МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ ВЗРЫВА ОБЪЕКТА НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ

Э. Д. Кузнецов

Астрономическая обсерватория Уральского государственного университета
620083 Екатеринбург, Россия
e-mail: Eduard.Kuznetsov@usu.ru

Построена модель сферически-симметричного взрыва объекта на геостационарной орбите. С помощью численной модели движения ИСЗ исследована эволюция облака фрагментов. Определены максимальные и минимальные скорости фрагментов в облаке. Вычислены скорости соударения фрагментов с геостационарными спутниками и энергия соударений.

MODELLING THE EFFECTS OF OBJECT EXPLOSION ON A GEOSTATIONARY ORBIT, by Kuznetsov E. – The model of a spherically symmetric explosion of a geostationary object is constructed. The evolution of the cloud of fragments was investigated with the aid of the numerical model of artificial satellite motion. The maximal and minimal initial velocities are determined for fragments in the cloud. The collision velocities of the fragments with the satellites and the collision energy are calculated.

ВВЕДЕНИЕ

Быстрое увеличение группировки спутников на геостационарной орбите сопровождается бурным ростом числа частиц космического мусора в геостационарной области. Одним из источников частиц техногенного происхождения в области геостационарной орбиты являются взрывы космических объектов. К настоящему времени в геостационарной области зафиксировано несколько случайных взрывов спутников и верхних ступеней ракет-носителей [5, 6, 4]. В настоящей работе исследуются кинематические и динамические характеристики облака фрагментов, образующегося в результате взрыва малой мощности.

МОДЕЛЬ ВЗРЫВА

Модель сферически-симметричного взрыва объекта на геостационарной орбите строится на основе результатов, изложенных в работах [2, 3, 7].

Входные параметры модели: элементы орбиты спутника (a, e, i, Ω, g, M_0 – большая полуось, эксцентриситет, наклон, долгота восходящего узла, аргумент перицентра, средняя аномалия), масса спутника m_{sp}, отношение миделева сечения спутника A к его массе $\gamma = A/m_{sp}$, минимальная и максимальная массы фрагментов взрыва $m_{\min}$, $m_{\max}$.

Выходные параметры модели: число образовавшихся фрагментов N, для каждого фрагмента даются масса m_n, парусность γ_n, компоненты скорости v_{x_n}, v_{y_n}, v_{z_n}, элементы орбиты (a_n, e_n, i_n, Ω_n, g_n, M_{0_n}).

Моделирование разрушения спутника выполняется следующим образом.

По заданным элементам орбиты спутника вычисляются координаты x_0, y_0, z_0 точки взрыва и компоненты геоцентрической скорости спутника w_{0x}, w_{0y}, w_{0z} в момент взрыва.

По заданной минимальной массе фрагментов $m_{\min}$ вычисляется число образующихся частиц $N(m)$ с массами меньшими m

$$N(m) = \begin{cases} 1.17 \cdot 10^{-4} m_{sp} \exp(-0.02056\sqrt{m}), & m \geq 1936 \text{ г}, \\ 8.69 \cdot 10^{-4} m_{sp} \exp(-0.05756\sqrt{m}), & m < 1936 \text{ г}. \end{cases}$$

Здесь массы выражены в граммах.

Функция распределения масс фрагментов

$$F(m) = \frac{\eta^{1-s}}{\eta_{\max}^{1-s} - 1}, \quad \eta = \frac{m}{m_{\min}}, \quad s = 0.83.$$

Процедура генерации масс фрагментов по заданному граничному значению массы выполняется несколько раз. Сначала – для граничного значения 100 г, затем – на порядок меньшего и т. д., пока не будет достигнута масса $m_{\min}$, а суммарная масса фрагментов не станет равной m_{sp}.

