

АНАЛИЗ ОСКОЛКОВ ОТ СТОЛКНОВЕНИЯ СПУТНИКОВ КОСМОС 2251 И ИРИДИУМ 33

Тинг Ванг

Столкновение между действовавшим американским спутником "Иридиум 33" и прекратившим работу русским спутником "Космос 2251" 10 февраля 2009 года – это первое соударение спутников на орбите. По состоянию на 1 декабря 2009 года американская система космического слежения составила каталог из 1632 обломков столкновения, многие из которых останутся на орбитах в течение десятилетий. В этой статье даются оценки полного количества, размера, отношения площади поверхности к массе и относительной скорости осколков, занесенных в каталог, а также приводятся расчеты времени жизни и орбитальной эволюции осколков. Приведены оценки краткосрочной и долгосрочной опасности от этих осколков в космической окружающей среде. Показано, что предыдущие оценки вероятности того, что космический объект столкнется с другим объектом, кажутся меньше, чем следует из наблюдавшихся столкновений. Проведен анализ зависимости вероятности столкновения от формы сталкивающихся объектов. Результаты указывают, что учет формы увеличит оценки столкновений. В предыдущих анализах не рассматривалось влияние добавочных элементов на спутниках, которые приводят к недооценке долгоживущей компоненты космического мусора.

Тинг Ванг работает по Программе исследования мира, Корнеллский университет, Итака, Нью-Йорк, США.

Статья получена редакцией 9 марта 2010 года и принята к опубликованию 3 мая 2010 года.

Почтовый адрес для корреспонденции: 152 Uris Hall, Cornell University, Ithaca, NY 14853, USA.

Электронный адрес: mr.wangting@gmail.com

ВВЕДЕНИЕ

Столкновение 10 февраля 2009 года между спутником Иридиум 33 и неработающим Космосом 2251 на высоте 770 км (470 миль) стало первым известным столкновением двух неповрежденных спутников.

Спутник Иридиум был частью группировки спутников связи, принадлежащих частной американской компании Iridium Satellite LLC, находящейся в Бетесде, Мериленд. Масса спутника без топлива составляла 556 кг. Масса спутника Космос (также без топлива) была равна 900 кг. Он принадлежит России и был запущен в 1993 году. Считается, что этот спутник не был действующим или не имел способности к маневрированию к моменту соударения.

Оба спутника вращались вокруг Земли со скоростью около 7.5 км/с и столкнулись с относительной скоростью свыше 10 км/с. В результате соударения образовался космический мусор с размерами от крупных массивных кусков до пылевых частиц. Мусор может угрожать близко расположенным спутникам.

В этой статье используются данные, опубликованные Сетью космического наблюдения США (SSN), и оценки, основанные на стандартной модели НАСА по оценкам развала¹, для вычисления числа, размеров, отношения площади поперечного сечения к массе и относительной скорости фрагментов, образовавшихся при соударении. Статья использует эту информацию для определения времени жизни на орбите и эволюции орбиты фрагментов, а также для оценки влияния такого столкновения на космическую окружающую среду.

ПАРАМЕТРЫ ФРАГМЕНТОВ

Параметры, использованные для определения характеристик фрагментов, содержат средний размер, массу, отношение площади к массе (площадь поперечного сечения фрагмента, разделенная на его массу), а также относительную скорость (скорость фрагмента сразу же после разрушения относительно центра масс спутников). Эти параметры служат начальными данными для вычисления орбитальной эволюции фрагментов и оценок их воздействия на космическую окружающую среду.

В статье использованы наблюдательные данные от Сети космического наблюдения США по фрагментам столкновения для оценки их параметров.

Эти результаты сравниваются с предсказаниями, даваемыми моделью стандартного развала НАСА, которая является эмпирической моделью, основанной на прошлых событиях развала и наземных испытаниях. Модель дает оценки распределения параметров фрагментов, основанные на скорости столкновений и массе сталкивающихся объектов. Не вызывает удивления, что эти оценки могут значительно отличаться от наблюдаемых результатов для конкретных событий развала. Например, модель недооценила количество фрагментов при разру-

шении китайского спутника Феньчжун в январе 2007 года примерно в три раза^{2,3}.

Количество и размеры фрагментов Иридиума-Космоса

Соединенные Штаты поддерживают "каталог" объектов в космосе. Чтобы попасть в каталог, объект должен быть замечен Сетью космического наблюдения, а его происхождение должно быть известно. В результате можно идентифицировать попадающие в каталог объекты, соответствующие наблюдаемым фрагментам двух спутников. Сейчас в каталоге находятся примерно 15000 объектов, а также несколько тысяч дополнительных объектов, которые отслеживаются Сетью космического наблюдения, но их происхождение неизвестно.

Данные наблюдений публикуются в виде "двухпланетных элементов" (ДПЭ), определяющих орбиту объекта в данное время⁴.

Сеть космических наблюдений может отслеживать объекты на низкой околоземной орбите, имеющие размеры более 10 см. Поскольку эта Сеть все еще обнаруживает и заносит в каталог фрагменты столкновений, полное количество фрагментов, скорее всего, превышает обнаруженную величину. Поэтому, чтобы предсказать фактическое количество крупных фрагментов, изучаются истории наблюдений за прошлыми разрушениями. На Рис.1 показаны процессы заполнения каталогов Сети космического наблюдения фрагментами от столкновения Космос-Иридиум и от еще трех прошлых событий на низкой околоземной орбите высотой менее 2000 км⁵. Как видно из графиков, процесс заполнения каталога объектами на низкой орбите можно разбить на три этапа.

Через первый месяц (первый этап) Сеть космического наблюдения находит и отслеживает фрагменты с постоянной скоростью в течение последующих 4-6 месяцев. Второй этап обычно начинается через месяц после разрушения и завершается через 150-200 дней после разрушения. Большинство фрагментов заносится в каталог в течение этого периода. На третьем этапе в каталог случайно попадают добавочные фрагменты. Типичная продолжительность этого этапа составляет несколько лет. За это время находится, грубо говоря, от 2 до 25 процентов фрагментов.

Как видно на Рис.1, второй этап для столкновения Иридиум-Космос кончился примерно через 200 дней после разрушения. Если предположить, что еще можно обнаружить 25% фрагментов за время третьего этапа, то текущее и ожидаемое количество занесенных в каталог фрагментов Иридиума 33 и Космоса 2251 представлено в табл.1.

Хотя добавление радара Кобра Дэйн в 2003 году позволило Сети космического наблюдения следить за фрагментами размером до 5 см⁶, частицы мусора с размером в диапазоне 5-10 см составляли всего 3% от всех занесенных в каталог объектов⁷. Поскольку Сеть косми-

ческого наблюдения может также пропустить фрагменты размером свыше 10 см⁸, число фрагментов в каталоге предполагается равным числу фрагментов с размером свыше 10 см (это консервативная оценка).

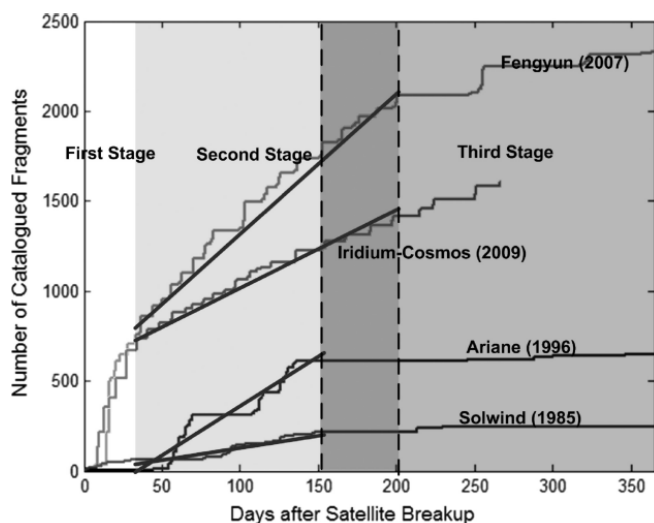


Рисунок 1: Изменение во времени числа зарегистрированных Сетью космических наблюдений фрагментов в четырех случаях разрушения спутников. По вертикальной оси отложено число фрагментов, занесенных в каталог, а по горизонтальной оси – количество дней, прошедших с момента разрушения спутника. Приведены четыре графика (сверху вниз): китайский спутник Феньчжун (2007 год), столкновение Иридиума с Космосом (2009 год), разрушение ракеты Ариан (1996 год) и разрушение спутника Солвинд (Солнечный ветер) – 1985 год. Надписи по горизонтальной строке – первый этап, второй этап, третий этап.

Таблица 1: Количество занесенных в каталог фрагментов спутников Иридиум и Космос.

	Космос 2251	Иридиум 33	Сумма
Количество фрагментов, занесенных в каталог (12/1/09)	1142	490	1632
Оценка полного количества с размером больше 10 см	1300	550	1850

В качестве сравнения Таблица 2 показывает количество фрагментов различных размеров, возникших от соударения Иридиум-Космос. Оно вычислено по модели разрушения, которой пользуется НАСА, с учетом массы спутников. Как выше отмечено, Сеть космического наблюдения может, как правило, следить за объектами на низкой околоземной орбите, если их размер превышает 10 см, так что первый столбец в Таблице 2 подходит для сравнения с наблюдениями.

Таблица 2: Оценки количества фрагментов различного размера по модели разрушения НАСА.

	> 10 см	> 1 см	> 1 мм
Космос 2251	840	43220	2.22x10 ⁹
Иридиум 33	580	30100	1.54x10 ⁹
Сумма	1420	73320	3.76x10 ⁹

Физический размер каждого помещенного в каталог фрагмента можно оценить по данным Сети космического наблюдения. В число этих данных входит радарное поперечное сечение (РПС) для большинства включенных в каталог фрагментов. РПС служит мерой радарного сигнала, отраженного от каждого объекта. Затем можно воспользоваться моделью НАСА по оценке размера, чтобы преобразовать РПС в усредненный размер для каждого объекта⁹.

На Рис.2 представлены суммарные распределения

по размеру фрагментов в облаках от Иридиума и Космоса (числа фрагментов с размером выше заданного) с использованием наблюдательных данных и модели НАСА по оценкам размера. При переходе к меньшим размерам кривые наблюдаемых данных начинают опускаться, начиная где-то с 10 см, из-за понижения чувствительности радаров Сети космического наблюдения.

Данные на Рис.2 примерно следуют распределению по степенному закону, который совпадает с функциональной формой, предполагаемой в модели НАСА по разрушению. Однако параметры подогнанных кривых отличаются от тех, какие соответствуют графикам модели НАСА. Если степенной закон справедлив, количество фрагментов Космоса, превышающих по размеру 1 см, должно более, чем вдвое, превышать оценки по модели НАСА. Точно так же, модель НАСА предсказывает значительно больше фрагментов, превышающих 1 м по размеру, в обоих случаях, чем на самом деле наблюдается.

