годам количество спутников стабилизируется вблизи величины около 10^3 (тем не менее, медленное уменьшение этой величины будет продолжаться и позже), и установится квазистационарное состояние, в котором вещество, выводимое на орбиту, будет полностью преобразовываться в фрагменты "космического мусора". В момент времени $t = 300$ годам количество фрагментов достигнет примерно $3 \cdot 10^8$.

На рис. 3, 4, 5 и 6 иллюстрируются результаты расчетов в четырех альтернативных моделях. Очевидно, что основные качественные особенности модели остаются без изменений. Если скорость запусков линейно возрастает с временем (см. рис. 3), то начальный рост количества спутников и фра-

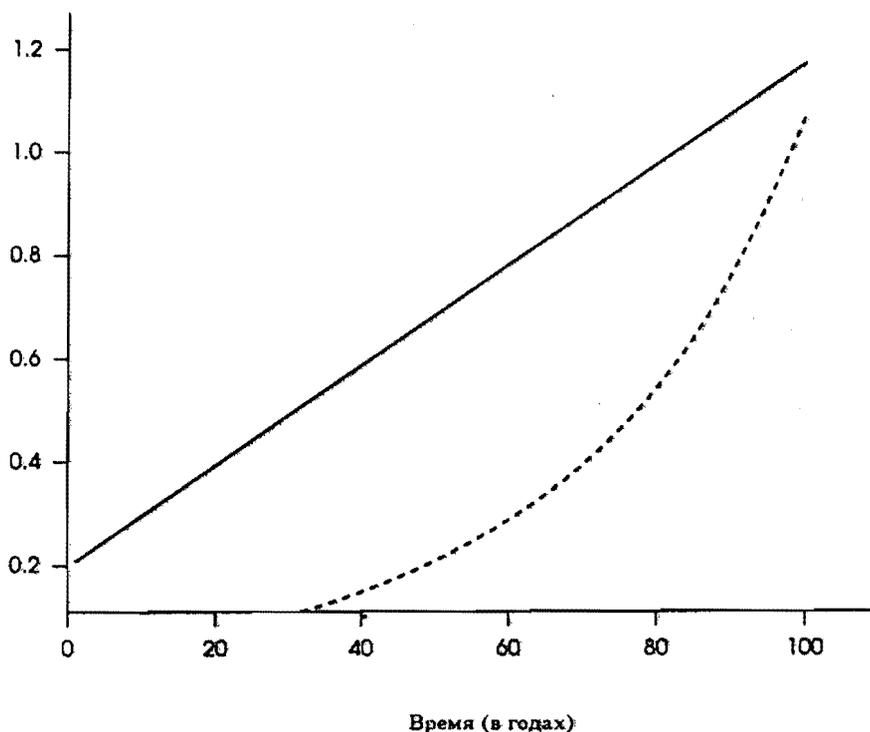


Рисунок 1

Количество "спутников" (сплошная линия) и "фрагментов" (пунктирная линия) в нашей математической модели со стандартным набором параметров на протяжении временного интервала в сто лет. Единица измерения по вертикальной оси соответствует 10^4 спутников и $3 \cdot 10^6$ фрагментов.

гментов будет происходить не линейно, а квадратично, и максимальная величина количества спутников будет больше; она достигает значения, большего $3 \cdot 10^4$, в момент времени $t = 145$ лет, после чего начинается очень быстрое уменьшение до квазистационарного значения в несколько тысяч спутников; при этом количество фрагментов составит около 10^9 . Во второй модели (см. рис. 4), в которой вводится дополнительное количество "первичных" фрагментов (например, от испытаний противоспутникового оружия), общее количество фрагментов будет расти экспоненциально от 10^5 до $2 \cdot 10^8$, после чего экспоненциальный рост снова сменится линейным. Максимальное число спутников ($1,3 \cdot 10^4$) будет наблюдаться в момент времени $t = 135$ годам, сопровождающегося резким спадом, после которого в момент времени $t = 250$ годам начнется медленное уменьшение от $1,5 \cdot 10^3$ до 10^3 . Результаты "оптимистической" модели (в которой не появляются "первичные" фрагменты, см. рис. 5) показывают, что катастрофическое умень-