Размеры фрагментов определяются по следующим формулам:

$$d = \begin{cases} \left(2.119 \cdot 10^{-2} m\right)^{1/2.26}, & m > m_0, \\ \left(7.076 \cdot 10^{-4} m\right)^{1/3}, & m \le m_0, \end{cases}$$

$$m_0 = 1403.193 \left(\frac{2c_1\rho}{3}\right)^{\frac{3}{c_2-1}}, \quad r = 2699 \text{ кг/м}^3, \quad c_1 = 0.01664, \quad c_2 = 0.26.$$

Здесь массы выражены в килограммах, размеры в метрах.

Площади миделевых сечений фрагментов находятся в предположении их сферической формы

$$A = \frac{\pi d^2}{4},$$

где d – диаметр частицы. Отсюда парусность

$$\gamma = \frac{A}{m}.$$

Среднее значение модуля приращения скорости $\overline{\Delta v}$ (в км/с) вычисляется по формуле

$$\lg \overline{\Delta v} = -0.676 \lg^2 d - 0.804 \lg d - 1.514,$$

Здесь d – в метрах.

Модуль приращения скорости Δv находится из треугольного распределения. Функция распределения имеет вид

$$G(x) = \begin{cases} \dfrac{5}{7}(5x^2 - x + 0.05), & 0.1 \le x \le 1, \\[2ex] \dfrac{5}{27}(-15x^2 + 39x - 19.95), & 1 < x \le 1.3, \end{cases} \qquad x = \Delta v \left(\overline{\Delta v}\right)^{-1}.$$

Предполагается, что векторы скоростей ориентированы изотропно, и их направления задаются углами Φ и T, функции распределения которых определяются соотношениями

$$F(\Phi) = \frac{\Phi}{2\pi}, \quad F(T) = \frac{1 - \cos T}{2}.$$

Компоненты относительной скорости фрагмента в прямоугольной системе координат, связанной с родительским объектом, Δv_x, Δv_y, Δv_z определяются формулами:

$$\Delta v_x = \Delta v \cos T, \quad \Delta v_y = \Delta v \cos \Phi \sin T, \quad \Delta v_z = \Delta v \sin \Phi \sin T.$$

Компоненты геоцентрической скорости находятся следующим образом:

$$w_x = w_{0x} + \Delta v_x, \quad w_y = w_{0y} + \Delta v_y, \quad w_z = w_{0z} + \Delta v_z.$$

Элементы орбит фрагментов вычисляются по начальному положению x_0, y_0, z_0 и скорости w_x, w_y, w_z.

КИНЕМАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОБЛАКА ФРАГМЕНТОВ

С помощью модели сферически-симметричного взрыва объекта на геостационарной орбите исследованы кинематические и динамические характеристики облака фрагментов. Начальные элементы орбиты взрывающегося объекта были выбраны следующими: большая полуось – 40 000 км, эксцентриситет – 0, наклон – 0°, 10°, 20°. Входные параметры модели варьировались в следующих пределах: начальная масса объекта – 1000, 2000 кг, минимально возможная масса фрагментов – 1 г.

Рассматривались два типа взрывов малой мощности. При взрывах первого типа образуется один фрагмент большой массы $0.2 - 0.3\,m_{sp}$ и небольшое количество фрагментов (от 9 до 26) малой массы. Взрывы второго типа дают бóльшее число фрагментов (от 230 до 310), причем масса самого крупного фрагмента не превосходит $0.02\,m_{sp}$. В табл. 1 приведены основные параметры фрагментов, образующихся в результате взрывов обоих типов. Максимальные скорости соответствуют частицам с минимальными массами.

Таблица 1. Параметры фрагментов взрыва

Название	Взрыв первого типа	Взрыв второго типа
Минимальная масса фрагментов, г	100 – 700	100 – 110
Диаметры фрагментов, м	0.07 – 0.9	0.07 – 3
Отношение миделева сечения к массе, м^2/кг	0.13 – 0.33	0.17 – 0.33
Начальная скорость, м/с	3 – 60	4 – 69

С помощью численной модели движения ИСЗ [1] для 23 модельных взрывов проведено моделирование движения фрагментов взрыва и 48 геостационарных объектов (большая полуось – 42 165 км; эксцентриситет – 0, 0.01; наклон – 0°, 15°; долгота восходящего узла – 0°, 250°; аргумент перицентра – 0°, 270°; средняя аномалия – 0°; масса – 500, 1000, 1500 кг) на интервале времени 100 сут.

