

АСТРОНОМИЯ

К. П. СТАНЮКОВИЧ и В. В. ФЕДЫНСКИЙ

О РАЗРУШИТЕЛЬНОМ ДЕЙСТВИИ МЕТЕОРИТНЫХ УДАРОВ

(Представлено академиком Н. Н. Семеновым 14 V 1947)

Большие планеты солнечной системы и их спутники непрерывно подвергаются метеоритной бомбардировке. Относительная скорость метеоритов довольно значительна и для Земли измеряется десятками километров к секунду. Даже наличие сравнительно плотной атмосферы, в которой подавляющее большинство метеоритов тормозится, испаряется и распыляется, не исключает возможности метеоритного удара о поверхность Земли с большой скоростью. При этом наблюдаются взрывные явления: образование воронки (кратера) с выбросом пыли и газов, световые и тепловые эффекты, а также мощная воздушная ударная волна. Падение тунгусского метеорита 30 VI 1908 г. (1,2), огромные кратеры Аризоны, Хенбери, Вабара (3,4), Саарема (5,6) показывают грандиозный масштаб этих явлений в отдельных случаях. В меньших масштабах такие явления, повидимому, не столь редки, как это доказывает недавнее падение метеорита 12 II 1947 г. вблизи Владивостока (7).

Поверхность Луны, не защищенная атмосферой, должна подвергаться гораздо более сильному воздействию метеоритных ударов, на что обратил внимание еще Robert Hooke, высказавший в 1665 г. предположение о метеоритном происхождении лунных кратеров (8). Много позже этим вопросом занимались А. Вегенер (9), Э. Эпик (10,11) и Уайли (12). Одним из авторов еще в 1937 г. было показано в работе, которая осталась неопубликованной, что метеорит, сталкивающийся с твердой поверхностью планеты со скоростью в несколько десятков км/сек., производит грандиозный взрыв. Особенно разрушительно должны действовать метеоритные взрывы на астероиды и твердые осколки в ядрах комет, на что указывали еще Ф. Бредихин (13) и позже С. Орлов (14,16).

Взрывное и разрушительное действие при падении метеорита, обладающего большой скоростью, своеобразно реализует его огромную кинетическую энергию. При скорости удара $> 4-5$ км/сек. тела ведут себя подобно сильно сжатому газу, так как силы молекулярного сцепления малы по сравнению с их начальной энергией. Поэтому явления, имеющие место при метеоритных ударах, могут быть описаны уравнениями газовой динамики.

От точки падения метеорита, как из центра взрыва, в коре планеты распространяется мощная ударная волна, которая способна в некотором объеме полностью разрушить твердое тело и превратить его в сильно сжатый газ. Полная энергия взрыва связана с давлением на фронте ударной волны соотношением, которое было найдено Л. Седовым (17) и одним из авторов (18):

$$\epsilon_0 = \frac{Ma^2}{2} = \frac{4\pi}{n-1} \eta p r^3. \quad (1)$$

Здесь M — масса метеорита, a — его скорость, p — давление на фронте ударной волны, r — расстояние от точки падения, n — показатель политропы расширяющегося газа, η — параметр, зависящий от n следующим образом: при $n=1, 7/5, 3, 5$ η равно, соответственно, $1/3, 1/5, 1/6, 1/7$.

Для сильного уплотнения газа при давлениях, больших 10^6 кг/см², на широком интервале давлений $n=3$, как это следует из работ Бриджмена и Иенсола (19).

Параметры, характеризующие фронт ударной волны, исходящей из точки падения метеорита, тогда задаются следующими основными уравнениями теории ударных волн:

$$E = \frac{pv}{n-1} = \frac{p}{2}(v_0 - v), \quad (2)$$

$$D^2 = v_0^2 \frac{p}{v_0 - v}, \quad (3)$$

$$u^2 = p(v_0 - v); \quad (4)$$

E обозначает плотность внутренней энергии, v — удельный объем, v_0 — начальный удельный объем, D — скорость фронта ударной волны, u — скорость газа за фронтом волны.

Тело разрушается до тех пор, пока полная энергия на фронте ударной волны, равна:

$$E + \frac{u^2}{2} = u^2 \geq \epsilon_k, \quad (5)$$

где $\epsilon_k = \alpha_k^2/2$ — соответствующая энергия разрушения.

