

Г. С. ШТЕЙНБЕРГ

О ПРОИСХОЖДЕНИИ КРУПНЫХ ЛУННЫХ КРАТЕРОВ И КРУГЛЫХ МОРЕЙ

(Представлено академиком М. А. Садовским 20 V 1968)

При обосновании метеоритной гипотезы образования лунного рельефа используются экстраполированные эмпирические зависимости, установленные для промышленных и военных взрывов, а также земных метеоритных кратеров. Проведенные в последнее время работы по моделированию крупных взрывов на выброс^(6, 7) показали, что подобные экстраполяции содержат существенные ошибки.

Характерным размером воронки является радиус, определяемый энергией взрыва, глубиной расположения центра взрыва, физико-механическими свойствами среды и ускорением силы тяжести. Применительно к Луне известны радиусы кратеров и ускорение силы тяжести и с известной достоверностью плотность и прочность пород. Глубина центра взрыва (предельная глубина проникания метеорита) может быть достаточно строго оценена.

Установленные зависимости, связывающие безразмерные параметры с энергией взрыва⁽⁶⁾, применительно к лунным условиям справедливы в диапазонах: энергии 10^{26} — 10^{32} эрг, радиусов воронок 0,8—200 км ($n = 0,6$ — $3,5$), что соответствует наблюдаемым характерным размерам лунных кратеров и круглых морей, а также принятым значениям энергий метеоритных взрывов^(1, 2, 8).

В соответствии с имеющимися оценками скорости метеоритов (до 80 км/сек) и их плотности (каменные 3 г/см³, железо-никелевые 8 г/см³), глубина проникания метеоритов (шаровой формы) может быть рассчитана:

$$W = \frac{2M}{C_x S \rho} \ln \frac{U_0}{U} = \frac{4}{3} \frac{\sigma}{\rho} r \ln \frac{U_0}{U}, \quad (1)$$

где M — масса метеорита, $C_x = 2$ — безразмерный коэффициент обтекания, S — площадь Миделева сечения метеорита, σ — плотность метеорита, ρ — плотность среды, r — радиус метеорита, U — скорость метеорита, при которой проникание практически кончается (в расчетах принято 4 км/сек), U_0 — начальная скорость метеорита.

Принимая энергию и скорость метеорита в качестве параметров и выразив радиус метеорита через E , U_0 и σ , формулу (1) можно переписать:

$$W = \frac{4}{3} \frac{\sigma}{\rho} \left(\frac{E}{\frac{4}{3} \pi \sigma U_0^2} \right)^{1/3} \ln \frac{U_0}{U}. \quad (2)$$

Результаты расчета глубины проникания приведены в табл. 2 и на рис. 1. Как видно из рис. 1, при $E = \text{const}$ W экстремально зависит от скорости. Максимальная глубина проникания реализуется при $V = 20$ км/сек.

Зависимость радиуса взрывной воронки от глубины центра взрыва также имеет экстремальный характер. Используя экспериментальные зависимости⁽⁶⁾, были найдены оптимальные глубины и соответствующие им максимальные радиусы воронок, которые могли возникнуть в лунных усло-

виях в результате взрывов с энергиями $10^{26} - 10^{32}$ эрг (рис. 2, табл. 1). При расчетах радиусов лунных кратеров, возникающих при взрывах, принималось: $g = 162$ см/сек²; $\rho = 3$ г/см³; δ (прочность) = 300 кг/см². Используя приведенные зависимости (рис. 2), были определены радиусы лунных кратеров, которые могли возникнуть в результате метеоритных взрывов (табл. 2). При этом принято $V = 20$ км/сек как обеспечивающая максимальную глубину проникания.

Как видно из табл. 1, максимальные диаметры воронок, возникающих в лунных условиях при взрывах с $E = 10^{26} - 10^{32}$ эрг, соответствуют наблюдаемым диаметрам лунных кратеров, но меньших диаметров круглых морей. Однако глубины, на которых должны располагаться центры взрывов, для реализации воронок с

