

УДК 523.51+523.34:523

В. Г. Кручиненко, П. Н. Козак

Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка

## Взрывные кратеры на поверхности космических аппаратов, образованные метеороидами и частицами космического мусора

Надійшла до редакції 29.03.01

Розраховано частоти утворення вибухових кратерів заданих розмірів на поверхні супутника «Океан-О». Використано дані про потоки спорадичних метеороїдів і космічного сміття в навколоземному просторі та теорія кратероутворення Епіка. Отримані результати свідчать про приблизну рівність ймовірностей руйнівних зіткнень від приведених вище двох складових. Оцінено ймовірності зустрічі космічного апарата з потенційно небезпечною частинкою в залежності від часу його перебування на орбіті. Показано дуже сильну залежність параметрів утворених кратерів як від швидкості, так і від кута падіння частинки. Для прикладу розрахунок проведено для відомого Арізонського кратера на поверхні Землі.

Данная работа инициирована сообщением, что 18 ноября 1999 г. произошла разгерметизация одного из блоков спутника «Океан-О». Подозрения на проходивший в это время метеорный дождь Леонид не подтвердились: разгерметизация произошла примерно через 14 ч после шторма Леонид. Поэтому расчеты свелись к определению количества образованных кратеров заданного размера на поверхности космического аппарата от столкновений с метеороидами спорадического фона и с частицами космического мусора.

Число столкновений космического аппарата с метеорной или какой-либо иной частицей можно представить простой зависимостью:

$$N = N_0(M \geq M_{\min}) \cdot S \Delta t,$$

где  $N_0(M)$  (в единицах  $\text{м}^{-2}\text{год}^{-1}$ ) — интегральный (кумулятивный) поток частиц с массой, которая не меньше  $M_{\min}$  (в граммах),  $S$  — эффективная поверхность космического аппарата ( $\text{м}^2$ ),  $\Delta t$  — время пребывания его в потоке (годы). Принимаем во внимание лишь те столкновения, которые приводят к образованию взрывных кратеров глубиной  $h \geq 0.2$  см. Расчеты используем для орбиты спутника «Океан-О». Среднюю скорость  $V$  столкнове-

ния аппарата с метеороидами принимаем равной 30 км/с. Исходя из орбитальных характеристик спутника «Океан-О» (почти полярная орбита, высота орбиты 670 км, орбитальная скорость 7.5 км/с), скорость частиц космического мусора относительно спутника оцениваем как 10.6 км/с.

Для дальнейшего анализа используем теорию кратерообразования Епіка [10] для случая столкновения каменной частицы (плотность  $\delta = 3.4 \text{ г/см}^3$ ) с железной мишенью (плотность  $\rho = 7.8 \text{ г/см}^3$ ). Теория [10] является на сегодня наиболее точной, так как проверена и согласована с экспериментальными данными (для скоростей от 2 до 9 км/с) и по статистике лунных кратеров для скоростей до 40 км/с [8]. Она основана на передаче количества движения (импульса), а не энергии, как полагали при расчетах многие исследователи. Суть заключается в том, что взрыв не происходит в момент столкновения тел. Ударяющее тело некоторое время продолжает двигаться внутрь мишени (при этом значительная часть энергии уносится наружу), и для расчета такого движения необходимо пользоваться законом сохранения импульса, а не энергии. Точно так же, как закон сохранения импульса используется при расчете движения тела

в сопротивляющейся среде, например метеороида в атмосфере Земли (уравнение торможения), а закон сохранения энергии — при расчете потери массы (уравнение абляции). («Энергия есть источник действия, само действие не пропорционально энергии» — писал Эпик [10]). Поскольку при разработке теории [10] автор не знал, в какой момент (или на какой глубине) внутри тела произойдет взрыв, он для согласования выводов теории с различными экспериментами использовал приближения. Нам представляется, что взрыв тела будет происходить в момент достижения им максимального торможения в данной среде. Строгого доказательства этого предположения пока нет, хотя в пользу его имеются существенные физические аргументы, которые мы приводим в работе [2]. Теории, которые основаны на передаче энергии в момент соударения тел (например [3]), дают завышенные в 1.7—2.3 раза [2] размеры кратеров и, с нашей точки зрения, не адекватны физическому процессу образования взрывных кратеров.