шение числа спутников задерживается до момента времени $t = 200$ лет, а квазистационарное состояние наступает вблизи момента времени $t = 300$ лет (в этом временном интервале количество спутников уменьшается от $1,8 \cdot 10^4$ до 10^3); экспоненциальное увеличение количества фрагментов также задерживается на несколько десятков лет. И, наконец, на рис. 6 показана зависимость результатов от предполагаемого размера (массы) фрагментов, разрушающих космический объект (это предположение эквивалентно различной устойчивости спутника к высокоскоростному удару; мы напомним, что наш выбор параметров соответствовал в этом случае десятикратному увеличению массы фрагментов, разрушающих спутник). Квазилинейное возрастание количества фрагментов наблюдается в этом случае в течение более длительного времени (около 200 лет), максимальное число спутников достигается в момент времени $t = 240$ годам (при этом количество спутников равно $3,8 \cdot 10^4$, а количество фрагментов достигает

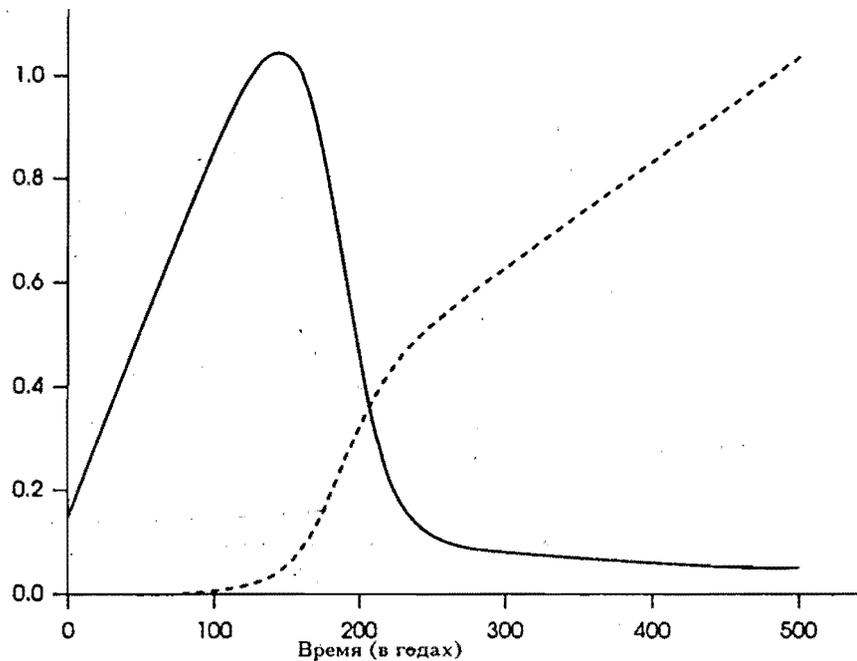


Рисунок 2

То же, что на рис. 1, но для временного интервала в 500 лет. Единица измерения по вертикальной оси соответствует $1,4 \cdot 10^4$ спутников и $5 \cdot 10^8$ фрагментов.

$8 \cdot 10^6$), а последующий медленный спад происходит в течение нескольких сотен лет. Эти результаты показывают, что для более точного количественного моделирования процесса в целом необходимо иметь более надежные данные (например, из экспериментов по гиперскоростному удару) о критическом отношении массы спутника и фрагмента, необходимом для катастрофического разрушения космических объектов искусственного происхождения.