Отношение площади к массе для фрагментов Иридиум-Космос

Время жизни фрагментов на орбите связано с отношением их площади поперечного сечения к массе (А/М). Наблюдаемое изменение большой полуоси орбиты фрагмента со временем, определяемое по публикуемой истории двухлинейных элементов (ДЛЭ), может быть связано с изменением энергии фрагмента. Рассматривая возмущения орбиты, например, под действием солнечного давления, можно отделить эффекты, связанные с атмосферным трением, и подсчитать механическую работу, проделанную действовавшим на объект атмосферным трением. Потери энергии зависят от А/М и плотности атмосферы. Если использовать детальную модель атмосферы, можно поэтому оценить значение А/М для каждого фрагмента. Реальный алгоритм применяет технологию численного фильтрации для устранения эффектов, связанных с другими возмущениями¹⁰. Алгоритм, примененный для этой статьи, пользовался моделью атмосферы NRLMSIS 00¹¹ и реальной ежедневной записью солнечного потока. При вычислении результатов применялись значения ДЛЭ, подсчитанные до 31 октября 2009 года.

На Рис.3 приведены распределения значений А/М для внесенных в каталог фрагментов Иридиума и Космоса. Значения А/М для большинства фрагментов от Иридиума выше, чем у фрагментов от Космоса. Это приводит к более короткому времени жизни для фрагментов Иридиума. Другие исследователи применяли различные методы, но получали аналогичные распределения А/М¹².

Рис.4 приводит фотографии спутников Иридиум (а) и Космос (б). Как видно из этих фотографий, Иридиум имел три крупные солнечные батареи, а солнечные батареи Космоса совмещены с корпусом спутника. Фрагменты с более высоким значением А/М, скорее всего, имеют материал солнечных батарей Иридиума. Аналогичное явление наблюдалось при распаде китайского спутника Феньчжун.

Отношение площади к массе для фрагментов Иридиум-Космос

Масса фрагмента может быть оценена из рассчитанных выше параметров, поскольку она должна быть пропорциональна квадрату его характеристического размера, разделенному на отношение площади к массе для этого фрагмента. В частности, масса конкретного фрагмента, занесенного в каталог, m_i может быть оценена следующим образом

$$m_i = \frac{\alpha l_i^2}{(A/m)_i} \tag{1}$$

$$\alpha = \frac{\beta M}{\sum_{i=1}^N \frac{l_i^2}{(A/m)_i}}$$

где суммирование идет от $i=1$ до $i=N$, l_i – средний размер фрагмента, $(A/m)_i$ - отношение поперечного сечения к массе для i -го фрагмента, M – масса спутника, N – зане-

сенное в каталог количество фрагментов от разрушенного спутника, β – доля полной массы зарегистрированных фрагментов по отношению к массе спутника; можно предположить, что эта доля составляет 0.7-0.95.

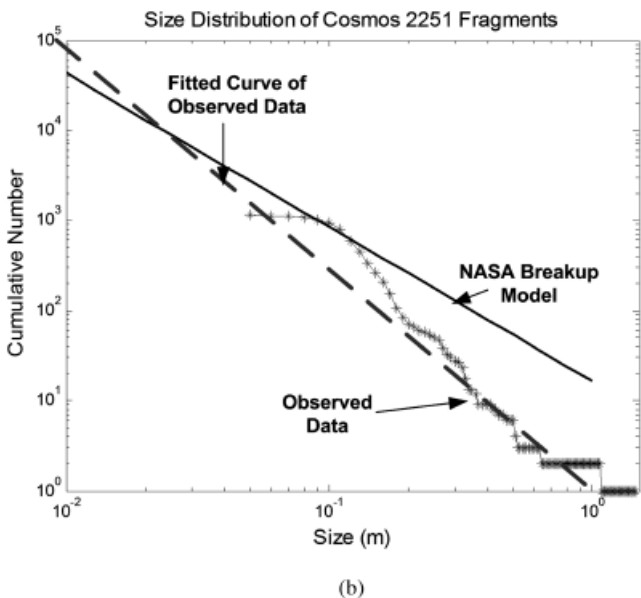
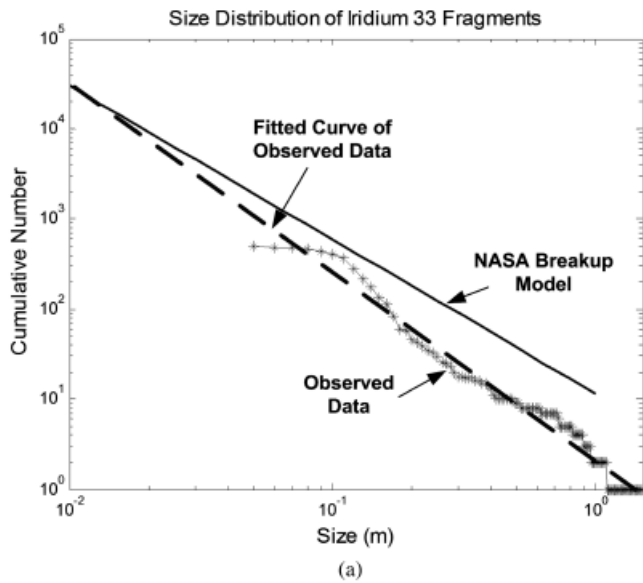


Рисунок 2: Суммарные распределения по размеру фрагментов от развала Иридиума и Космоса. На кривых приведено количество фрагментов с размером, превышающим заданную величину, где размер определяется с использованием модели НАСА по оценке величины фрагмента, чтобы преобразовать радарное поперечное сечение в физический размер. При переходе к меньшим размерам, начиная примерно с 10 см, наблюдаемые данные на кривых начинают понижаться из-за падения чувствительности радаров Сети космического наблюдения. Приведенные графики показывают, что данные следуют степенному закону, но с иными параметрами, чем предсказывает модель разрушения НАСА. На верхнем рисунке приведены данные по Иридиуму 33. По вертикальной оси отложено полное число фрагментов, а по горизонтальной – размер фрагмента (м). Сплошная линия соответствует модели разрушения, предложенной НАСА, а штрихованная линия является результатом подгонки наблюдавшихся данных. Все результаты наблюдений отражены на графике, изображенном крестиками. На нижнем рисунке приведены данные по Космосу 2251. Все остальные обозначения остаются неизменными.

Множитель α включен для уверенности, что сумма масс всех N фрагментов равна βN , а это есть масса начального спутника, унесенная всеми включенными в ка-

талог фрагментами.

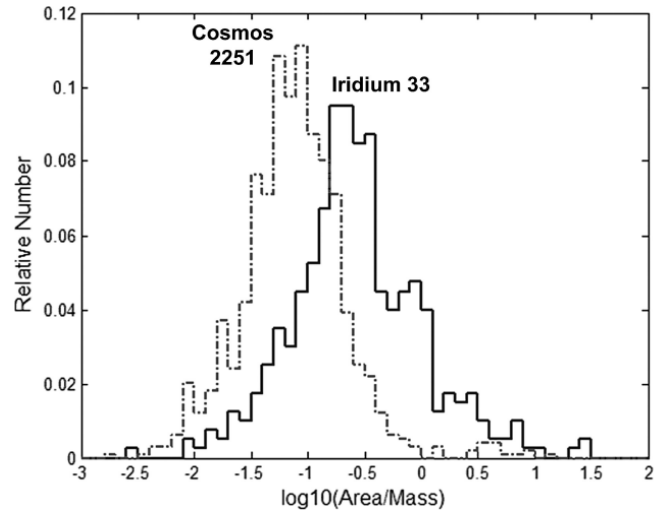


Рисунок 3: Отношение площади к массе (A/M) внесенных в каталог фрагментов спутников Иридиум и Космос. По вертикальной координатной оси отложено относительное количество фрагментов, а по горизонтальной – десятичный логарифм отношения A/M .

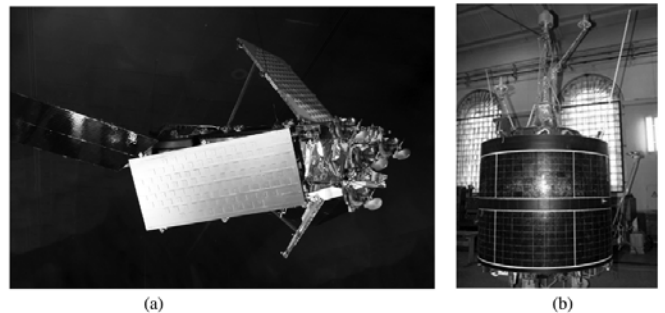


Рисунок 4: Изображения спутников Иридиум и Космос: (a) Иридиум 33; (b) Космос 2251.

Ошибка в расчетной массе конкретного фрагмента, по-видимому, велика, поскольку величина радарного поперечного сечения (РПС), перевод РПС в физический размер и подсчитанные значения A/M обладают неопределенностью. Более того, масса обнаруженных фрагментов неизвестна. Но поскольку эти неопределенности влияют на все фрагменты, относительное распределение масс может быть достаточно точным. Рис.5 показывает, как полная масса включенных в каталог фрагментов данного размера меняется в зависимости от размера для двух спутников.

Как следует из Рис.5, примерно 80% массы спутника Иридиум сконцентрировано в нескольких массивных фрагментах. Расчеты показывают, что наибольший фрагмент Иридиума может содержать более половины полной массы спутника. В каталоге Сети космического наблюдения этому крупному фрагменту присвоен идентификационный номер 24946 (такой же номер был у начального спутника Иридиум).

Аналогично, больше половины массы спутника Космос содержится в нескольких крупных обломках.

Поскольку основная часть Иридиума и большая часть Космоса, как представляется, не взаимодействуют друг с другом, столкновение не было, похоже, лобовым между телами обоих спутников.

Если сравнивать с Иридиумом, то более значительная часть массы Космоса разбилась на более мелкие фрагменты. Больше четверти всей массы Космоса сконцентрировано во фрагментах с размером от 10 см до 20 см. Более мелкие и невидимые фрагменты могут содержать свыше 20% массы спутника. Причиной такого различия может стать то, что Космос оказался более компактным, чем Иридиум, и поэтому энергия от соударения оказалась более тесно связанной с корпусом спутника.

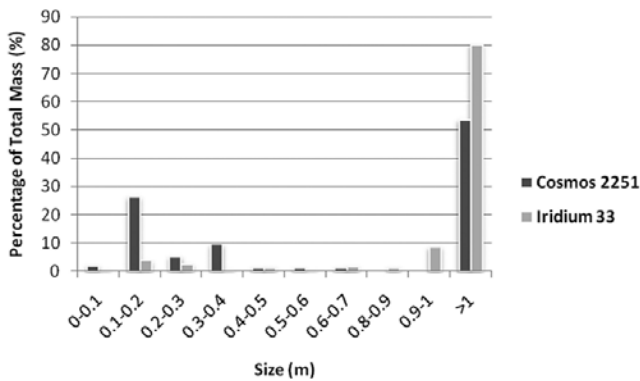


Рисунок 5: Распределение массы внесенных в каталог фрагментов соударения в зависимости от размера фрагмента для обеих спутников: размер столбца показывает полную массу фрагментов в каждом данном диапазоне размеров по отношению к полной массе столкнувшихся спутников. На левой вертикальной оси отложена доля полной массы спутника (в процентах). На правой вертикальной оси показаны массы зафиксированных фрагментов (зачерненные столбцы для Космоса и серые – для Иридиума. На горизонтальной оси приведены диапазоны размеров фрагментов.

