

УДК 523.64

**В. Г. Кручиненко<sup>1</sup>, К. И. Чурюмов<sup>1</sup>, Ю. П. Добрянский<sup>2</sup>, А. А. Вальтер<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Астрономическая обсерватория Киевского национального университета имени Тараса Шевченка  
04053 Киев, ул. Обсерваторная 3

<sup>2</sup>Варминско-Мазурский университет  
Польша, Ольштын

<sup>3</sup>Институт прикладной физики Национальной академии наук Украины  
03028 Киев, пр. Науки 46

## **Определение возможного размера кратера на ядре кометы 9P/Темпеля I**

*Определены возможные размеры кратера на ядре кометы Темпеля, который будет образован искусственным ударником 4 июля 2005 года. Для этого использованы два независимых метода.*

*ВИЗНАЧЕННЯ МОЖЛИВИХ РОЗМІРІВ КРАТЕРА НА ЯДРІ КОМЕТИ 9P/ТЕМПЕЛЯ I, Кручиненко В. Г., Чурюмов К. І., Добрянский Ю. П., Вальтер А. А. — Визначені можливі розміри кратера на ядрі комети Темпеля, який буде утворено штучним ударником 4 серпня 2005 року. Для цього використано два незалежних методи.*

*DETERMINATION OF POSSIBLE SIZES OF THE CRATER ON THE NUCLEUS OF COMET 9P/TEMPEL 1, by Kruchynenko V. G., Churyumov K. I., Dobrianskyi Yu. P., Valter A. A. — Using two independent methods, we determined possible sizes of the crater to be formed on the nucleus of Comet 9P/Tempel 1 by the artificial impactor on 4 July 2005.*

### **ВВЕДЕНИЕ**

12 января 2005 г. с американского космодрома во Флориде (мыс Канаверал) стартовал космический аппарат в направлении к короткопериодической комете 9P/Темпель 1, к ядру которой он приблизится в начале июля 2005 г. Главной целью миссии является отправка с борта орбитального аппарата специального модуля — медного ударника массой 372 кг на 5-км ледяное ядро кометы Темпеля 1, с которым импактор на скорости 37014 км/ч столкнется 4 июля 2005 г.

Ядро кометы Темпеля 1 имеет продолговатую и неправильную форму, по-видимому подобную форме ядра кометы Боррелли, сфотографированного с борта КА «Дип Спейс 1» в сентябре 2001 г. Средний радиус ядра кометы 9P/Темпеля 1 равен  $3.25 \pm 0.2$  км, отношение осей  $(a/b) = 3.2 \pm 0.4$  для эллипсоида с полуосями  $a = 7.2 \pm 0.9$  км и  $b = c = 2.2 \pm 0.3$ . Объем ядра  $V = 90 \dots 210$  км<sup>3</sup> ( $V_{\text{ср}} = 146$  км<sup>3</sup>). Исследования кометы Боррелли с борта пролетного КА «Дип Спейс 1» показали, что плотность ее ядра лежит в пределах от 0.29 до 0.83 г/см<sup>3</sup> (среднее 0.49 г/см<sup>3</sup>). Однако исследования

другой кометы Вилда 2 с пролетной траектории КА «Стардаст» делают наиболее вероятной оценкой плотности кометного ядра  $\rho = 0.3...0.4 \text{ г/см}^3$ . Тогда масса ядра кометы Темпеля 1 составит  $M = 0.1...2.5 \cdot 10^{14} \text{ кг}$ .

При столкновении возможны следующие сценарии.

1. Образование на поверхности ядра взрывного кратера. По разным оценкам его диаметр может составлять от 60 до 200 м. Предполагается, что наиболее вероятно образование кратера диаметром 100 м и глубиной 30 м.

2. Полное разрушение ядра кометы Темпеля 1, аналогично тому как в 2000 г. полностью распалось ядро кометы C/1999 S4 (LINEAR), и на ее орбите образовался метеорный рой. Такой сценарий вполне возможен, если справедлив механизм [3], согласно которому в кометных льдах в результате их взаимодействия с магнитными полями планет и межпланетным магнитным полем (особенно это касается короткопериодических комет семейства Юпитера) могут накапливаться продукты электролиза (гремучая смесь), взрыв которых при столкновении с метеоритом или любым импактором может привести к полному разрушению ядра. Однако наличие ударно-взрывных кратеров на поверхностях ядер короткопериодических комет 19P/Боррелли и 81P/Вилда 2, изображения которых были получены с борта космических аппаратов «Дип Спейс-1» и «Стардаст», и которые свидетельствуют о многократных столкновениях ядер этих комет с космическими телами, противоречат наличию во льдах ядер этих комет взрывоопасных продуктов электролиза.

3. Сквозной пролет импактора через ледяное ядро кометы Темпеля 1, в результате чего в ядре может образоваться сквозное отверстие, что представляется маловероятным, учитывая 6 км толщю этого ядра.

Поэтому наиболее вероятным сценарием является образование взрывного кратера на поверхности ядра кометы Темпеля 1. Весь процесс образования первого искусственного кратера на ядре кометы будет фиксироваться с борта орбитального КА «Дип Импект».

Эта миссия позволит впервые проанализировать кометное реликтовое вещество, выброшенное из внутренних частей кометного ядра, что даст возможность заглянуть в прошлое Солнечной системы, все тела которой образовались из этого вещества 4.6—5 млрд лет тому назад. Геометрические размеры кратера, который образуется 4 июля 2005 г. на ядре кометы Темпеля 1, могут варьировать в довольно широких пределах, в зависимости от свойств кометного вещества, заложенных в расчетах разных исследователей, и от применяемых моделей разрушения. Здесь приведены прогнозные расчеты по двум моделям.