ВЫВОДЫ

Естественно, что обсуждавшиеся выше результаты зависят от модели: например, реальное распределение масс объектов на околоземных орбитах (и, в частности, "космического мусора") непрерывно и наше предположение о двух дискретных взаимодействующих популяциях является несколько искусственным. С этой точки зрения следует изучать более реалистические модели, аналогично тому, как это делалось для моделей столкновительной эволюции астероидов.^{16,17} Более того, следует принимать во

внимание зависимость плотности и скорости (а, следовательно, и частоты столкновений) от высоты орбиты; то же самое относится и к скорости удаления фрагментов из-за торможения в атмосфере, которое дополнительно будет зависеть от отношения их площади и массы (т.е., от размеров, формы и плотности) и от 11-летнего цикла солнечной активности. Тем не менее, мы уверены, что основные особенности нашей простой модели соответствуют основам динамики реальной модели, и поэтому представляют хорошее полуколичественное описание эволюции совокупности фрагментов. Это подтверждается сравнением наших результатов с данными других исследований, основанных на иных подходах к проблеме.^{11,12,15}

Основной вывод данной статьи заключается в том, что существует внутренний предел количества спутников (или других крупных космических объектов) на низкой околоземной орбите, который всего лишь примерно на один порядок величины превышает современное количество объектов. Экспоненциальный рост количества фрагментов в результате столкновений, скорее всего, на-

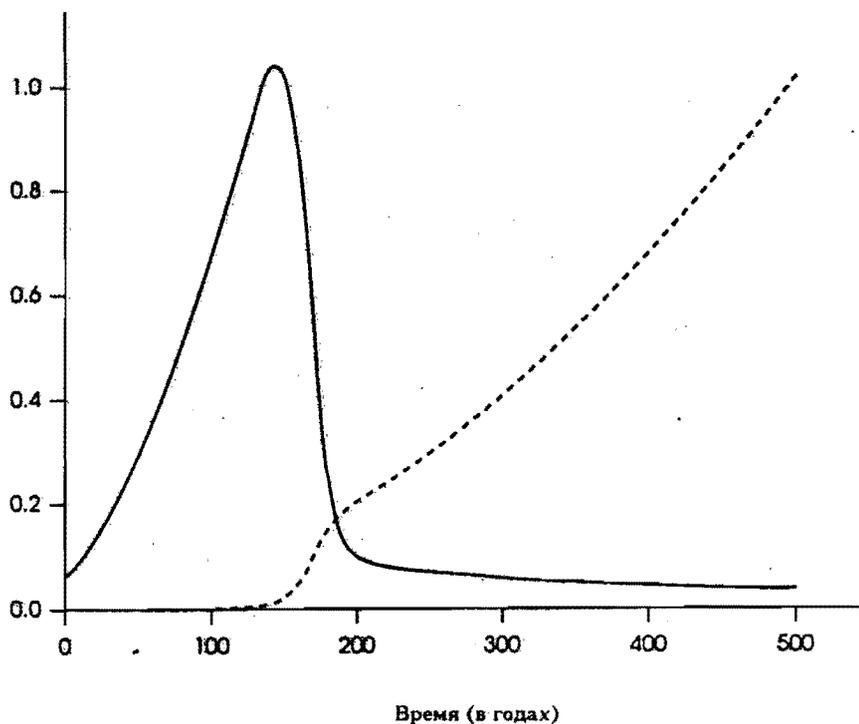


Рисунок 3

То же, что на рис. 2, но для варианта модели, соответствующего линейному увеличению частоты запуска спутников. Единица измерения по вертикальной оси соответствует $3,3 \cdot 10^4$ спутников и $3 \cdot 10^9$ фрагментов.

чнется через несколько десятилетий, что, возможно, вынудит космические агентства уменьшить частоту вывода космических объектов на орбиту, для того, чтобы поддержать общее количество спутников на уровне, не намного превышающим существующий, и предотвратить катастрофическое сокращение космической активности через несколько столетий.

