

Ep. 5.12

EESTI NSV TEADUSTE AKADEEMIA GEOLOGIA INSTITUUDI UURIMUSED
ТРУДЫ ИНСТИТУТА ГЕОЛОГИИ АКАДЕМИИ НАУК ЭСТОНСКОЙ ССР

XI

МЕТЕОРИТИКА

ТАЛЛИН 1963 TALLINN

О КРАТЕРООБРАЗУЮЩИХ МЕТЕОРИТАХ

В. А. БРОНШТЭН, К. П. СТАНЮКОВИЧ

Рассмотрим явления, происходящие при ударе метеорита о твердую поверхность.

При малых скоростях падения (до 100 м/сек) в месте удара, в случае обыкновенного грунта, будет наблюдаться обычная вмятина, причем сам метеорит не разрушается; если удар метеорита о скальные породы произойдет лишь при самых незначительных скоростях (порядка 10—20 м/сек), то он не вызовет дробления скальных пород и самого метеорита; большие скорости вызовут это дробление. При скоростях порядка 100—500 м/сек, в случае удара о мягкий грунт, немоналитный метеорит также начнет дробиться. При еще больших скоростях происходит полное разрушение (испарение) метеорита и прилегающих к нему частей среды, что приводит к взрыву с образованием кратера.

Разнообразие явлений, происходящих при ударе различных метеоритов (каменных, железных, монокристаллических, сложных, и т. д.) различной массы в различные среды (песок, глину, известняк, скальные породы и т. д.) с различными скоростями, оказывается, поддается единому физическому анализу, поскольку определяющих ход явления основных параметров всего два: скорость удара метеорита о поверхность преграды и наименьшая плотность энергии (на единицу массы) разрушения структуры какого-либо из компонентов метеорита или среды, испытывающей действие удара.

Очевидно, масса ударяющего метеорита будет влиять лишь на размеры образования, а именно: радиус разрушения (воронки кратера, выбросы материала из кратера), при прочих равных условиях, будет пропорционален радиусу метеорита (при условии его проникания в однородную среду). Скорость же удара и величина плотности энергии разрушения структуры какого-либо компонента метеорита или среды, воспринимающей удар, качественно влияют на характер действия этого удара.

Если скорость удара мала, то, как мы указали выше, образуется простая вмятина среды, воспринимающей удар, большая или меньшая, в зависимости от ее прочности и скорости метеорита; в почве образуется не очень глубокая воронка, причем ее диаметр соизмерим с диаметром метеорита; глубина всей воронки может быть меньше или больше ее диаметра.

Если скорость такова, что части метеорита могут разрушаться, раскалываясь на сравнительно мелкие (по отношению к метеориту) куски, или будет дробиться среда, воспринимающая удар, то направлен-

ное движение метеорита приведет к ненаправленному, неупорядоченному движению этих частиц, которые, разлетаясь по различным направлениям, будут увеличивать размеры воронок по диаметру за счет уменьшения ее размеров в глубину. Это явление также связано с более сильным торможением метеорита в связи с увеличением его эффективных размеров.

Часть вещества метеорита и среды, воспринимающей удар, будет выброшена наружу. Очевидно, что подобное явление может наблюдаться тогда, когда давление при ударе будет порядка сотен атмосфер, т. е. когда скорость удара достигнет сотен метров в секунду. При дальнейшем увеличении скорости удара может произойти сначала частичное, а затем и полное дробление метеорита и среды, воспринимающей удар, в непосредственной близости к метеориту; и, наконец, при скоростях удара для железного метеорита 4—5 км/сек, для каменного метеорита 2—4 км/сек будет происходить испарение метеорита и прилегающей к нему среды.

Эти явления, начиная с простого дробления, следует назвать взрывными. Обычно под взрывом понимают процесс (происходящий при химической реакции) быстрого разделения какого-либо вещества, идущий с выделением тепла, что влечет за собой быстрое увеличение давления и расширение продуктов реакции. В данном случае под взрывом следует понимать процесс быстрого перехода энергии упорядоченного движения частиц, составляющих тело, в энергию неупорядоченного движения отдельных частиц, образующихся при разрушении данного тела, причем частицы — это не только молекулы или атомы, но и просто мелкие осколки данного тела. Полный взрыв происходит при испарении тела; при разрушении тела на осколки наблюдается явление, подобное взрыву меньшей интенсивности.