Относительные скорости фрагментов Иридиум-Космос

При разрушении спутника каждый фрагмент получает энергию и импульс, что приводит к относительной скорости по отношению к исходному спутнику. Метод, использованный для определения относительной скорости фрагментов на основе наблюдаемых ДЛЭ, рассмотрен в Приложении А.

Распределение относительных скоростей внесенных в каталог фрагментов от столкновения, приведено на Рис.6. Распределение фрагментов Космоса сдвинуто в сторону более высоких скоростей, чем аналогичное распределение для фрагментов Иридиума. Этот результат противоречит модели разрушения, принятой НАСА, по оценкам которой фрагменты с более высокими значениями А/М будут иметь более высокие относительные скорости (см.Рис.7), хотя распределение А/М для фрагментов Космоса имеет максимум при меньших значениях А/М, чем для фрагментов Иридиума.

Данные, приведенные на Рис.7, показывают, что при разрушении спутника Феньчжун и развале в 1985 году спутника “Солвинд” соотношение между А/М и относительной скоростью попавших в каталог фрагментов значительно отличается от предсказаний модели НАСА. Эта модель предсказывала соотношение по степенному закону между А/М и средней скоростью фрагментов, имеющих такое же значение А/М, но в то же время данные демонстрируют более отличающуюся функциональную форму. В частности, средняя скорость, похоже, мало меняется для значений А/М, лежащих в диапазоне 0.1-1.

Такие случаи указывают, что соотношение между А/М и относительной скоростью в модели НАСА в общем случае не является корректным.

Рис.8 демонстрирует распределение скорости фрагментов, помещенных в каталог, вдоль трех координатных направлений, Компоненты скорости определяются согласно связанной с телом спутника системе координат, изображенной на Рис.9¹³.

Азимут на Рис.9 – это угол между осью X и проекцией вектора скорости на плоскость x-y, а возвышение – угол между вектором скорости и плоскостью x-y.

Кривые на Рис.8 указывают, что направления относительных скоростей фрагментов Иридиума распределены совершенно случайно, поскольку центр распределений находится вблизи нуля. Но распределение скоростей фрагментов Космоса сдвинуто в направлении положительных значений по оси Z и отрицательных значений по оси X. Эти сдвинутые распределения скорости не могли возникнуть в результате передачи импульса от Иридиума, так как в распределении Иридиума не видно соответ-

ствующего сдвига.

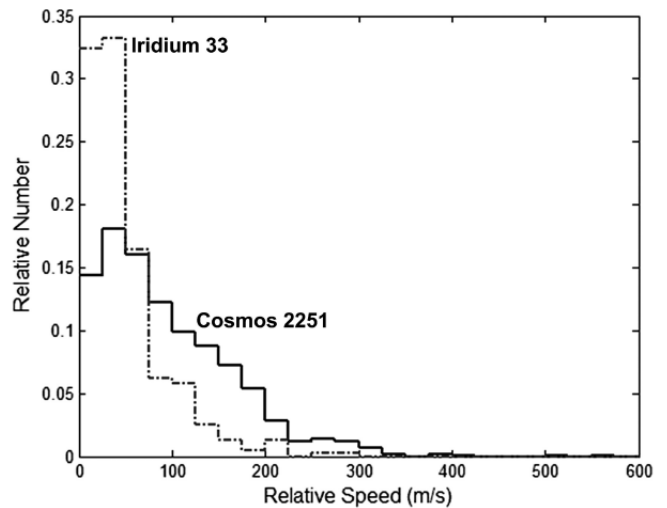


Рисунок 6: Распределение относительной скорости помещенных в каталог фрагментов от Иридиума (пунктирный график) и Космоса (сплошной график). Поскольку начальная скорость спутников составляла около 7.5 км/с, относительные скорости подавляющего большинства фрагментов составляют только пару процентов от их нынешней орбитальной скорости. По вертикальной оси отложено относительное число фрагментов, а по горизонтальной оси – относительная скорость (м/с).

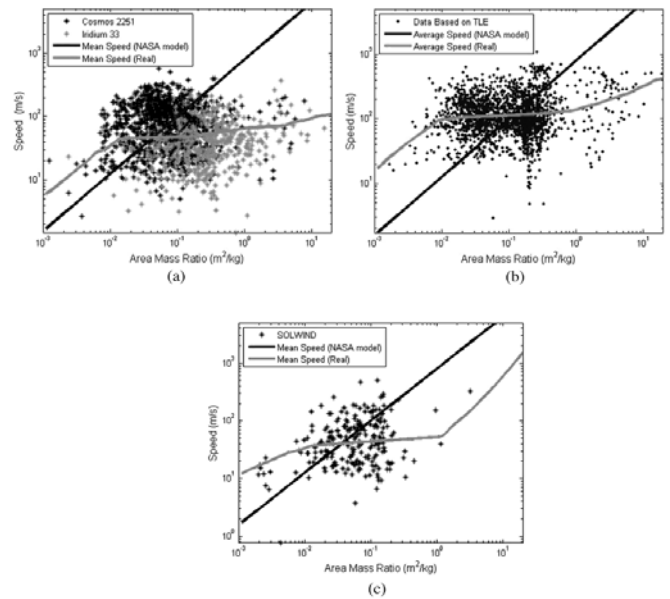


Рисунок 7: Распределения по А/М и по относительным скоростям. Точки на графике соответствуют истинным значениям для фрагментов: (а) от соударения Иридиум-Космос (слева наверху), (b) от распада Феньчжуна (справа наверху) и (с) от развала Солвинда (в центре снизу). Темная линия указывает на связь между относительной скоростью и значениями А/М, предсказанную моделью НАСА. Светлая линия представляет собой локально взвешенную среднюю скорость. По вертикальной оси каждого из трех графиков отложена относительная скорость (м/с), а по горизонтальной – отношение А/М (м²/кг). В окнах графиков указаны следующие обозначения: (а) темные точки – данные для Космоса, светлые точки – данные для Иридиума; темная линия – средняя скорость по модели НАСА, светлая линия - реальная средняя скорость; (b) точки соответствуют данным ДЛЭ, смысл линий такой же, как в (а); (с) темные точки соответствуют обломкам Солвинда, смысл линий то же, как в (а).

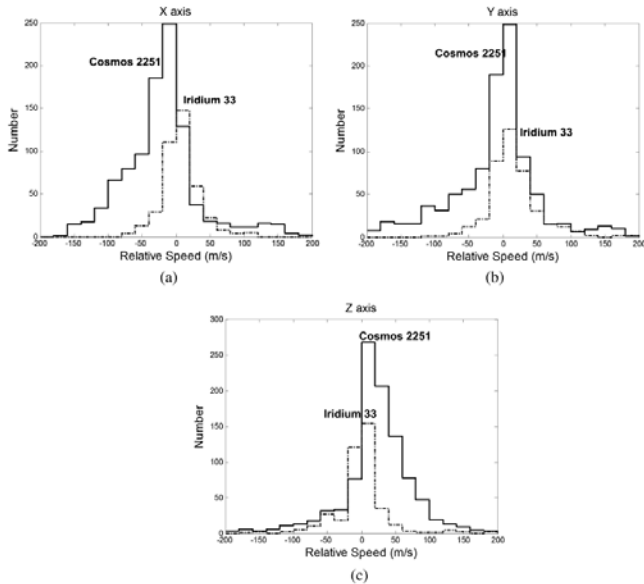


Рисунок 8: Распределение компонент относительной скорости по трем координатным осям: (а) ось X, (б) ось Y, (с) ось Z. Оси показаны на Рис.9. По вертикальной оси каждого из графиков приведено число фрагментов, по горизонтальной – относительная скорость (м/с). Гистограмма данных для Космоса выделена темной линией, а гистограмма данных для Иридиума – светлой.

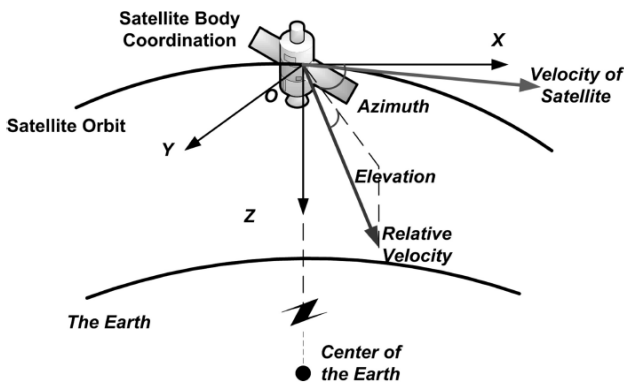


Рисунок 9: Координаты корпуса спутника, а также азимутальный и высотный углы. Обозначения, начиная с верхнего ряда, слева направо: координаты корпуса спутника, орбита спутника, азимут, скорость спутника, возвышение, относительная скорость, Земля, центр Земли.

Как отмечалось выше, на долю незамеченных фрагментов может выпасть более 20% массы Космоса. Более того, более мелкие фрагменты имеют более высокие значения A/M, чем крупные фрагменты¹⁴, и в соответствии с результатами наблюдений (см. Рис.7) можно ожидать, что эти мелкие фрагменты наберут более высокие относительные скорости, чем более крупные фрагменты. Поэтому такие невидимые фрагменты могут нести достаточно импульса, чтобы объяснить видимый недостаток полного импульса.

Если это справедливо, распределение направлений относительной скорости незамеченных фрагментов должно быть совершенно иным, чем то, что наблюдается у фрагментов, занесенных в каталог. Использование закона сохранения импульса для определения распределения относительной скорости у незамеченных фрагментов может оказаться полезным для уточнения моделей мусора, образованного при разрушении небесных тел.

ВРЕМЯ ЖИЗНИ И ЭВОЛЮЦИЯ ОРБИТЫ ФРАГМЕНТОВ ИРИДИУМА-КОСМОСА

Подсчет времени жизни и эволюции орбиты занесенных в каталог фрагментов столкновения Иридиума и Космоса полезен для понимания долгосрочной опасно-

сти, какую они представляют для других объектов.

Полуаналитический алгоритм определения времени жизни разработан для расчета времени жизни на орбите фрагментов, образованных в этом событии¹⁵. В число исходных данных для этого алгоритма входят расчетные значения A/M фрагментов, опубликованные данные ДЛЭ фрагментов и детальная модель атмосферы (NRLMSIS 00). Информация о солнечном потоке (F107) и данные по геомагнитному индексу (KP) за последние четыре солнечных цикла усредняются и также служат в качестве исходных данных для модели атмосферы.