Запишем основные зависимости теории [10]. Соотношение для глубины  $h$  кратера от первоначально неразрушенной поверхности и диаметра  $d$  ударяющего тела представляем в виде:

$$\frac{h}{d} = 1.785 \left( \frac{\delta}{\rho} \right)^{1/2} \left( \frac{V^2}{\sigma_p} \right)^{1/30} \cos Z. \quad (1)$$

Для диаметра  $D$  кратера используем формулу

$$\frac{D}{d^{3/2}} = 1.20 \left( \frac{kV\delta}{h} \right)^{1/2} (\rho\sigma_p)^{-1/4}, \quad (2)$$

где  $\sigma_p$  — прочность вещества на разрушение,  $Z$  — зенитный угол падения,  $k$  — безразмерный фактор передачи импульса, который определяется из уравнения

$$k = CV^2(1 - 0.04k^2)^{1/2} + 2. \quad (3)$$

Константа  $C = 4.2 \cdot 10^{-13} \text{ с}^2/\text{см}^2$  — для удара камня по камню и  $6.5 \cdot 10^{-13} \text{ с}^2/\text{см}^2$  — для удара железа по камню. Прочность на разрушение согласно [10] равна

$$\sigma_p = \sigma_{\text{сж}} + 0.38gh,$$

где  $\sigma_{\text{сж}}$  — прочность на сжатие ( $\sigma_{\text{сж}} = 7.1 \cdot 10^4 D^{-1/4} \text{ Н/см}^2$ ), второе слагаемое возникает из-за трения, вызванного вышележащими слоями мишени,  $g$  — ускорение свободного падения.

Уравнения (1) и (2) можно свести к следующей зависимости:

$$\frac{kV^{4/5}}{(\cos Z)^3} = 3.95 \left( \frac{D}{h} \right)^2 \frac{\delta^{1/2} \sigma_p^{2/5}}{\rho}. \quad (4)$$

При известных размерах кратера ( $h$  и  $D$ ) и плотностях ударяющего тела и мишени ( $\delta$  и  $\rho$ ), и конкретном значении прочности на разрушение  $\sigma_p$ , вычисленном по приведенным выше формулам, правая часть уравнения (4) предстает собой константу для данного кратера. Поскольку приблизительно  $k \propto V^{1/2}$ , то скорость будет пропорциональна  $(\cos Z)^{2.3}$ , т. е. для образования одного и того же кратера значения скорости при различных углах столкновения будут существенно различными. Мы уже указывали, что используемая теория проверена по различным данным. Для известного ядерного взрыва Теарот, например, вычисленный диаметр кратера (101 м) прекрасно согласуется с экспериментальным значением 105 м (от кромки до кромки) при энергии взрыва  $5 \cdot 10^{12}$  Дж [7, 9]. Теорию [10] можно использовать для взрывов различного масштаба. При вычислениях параметров взрывных кратеров, образованных на поверхностях космических аппаратов, приведенные формулы несколько упрощаются, поскольку гравитационного поля на них практически нет.

Рассмотрим в качестве примера Аризонский кратер. Согласно данным [4] метеорит Каньон Дьябло, образовавший кратер, состоял в среднем из 94 % железа и из 5 % никеля, его средняя плотность  $\delta = 7.85 \text{ г/см}^3$ . Плотность почвы  $\rho = 2.62 \text{ г/см}^3$ ,  $D = 1.2 \text{ км}$ ,  $h = 175 \text{ м}$ ;  $\sigma_p = 3980 \text{ Н/см}^2$ . На основании проведенных расчетов в [4] получено, что минимальная скорость выпавшего метеорита составляет 9.4 км/с, а за наиболее вероятную принято 15 км/с. Рассмотрен случай вертикального падения и получено, что масса выпавшего метеорита составляет 63 тыс. тонн ( $d = 24.8 \text{ м}$ ). С позиций теории [10] приведенные результаты нуждаются в пересмотре. Правая часть соотношения (4) равна  $5.47 \cdot 10^5$ . Это означает, что при вертикальном падении ( $Z = 0$ ) метеороида Каньон Дьябло скорость его была равной 25 км/с (при этом  $k = 4.20$ ), а при падении под углом  $Z = 45^\circ$  она составляла 11.6 км/с. В первом случае диаметр тела равен 41.1 м (масса 285 тыс. тонн), а во втором случае — диаметр 61.4 м (масса 950 тыс. тонн), поскольку зависимость диаметра от  $V$  и  $Z$  имеет вид