Надо заметить, что если метеорит попадает в водонасыщенный грунт, то происходит испарение воды (уже при скоростях 1,5—2 км/сек). Это испарение будет происходить вследствие того, что при ударе метеорита о поверхность планеты по самому метеориту и в глубь планеты пойдет мощная ударная волна, причем давление p_y на фронте этой волны в момент удара определится точным выражением, которое находим из закона сохранения количества движения:

$$p_y = \frac{(\bar{k}_1 + 1)(\bar{k}_2 + 1)\delta_{10}\delta_{20}v_k^2}{(\sqrt{(\bar{k}_1 + 1)\delta_{10}} + \sqrt{(\bar{k}_2 + 1)\delta_{20}})^2}, \quad (1)$$

где δ_{10} — плотность метеорита,
 δ_{20} — плотность среды, воспринимающей удар,
 v_k — скорость удара.

Величины k_1 и k_2 определяются выражениями:

$$\bar{k}_1 = \frac{\delta_{10}}{\delta_1 - \delta_{10}}; \quad \bar{k}_2 = \frac{\delta_{20}}{\delta_2 - \delta_{20}}, \quad (2)$$

где значение δ_1 соответствует плотности метеорита на фронте ударной волны (или волны сжатия), образующейся при ударе; δ_2 — то же для среды, воспринимающей удар. При больших скоростях удара, т. е. при давлениях порядка 100 000 кг/см² и выше, k_1 и k_2 уменьшаются и приближаются к величинам $\frac{k-1}{2}$, где k — показатель адиабаты в законе сжимаемости. Для метеорита

$$\rho = A_1 (\delta_1^{k_1} - \delta_{10}^{k_1}), \quad (3a)$$

для среды

$$\rho = A_2 (\delta_2^{k_2} - \delta_{20}^{k_2}), \quad (3б)$$

при этом $k_1 \approx k_2 \approx 3 \div 5$. При меньших давлениях для грунта $k_2 \approx 5 \div 10$, причём $k_2 < k_1$.

Формула (1) позволяет достаточно точно рассчитывать давления для различных скоростей, например при $v_k = 10$ км/сек $p_y = 10^7$ кг/см² ($\delta_{10} = \delta_{20} = \delta$).

Большинство мелких метеоритных тел, масса которых не превышает десятков или сотен граммов, влетая в земную атмосферу, вследствие торможения, которое прогрессивно возрастает с уменьшением высоты, особенно из-за резкого уменьшения размеров метеоритного тела, перестают светиться уже на высоте 50—80 км. Более крупные тела, с массой порядка не менее сотен граммов, проникают в нижние слои атмосферы, где резкое торможение часто влечет за собой их разрушение; наиболее крупные метеорные тела в виде осколков при этом падают на Землю. (Надо заметить, что разрушение метеорного тела происходит не всегда.)

Падение метеоритов с остатками космической скорости на землю возможно лишь в том случае, когда их начальная масса до влета в атмосферу была порядка сотен тонн.

Метеориты, падающие с малыми скоростями, образуют неглубокие узкие воронки в рыхлом грунте; если они падают, например, на скальные породы, последние не испытывают деформации. В случае падения метеоритов с большими скоростями диаметры воронок прогрессивно возрастают с возрастанием скорости. При скоростях удара порядка сотен метров в секунду наблюдаются разрушения структуры или самого метеорита, или среды, в которую он проникает (или того и другого вместе), что приводит к выбросу осколков из образовавшейся воронки-кратера. Большие и гигантские метеориты, ударяясь о поверхность Земли с остатками космической скорости (больше 4—5 км/сек), производят мощный взрыв, при этом диаметр образовавшегося при взрыве кратера во много раз превышает его глубину, а вещество метеорита частично или полностью испаряется, и, таким образом, в больших кратерах почти ничего не находят.

В том случае, когда первоначальное метеорное тело разрушается недалеко от поверхности Земли (в воздухе) и его обломки падают с различными скоростями (большие — с большими, малые — с меньшими), на поверхности Земли может наблюдаться указанное разнообразие кратеров, как это, например, имело место при падении Сихотэ-Алинского метеорита. Следует отметить, что сначала с увеличением размеров воронок увеличиваются массы найденных в них метеоритов; далее с увеличением размеров воронок массы найденных в них метеоритов уменьшаются вследствие дезынтеграции.