Алгоритм подсчитывает изменения большой оси и эксцентricность орбиты каждого фрагмента, принимая во внимание атмосферное торможение и так называемые J2- возмущения, связанные с несферичностью Земли. Расчеты затем определяют, какие фрагменты уходят со временем. Проверка этого алгоритма с известными временами жизни фрагментов от разрушения Ариана в 1985 году показывает, что ошибки в оценке времени жизни (включая ошибки от расчетов A/M) конкретных фрагментов составляют около 15%.

Результаты приведены на Рис.10. Поскольку на той высоте, где произошло столкновение, атмосферное трение мало, значительная доля созданных обломков останется на орбите в течение нескольких десятилетий. Примерно пятая часть фрагментов, попавших в каталог от этого столкновения, останутся на орбите более, чем на 30 лет. Фрагменты от спутника Космос имеют большее время жизни благодаря меньшему отношению площади к массе. Нерегулярность кривых обязана влиянию 11-летнего солнечного цикла.

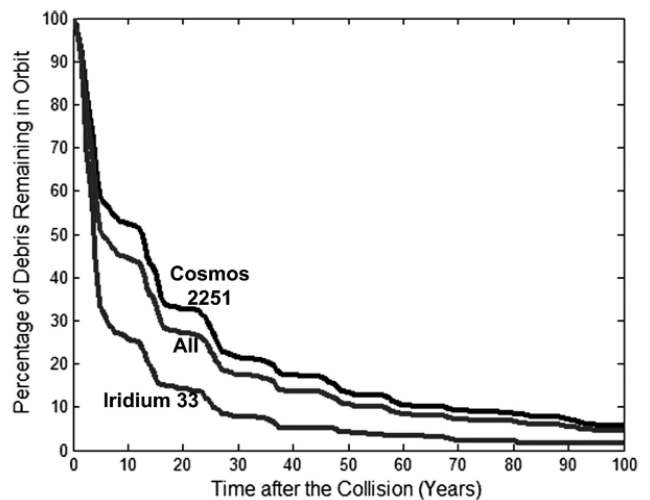


Рисунок 10: Доля обломков, которая, как ожидается, останется на орбите, в зависимости от времени после столкновения. По вертикальной оси отложено количество осколков, оставшихся на орбите (%). По горизонтальной оси отложено время, прошедшее после столкновения (годы). Верхняя кривая относится к обломкам от Космоса, нижняя – к обломкам от Иридиума. Средняя кривая учитывает все обломки.

Поскольку столкновение Иридиум-Космос произошло на несколько сотен километров выше орбиты Международной космической станции (МКС), эти осколки вряд ли приведут к большому краткосрочному риску для МКС. С другой стороны, за следующие 10-20 лет (таково предсказанное время жизни МКС) около 70% фрагментов, попавших в каталог, будут снижаться и пройдут через орбиту МКС. Это представляет небольшой, но долгосрочный риск для МКС.

Из-за относительных скоростей, полученных фрагментами в результате столкновения, фрагменты будут иметь распределение по орбитальной скорости, причем у большинства фрагментов скорость будет отличаться от орбитальной скорости исходного спутника на несколько процентов (см. Рис.6). В результате после столкновения обломки каждого спутника прежде всего разойдутся вдоль орбиты начального спутника. Несферичность Земли заставит орбиты медленно прецессировать, и со временем расходящиеся обломки образуют слой вокруг

Земли (см. Рис.11). Фрагменты остаются сконцентрированными по высоте вблизи той орбиты, по которой двигался исходный спутник. Поскольку фрагменты Космоса имеют более высокие относительные скорости и меньшее наклонение орбиты, чем фрагменты Иридиума, они будут прецессировать быстрее. В результате, орбиты фрагментов Космоса будут расходиться быстрее и распределяться вокруг Земли в течение трех лет. Однако, фрагменты Иридиума, хотя они и расходятся значительно медленнее, все еще представляют угрозу для всех спутников, проходящих через эту высоту.

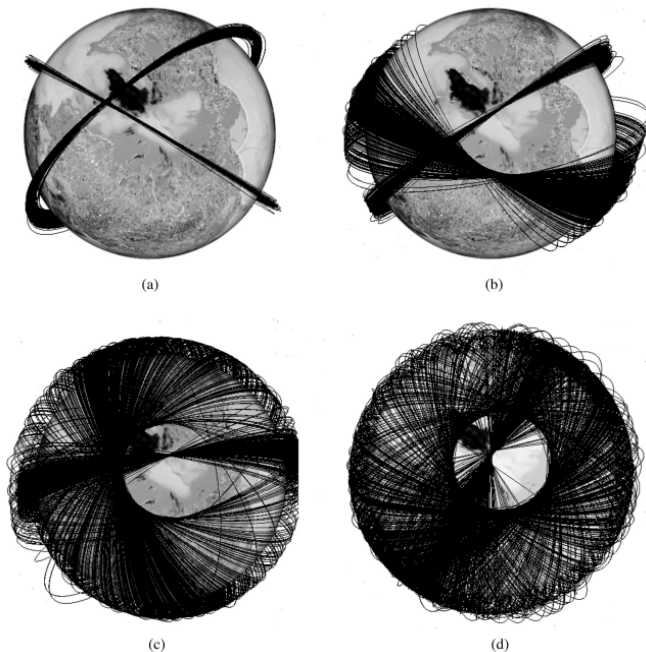


Рисунок 11: Расхождение со временем орбит обломков от столкновения. Большинство фрагментов, образованных при столкновении, имеют орбитальные скорости, близкие к скорости своего родительского спутника. Поэтому они движутся по орбитам, близким к орбите спутника-родителя. Распределение скоростей у фрагментов приводит к тому, что орбиты этих фрагментов прецессируют с разной скоростью: большинство фрагментов Космоса обладают более высокими относительными скоростями и меньшими наклонениями по сравнению с фрагментами Иридиума, так что расширение орбит фрагментов Космоса происходит быстрее. Через три года после соударения фрагменты Космоса образуют слой вокруг Земли, сконцентрированный по высоте вблизи орбиты исходного спутника Космос. (а) Картина через 7 дней после столкновения, (b) через три месяца, (c) через год, (d) через три года после столкновения.

ВЛИЯНИЕ СТОЛКНОВЕНИЯ ИРИДИУМ-КОСМОС НА КОСМИЧЕСКУЮ ОКРУЖАЮЩУЮ ОБСТАНОВКУ

В этом разделе проводится оценка краткосрочных и долгосрочных эффектов на космическую окружающую обстановку. Здесь «краткосрочный эффект» означает риск столкновения с космическими объектами, вызываемого занесенными в каталог фрагментами Иридиума-Космоса в течение года после соударения.

Краткосрочное влияние на космическую окружающую обстановку

Риск столкновения космического аппарата с другими космическими объектами пропорционален числу соединений между ними, где под словом «соединение» подразумевается событие, когда два объекта проходят один мимо другого в пределах некоторого установленного «критического расстояния».

Если анализировать риск столкновения, связанный с фрагментами соударения, количество соединений рассчитывается за период в 24 часа между всеми неповрежденными объектами на орбите (космический аппарат или

последние ступени запускающих кораблей) и всеми объектами, которые содержатся в каталоге Сети космического наблюдения по состоянию на 17 ноября 2009 года¹⁰. Для этого вычисления соединение определяется, если два объекта проходят один мимо другого в пределах 5 км.

Поскольку в каталоге имеется около 15000 объектов, алгоритм соединения использует несколько фильтров для уменьшения объема требуемого счета с учетом относительной геометрии пары объектов. Например, алгоритм отбрасывает пары объектов, высоты которых отличаются, по крайней мере, на критическое расстояние. При использовании таких фильтров расчет соединений между десятками миллионов пар объектов за период в 24 часа требует всего лишь десяти минут работы обычного персонального компьютера¹⁷.

Результат представлен на Рис.12. Всего было 3222 соединения невзаимодействующих объектов со всеми занесенными в каталог объектами за 24 часа 17 ноября 2009 года. Из них 2530 соединений зарегистрировано с объектами, которые не являются фрагментами от соударения между Иридиумом и Космосом, так что таково число соединений, какое можно ожидать, если бы столкновение Иридиум-Космос не состоялось.

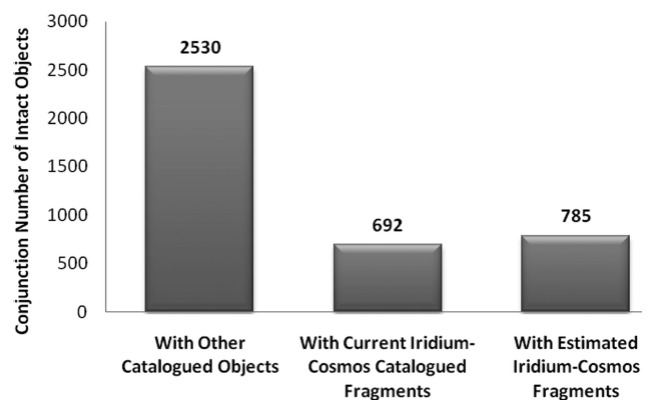


Рисунок 12: Количество соединений за сутки между неповрежденными объектами и другими объектами. Левый прямоугольник отображает число соединений неповрежденных объектов с иными, которые не являются фрагментами от столкновения Иридиума с Космосом. Средний и правый прямоугольники показывают число соединений с объектами, которые в настоящее время занесены в каталог в качестве фрагментов столкновения Иридиум-Космос, и с полным оцененным количеством фрагментов от этого столкновения, размеры которых превышают 10 см. В расчетах использовались данные из каталога Сети космических наблюдений на 17 ноября 2009 года.

Оставшиеся 692 соединения – это соединения неповрежденных объектов с занесенными в каталог фрагментами от столкновения Иридиум-Космос. Как оценено выше, грубо говоря, 13% фрагментов от столкновения Иридиум-Космос не было занесено в каталог (смотрите Табл.1); учет этих дополнительных фрагментов увеличивает число соединений от 692 до 785.

Эти результаты означают, что столкновение Иридиум-Космос привело к возрастанию на 25-30% риска для неповрежденных объектов столкнуться с помещенными в каталог объектами.

Рис.13 показывает распределение по высоте этих соединений. Оно показывает, что риск столкновения неповрежденных объектов с всеми объектами, помещенными в каталог, в полосе высот 700-800 км (которая уже была наиболее угрожающей областью космического пространства) удвоился после того, как произошло столкновение Иридиума с Космосом. Число соединений на орбите МКС (на высоте ниже примерно 450 км) не очень велико, поскольку время жизни объектов на таких высотах мало из-за большого атмосферного трения.