$$d = 1.10 \cdot 10^4 / (V^{1/15} \cos Z).$$

Нам представляется, что для Аризонского кратера вторая оценка более вероятна (скорость столкновения около 11 км/с, зенитный угол траектории удара  $45^\circ$ ), поскольку кратер имеет некоторую асимметрию и значительное количество мелкодисперсного метеоритного вещества (12000 т) [4, 11]. Исходя из формы кратера и наличия брекчии, содержащей осколки метеорита под южным валом

кратера, было высказано предположение о полете метеороида с севера на юг под углом к горизонту  $45^\circ$  [4]. Большое количество мелкодисперсного метеоритного вещества также, с нашей точки зрения, свидетельствует о небольшой скорости удара.

В случае столкновения космических частиц среднюю плотность которых принимаем равной  $3.4 \text{ г/см}^3$ , со спутником (железная мишень с плотностью  $7.8 \text{ г/см}^3$ ) зависимость (4) можно представить в виде

$$\frac{h^{2.50}}{D^{2.375}} k^{5/4} V = 7.71 \cdot 10^4 (\cos Z)^{3.75}.$$

С учетом скорости соударений метеороидов и частиц космического мусора из соотношения (3) следует, что в этом случае фактор  $k$  передачи импульса при ударе равен 4.51 и 2.62 соответственно. Вычисления выполняются для нормального угла падения ( $\cos Z = 1$ ). Прочность на сжатие материала космического аппарата принимается равной  $\sigma_p = 4.1 \cdot 10^4 \text{ Н/см}^2$  — такая величина получена для железного Сихотэ-Алинского метеорита [1]. Из зависимости (1) получим минимальное (при  $h = 0.2 \text{ см}$ ) значение диаметра ударника (метеороида и частицы космического мусора):

$$d_{\min} = 0.13 \text{ см при } V_0 = 30 \text{ км/с}$$

$$\text{и } 0.14 \text{ см при } V_0 = 10.6 \text{ км/с.}$$

При этом минимальная масса  $M_{\min}$  метеороида и частиц космического мусора, способных образовывать кратер заданной глубины, составляет  $3.9 \cdot 10^{-3} \text{ г}$  и  $4.9 \cdot 10^{-3} \text{ г}$  соответственно.

Для вычисления потока метеорных частиц спорадического фона, массы которых не меньше  $M_{\min}$ , используем данные работ [5, 6]. Согласно данным [6] кумулятивный поток метеорных частиц  $N^*$  (в единицах  $\text{м}^2 \cdot \text{год}^{-1}$ ) в интервале масс  $10^6 \dots 10^2 \text{ г}$  представляем зависимостью

$$\lg N^* = -7.30 - 1.25 \lg M. \quad (5)$$

Зависимость потока  $F$  метеороидов [5, рис. 1] от диаметров  $d$  метеороидов от 0.01 до 10 см можно записать в следующем виде:

$$\lg F = -6.95 - 3.72 \lg d.$$

Переходя от диаметров к массам при  $\delta = 3.4 \text{ г/см}^3$ , получим зависимость для интервала масс  $1.8 \cdot 10^{-6} \dots 1.8 \cdot 10^3 \text{ г}$ :

$$\lg N = -6.64 - 1.24 \lg M. \quad (6)$$

Видим, что зависимости (5) и (6) близки между собой: параметры распределения по массе в обоих

случаях совпадают. Поэтому число метеороидов, способных произвести кратеры глубиной  $h \geq 0.2 \text{ см}$ , из соотношений (5) и (6) равно  $5.1 \cdot 10^{-5}$  и  $2.2 \cdot 10^{-4}$ . Принимаем среднее значение  $(5.1 \cdot 10^{-5} \times 2.2 \cdot 10^{-4})^{1/2} = 1.1 \cdot 10^{-4}$ .