Метеоритные бомбардировки особенно сильно влияют на планеты, лишённые атмосферы, и на астероиды, и вследствие этого подобные тела солнечной системы разрушаются — дезынтегрируют со временем. Точно так же при столкновениях метеорные тела разрушают друг друга. На расстоянии Земли от Солнца железное метеорное тело радиусом 1 см, т. е. с массой 30 г, полностью может быть разрушено в пределах 5—10 млн. лет.

После этого физического введения в теорию кратерообразующих метеоритов рассмотрим конкретный пример падения метеорита Каали.

Теория образования метеоритных кратеров, развитая за последние годы К. П. Станюковичем (1960а), позволяет определить по величине кинетической энергии падающего метеорита E_k диаметр образующегося кратера D или, наоборот, по D найти E_k . С другой стороны, исследование движения больших метеоритов в атмосфере показывает, что далеко не всякое сочетание конечной массы m и конечной скорости v метеорита, удовлетворяющее условию

$$E_k = \frac{m_k v_k^2}{2}, \quad (4)$$

может иметь место в действительности.

Задачей нашей работы было попытаться восстановить по имеющимся фактическим данным о Каалиских метеоритных кратерах обстоятельства падения этого метеорита. Наиболее подробное описание района падения и кратеров имеется в работах И. А. Рейнвальда (Reinwaldt, 1928; Reinwald, 1939).

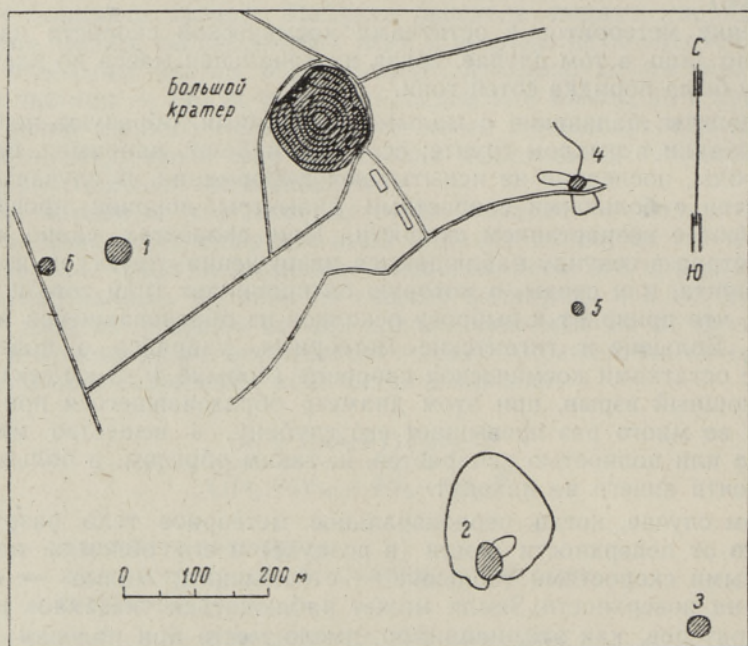


Рис. 1. Расположение Каалиских кратеров (по И. А. Рейнвальду).

Всего было обнаружено семь кратеров, из которых один получил название «большого», а остальные обозначены номерами от одного до шести. Параметры этих кратеров приведены в табл. 1; расположение их показано на рис. 1.

Размеры и глубина d кратеров взяты у И. А. Рейнвальда (Reinwaldt, 1928; Reinwald, 1939).

Кратеры	Размеры, м	Принятое D , м	d , м	E_k , эрг
Большой	110×92	100	8,5	$4 \cdot 10^{19}$
№ 1	39×34	37	4,0	$2 \cdot 10^{18}$
№ 2	53×36	45	3,5	$3,5 \cdot 10^{18}$
№ 3	32	32	3,5	10^{18}
№ 4	20×14	17	1,2	$2 \cdot 10^{17}$
№ 5	13×10	12	0,9	$8 \cdot 10^{16}$
№ 6	26×25	25	0,65	$5,5 \cdot 10^{17}$

В третьем столбце приведено принятое нами значение диаметра D . Значения энергии получены из следующих формул, сводящих задачу к взрыву некоторой эквивалентной массы взрывчатого вещества (Станюкович, 1960а; Станюкович и Бронштэн, 1960):

$$M_v Q_v = \eta E_k, \quad (5)$$

$$R_v = \lambda M_v^{\frac{1}{3}}, \quad (6),$$

где M — эквивалентная масса стандартного взрывчатого вещества ($вв$),

Q_v — плотность энергии этого $вв$, выделяющейся при взрыве,

R_v — радиус воронки взрыва,

η — коэффициент полезного использования энергии.