Выражая v через v_0 и вводя плотности ρ и ρ_0 , найдем:

$$\rho = \frac{n+1}{n} \rho_0. \quad (6)$$

Рис. 1. 1 — железные метеориты, $\sigma/\rho_0=3$; 2 — каменные метеориты, $\sigma/\rho_0=1$; $a/a_k=5$ км/сек.

Из (2) и (6) находим величину предельного давления p_k , еще необходимого для разрушения кристаллической решетки:

$$p_k = \frac{n+1}{2} \rho_0 \epsilon_k. \quad (7)$$

Подставляя (7) в (1), получим:

$$\frac{Ma^2}{2} = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_0 \frac{3}{2} \frac{n+1}{n-1} \eta \epsilon_k, \quad (8)$$

и далее, вводя радиус метеорита R и его плотность σ , после небольших преобразований:

$$\left(\frac{r}{R}\right)^3 = \frac{2}{3\eta} \frac{n-1}{n+1} \frac{\sigma}{\rho_0} \left(\frac{a}{a_k}\right)^2. \quad (9)$$

Радиус зоны испарения кристаллической решетки r , вычисленный по формуле (9), в несколько раз превосходит радиус метеорита, как это видно из рис. 1. При построении кривых рис. 1 средний состав земной коры и метеоритов был принят по геохимическим данным.

Согласно А. Ферсману ⁽²⁰⁾, в земной коре и каменных метеоритах, имеющих удельный вес около 2,8, преобладают O, Si, Ca, Fe, в то время как железные метеориты, состоящие преимущественно из Fe, Ni, имеют плотность приблизительно в 3 раза больше. В этих условиях ϵ_k среды приблизительно равно 85 кал./моль, или около 3 кал./г, что соответствует критической скорости $a_k \cong 5$ км/сек.

Средняя плотность энергии во всем объеме зоны разрушения кристаллической решетки:

$$\bar{\epsilon} = \frac{3}{2} \eta \frac{n+1}{n-1} \epsilon_k, \quad (10)$$

что для $n = 3$ дает $\bar{\epsilon} = \epsilon_k/2$, или около 1,5 кал./г. Детонация ВВ дает начальную плотность энергии 1,0—1,5 кал./г, так что всю массу вещества в зоне разрушения можно уподобить равному количеству ВВ. Но выше было уже показано, что объем зоны разрушения может быть в десятки и сотни раз больше объема метеорита. Железный метеорит, врезающийся в земную кору со скоростью около 60 км/сек., должен произвести взрывное действие, в 1000 раз превосходящее эффект равного ему по весу количества ВВ.

Взрыв при ударе метеорита происходит вблизи самой поверхности планеты. Глубину проникновения метеорита можно оценить из теории неупругого удара:

$$a_x = a e^{-M_x/M}, \quad (11)$$

где $M_x = \pi R^2 \rho_0 l$ — масса среды, испытавшая соударение с метеоритом, а a_h/a в конце движения условно принято 0,01. Тогда $l = 6R \frac{\sigma}{\rho}$, т. е.

находится в пределах 6—18 R . Следовательно, метеорит останавливается вблизи границы зоны разрушения кристаллической решетки.

Экспериментальные данные Бюрло ⁽²¹⁾ и Гаузера ⁽²²⁾ связывают радиус воронки (кратера) B с массой ВВ, взорванных на поверхности почвы, следующим соотношением:

$$B^3 = km. \quad (12)$$

Если B выражается в метрах, а M и m в кг, то $k \cong 1$. Из (9) и (12) получаем, что

$$B^3 = \frac{2}{3\eta} \frac{n-1}{n+1} \left(\frac{a}{a_k}\right)^2 M. \quad (13)$$

Принимая $n=3$, найдем, что

$$B^3 = 2 \left(\frac{a}{a_k}\right)^2 M. \quad (14)$$

Так как $(a/a_k)^2$ может меняться в вероятных пределах от 1 до 200, то, например, Аризонский кратер диаметром 1200 м мог образоваться от падения метеорита, имевшего массу не более 100 тыс. тонн (если метеорит был „на излете“, т. е. имел скорость $a \cong a_k$) и вероятно, не менее 500 тонн. Таким образом, аризонский метеорит мог быть железным осколком, имевшим диаметр порядка 5—30 м (см. рис. 1).

Средняя скорость масс, выброшенных при метеоритном взрыве и обладающих свойствами газа, оценивается из теории нестационарных процессов ⁽²³⁾, что в рассматриваемом случае составляет $\cong 3$ км/сек. При этом распределение скоростей будет таково, что $1/2$ всех масс получит скорость, большую 3 км/сек., 10% — свыше 5 км/сек., а отдельные частицы даже до $2a$.