Долгосрочное влияние на космическую окружающую обстановку

Отрицательное долгосрочное влияние фрагментов Иридиума-Космоса на окружающую космическую обстановку – вот главная забота всех стран, делящих космическое пространство. В этом разделе оцениваются долгосрочное растущее число столкновений между неповрежденными объектами и фрагментами, имеющими размер более 10 см, от столкновения Иридиум-Космос.

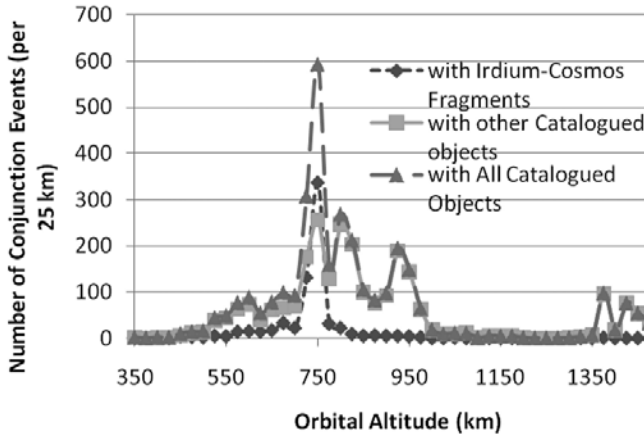


Рисунок 13: Распределение по высоте числа соединений между неповрежденными объектами и объектами, помещенными в каталог (по состоянию на 17 ноября 2009 года). По вертикальной оси отложено число событий соединения (в диапазоне высот 25 км), а по горизонтальной оси – высота орбиты (км). На графике со штрихованной линией и точками приведены данные по соединениям с фрагментами Иридиума-Космоса, серая линия с квадратами соответствует соединениям с остальными объектами, занесенными в каталог, а сплошная линия с треугольниками относится к соединениям со всеми объектами, занесенными в каталог.

Для учета риска от столкновений используются две оценки частоты столкновений включенных в каталог неповрежденных объектов со всеми занесенными в каталог объектами. Одна оценка следует из числа наблюдаемых событий столкновений. Вторая вытекает из анализа НАСА с применением модели НАСА LEGEND¹⁸. Частота столкновений в этом анализе подсчитана на первое января 2006 года, когда стартовали вычисления НАСА.

Для первой оценки за последние 20 лет набралось три столкновения фрагментов с неповрежденными объектами и одно с участием только неповрежденных объектов (Таблица 3). Эти результаты были использованы для подсчета средней частоты столкновений за последние 20 лет⁹. В верхней строке Таблицы 4 показано среднее число столкновений в год с учетом этой средней частоты событий.

Для второй оценки использован анализ НАСА 2006 года, где оценены потенциальные столкновения между объектами с размерами свыше 10 см в течение следующих 200 лет⁹. НАСА оценило, что за следующие 200 лет среднее число столкновений между двумя неповрежденными объектами составит 4.9, а между неповрежденными объектами и фрагментами вырастет до 10.8. Фактически все эти столкновения произойдут на низкой околоземной орбите (НОО). Подсчеты НАСА сделаны в предположении, что на орбите находятся 7667 объектов, примерно 2500 из которых являются неповрежденными. Так как количество объектов на НОО, занесенных в каталог, составило фактически 6100 в 2006 году, эти результаты были изменены в соответствие с таким количеством объектов²⁰. Если допустить, что дополнительные 1600 объектов являются фрагментами, число столкновений между неповрежденными объектами останется неизменным, но число столкновений между неповрежденным объектом и фрагментом уменьшится за ближайшие 200 лет до 7.5 [10.8(6100 - 2500)/(7667 - 2500) = 7.5]. Как следует из анализа НАСА, частота столкновений со временем слегка вырастет, но останется относительно стабильной за следующие 200 лет. Среднее число столкновений на 1 января 2006 года предполагается неизменным в течение 200 лет. Результаты приведены на нижней строке

Таблицы 4.

Таблица 3: История столкновений между объектами, занесенными в каталог¹.

Дек. 1991	Бездействующий спутник Космос 1934 (номер в каталоге 18985) столкнулся с обломками спутника Космос 296 (номер 13475).
Июль 1996	Активный французский спутник Сериз (номер 23606) столкнулся с обломками ступени ракеты Ариан (номер 18208).
Янв. 2006	Корпус ракеты США (номер 7219) столкнулся с занесенными в каталог обломками ступени китайской ракеты (номер 26207).
Февр. 2009	Активный спутник Иридиум 33 (номер 24946) столкнулся с неработающим спутником Космос 2251 (номер 22675).
Н.Л.Джонсон, "История орбитальной фрагментации спутников", 14 ^е издание, Космический Центр имени Линдона Джонсона, Хьюстон, США.	

Таблица 4: Оценки среднего количества столкновений за один год между занесенными в каталог объектами по состоянию на 1 января 2006 года. В первом столбце учтены столкновения между неповрежденными объектами (НПО-НПО), а во втором – столкновения неповрежденно-го объекта с фрагментом (НПО-Ф).

	НПО-НПО	НПО-Ф	Сумма
Число фактических событий	0.050	0.15	0.20
Оценки НАСА	0.025	0.038	0.062

Полная частота столкновений, полученная НАСА (смотри колонку "Сумма" в Табл.4), в три раза меньше, чем оценено из наблюдавшихся столкновений. Можно допустить, что это связано с большим ростом фрагментов от столкновений с 2006 года, но ни в одном из наблюдавшихся столкновений не содержались эти дополнительные фрагменты. Более того, населенность фрагментами на 1990-е годы была на 10% меньше, чем в 2006 году, и этот фактор в среднем значении за 20 лет был использован для расчета верхней строки Таблицы 4. Для демонстрации того, что оцененная из отчета НАСА частота столкновений представляет собой низшую границу фактической исторической частоты столкновений, следующие расчеты показывают, что эти частоты не согласуются достаточно хорошо с наблюдающимся числом столкновений.

В соответствии с теорией вероятности, если λ представляет среднее число столкновений за данный интервал времени, то вероятность появления k столкновений за такой же интервал времени дается распределением Пуассона:

$$P_{\lambda}(k) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!} \quad (2)$$

Эти вероятности подсчитываются для разных значений k в предположении о скорости соударений, принятой НАСА. Если оценки НАСА о средней скорости столкновений правильны, то среднее количество столкновений между неповрежденными объектами и всеми объектами равно 1.57²¹ за временной период 20 лет вместо фактически наблюдаемой величины, равной 4. Рис.14 показывает вероятность увидеть разные количества столкновений за 20 лет в предположении, что средняя скорость столкновений рассчитана НАСА по уравнению (2). В таком случае вероятность увидеть четыре столкновения за 20 лет составит около 3%, а это заставляет считать, что анализ НАСА может недооценивать вероятность столкновений.

Недооценка может частично может стать результатом неопределенностей определения размера и формы объектов в космосе и того факта, что модель НАСА не принимает в расчет того, как вероятность столкновения изменяется в зависимости от расположения двух объектов. Влияние форм рассмотрено в Приложении Б. Этот анализ показывает, что, например, для объектов с той же

самой площадью поверхности вероятность столкновения между двумя сферами значительно меньше, чем между двумя длинными стержнями. Поэтому сведение всех объектов к сферам в моделях столкновения должно уменьшать реальные вероятности столкновений.

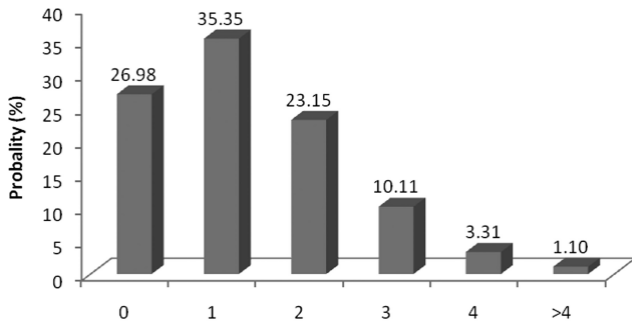


Рисунок 14: Вероятность увидеть различное число столкновений за 20 лет в предположении принятой НАСА вероятности столкновения, приведенной в табл. 4 (0.0785). По вертикальной оси отложена вероятность (%), по горизонтальной – число столкновений за 20 лет. Столбики иллюстрируют вероятность появления шести вариантов числа столкновений (0, 1, 2, 3, 4 и больше, чем 4).

В частности, важно отметить, что модель НАСА LEGEND не рассматривает столкновения с придатками спутников (например, с антеннами или солнечными батареями²²). Впрочем, столкновения между придатками спутников и неповрежденными объектами могут привести к катастрофическим событиям, образующим большое число обломков. Действительно, в столкновении Иридиум-Космос могли участвовать солнечные батареи Иридиума. Если исключить столкновения с участием придатков (случай с Сериз и, возможно, столкновение Иридиум-Космос), частота столкновений согласуется с оценками НАСА, поскольку вероятность двух столкновений за последние 20 лет превышает 20% (смотрите Рис.14).

С другой стороны, используя частоту столкновений из верхней строки Табл.4 (0.20), мы получим, что существует 20%-ная вероятность увидеть четыре столкновения. Для приведенного ниже анализа два набора частоты столкновений использованы в Табл.4 в качестве верхней и нижней границы для сравнения.

В качестве первого шага при оценке будущих столкновений рассчитано количество соединений между неповрежденными объектами и другими занесенными в каталог неповрежденными объектами по состоянию на 1 января 2006 года. Результаты показаны на Рис.15. Для сравнения также было подсчитано количество соединений на 17 ноября 2009 года, которое приведено раньше на Рис.12. Резкое увеличение соединений обязано быстрому росту числа объектов в каталоге Сети космических наблюдений от, примерно, 9400 до 15000 за этот промежуток времени. В это увеличение каталога вошли рост количества неповрежденных объектов примерно на 500 и фрагментов примерно на 5000.

Полное среднее количество столкновений между неповрежденными объектами и фрагментами от столкновения Иридиум-Космос оценивается таким образом

$$C = \int \gamma \frac{N_c}{N_{2006}} K dt \quad (3)$$

где N_c – число соединений за одни сутки между неповрежденными объектами и помещенными в каталог фрагментами столкновения Иридиум-Космос, число которых можно определить из Рис.12; γ – доля фрагментов Иридиум-Космос, оставшихся на орбите, (см. Рис. 10); N_{2006} – число соединений за сутки между неповрежденными объектами и помещенными в каталог фрагментами по состоянию на 1 января 2006 года, что можно найти из Рис.15; K – среднее количество столкновений в год между неповрежденными объектами и фрагментами, которое дается в Табл.4.

Уравнение (3) предполагает, что орбиты неповрежденных объектов не изменятся за время интегрирования. Это консервативное допущение, так как количество неповрежденных объектов растет из-за новых космических

запусков, а это увеличивает количество столкновений. Кроме того, Уравнение (3) не содержит фрагменты вторичных столкновений, вызванных столкновениями с первоначальными фрагментами Иридиум-Космос.