Для типичных $вв$ $Q_v = 1 \div 1,5$ ккал/г, в среднем $Q_v = 1,25$ ккал/г = $5,2 \cdot 10^{10}$ эрг/г. Заменяя R_v через $\frac{D}{2}$ и исключая M_v из этих формул, найдем, что

$$E_k = \frac{Q}{\eta} \left(\frac{D}{2\lambda} \right)^3. \quad (7)$$

Коэффициент λ для основной породы в районе Каалиских кратеров — доломита — можно принять равным шести (для гранита $\lambda = 5$, для глины $\lambda = 8$). Кроме того, практически $\eta = 0,8$. Вычисленные по формуле (7) значения E_k приведены в пятом столбце табл. 1.

Минимальная скорость удара метеорита определяется из условия испарения среды при ударе, которое непременно сопровождает удар кратерообразующих метеоритов:

$$v_k^2 \geq 2\varepsilon_i, \quad (8)$$

где ε_i — энергия, необходимая для испарения 1 г среды. Полагая для доломита $\varepsilon_i \approx 1,5 \cdot 10^{11}$ эрг/г, получим $v_k \approx 5,5$ км/сек.

Для нахождения наиболее вероятных значений конечных и начальных масс и скоростей m_k , v_k , m_0 , v_0 мы применили метод, использованный в исследовании обстоятельств движения в атмосфере Тунгусского метеорита, проведенном В. А. Бронштэном (Бронштэн, 1961). В момент достижения метеоритом земной поверхности выполняется условие

$$e^{-u_0} [Ei(u_0) - Ei(u)] = \frac{c_x A \rho_0 H \sec i}{m_0^{1/2}}, \quad (9)$$

$$\text{где } u_0 = \frac{\sigma v_0^2}{6}, \quad u = \frac{\sigma v^2}{6}, \quad \sigma = \frac{\lambda}{c_x Q},$$

λ — коэффициент теплопередачи,

c_x — коэффициент сопротивления,

Q — энергия, идущая на нагревание и испарение единицы массы метеорита,

A — коэффициент формы,

ρ_0 — плотность воздуха на уровне моря,

H — высота однородной атмосферы,

i — наклон траектории к вертикали,

$Ei(u)$ — интегральная показательная функция.

Находки метеоритного железа в кратерах указывали, что метеорит был железным. Поэтому, полагая плотность метеорита $\delta = 8 \text{ г/см}^3$, найдем $A = 1,22 \delta^{-2/3} = 0,3$ (для шарообразной формы). Кроме того, $\rho_0 = 1,25 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$; $H = 8 \cdot 10^5 \text{ см}$.

Менее уверенны оценки параметров σ , c_x и угла падения i . В исследовании Тунгусского метеорита (Бронштэн, 1961) было положено $\sigma = 10^{-12}$ и для $\frac{c_x}{2}$ брались три значения: 0,5, 1 и 2. Единственный случай фотографической регистрации падения метеорита Пршибрам был обработан Цеплехой, но в первом сообщении о результатах обработки (Сеплеха, 1959) были допущены некоторые ошибки, в частности в оценке σ и m_0 , о чем сообщил позднее сам Цеплеха (Сеплеха, 1960; Цеплеха, 1961).

Для интервала скоростей 1—7 км/сек он получил $\frac{c_x}{2} = 0,43$ и для скоростей $v \leq 20 \text{ км/сек}$ — переменное σ , возрастающее со скоростью (частное сообщение З. И. Цеплеха):

v	7	10	14	17	20 км/сек
$\sigma \cdot 10^{-12}$	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9.

Результат Цеплехи для c_x близко совпадает с экспериментальными данными, приводимыми Бэкером (Baker, 1958), получившим для режима непрерывного потока, соответствующего движению больших метеоритов ниже 70—80 км. $\frac{c_x}{2} = 0,46$. С другой стороны, К. П. Станюкович (1960б),

исходя из теоретических соображений, получил $\frac{c_x}{2} = 1,85$. Мы примем $\frac{c_x}{2} = 1$.

Порядок величины σ , полученный Цеплехой, укладывается в пределы, приведенные в ранней работе Яккия для ярких метеоров (Jacchia, 1949). Для более слабых метеоров Яккия (Jacchia, 1952) получил более высокие значения σ . Мы, как и прежде, примем $\sigma = 10^{-12}$, а влияние возможной ошибки разберем отдельно. Что касается угла i , то он неизвестен, поскольку падение произошло, вероятно, в доисторическую эпоху. Однако форма как самих кратеров, так и эллипса рассеяния (см. рис. 1) указывает на то, что падение происходило под углом, близким к 45° . Поэтому мы положили $i = 45^\circ$ и $\sec i = 1,42$.