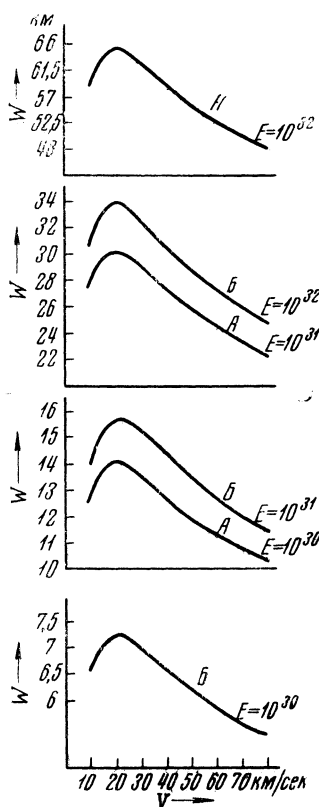


Рис. 1

Рис. 1. Зависимость глубины проникания от скорости для железно-никелевых (А) и каменных (Б) метеоритов (E — в эргах)

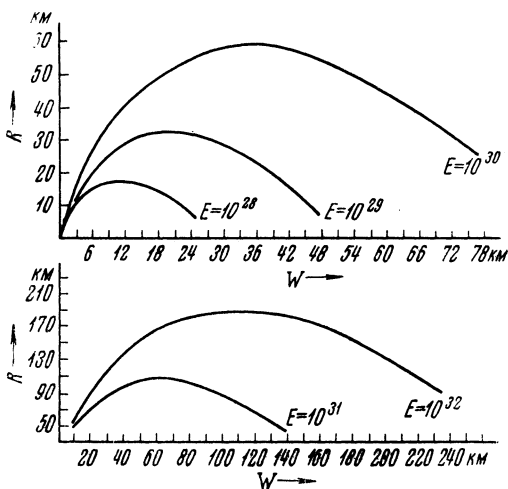


Рис. 2

Рис. 2. Зависимость радиуса лунной взрывной воронки от глубины центра взрыва и энергии взрыва

такими (максимальными) диаметрами значительно отличаются от предельных глубин проникания метеоритов (см. рис. 1, табл. 2).

Вопрос о соотношении предельных глубин проникания метеоритов и оптимальных глубинах расположения центров взрывов целесообразнее рассматривать на конкретных примерах.

Таблица 1

Энергия взрыва E , эрг	10^{26}	10^{27}	10^{28}	10^{29}	10^{30}	10^{31}	10^{32}
Оптимальная глубина центра взрыва W , км	3	6	10	20	35	60	110
Радиус воронки R , км	4,5	9	17	32	58	106	190

По мнению сторонников метеоритной гипотезы, энергия метеоритных взрывов, обусловивших возникновение крупных кратеров ($D \geq 150$ км) и морей, составляла $10^{30} - 10^{32}$ эрг (2). В частности, для кратера Клавий ($D = 230$ км) $E = 2,1 \cdot 10^{31}$ эрг (8). По графикам (рис. 1, 2) зависимостей $W = F_1(E, V, \sigma)$ и $R = F_2(E_2, W)$ находим, что максимальная глубина проникания метеорита составит 33 км, а соответственно радиус воронки взрыва 90 км, что намного меньше размеров кратера Клавий. Число таких

примеров можно продолжить (кратеры Гримальди, Шиккард, Риччиоли, Шиллер и др.). В то же время следует отметить, что для кратеров с $D < 100$ км (Тихо, Аристилл, Кеплер, Бессель) устанавливается соответствие между наблюдаемыми диаметрами и максимальными диаметрами, которые могли возникнуть при метеоритных взрывах (при $V = 20$ км/сек; $\sigma = 8$ г/см³; $E = 1,07 \cdot 10^{30}$; $2,88 \cdot 10^{29}$; $5,37 \cdot 10^{28}$; $6,31 \cdot 10^{27}$ эрг, соответственно (8)).

Еще более четко отмеченное несоответствие проявляется при рассмотрении лунных морей. Поперечники большинства лунных морей составляют 450—600 км, а в отдельных случаях они достигают 700—1000 км. Из графиче-

Т а б л и ц а 2

Энергия E (эрг)	Глубина проникания метеорита W при $V = 20$ км/сек (км)		Радиус воронки R (км)		Энергия E (эрг)	Глубина проникания метеорита W при $V = 20$ км/сек (км)		Радиус воронки R (км)	
	каменный	железный	каменный	железный		каменный	железный	каменный	железный
10^{26}	0,34	0,66	1,4	2,35	10^{30}	7,32	14,1	31,0	43,0
10^{27}	0,73	1,41	3,5	5,3					
10^{28}	1,57	3,04	7,0	10,0					
10^{29}	3,4	6,6	13,0	20,0					
					10^{31}	15,7	30,4	64,0	89,0
					10^{32}	34,0	65,6	128,0	170,0

ка (рис. 2) следует, что при $E = 10^{32}$ эрг предельный радиус воронки взрыва, реализуемый в лунных условиях, составит 190 км. При этом центр взрыва должен располагаться на глубине 110 км. Предельная расчетная глубина проникания метеорита с $E = 10^{32}$ эрг равна 65 км, соответственно радиус воронки взрыва составит 170 км, что также намного меньше размеров лунных морей.