Если $a=50$ км/сек., то значительная часть вещества получит скорости выше предельной и будет выброшена в межпланетное пространство. Без учета задерживающего действия атмосферы, которое, конечно, очень велико для Земли, планета потеряет:

П л а н е т а	Земля	Марс	Луна	Церера (астероид)
Предельная скорость км/сек.	11,2	5,0	2,4	0,5
Относительное количество потерянной массы ($M=1$)	2	20	200	4000

Луна и астероиды, лишённые атмосферы, ежедневно теряют массу, которая в сотни и тысячи раз превосходит массу выпадающих на них метеоритов. Примем весьма осторожную оценку Ватсона (²⁴), считающего, что на Землю выпадает ежедневно 1 тонна метеорного вещества. Так как Луна представляет для метеоритов мишень, в 13 раз меньшую по площади, чем Земля, то она должна терять ежедневно массу порядка 15 тонн. Чем меньше размеры планеты, спутника или астероида, тем более интенсивно идет процесс их дезинтеграции. Вполне возможны катастрофические случаи полного разрушения микропланет или твердых частиц в ядрах комет, так как относительные орбитальные скорости тел солнечной системы в ее внутренней области имеют значения десятков км/сек. (соответствующий расчет показывает, что при скорости удара в 50 км/сек. масса полностью разрушаемого астероида может в 10 000 раз превосходить массу ударяющего метеорита). Следовательно, метеоритная бомбардировка и вызванная ею дезинтеграция планетного и кометного вещества в солнечной системе должны учитываться, как важные космогонические факторы.

В заключение отметим, что кратерообразующие метеориты, приближающиеся к земной поверхности с большой скоростью, порождают мощную ударную волну также в воздухе. Давление на ее фронте при $a=50$ км/сек. составляет 25 000 кг/см². Такая ударная воздушная волна производит разрушения вдоль проекции траектории метеорита на земную поверхность еще во время полета метеорита, иногда на значительном расстоянии от места падения.

Поступило
14 V 1947

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Л. А. Кулик, ДАН, А, № 23, 393 (1927). ² И. С. Астапович, Астр. журн., 10, № 4, 465 (1933). ³ L. J. Spenser, The Geogr. J., 81, No. 3, 227 (1933). ⁴ G. C. Flammarion, L'Astr., 46, No. 12, 549 (1932). ⁵ J. A. Reinwaldt, Publ. Geol. Inst. Univ. Tartu, 35, No. 11, 30 (1928). ⁶ Е. Л. Кринов, Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз., 9, № 4, 409 (1945). ⁷ Известия Сов. депутат. труд. Союза ССР от 22 III 1947 г. ⁸ R. A. McIntosh, The J. of the RAS of Canada, 73, No 1 (1943). ⁹ А. Вегенер, Происхождение лунных кратеров, М., 1923. ¹⁰ Э. К. Элик, Изв. Русск. об-ва любит. мировед., № 3 (1916). ¹¹ Е. К. Орик, Publ. de l'Obs. Astr. de l' Univ. de Tartu, 28, No. 6, 3 (1936). ¹² С. А. Wylie, Pop. Astr., 42, 469 (1934). ¹³ Th. A. Brédikhine, Etudes sur l'origine des météores cosmiques, St. Petersburg., 1903. ¹⁴ С. В. Орлов, Голова кометы и классификация кометных форм, М. 1945. ¹⁵ С. В. Орлов, Астр. журн., 17, № 1 (1940). ¹⁶ С. В. Орлов, Астр. журн., 17, № 3 (1936). ¹⁷ Л. И. Седов, Прикл. матем. и мех., 10, № 2 (1946). ¹⁸ К. П. Станюкович, ДАН, 52, № 7 (1946). ¹⁹ H. Jenson, Z. Phys., 111, No. 5—6 (1938—39). ²⁰ А. Е. Ферсман, Геохимия, 1, Л., 1933. ²¹ Бюрло, Детонация через влияние, Изд. Арт. Ак., 1934. ²² П. И. Чичеловский, Основы расчета зарядов, Воениздат, 1945. ²³ Л. Д. Ландау и К. П. Станюкович, ДАН, 47, № 3 (1945). ²⁴ F. C. Watson, Between the Planets. Phil., 1947.