Вычисления конечных масс, скоростей и энергии мы производили для четырех значений m_0 , а именно: 50, 500, 5000 и 50 000 т и для сплошного спектра скоростей, соответствующих интервалу $u_0 = 0,4 \div 3,0$ (при $\sigma = 10^{-12}$ это соответствует $v_0 = 15,5 \div 42,4 \text{ км/сек}$). Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, значение $m_0 = 50$ т ни при каких начальных скоростях не может дать энергии, необходимой для образования большого кратера, причем во всех случаях $v_k < 3,5$ км/сек. Напротив, при $m_0 = 50\,000$ т энергия удара оказывается завышенной на три порядка. При двух других значениях начальных масс можно получить приемлемые величины E_k , а именно: для $m_0 = 500$ т при $v_0 = 21,5$ км/сек получим $m_k = 80$ т и $v_k = 9,8$ км/сек, а для $m_0 = 5000$ т при $v_0 = 39$ км/сек получим $m_k = 20$ т и $v_k = 20$ км/сек. На рис. 2 показана область значений E_k , соответствующих полю начальных масс и скоростей (m_0, v_0) . Изолинии проведены через один порядок. Пунктиром нанесена изолиния $E_k = 4 \cdot 10^{19}$ эрг.

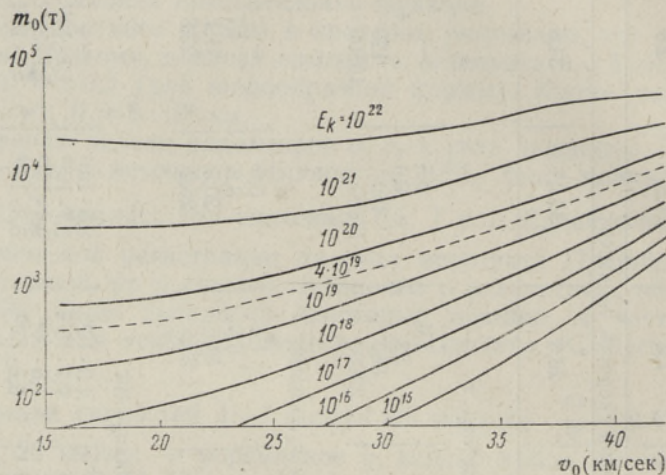


Рис. 2. Зависимость энергии удара (E_k) от начальной массы (m_0) и скорости (v_0).

Таким образом, начальная масса метеорита Каали находится в пределах 400—10 000 т и наиболее вероятная ее оценка — около 1000 т. Начальная скорость могла заключаться в весьма широких пределах. Конечная масса составляла, как мы уже видели, 20—80 т и скорость падения — 10—20 км/сек.

Изменение оценки параметра c_x в два раза при неизменности σ (большую ошибку трудно допустить) повлечет за собой изменение m_0 и m_k в 0,8 раза и никак не повлияет на определение v_0 и v_k . Точно так же повлияет изменение оценок A и $\text{sec } i$. Изменение оценки параметра σ в два раза (при неизменности c_x) вызовет изменение v_0 и v_k в 0,7 раза и не повлияет на оценки m_0 и m_k . Таким образом, неточность принятых нами параметров скажется незначительно, поскольку результаты мы можем получить лишь с точностью до одного порядка.

До сих пор мы рассматривали лишь метеорит, образовавший большой кратер. Остальные кратеры, как легко видеть, не могли быть образованы индивидуальными метеоритными массами, летевшими вместе с главной массой через атмосферу или хотя бы начиная с высоты 80 км, где сказывается уже сопротивление воздуха. При меньших массах эти метеориты были бы сильнее заторможены воздухом и, отстав от главной массы, упали бы вдалеке от нее. Между тем, как видно из рис. 1, большая ось эллипса рассеяния составляет всего 1 км, малая ось — 500 м. Это указывает на то, что разрыв метеорита на части произошел

на небольшой высоте. Для сравнения укажем, что отрыв от главной массы метеорита Пршибрам произошел между высотами 44 и 23 км, причем большая ось эллипса рассеяния составляет 16 км, малая ось — 1 км. Следует иметь в виду, что метеоритный дождь Пршибрам был каменный, а Каали — железный. Сихотэ-Алинский железный метеоритный дождь выпал в эллипсе рассеяния с большой осью 5 км, но мы не знаем, на каких высотах происходило отделение осколков.