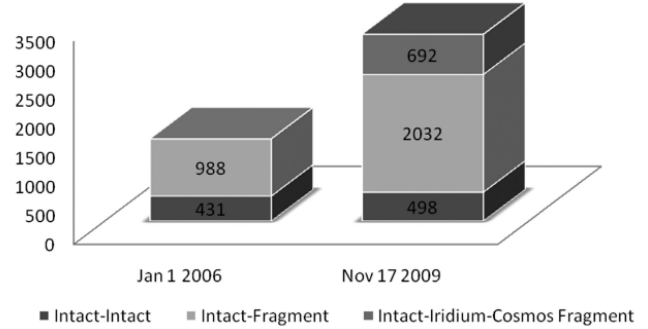


Рисунок 15: Количество соединений разного типа за сутки 1 января 2006 года и 17 ноября 2009 года. По вертикальной оси откладывается количество соединений, на горизонтальной оси приведены две даты: 1 января 2006 года и 17 ноября 2009 года. Изображенные кубы состоят из двух или трех частей. Темные части соответствуют соединениям неповрежденных объектов и неповрежденных объектов (их 432 слева и 459 справа). Светлосерые части - количество соединений неповрежденных объектов и фрагментов (их 983 слева и 2032 справа). Темно-серые части (только справа): 692 соединения неповрежденных объектов с фрагментами Иридиума-Космоса.

Уравнение (3) используется для подсчета общего среднего числа столкновений между неповрежденными объектами и помещенными в каталог фрагментами Иридиум-Космос для двух значений вероятности столкновений, представленных в Табл.4. Результаты приведены на Рис.16.

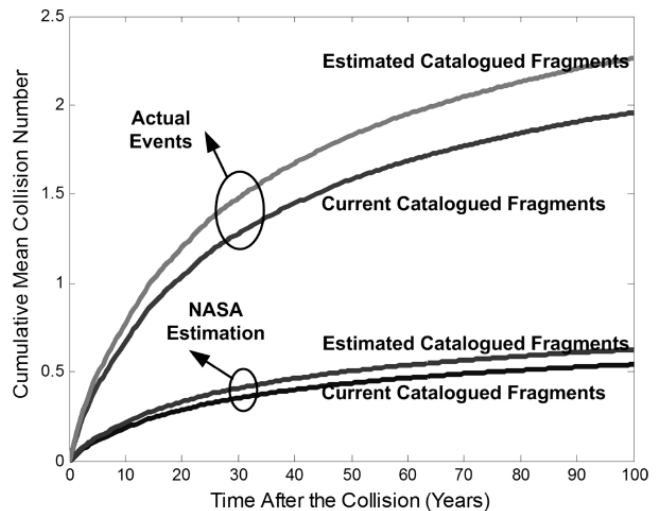


Рисунок 16: Суммарное среднее количество столкновений между неповрежденными объектами и фрагментами Иридиум-Космос с размером более 10 см. Две нижние кривые предполагают более низкое значение вероятности столкновения из данных, представленных в Табл.4 (0.062), а две верхние кривые предполагают более высокое значение (0.20). Для каждой пары кривых нижняя представляет количество фрагментов Иридиум-Космос, включенных сейчас в каталог, а верхняя (серая) предполагает возможное фатальное количество фрагментов с размером свыше 10 см. По вертикальной оси отложено итоговое среднее число столкновений, а по горизонтальной – количество лет прошедших с момента столкновения. Около каждой пары кривых приведены следующие обозначения: сверху - оценка количества фрагментов, занесенных в каталог, снизу – текущее количество фрагментов, занесенных в каталог. Сверху указано стрелкой: фактические события; снизу указано стрелкой: оценка НАСА. Рис.16 показывает, что в течение ближайших ста лет среднее число столкновений между неповрежденными объектами и крупными фрагментами Иридиума-Космоса составит 0.5-2. Кроме того, если произойдет столкнове-

ние на орбите, это, по-видимому, случится в течение 30 лет после столкновения Иридиума и Космоса, поскольку за это время, как ожидается, 80% фрагментов уйдут с орбиты. Как отмечалось ранее, поскольку количество неповрежденных объектов, как ожидается, вырастет со временем, проведенная оценка служит нижней границей, хотя и дает указание о воздействии этих фрагментов на космическую обстановку.

Более того, ожидается, что число фрагментов Иридиума-Космоса, имеющих размер в диапазоне 1-10 см, будет примерно в 50 раз больше, чем число фрагментов, превышающих по размеру 10 см. В результате ожидается много десятков столкновений между неповрежденными объектами и фрагментами Иридиума-Космоса, имеющими размер более 1 см.

Если масса и скорость при столкновении достаточно велики, при столкновениях с фрагментами, размер которых превышает 10 см, может передаваться кинетическая энергия, достаточная для полного разрушения неповрежденного объекта. Это создаст облако фрагментов, что вызовет аналогичный риск новых столкновений. В принципе, если иметь достаточно хорошую информацию о слежении, можно предсказывать близкие соединения между объектами, занесенными в каталог, и в ряде случаев предпринять шаги для уменьшения возможности столкновения.

Хотя у фрагментов с размером около сантиметра вряд ли хватит массы, чтобы заставить разрушиться неповрежденный объект, они способны серьезно повредить или вывести из строя работающий спутник. Поскольку фрагменты такого размера слишком малы, чтобы за ними можно было надежно наблюдать, не удастся предсказать возможные столкновения. Более того, от фрагментов размером свыше одного сантиметра, сталкивающихся с объектом при орбитальной скорости, нельзя будет эффективно защититься. Так что фрагменты такого размера несут в себе особую угрозу, поскольку они многочисленны, обладают разрушительным потенциалом и за ними невозможно следить.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ столкновения Иридиум-Космос с использованием наблюдательных данных об облаке фрагментов от американской Сети космических наблюдений приводит к выводу, что столкновение создало, грубо говоря, 1500 фрагментов размером свыше 10 см. Число фрагментов размером более 1 см превышает, по-видимому, 100 000.

Примерно пятая часть фрагментов, занесенных в каталог, останутся на орбите, как ожидается, в течение более 30 лет, а примерно 5% фрагментов будут иметь сроки пребывания на орбите, превышающие 100 лет. Фрагменты от Иридиума будут иметь в среднем значительно меньшее время жизни, чем фрагменты Космоса, в связи с тем, возможно, что фрагменты от солнечных батарей Иридиума имеют относительно высокое отношение площади к массе.

Основная часть спутника Иридиума, как кажется, осталась неповрежденной. Это наводит на мысль, что Иридиум испытал скорее скользящий удар, нежели лобовое соударение с корпусом спутника.

Поскольку образовалось большое количество фрагментов, столкновение Иридиум-Космос увеличило на 25% риск того, что с неповрежденными объектами на орбите будут сталкиваться в течение года после основного соударения объекты размером более 10 см. Наибольшее увеличение риска столкновений произойдет на высотах 700-800 км, которые уже были наиболее опасными районами. Однако этот мусор не увеличит значительно риск для Международной космической станции, которая находится на значительно меньшей высоте.

Количество столкновений, которые произошли за прошедшие 20 лет между занесенными в каталог объектами, предполагает более высокую вероятность таких событий (для заданного числа объектов, занесенных в каталог, и поэтому для данного количества соединений), чем предполагалось в ряде прошлых исследований. Это наводит на мысль, что столкновения в космосе будут происходить более часто, нежели ожидалось ранее.

Более высокая вероятность столкновений может последовать от недооценки размера объектов на орбите, а

также из-за неудачи учесть форму этих объектов, которая, как было показано, значительно влияет на вероятность столкновения. Точная оценка вероятности столкновения важна для понимания долгосрочной эволюции космического мусора.

Кроме того, крупное возращение космического мусора от событий с разрушением удвоило число ежедневных соединений по сравнению с 2006 годом. Как рост количества соединений, так и более высокая вероятность столкновений (для данного числа соединений) приведут к увеличению количества столкновений в течение следующих лет по сравнению с предсказаниями ранее проведенных исследований.

Среднее число столкновений по оценкам считается равным 0.5-2 за следующие 100 лет. Это относится к столкновениям между неповрежденными объектами и фрагментами Иридиума-Космоса, имеющими размер свыше 10 см (в консервативном предположении, что количество неповрежденных объектов не меняется). Поскольку число фрагментов с размером 1-10 см в 50 раз больше числа фрагментов с размером более 10 см, оценка показывает, что произойдет много десятков столкновений неповрежденных объектов с фрагментами Иридиум-Космоса, превышающими по размеру 1 см.

Наш анализ имеет также последствия для стандартной модели разрушения, принятой НАСА. Найдено, что итоговое количество фрагментов в зависимости от размера фрагмента следует степенному закону, как указывает и модель НАСА, но параметры степенного закона зависят от характера разрушения. Модель НАСА может, поэтому, дать ошибочное предсказание о мусоре от конкретного события в разных диапазонах размеров обломков.

Расчеты указывают, что стандартная модель НАСА, вероятно, некорректна при оценке скорости фрагментов с учетом А/М. В этом случае не похоже, чтобы модель давала верную функциональную форму.

Эти вопросы важны для применения модели НАСА в случае долгосрочного моделирования. Включение данных от событий разрушения за последние годы должно привести к улучшению модели НАСА.

Событие Иридиум-Космос высветило тот факт, что столкновения в космосе носят не только теоретический характер, а представляют реальный риск для космического имущества. Международное сообщество предпринимает шаги в правильном направлении путем разработки правил уменьшения мусора для повседневной деятельности в космосе. Эти правила были одобрены ООН и должны выполняться всеми странами, разделяющими космическое пространство.

Однако, даже если следовать этим мерам, населенность космоса мусором скорее всего будет расти в отдельных областях пространства. Расчеты предполагают, что риск столкновений в космосе может оказаться выше, а заселенность мусором может расти более быстро, чем ожидалось ранее. Предотвращение этого потребует сокращение количества мусора на орбите, что, в свою очередь, может потребовать удаления с орбиты крупных массивных объектов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор хочет поблагодарить Дэвида Райта и профессора Хай Хуаня за обсуждения и замечания к этой статье.

Автор ценит поддержку со стороны Фонда Джона и Катерины Рокфеллеров в виде гранта Программе изучения мира в Корнеллском университете. Ранние этапы работы были частично поддержаны грантом Фонда Рокфеллеров Космической рабочей группе при Бейянгском университете в Пекине.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. N.L. Johnson et al., "NASA New Breakup Model of Evolve 4.0," *Advances in Space Research* 28 (2001): 1377-1384.
2. G. Stansbery et al., "A Comparison of Catastrophic On-Orbit Collisions." Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, Wailea, Maui, Hawaii, 2008.
3. J.-C.Liou and N.L.Johnson, "Characterization of the Cataloged Fengyun-1C Fragments and Their Long-term Effect on

the LEO Environment," *Advances in Space Research*, 43 (2009).