Предотвращение взрывов на орбите, испытаний противоспутникового оружия, инъекцию на орбиту (с высотой более нескольких сотен километров) новых "первичных" фрагментов могут задержать возникновение проблемы размножения "космического мусора" на несколько десятилетий. Важным фактором, действующим в этом направлении, следует считать принятое НАСА в 1982 году решение о сбросе неиспользованных компонент топлива и газов из последних ступеней ракеты "Дельта" для того, чтобы предотвратить их взрывы, которые могут быть инициированы смешением оставшихся компонент. Но не исключено, что в будущем потребуются новые, более ради-

кальные меры для предотвращения обсуждавшейся выше катастрофы. Возможный перечень таких мер включает преднамеренный увод с орбиты космических объектов, прекративших активное функционирование, убиение объектов или фрагментов из околоземного космического пространства при помощи других методов, разработку процедур для активного предотвращения столкновений, использование более устойчивых спутников (защищенных экранами или конструктивными мерами), уменьшение массы и размеров спутников. Некоторые из этих мер уже рассматриваются и разрабатываются, а другие находятся на стадии предварительных исследований.¹⁸⁻²⁰

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Фрэнка фон Хиппеля за предложение заняться проблемой генерации "космического мусора" при столкновениях объектов на орбите, Л. Ансельмо за предоставление обновленной информации о характеристиках "космического мусо-

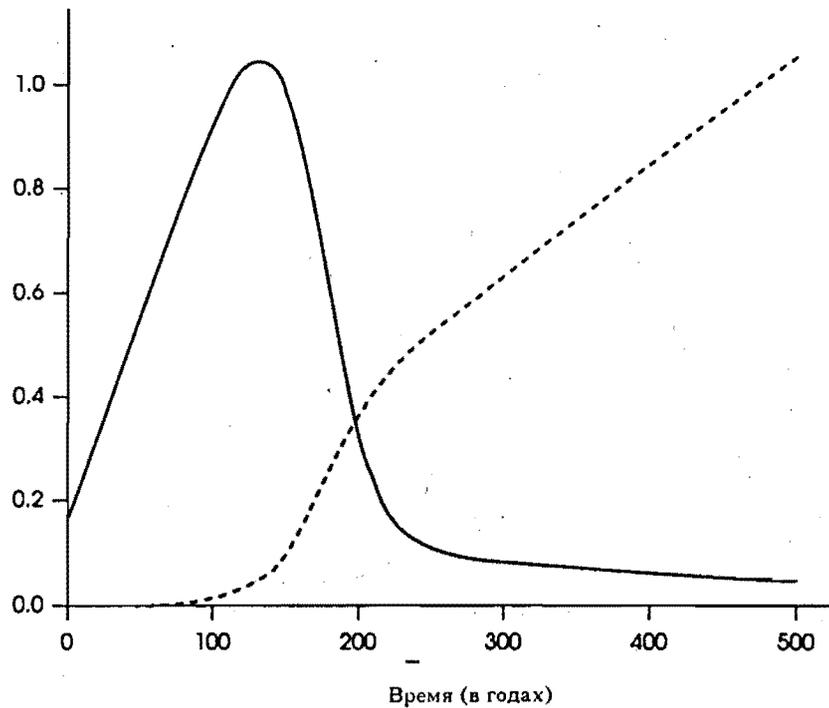


Рисунок 4

То же, что на рис. 2, но для варианта модели, соответствующего увеличению скорости инъекции "первичных" фрагментов (в результате взрывов или испытаний противоспутникового оружия). Единица измерения по вертикальной оси соответствует $1,3 \cdot 10^4$ спутников и $5,2 \cdot 10^8$ фрагментов.