Результаты моделирования показывают, что скорость соударения существенно зависит от взаимного наклона орбит I фрагмента и геостационарного спутника. В табл. 2 приведены максимальные значения скорости соударения $V_{\max}$ и соответствующие им массы ударника m_{lim} в зависимости от угла взаимного наклона орбит I для геостационарного спутника с массой 1500 кг. В этом случае максимальные изменения большой полуоси Δa геостационарного спутника составляют 400 км. Масса m_{lim} соответствует максимальной массе ударника, при которой столкновение не является катастрофическим. В случае, если удельная энергия S, приходящаяся на единицу массы спутника, превышает 45 кДж/кг, столкновение считается катастрофическим, то есть ведет к разрушению спутника [7].

Таблица 2. Зависимость максимальных значений скорости соударения $V_{\max}$ и соответствующих им масс ударника m_{lim} от угла I взаимного наклона орбит для геостационарного спутника с массой 1500 кг

I	$V_{\max}$, м/с	m_{lim}, кг
15°	800	200
25°	1330	70
35°	1850	30

Таким образом, соударения геостационарных объектов с фрагментами, образовавшимися в результате взрыва малой мощности, как правило, не приводят к разрушению объектов. В случае взрывов первого типа возможно образование небольшого числа фрагментов фрагментов, столкновение с которыми может иметь катастрофические последствия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование кинематических и динамических свойств облака фрагментов, образующегося при взрыве космического объекта, показало, что число фрагментов и их массы могут изменяться в широком диапазоне. Несмотря на то, что начальные приращения скорости фрагментов при взрыве малой мощности не превосходят нескольких десятков м/с, скорости соударения с объектами на орбитах с большими взаимными наклонами могут превышать 1 км/с. В некоторых случаях соударения с массивными фрагментами могут приводить к катастрофическим последствиям.

Работа выполнена при поддержке Министерства промышленности, науки и технологий Российской Федерации (Контракт № 40.022.1.1.1108).

[1] *Бордовицына Т. В., Шарковский Н. А., Яндульский Г. И. и др.* Численная модель движения ИСЗ // Наблюдения искусственных небес. тел.–1988.–**84**, ч. 1.–С. 70–74.

[2] *Бордовицына Т. В., Дружинина И. В.* Математическое моделирование динамических параметров потока частиц, образовавшихся в результате распада космического аппарата на околоземной орбите // Околоземная астрономия.–М.: Космосинформ, 1998.–С. 102–117.

[3] *Бордовицына Т. В., Дружинина И. В.* Комплекс программ для определения динамических параметров потока частиц, образовавшихся в результате распада объекта на орбите // Астрономия и геодезия.–1998.–**16**.–С. 58–67.

[4] *Вершков А. Н., Григорьев К. В., Киладзе Р. И., Сочилина А. С.* Моделирование взрывов на геостационарной орбите и анализ орбитальных элементов // Околоземная астрономия XXI века.–М.: ГЕОС, 2001.–С. 107–116.

[5] *Касименко Т. В., Микиша А. М., Рыхлова Л. В., Смирнов М. А.* Взрывы на геостационарной орбите // Столкновения в околоземном пространстве.–М.: Космосинформ, 1995.–С. 159–168.

[6] *Смирнов М. А., Микиша А. М., Касименко Т. В., Рыхлова Л. В.* Космический мусор и взрывы на околоземных орбитах // Околоземная астрономия XXI века.–М.: ГЕОС, 2001.–С. 98–106.

[7] *Pardini C., Anselmo L., Rossi A., et al.* AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, Monterey, CA, USA, Feb. 9–11, 1998 // http://apollo.cnuce.cnr.it/~rossi/publications/codrm97/AAS98-173.html.