4. Для добавочной информации о ДЛЭ смотрите http://en.wikipedia.org/wiki/Two-line_element_set

5. Этими прошлыми событиями являются разрушение Феньчжуня 1С (международный идентификационный номер –МИН 1999-025) в 2007 году, разрушение ракетного корпуса Ариана (МИН 1994-29В) в 1996 году и разрушение Р-78 (Солвинд) (МИН 1979-017А) в 1985 году.

6. E.G.Stansbery, "Growth in the Numbers of SSN Tracked Orbital Objects," (paper presented at the 55th International Astronautical Congress, Vancouver, Canada, 2004).

7. Отношение подсчитано на основе доклада о космической ситуации www.space-track.org, on 7 July 2009 (доступ получен 7 мая 2010 года).

8. H. Klinkrad, *Space Debris Models and Risk Analyses* (Verlag: Springer, 2006).

9. Y.-I. Xu et al., "A Statistical Site Estimation Model for HAYSTACK and HAX Radar Detection." (paper presented at the 54th International Astronautical Congress, 2005).

10. T. Wang and H. Huang, "Estimating Orbital Lifetimes of Space Objects from Two-line Elements," (paper presented at the 3rd IAASS Conference, Rome, 2008).

11. Детали модели атмосферы можно найти в <http://www.nrl.mil/research/nrl-review/2003/atmospheric-science/picone/> (доступ с 7 мая 2010 года).

12. L. Anselmo and C. Pardini, "Analysis of the Consequences in Low Earth Orbit of the Collision between Cosmos and Iridium 33," Paper presented at the 21st International Space Flight Symposium, Toulouse, France, 28 September – 2 October 2009.

13. Ось z системы координат всегда направлена от фрагмента вдоль вектора земного радиуса к центру Земли. Ось x системы координат идет по направлению вектора скорости и она перпендикулярна радиусу-вектору (если эксцентриситет орбиты равен нулю, тогда направления вектора скорости и оси x совпадают). Ось y перпендикулярна плоскости орбиты.

14. Например, для сферы с радиусом r, величина A/M обратно пропорциональна r и поэтому возрастает с уменьшением r.

15. T. Wang and H. Huang, "New Method to Determine Close Approach Between Satellites," (paper presented at the 3rd IAASS Conference, Rome, 2008). Доступно по адресу <http://wangting.org/pages/papers/close%20approach.pdf> (доступ с 21 июня 2010 года).

16. Для анализа, приведенного в статье ниже, данные каталога Сети космического наблюдения и данные, использованные в последующих вычислениях, приходится на один и тот же день – на 17 ноября 2009 года.

17. T. Wang and H. Huang, "New Method to Determine Close Approaches Between Satellites," (paper presented at the 3rd IAASS Conference, Rome, 2008).

18. J. C. Liou and N. L. Johnson, "Instability of the Present LEO Satellite Populations," *Advances in Space Research* 41 (2008): 1046-1053.

19. Поскольку с начала космической деятельности наблюдалось всего четыре столкновения с неповрежденными объектами, люди могут поспорить, что надо использовать больший промежуток времени, нежели двадцать лет, рассмотренные нами. Однако, скорость столкновений несколько десятков лет тому назад была мала из-за меньшего количества объектов на орбите. Например, в 1970 году на орбите находилось всего около 700 объектов, а в 1980 году – 1700 по сравнению с 3000 в 1990 году и с 4500 в настоящее время. Кроме того, если бы произошло столкновение с участием неповрежденного объекта, оно могло бы остаться незамеченным, так как вычислительные возможности были низкими, а алгоритмы столкновения – неэффективными до 1990 годов. Следует учесть, что было обнаружено семь столкновений после 1997 года и ни одного до этого (столкновение Космоса 1934 в 1991 году не было обнаружено до 2005 года, а три других возможных столкновений были обнаружены в 1997, 2002 и 2008 годах; как считается, это были столкновения с необнаруженными объектами.). Более того, даже если эти четыре столкновения рассматриваются как случившиеся за 25-30 лет, это все равно приведет к вероятности столкновений, которая в два раза превышает используемое НАСА значение.

20. На 1 января 2006 года было 532 объекта, внесенных в каталог, чьи орбиты не публиковались. В их число входят американские военные спутники и связанные с ними фрагменты, а также корпуса ракет, оставшиеся от их запуска. Многие из этих объектов находятся на низкой околоземной орбите, но из-за отсутствия информации об орбите они не включены в последующие расчеты.

21. Существуют несколько тысяч фрагментов, которые отслеживаются Сетью космического наблюдения, но не включены в каталог, так как неизвестен их источник. Эти фрагменты использованы в модели НАСА LEGEND. Поскольку не обнаружено столкновений между неповрежденными объектами и этими отслеживаемыми, но не занесенными в каталог объектами, удобно использовать скорость столкновений всех объектов, которые рассматриваются НАСА и составляют 1.57 вместо использования скорости столкновений 1.2.

22. J.C. Liu, "Обновленные оценки окружающего орбитального мусора на низкой орбите," *Orbital Debris Quarterly News* 14 (2010). В этой статье приводятся аргументы в пользу того, что придатками спутников можно пренебречь, так как столкновения между придатками спутников и мусором могут вызвать проблемы для операционных нагрузок, но дадут пренебрежимо малый вклад в рост численности мусора. Однако, как указано в тексте, столкновения между придатками и неповрежденными объектами могут привести к появлению большого количества мусора.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ СКОРОСТИ ФРАГМЕНТОВ

Обсуждается метод расчета относительных скоростей фрагментов, созданных столкновением между двумя объектами. Предполагается, что спутник отслеживался Сетью космического наблюдения, так что его орбита точно известна. Поскольку время столкновения известно, положение r_s и скорость V_s космического аппарата в момент столкновения могут быть определены с большой точностью.

Но слежение за фрагментами не может начаться до некоторого момента после столкновения, так что их орбиты сразу после столкновения не известны достаточно хорошо для точного определения их положений и скоростей в этот момент. Здесь описан метод определения начальных относительных скоростей фрагментов.

Прежде всего, применяются ДЛЭ для определения траектории каждого занесенного в каталог фрагмента. Далее, предполагается, что фрагмент во время столкновения находился в точке вычисленной орбиты, наиболее близкой к положению космического аппарата в это время (смотрите рис. А-1).

Положение ближайшей точки равно r_{deb} , а соответствующая скорость – V_{deb} . Из-за неопределенности с орбитой r_{deb} и r_s обычно не совпадают, для величин r_{deb} и V_{deb} используется следующий метод.

Координатная система спутника¹ может быть установлена при помощи r_s и V_s . В системе координат спутника ошибка r_{error} в положении фрагмента и его относительной скорости V_{rel} могут быть выражены следующим образом:

$$\begin{aligned} r_{error} &= C_{oi} (r_{deb} - r_s) \\ V_{rel} &= C_{oi} (V_{deb} - V_s) \end{aligned} \quad (1)$$

где C_{oi} – матрица перехода от инерциальной системы координат к системе координат спутника.

В идеальной ситуации член r_{error} будет равен нулю. Но обычно он не обращается в ноль благодаря ошибкам при расширении орбиты. Выбор положения фрагмента в момент столкновения устраняет большинство ошибок вдоль траектории, то-есть $r_{error,x}$, как и точка на орбите, ближайшая к r_s . Поэтому необходимо только убрать остальные компоненты – $r_{error,y}$ и $r_{error,z}$.

Как отмечалось выше, орбита космического аппарата известна точно и требуется короткое возвращение по орбите ко времени столкновения в предположении, что r_s точно известно, а r_{deb} оказывается единственным источником ошибок для r_{error} .

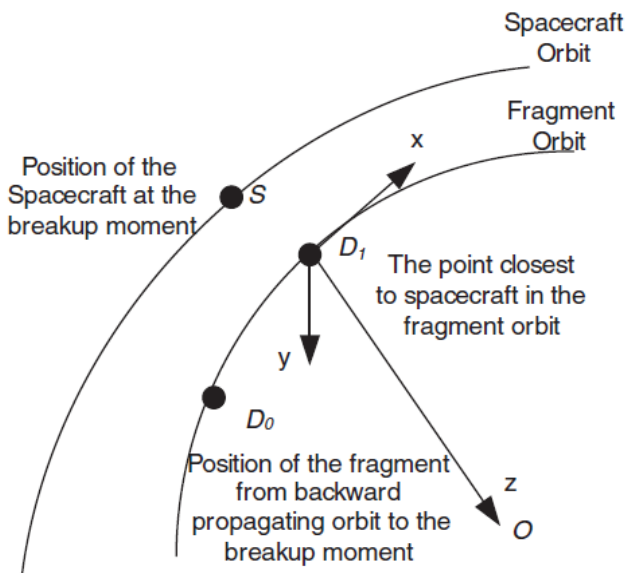


Рисунок А-1: Соотношение между орбитой космического аппарата и орбитой фрагмента в момент разрушения. Точка S на внешней орбите на рисунке определяет положение космического аппарата в момент столкновения. Точка D₁ (на орбите фрагмента) находится ближе всего к космическому аппарату. Точка D₀ определяет положение фрагмента на момент столкновения.

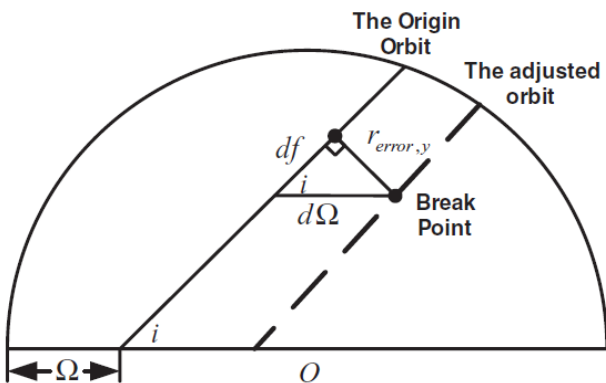


Рисунок А-2: Схема корректирования орбит. Надписи сверху вниз: Начальная орбита, скорректированная орбита, Точка удара.

Компонента $r_{error,z}$ определяется ошибками большой полуоси и эксцентриситета орбиты фрагмента. Атмосферное трение и солнечное давление – вот главные источники этих ошибок. В стандартной модели SGP4, используемой для определения орбиты на основе ДЛЭ, V является параметром ДЛЭ, отражающим влияние атмосферного трения и солнечного давления. В расчеты вается путем подгонки орбиты спутника под наблюдательные данные, набираемые за несколько дней, и поэтому только отображает эти возмущения за относительно короткое время. Однако в ряде случаев орбита должна быть пересчитана в прошлое на несколько десятков дней и тогда использование V приведет к большим ошибкам. Изменение V приведет к изменениям большой полуоси, эксцентриситета и, следовательно, $r_{error,z}$. Поэтому применяется метод итераций по Ньютону для минимизации $r_{error,z}$ путем варьирования V с использованием значений V от ДЛЭ в качестве исходных данных.