ра" (сводка которой приводится во введении) и Ф. Калоджеро за полезные замечания по некоторым математическим аспектам этой задачи. Мы признательны за полезные замечания и предположения, сделанные Д.Дж. Кесслером при чтении первого варианта статьи. Работа одного из авторов (П. Фаринеллы) частично поддерживалась Итальянским космическим агентством и Итальянским министерством университетов и научных исследований.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. R.D. Culp, R.A. Madler, "Modelling Un-traceable Orbital Debris Associated with the Tracked Space Debris Cloud", Paper AAS 87-472, AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference, Kalispell, Montana, 10 - 13 August 1987.
2. На десяти объектах расположены радиоизотопные генераторы, а еще на тридцати трех - выключенные ядерные реакторы.
3. D.S. McKnight, ed., Orbital Debris Monitor, v. 4, p. 1, January 1991. Это ежеквартальное издание, в котором публикуются краткие сообщения и новые данные о состоянии "космического мусора" искусственного происхождения.
4. R.D. Culp, D.S. McKnight, "Distinguishing between Collision-Induced and Explosion-Induced Satellite Breakup through Debris Analysis", Astrodynamics 1985, proceedings of AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference, 12 - 15 August 1985, Vail, Colorado, Advances in the Astronautical Sciences, v. 58, part I, pp. 739 - 768, paper AAS 85-370, Univelt Inc., San Diego, California, 1986.
5. N.L. Johnson, D.S. McKnight, "Artificial Space Debris", Malabar, Florida, Orbit Book Company, Inc., 1987.
6. N.L. Johnson, "Soviet Space Programmes 1980 - 1985", Science and Technology Series, v. 66, American Astronautical Society, San Diego, California, Univelt Inc., 1987.
7. S.W. Bowlin, ed., "Space Debris - A Po-

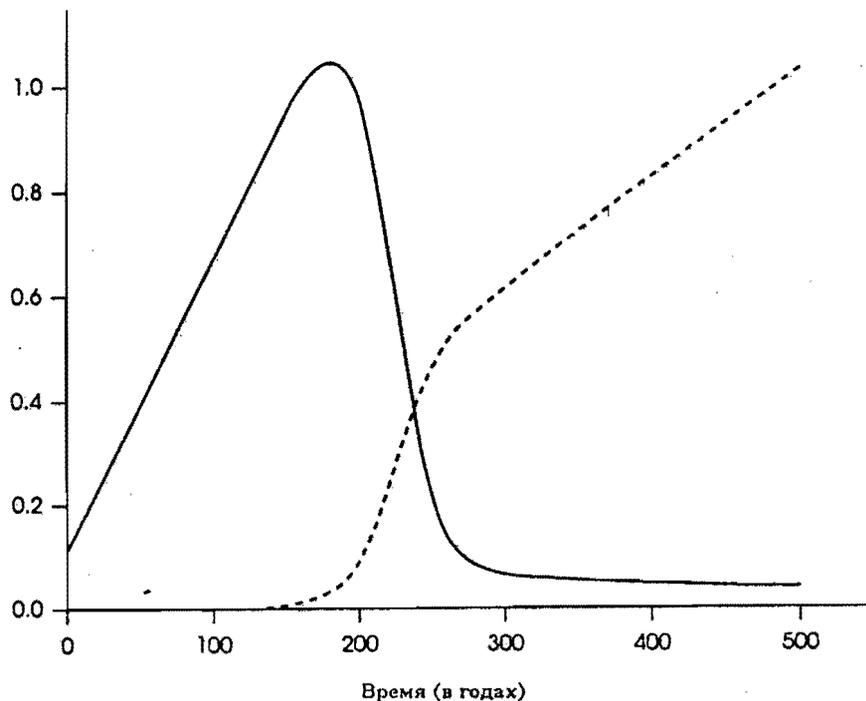


Рисунок 5

То же, что на рис. 2, но для варианта модели, соответствующего отсутствию "первичных" фрагментов. Единица измерения по вертикальной оси соответствует $1,8 \cdot 10^4$ спутников и $5,1 \cdot 10^8$ фрагментов.

