

## ДОПОЛНЕНИЕ К СТАТЬЕ "РЕЖИМ ОТВЕТСТВЕННОСТИ И СТРАХОВАНИЯ ДЛЯ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА "

*Тинг Ванг*

Данное дополнение содержит не вошедшее в основной текст Приложение А к статье Тинг Ванга "Режим ответственности и страхования для предупреждения образования космического мусора".

### Приложение А.

#### А. Идентификация источников фрагментов

Объединенному центру космических операций США (ОЦКО) после разрушения спутника обычно требуется несколько суток для того, чтобы начать включать в каталог его фрагменты. Такой промежуток времени необходим для того, чтобы собрать достаточное количество наблюдений для определения стабильных орбит и для того, чтобы фрагменты разошлись на достаточное расстояние, чтобы их можно было различить. Большинство фрагментов будет внесено в каталог примерно через один месяц. Полный процесс создания каталога после разрушения может занять годы. После того, как объект внесен в каталог, центр ОЦКО будет регулярно обновлять его орбиту. В общедоступной версии орбит используется формат двухстрочного набора элементов (TLE).

Однако, доказательство источника фрагментов является намного более трудным. Многие исходные данные не могут быть использованы в качестве доказательства, поскольку эти данные могут содержать секретную информацию, которую не хотят раскрывать военные. Общедоступные исторические наборы элементов фрагмента могут быть приняты как доказательство, поскольку такие наборы могут быть легко подтверждены наблюдениями других стран и организаций.

Основываясь на наборах элементов TLE, можно будет произвести обратный расчет орбит до момента времени, в который разрушился спутник. Если фрагмент находился в том же самом месте, где произошло разрушение, и относительная скорость между фрагментом и разрушенным спутником имела типичное значение (изменение скорости созданных в столкновении фрагментов размером в 10 см меньше 500 м/с), то этого будет достаточно для доказательства образования фрагмента при столкновении. Однако, обратный расчет орбиты приведет к большой ошибке вдоль траектории и относительно малым ошибкам в двух других направлениях. Рассчитанное положение фрагмента располагается не в точке разрушения, а на орбите, близкой к точке разрушения (см. рис. 1).

Это условие, вместе с ограничением относительной скорости, является необходимым, но недостаточным для доказательства источника фрагмента, и может быть выражено в виде:

$$D_{\min} < d$$
$$V_{\text{rel}} < v$$

где  $D_{\min}$  – минимальное расстояние между фрагментом и точкой разрушения и  $V_{\text{rel}}$  – относительная скорость фрагмента и спутника в момент разрушения.  $d$  – это пороговая ошибка в расстоянии. Ее значение определяется ошибками поперек траектории и радиуса;  $v$  – это пороговая относительная скорость при разрушении.

Поскольку положение фрагмента зависит от времени, расчет  $D_{\min}$  можно преобразовать в оптимизационную задачу: найти такое время, в которое расстояние между фрагментом и местом разрушения спутника будет минимальным,

$$D_{\min} = \min D(t)$$
$$D(t) = |P_f(t) - P_b|$$
$$t_0 - \frac{T}{2} < t < t_0 + \frac{T}{2}$$

где  $P_b$  – вектор положения точки разрушения спутника,  $P_f(t)$  – векторная функция для расчета положения фрагмента,  $t_0$  – момент времени разрушения спутника,  $T$  – орбитальный период фрагмента.

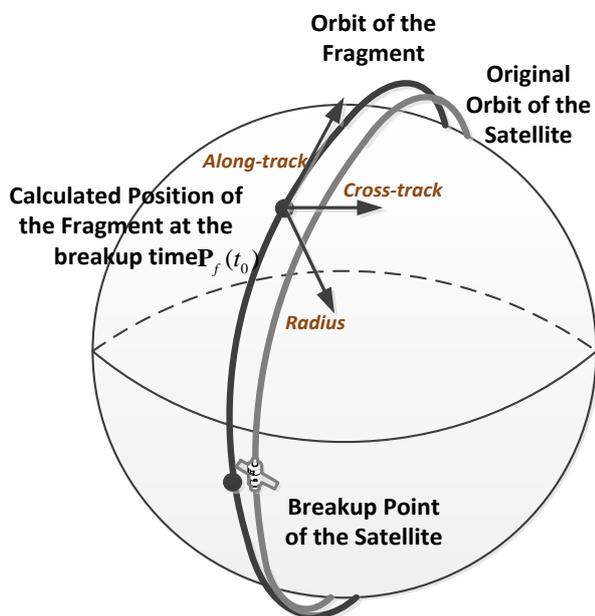


Рисунок А-1. Расчетное положение фрагмента в момент разрушения. Надписи на рисунке (сверху вниз): 1 – орбита фрагмента; 2 – первоначальная орбита спутника; 3 – вдоль траектории; 4 – расчетное положение фрагмента в момент разрушения; 5 – поперек траектории; 6 – по радиусу; 7 – точка разрушения спутника.

Ошибки в положении фрагмента определяются длительностью обратного отсчета времени вдоль орбиты (времени от начальной точки расчета назад до времени разрушения), и орбитой фрагмента. Большая длительность обратного отсчета и меньшая высота орбиты приводит к большей неопределенности. Если длительность обратного отсчета превышает год (что может случиться; как было отмечено ранее, каталогизация фрагментов из большого облака может занять несколько лет), неопределенность вдоль траектории может составлять тысячи километров, в то время как ошибки поперек траектории могут быть равны десяткам километров.

Сорок лет назад было бы легко доказать, что фрагмент появился в результате определенного столкновения, потому что тогда произошло всего несколько столкновений, причем, вероятно, что только одно из них удовлетворяло сформулированным выше условиям. Сейчас произошло более 200 разрушений. Поскольку время обратного расчета может измеряться годами, то неопределенность в положении будет огромной. Вполне вероятно, что можно будет найти несколько разрушений, удовлетворяющих поставленным условиям.

Имеется примерно 6000 фрагментов, отслеживаемых центром ОЦКО, источники которых не идентифицированы из-за неопределенности в обратном расчете их орбит. Хотя страна не может отрицать ответственности за все фрагменты, созданные в массивном событии образования мусора, для страны возможно отрицание ответственности за конкретный фрагмент.