Для удаления $r_{error,y}$ прежде всего переведем r_{deb} и V_{deb} в классические орбитальные элементы. Из геометрии следует, что $r_{error,y}$ определяется прямым восхождением восходящего узла Ω и наклоном орбиты i . При рассмотрении эффектов J₂-пертурбаций Ω является “быстрой” переменной, обычно меняющейся на несколько градусов в день в то время, как изменение i на несколько

градусов обычно требует нескольких лет. Расчеты показывают, что ошибки Ω могут превышать ошибки i в десятки раз. Поэтому разумно предположить, что $r_{error,y}$ зависит только от Ω . В результате $r_{error,y}$ удаляется при изменении Ω . На Рис. А-2 проиллюстрирована корректировка орбиты. Как видно из рисунка, изменение Ω приведет к вариациям истинной аномалии f . Из геометрических соображений можно выразить $d\Omega$ и df :

$$d\Omega = \pm \frac{\sin(r_{error,y} / r)}{\sin i} \tag{2}$$

$$df = \pm \arccos\left(\frac{\cos d\Omega}{\cos(r_{error,y} / r)}\right)$$

Здесь r – расстояние от центра Земли до фрагмента. Скорректированные значения Ω и f можно получить несколькими итерациями ур-ия (2). В предлагаемом алгоритме сначала надо скорректировать V для уменьшения $r_{error,z}$. Следующий шаг заключается в использовании уравнения (2) для устранения $r_{error,y}$ и определении элементов орбиты на момент столкновения. Последний шаг – это возвращение от орбитальных элементов к скорости V_{deb} и затем использование уравнения (1) для расчета относительной скорости V_{rel} .

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б.
ВЕРОЯТНОСТЬ СТОЛКНОВЕНИЯ ОБЪЕКТОВ
С РАЗНОЙ ФОРМОЙ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ**

Для столкновений крупного объекта с небольшой частицей вероятность столкновения почти не связана с их формой. Но для объектов сходных размеров форма может сильно повлиять на вероятность столкновения.

Рассел предложил метод расчета вероятностей столкновения объектов с конкретным космическим аппаратом, имеющим усложненную форму². Его метод широко используется для избегания столкновений. Но его метод предполагает, что ориентация корабля задана, и поэтому метод нельзя использовать для оценки долгосрочной вероятности столкновений, где предполагается случайная ориентация космического аппарата. Кесслер рассчитал долгосрочную вероятность столкновения объекта в предположении, что объект эквивалентен сфере, имеющей такую же площадь поверхности, как и объект. Такое предположение основано на допущении, что случайно распределенная ориентация исключит влияние формы³.

В этом разделе использовано моделирование методом Монте Карло, чтобы понять, как долговременная вероятность зависит от формы сталкивающихся объектов. Результаты указывают, что предположения Кесслера не корректны.

Б.1. Метод

Метод Монте Карло использован для изучения вероятностей столкновения сфер и цилиндров, имеющих одну и ту же площадь поверхности. Расчет можно разделить на три этапа:

1. Создается двухмерный массив, а его элементы поначалу установлены равными нулю. Массив представляет собой двухмерное поле.
2. Выбираются два объекта (каждый в виде сферы или цилиндра определенной формы, но всех одна и та же площадь поверхности) и помещаются в случайном положении, со случайным наклоном и случайным азимутом β по отношению к двумерному полю (смотрите Рис. Б-1). Объекты значительно меньше двухмерного поля.
3. Объекты проецируются на двухмерное поле и присваивается цифра всем элементам массива, которые оказываются частью спроецированных площадей (Рисунки Б-1 и Б-2). (Проекция цилиндра – это комбинация прямоугольника и двух эллипсов, а проекция сферы – это круг.) На двухмерном массиве элементы с нулем – это те, где нет объекта, элементы с единицей – это места, занятые одним объектом, а элементы с двойкой – площадь, где накладываются два

- объекта. Поэтому столкновение происходит, когда в массиве появляются элементы со значением “два”.
4. Повторяются вышеуказанные три этапа заданное количество раз и находится число столкновений.

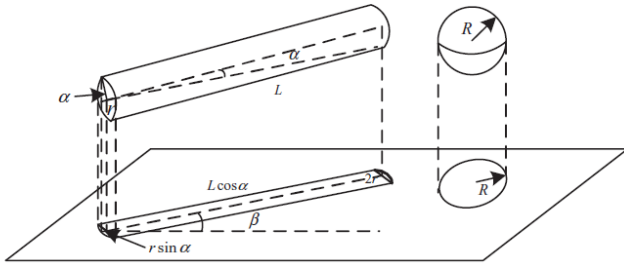


Рисунок Б-1: Проекция сферы и цилиндра на плоскость.

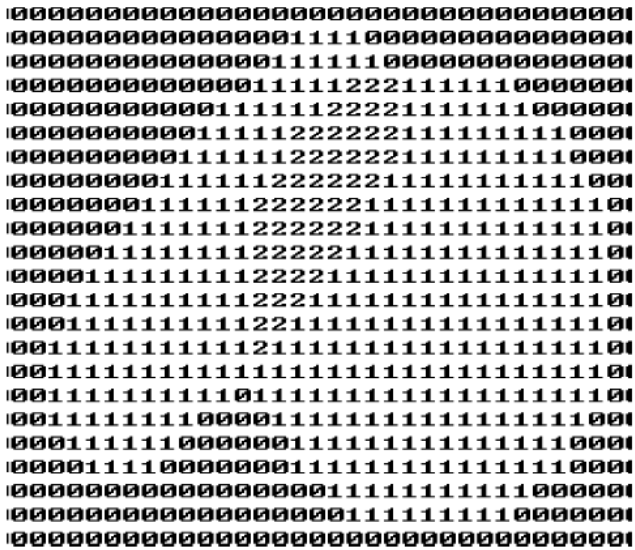


Рисунок Б-2: Отображение проекции сферы и цилиндра на двумерном массиве. Здесь представлена только небольшая часть двумерного поля. При расчете объекты выглядят гораздо меньшими.

Б.2 Результаты вычислений

Объектами, использованными при вычислениях, были сферы и цилиндры с отношением длины к диаметру (L/D) 0.05, 0.2, 1, 3, 5, 10 и 20. Все объекты выбраны так, чтобы имели одинаковые площади поверхности⁴. Цилиндр с L/D = 0.05 – это тонкий диск, а с L/D = 20 он представляет собой тонкий длинный стержень.

Двухмерный массив имеет 10000 x 10000 ячеек, а площадь поверхности при каждой форме объекта составляет 2010619 ячеек, что соответствует сфере с радиусом 400. Диск с L/D = 0.05 будет иметь толщину 54 ячейки, а диаметр 1079 ячеек. В то же время стержень с L/D = 20 будет иметь длину 35343 ячеек и диаметр 177.

Для каждой пары объектов процедура повторяется 2000 раз. Результаты расчетов помещены в Табл. Б-1.

Табл. Б-1 показывает, что вероятность столкновения между двумя сферами оказалась наименьшей из всех рассмотренных пар объектов. Вероятность столкновения сферы и длинного стержня примерно на 40% выше, чем для пары сфера-сфера. Вероятность столкновения двух длинных стержней более, чем вдвое, превышает вероятность столкновения двух сфер.

Вводится “коэффициент формы” σ , определяемый соотношением

$$\sigma = 4 \frac{A_{ccs}}{A_{sf}} \tag{3}$$

где A_{ccs} - фактическое среднее поперечное сечение столкновений, а A_{sf} - площадь поверхности.

Для сферы $\sigma = 1$. Для других объектов коэффициент может быть определен минимумом функции

$$f = \sum_i \sum_j |\sigma_i \sigma_j - N_{ij} / 371| \tag{4}$$

где N_{ij} - число столкновений для объекта i, j , помещенное в Таблицу Б-1.

Результаты вычислений находятся в Табл. Б-2. Ошибка коэффициента формы, равная $(|371\sigma - N_{ij}|/N_{ij})$, обычно не превышает 2%. Это значит, что коэффициент достаточно хорош для перевода площади поверхности в эффективную площадь поперечных сечений столкновения.

Результаты, помещенные в Табл. Б-2, указывают, что если отношение L/D близко к единице, предположение Кесслера корректно и влиянием формы на вероятность столкновения можно пренебречь. Но, если это отношение меньше примерно 0.2 или примерно превышает 5, форма влияет на вероятность столкновения, и ее следует рассматривать. Более того, поскольку коэффициент формы у сферы минимален для этих объектов, применение подхода Кесслера будет преуменьшать вероятность столкновения космических объектов.

Благодаря гравитационной стабилизации длинные тонкие объекты будут стремиться ориентироваться в направлении к центру Земли, что приведет к еще большему росту эффективного поперечного сечения. Интересно отметить, что столкновение 1996 года произошло между куском орбитального мусора и штангой спутника Сериз, стабилизированной по гравитационному градиенту.

Этот анализ показывает, что формы объектов в космосе могут значительно повлиять на вероятность столкновения. Для длинных стержней вероятность столкновения может вырасти на 40% по сравнению с предыдущими оценками. Из-за важности оценок вероятности столкновений объектов в космосе необходимы дальнейшие исследования более усложненных форм и объектов, не имеющих равные поверхностные площади.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Ось z системы координат всегда направлена от объекта вдоль земного радиуса к центру Земли. Ось x системы координат совпадает с направлением вектора скорости и перпендикулярна радиусу-вектору. Ось y перпендикулярна плоскости орбиты.
2. P.P. Russell, “General Method for Calculating Satellite Collision Probability,” Journal of guidance control and dynamics 24 (2001): 716-722.
3. D.J. Kessler and A.-M. P. D. , “Critical Number of Spacecraft in Low Earth Orbit: Using Satellite Fragmentation Data to Evaluate the Stability of the Orbital Debris Environment.” (paper presented at the Proceedings of the Third European Conference on Space Debris, 2001).
4. Это ограничение на объекты применяется для сравнения с результатом Кесслера.

Таблица Б-1: Число столкновений для объектов разной формы, но с той же самой площадью поверхности (по 20000 сеансов моделирования в каждом случае). **Сетка содержит сто миллионов ячеек, площадь поверхности объекта столкновения составляет 2.010.619 ячеек.**

	Сфера	L/D = 0.05	L/D = 0.2	L/D = 1	L/D = 3	L/D = 5	L/D = 10	L/D = 20
Сфера	371	408	407	373	390	402	468	512
	L/D = 0.05	502	459	416	421	459	523	581
		L/D = 0.2	442	405	395	469	507	575
			L/D = 1	368	392	399	469	517
				L/D = 3	393	407	484	539
					L/D = 5	415	517	573
						L/D = 10	583	624
							L/D = 20	801

Таблица Б-2: Коэффициенты формы для объектов, которые использованы в Табл. Б-1.

Сфера	L/D = 0.05	L/D = 0.2	L/D = 1	L/D = 3	L/D = 5	L/D = 10	L/D = 20
1,00	1.12	1.10	1.00	1.04	1.10	1.26	1.40