- tential Threat to Space Station and Shuttle", GAO/IMTEC-90-18, Washington, DC, General Accounting Office, 14 April 1990.
8. D.G. Cooke, "The SMART Catalog", paper AAS 87-450, AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference, Kalispell, Montana, 10 - 13 August 1987.
 9. Interagency Group (Space), "Report on Orbital Debris for National Security Council", Washington, DC, February 1989, pp. 4 - 5.
 10. D.R. Davis, P. Farinella, P. Paolicci, V. Zappala, eds., "Catastrophic Disruption of Asteroids and Satellites", Journal of the Italian Astronomical Society, v. 57, p. 1, 1986.
 11. D.J. Kessler, B.G. Cour-Palais, "Collision Frequency of Artificial Satellites: The Creation of a Debris Belt", Journal of the Geophysical Research, v. 83, 1 June 1978, pp. 2637 - 2646.
 12. D.J. Kessler, "Collisional Cascading: The Limits of Population Growth in Low Earth Orbit", COSPAR Conference 1990 (to be published in Advances in Space Research).
 13. P. Eichler, D. Rex, "Debris Chain Reactions", paper AIAA-90-1365, AIAA/NASA/DOD Orbital Debris Conference: Technical Issues and Future Directions, Baltimore, Maryland, 16 - 19 April 1990.
 14. ESA Space Debris Working Group, "Space Debris", ESA SP-1109, November 1988.
 15. D. Talent, "Analytical Model for Orbital Debris Environmental Management", paper AIAA-90-1363, AIAA/NASA/DOD Orbital Debris Conference: Technical Issues and Future Directions, Baltimore, Maryland, 16 - 19 April 1990.
 16. J. Dohnanyi, "Fragmentation and distribution of Asteroids", in T. Gehrels, ed., "Studies of Minor Planets", NASA SP-267, pp. 263 - 295, 1971.
 17. D.R. Davis, P. Farinella, P. Paolicchi, S.J. Weidenschilling, R.P. Binzel, "Asteroid collisional history: Effects on sizes and spins", in R.P. Binzel, T. Gehrels, M.S. Matthews, eds., "Asteroids II", University of Arizona Press, 1989, pp. 805 -

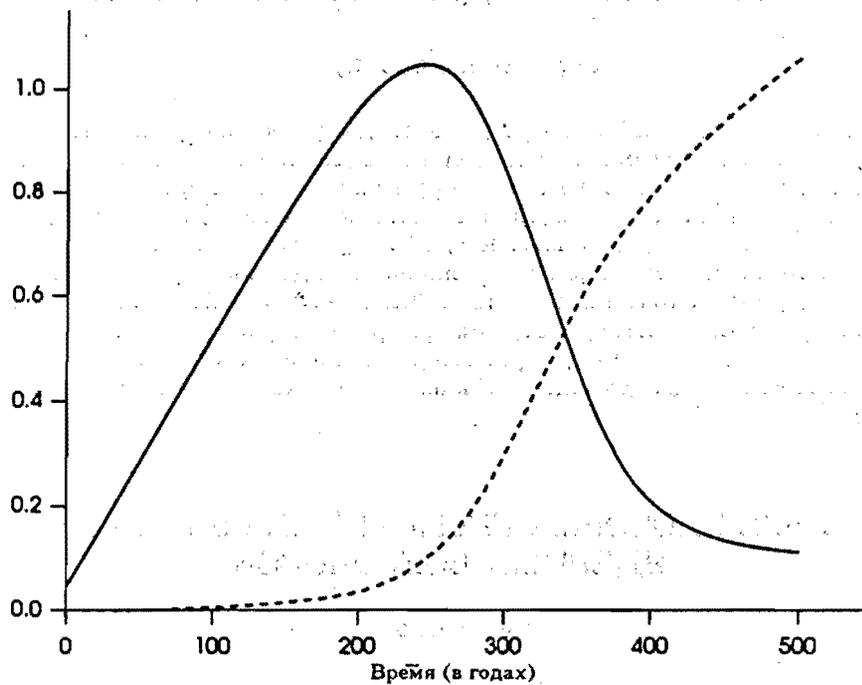


Рисунок 6

То же, что на рис. 2, но для варианта модели, соответствующего большим размерам фрагментов (иначе говоря, более защищенным спутникам). Единица измерения по вертикальной оси соответствует $3,8 \cdot 10^4$ спутников и $8,9 \cdot 10^7$ фрагментов.

826.

18. Interagency Group (Space), "Report on Orbital Debris for National Security Council", Washington, DC, February 1989, pp. 31 - 37.
19. ESA Space Debris Working Group, "Space

Debris", ESA SP-1109, November 1988, pp. 55 - 64.

20. Office of Technology Assessment, "Orbital Debris: A Space Environmental Problem", Washington, DC, US Government Printing Office, 1990.