#### ПЕРВАЯ МОДЕЛЬ

Для расчета глубины и диаметра кратера использована теория [7], которая, с точки зрения авторов прогноза, является на сегодня наиболее адекватной протеканию взрывного процесса при столкновении тел с космическими скоростями. Она проверена и согласована с экспериментальными данными для скоростей от 2 м/с до 9 км/с и по статистике лунных кратеров для скоростей до 40 км/с [6]. Теория принципиально отличается от других, в основе которых принимается передача кинетической энергии столкновения. Суть заключается в том, что взрыв не происходит в момент столкновения тел. Ударяющее тело некоторое время продолжает двигаться внутрь мишени (при этом часть энергии уносится наружу), и для расчета такого движения необходимо пользоваться законом сохранения импульса, а не энергии.

Принимаем следующие исходные данные. Масса снаряда  $m = 3.72 \cdot 10^5 \text{ г}$ , скорость столкновения  $V = 1.03 \cdot 10^6 \text{ см/с}$ , плотность снаряда  $\delta = 7.0...8.9 \text{ г/см}^3$ ,

плотность вещества кометного ядра  $\rho = 0.5 \text{ г/см}^3$ ,  $\cos Z = 1.0$  (падение, перпендикулярное к поверхности), прочность вещества кометного ядра (лед  $\text{H}_2\text{O}$ ) составляет  $\sigma_p = 10...100 \text{ кН/м}^2$ ; тонкой минеральной коркой пренебрегаем. Поскольку нам необходимо иметь некоторый эффективный размер снаряда, то на основании принятых данных определяем эквивалентный диаметр сферического тела,  $d = 43.0...46.6 \text{ см}$ . Принимаем, что безразмерный фактор передачи импульса равен  $\eta = 2.45$ .

Формулу для глубины  $h$  кратера представляем в следующем виде:

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

Из зависимости (1) следует, что глубина образованного кратера составит  $h = 4.8... 5.6 \text{ м}$ . Диаметр  $D$  кратера вычисляем по формуле

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

Значение диаметра кратера, согласно соотношению (2) и интервалу полученных глубин, находится в пределах  $22...57 \text{ м}$ . Объем разрушенного вещества (объем кратера)

$$W = 0.363hD^2 = 810...7080 \text{ м}^3.$$

Соответствующая масса  $M$  разрушенного льда в тысячи раз превосходит массу ударника. Средняя удельная энергия, затраченная импактором на единицу разрушенной массы мишени, будет равна

$$mV^2/(2M) = 3.6—20 \text{ кДж/кг}$$

Этой энергии недостаточно, чтобы расплавить лед (для сублимации льда необходима энергия  $2 \text{ МДж/кг}$ ). Взрыв произойдет на глубине приблизительно  $1.8 \text{ м}$ , и ответственная за него сублимированная масса составит менее  $1 \%$  общей эродированной массы — остальная масса будет выброшена в виде льдинок.

Основной вывод, который следует из нашего прогноза: размеры кратера будут небольшими — значительно меньше тех, которые сейчас появились в печати.

## ВТОРАЯ МОДЕЛЬ

В рамках этой модели оценка размеров образовавшегося кратера производилась методами ударно-взрывной аналогии, развитыми в большом количестве работ и в значительной мере обобщенных в работе [4]. Из этой аналогии вытекает, что кратеры, образовавшиеся при метеоритных ударах с космическими скоростями эквивалентны кратерам, произведенным взрывами малозаглубленных зарядов. Обработка большого количества наблюдательных данных, а также взрывных и ударных экспериментов [1, 2] приводит для большого диапазона размеров к следующей зависимости для диаметра кратера:  $D = LE^{1/N}$ , где  $E$  — энергия его образования, в данном случае кинетическая энергия ударника,  $L$  — постоянный коэффициент,  $N = 3.4$ . Если  $D$  выражено в метрах, а  $E$  в джоулях, то  $L = 0.02$ . Для рассматриваемого случая  $D = 22 \text{ м}$ . Для крупных событий более адекватной может оказаться зависимость [2]

$$D = 0.773 \left( \frac{g_0}{g} \right)^{0.118} E^{0.294},$$

где  $D$  выражено в км, а  $E$  — в Мт,  $g_0$  — ускорение свободного падения на Земле,  $g = 0.07 \text{ см/с}^2$  — на ядре кометы. Расчет по формуле (3) приводит к значению  $D = 65 \text{ м}$ .

Глубина кратеров такого размера согласно [5] равна  $h = 0.354 D = 8...23 \text{ м}$ .

И этот независимый прогноз свидетельствует о том, что размеры кратера должны быть небольшими.

1. Адушкин В. В., Костюченко В. Н., Николаевский В. Н., Цветков В. М. Механика подземного взрыва // Итоги науки и техники / ВИНТИ. Механика твердых деформируемых тел.—1973.—7.—С. 87—197.
2. Базилевский А. Т., Иванов Б. А., Флоренский К. П. и др. Ударные кратеры на Луне и планетах. — М.: Наука, 1983.—200 с.
3. Дробышевский Э. М. История Титана, колец и магнитного поля Сатурна и природа короткопериодических комет. — Л., 1980.—55 с.—(Препринт / АН СССР; Физико-технический ин-т им. А. Ф. Иоффе, № 674).
4. Меллош Г. Образование ударных кратеров: геологический процесс. — М.: Мир, 1994.—335 с.
5. Dence M. R. Dimensional analysis of impact structures // Meteoritics.—1973.—8, N 4.—P. 343—344.
6. Opik E. J. The lunar surface as an impact counter // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1960.—120.—P. 404—411.
7. Opik E. J. Interplanetary encounters. — New York: Elsevier sci. publ., 1976.—155 p.

Поступила в редакцию 17.03.05