Таким образом, в результате метеоритных взрывов с энергией 10^{30} — 10^{31} эрг кратеры с поперечником более 180 км возникнуть не могли. Аналогично при взрывах с $E = 10^{32}$ эрг не могли возникнуть лунные моря.

Ошибочность подхода сторонников взрывного метеоритного происхождения крупных кратеров и морей (1-5) состоит в том, что фактор глубинности в рассмотрение ими не принимался и характерный размер воронки — радиус находился, как функция энергии, в предположении, что взрыв происходит на оптимальной глубине. Как было показано выше, это предположение ошибочно.

Неучет глубины расположения центра взрыва приводит и к другим неточностям. Заключение о том, что при равных массах и скоростях (т. е. равных энергиях) взрывы железного и каменного метеоритов приведут к образованию одинаковых кратеров (8), является неверным. Из табл. 2 видно, что глубина проникания железного метеорита примерно вдвое больше, чем каменного; легко проверить, что для образования одинаковых по размерам воронок энергия каменного метеорита должна быть примерно на порядок больше, чем энергия железного (табл. 2).

Необходимо отметить, что во всех приведенных расчетах принимались начальные условия, обеспечивающие максимальную сходимость с результатами, следующими из метеоритной гипотезы. Кроме того, при определении максимальной глубины проникания метеорита, следуя за сторонниками метеоритной гипотезы, принималось, что взрыв начинается после окончания проникания. В действительности же метеоритный взрыв начинается с момента удара, вследствие чего фактическая (эффективная) глубина центра взрыва будет заметно меньше расчетной глубины проникания, приведенной в табл. 2. Соответственно и найденные значения радиусов воронок являются заведомо завышенными. Зная скорость распространения детонационной волны в метеорите, можно достаточно точно оценить на какой глубине (через какое время после удара) взорвется все вещество

метеорита. Однако рассмотрение этого вопроса не входит в задачу настоящей работы.

Таким образом, несмотря на оптимизацию начальных условий, удовлетворительной сходимости результатов экспериментальных исследований с выводами, следующими из метеоритной гипотезы, достигнуть не удалось. С позиций метеоритной гипотезы в рамках теории сосредоточенного взрыва на выброс образование крупных кратеров и морей не может быть объяснено.

Решение вопроса о причинах возникновения крупных лунных кратеров и морей может идти по двум альтернативным направлениям:

1. Рассматривать образование их, используя теорию взрыва накладных зарядов. По физике явления это ближе к взрыву крупного метеорита, нежели взрыв на выброс. Однако в этом случае вряд ли удастся преодолеть энергетические трудности, так как кратерообразующий эффект накладных взрывов меньше, чем у взрывов на выброс.

2. Образование крупных кратеров и морей обусловлено эндогенными причинами.

Последнее представляется более вероятным.

Автор выражает благодарность В. Н. Родионову, А. Н. Дремину, А. Г. Мержанову и А. С. Штейнбергу за консультации и обсуждение результатов и М. Г. Сербуленко за помощь в расчетах.

Институт вулканологии
Сибирского отделения Академии наук СССР
Петропавловск-Камчатский

Поступило
15 V 1968

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Б. Ю. Левин, Бюлл. Всесоюзн. Астрономо-геодезич. общ., № 30, 37 (1962).
² Б. Ю. Левин, Е. Л. Рускол, Вопр. космогонии, № 8 (1962). ³ К. П. Станюкович, В кн.: Физика взрыва, М., 1959. ⁴ К. П. Станюкович, Искусственные спутники Земли, в. 4 (1960). ⁵ К. П. Станюкович, В. А. Бронштэн, В сборн. Луна, под ред. А. В. Маркова, гл. VIII, 1960. ⁶ М. А. Садовский, В. В. Адушкин и др., Физика горения и взрыва, № 1 (1967). ⁷ М. А. Садовский, В. В. Адушкин, В. Н. Родионов, ДАН, 167, № 6 (1966). ⁸ R. Baldwin, The Measure of the Moon, Chicago, 1963.