Для приближенной оценки интегрального потока космического мусора используем данные той же работы [5, рис. 1]. Приведенную кривую для интервала диаметров частиц от 0.001 до 1 см аппроксимируем функцией

$$\lg F_* = -5.40 - 2.47 \lg d_*,$$

где поток приведен в единицах  $\text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ ,  $d_*$  — в см. При  $\delta = 3.4 \text{ г/см}^3$  интервал масс этих частиц составляет от  $1.78 \cdot 10^{-9}$  до 1.78 г, а интегральная зависимость потока частиц космического мусора принимает вид

$$\lg N_* = -5.19 - 0.823 \lg M.$$

Очевидно, искомое число частиц космического мусора, которые могут образовать кратер заданной глубины, равно

$$N_*(M \geq 4.9 \cdot 10^{-3} \text{ г}) = 5.1 \cdot 10^{-4}.$$

Если принять, что эффективная поверхность космического аппарата  $S = 10 \text{ м}^2$ , а время  $\Delta t = 1 \text{ год}$ , то число образованных кратеров глубиной  $h \geq 0.2 \text{ см}$  равно  $N_0 = 1.1 \cdot 10^{-3}$  для спорадического фона и  $5.1 \cdot 10^{-3}$  для космического мусора.

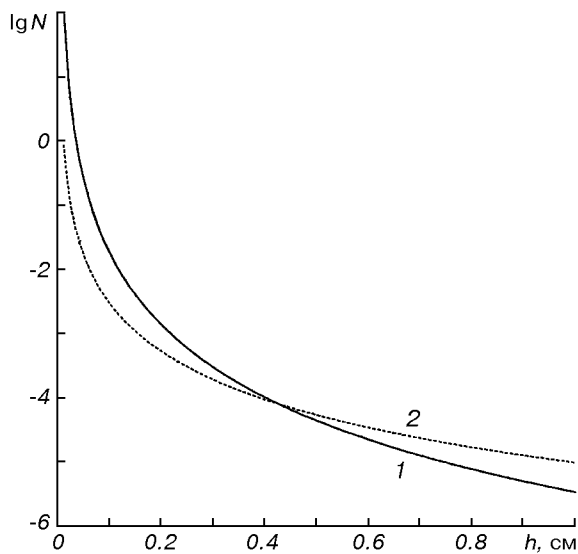
Здесь необходимо учитывать, что реальное время пребывания спутника в потоке частиц космического мусора будет составлять, вероятно, не более  $0.1 \Delta t$ , поэтому полученные частоты столкновений по порядку величины равны между собой.

Из формулы (2) следуют такие оценки диаметров кратеров: 2.1 см, образованные метеороидами и 1.1 см — частицами мусора. Если принять, что кратеры имеют форму шарового сегмента объемом

$$W = \pi \cdot h(4h^2 + 3D^2)/24,$$

то объемы разрушений составят соответственно 0.35 и  $0.10 \text{ см}^3$ .

Выбранная величина глубины кратера 0.2 см не является критичной — вместо нее можно задать другое значение и вычисление выполнить для любого космического аппарата. Произведя указанные вычисления для спутника «Океан-О» ( $S = 10 \text{ м}^2$ ) в диапазоне  $0.01 \text{ см} \leq h \leq 1 \text{ см}$ , и учитывая, что реальное время пребывания спутника в потоке частиц космического мусора составляет примерно  $0.1 \Delta t$ , получим зависимость для количества соударяемых частиц обоих типов с космическим аппаратом за год. Эти данные представлены на рисунке.



Зависимость логарифма потока  $N$  частиц, соударяющихся с поверхностью космического аппарата «Океан-О» (с площадью  $10 \text{ м}^2$ ) за год, способных образовать на поверхности аппарата взрывной кратер глубиной  $h$ : 1 — метеоритный спорадический фон, 2 — частицы космического мусора

Имея частоту столкновений  $N$  спутника с метеороидами спорадического фона и частицами космического мусора, можно рассчитать вероятность столкновений аппарата с частицей, способной образовать на поверхности взрывной кратер глубиной  $h$  и более. Вычисления по-прежнему произведем для  $h = 0.2 \text{ см}$ . Указанную вероятность столкновений КА с числом  $r$  интересующих нас частиц за время  $t$  получим из распределения Пуассона:

$$P(r, t) = \frac{(Nt)^r}{r!} e^{-Nt}.$$

Вероятность соударений хотя бы с одной частицей определим из кумулятивного распределения:

$$P(r \geq 1, t) = e^{-Nt} \sum_{r=1}^{\infty} \frac{(Nt)^r}{r!}.$$

При указанных частотах столкновений для потенциального времени пребывания спутника на орбите (до 10 лет) данная зависимость может быть с достаточной точностью аппроксимирована линейной функцией типа  $P(r \geq 1, t) = at$ . Значение коэффициента  $a$  для соударений спутника «Океан-О» хотя бы с одним метеороидом спорадического фона, способных образовать на поверхности кратер

глубиной  $h \geq 0.2 \text{ см}$ , составляет  $0.0013 \text{ год}^{-1}$ , а для частиц космического мусора —  $0.0005 \text{ год}^{-1}$ .

Таким образом, для выбранных условий ( $S = 10 \text{ м}^2$ ,  $h \geq 0.2 \text{ см}$ ) вероятность образования такого кратера на протяжении порядка 10 лет пребывания спутника на орбите составляет примерно 0.01.

1. Кринов Е. Л. Метеоритный дождь. — М.: Наука, 1981.—192 с.
2. Кручиненко В. Г. Метеоритные кратеры на поверхности Земли // Кинематика и физика небес. тел.—2000.—16, № 6.—С. 507—518.
3. Станюкович К. П. Неустановившиеся движения сплошной среды. — М.: Наука, 1971.—855 с.
4. Шумейкер Ю. М. Механика удара на примере Аризонского метеоритного кратера // Взрывные кратеры на Земле и планетах / Под ред. К. П. Станюкович. — М.: Мир, 1968.—С. 68—104.
5. Durin C., Mandeville J. C. MOS sensors for detection of orbital debris // Proc. Second Europ. Conf. on Space Debris. ESA SP-393.—1997.—P. 143—146.
6. Kruchynenko V. G. Integrated density of influx of space bodies onto Earth for a wide range of masses // Proc. Inter. Conf. METEORIODS 1998 / Eds W. J. Baggaley, V. Porubcan. — Bratislava: Astron. Inst. Slovak Acad. Sci., 1999.—P. 329—332.
7. Nordyke M. D. Nuclear craters and preliminary theory of the mechanics of crater formation // J. Geophys. Res.—1961.—66.—P. 3439—3459.
8. Opik E. J. The lunar surface as an impact counter // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1960.—120.—P. 404—411.
9. Opik E. J. Cratering and the Moon's surface // Adv. Astron. Astrophys.—1971.—8.—P. 107—337.
10. Opik E. J. Interplanetary encounters. — New York: Elsevier scient. publ. comp., 1976.—155 p.
11. Rinehart J. S. Distribution of meteoritic debris about the Arizona meteorite crater // Smithson. Contr. Ap.—1958.—2, N 7.—P. 145—159.

#### EXPLOSIVE CRATERS ON THE SURFACE OF SPACE VEHICLES PRODUCED BY METEORIODS AND SPACE DEBRIS PARTICLES

V. G. Kruchynenko, P. N. Kozak

The frequencies of the formation of explosive craters of the given sizes on the surface of the satellite «Ocean-O» were calculated. For this purpose the data on the flux of sporadic meteoroids and space debris in the near-Earth space and the E. Opik's theory of crater formation were used. The results show that the probabilities of destructive collisions with two components mentioned above are approximately equal. The probability of the collision of a space vehicle with a potentially hazard particle depending on the duration of its stay in the orbit is also estimated. The parameters of the craters formed are shown to depend strongly on both the speed and the angle of incidence of the particle. As an example, the calculation is done for the well-known Arizona crater on the Earth's surface.