Таким образом, следует считать, что после разрыва, происшедшего на сравнительно небольшой высоте (5—10 км), отрывавшиеся от главной массы осколки имели практически ту же скорость, что и главная масса. Поэтому массы осколков составляли те же доли от главной массы, что и энергия образования соответствующих кратеров — от энергии образования большого кратера. Общая масса осколков составляла, по-видимому, 18—20% главной массы.

В заключение отметим, что в среде, воспринявшей удар, около кратера разрушения должна находиться область разрушенных, но не выброшенных пород и остатков метеорита (находящихся в мелкораздробленном состоянии). Радиус этой области может на несколько десятков процентов превосходить соответствующий радиус кратера.

Эта область образуется вследствие уходящей вглубь ударной волны. Если внизу на сравнительно небольшом расстоянии находится жидкая среда (как, например, согласно предположениям, это имело место на Луне) или пустота, то ударная волна вызовет с тыловой части кратера откол.

Часть энергии ударной волны, идущей в направлении радиуса кратера и вниз под небольшими углами, пойдет на вздыбливание пород и на их частичный подъем без выброса, что приведет к образованию вала.

*Комитет по метеоритам
Академии наук СССР*

ЛИТЕРАТУРА

- Бронштэн В. А. 1961. К вопросу о движении в атмосфере Тунгусского метеорита. Метеоритика, вып. XX.
- Станюкович К. П. 1960а. Элементы теории удара твердых тел с большими скоростями. Искусственные спутники Земли, вып. 4.
- Станюкович К. П. 1960б. Об одном эффекте в области аэродинамики метеоров. Изв. АН СССР, ОТН. Механика и машиностроение, № 5.
- Станюкович К. П. и Бронштэн В. А. 1960. Роль внешних космических факторов в эволюции Луны. В сб.: «Луна». Физматгиз.
- Цеплеха З. И. 1961. Базисные фотографии падения метеоритного дождя Пршибрам. Метеоритика, вып. XX.
- Baker, R. M. L. 1958. Drag interactions of meteorites with the Earth's atmosphere. Dissertation. University of California, Los Angeles.
- Cep-lecha, Z. 1959. Bull. Astr. inst. Czech., vol. 11, no. 1, p. 9.
- Cep-lecha, Z. 1960. Bull. Astr. inst. Czech. vol. 11, no. 4, p. 164.
- Jacchia, L. G. 1949. Photographic meteor phenomena and theory. Harv. Obs. Techn. Report, no. 2.
- Jacchia, L. G. 1952. A comparative analysis of atmospheric densities from meteor deceleration observed at Massachusetts and New Mexico. Harv. Obs. Techn. Report, no. 10.
- Reinwaldt, I. 1928. Bericht über geologische Untersuchungen am Kaalijärv (Krater von Sall) auf Ösel. Publ. Geol. Inst. Univ. Tartu, Nr. 11.
- Reinwald, I. A. 1939. The Kaalijärv Meteor craters (Estonia). Publ. Geol. Inst. Univ. Tartu, Nr. 55.

KAALI METEORIIDI LANGEMISE TINGIMUSTEST

V. BRONSTEN, K. STANJUKOVITS

Resümee

K. P. Stanjukovitši poolt arendatud meteoriidikraatrite tekkimise teooria alusel on artiklis välja arvatud seitsme Kaali meteoriidikraatri tekkimiseks vajalik energia — E_k . Andmed nende kraatrite kohta ja valemi (7) järgi arvatud E_k väärtused on toodud tabelis 1. Tingimuse (8) alusel on löögi minimaalne kiirus meteoriidi aurustamiseks 5,5 km/sek.

Meteoriidi alg- ja lõppmasside ning alg- ja lõppkiiruste (m_0, m_k, v_0, v_k) tõenäoliste väärtuste leidmiseks kasutati meteoriidi atmosfääris liikumise põhivõrrandite lahenditest järelduvat valemit (9). Arvutuste juures võeti aluseks, et takistuse koefitsient $c_x = 2$, kuju koefitsient $A = 0,3$, parameeter $\sigma = 10^{-12}$ ja langemisnurk $i = 45^\circ$. Nende parameetrite ebatäpsest tundmisest tekkida võivad vead ei ületa meteoriidi massi alal 20% ja kiiruse alal 30%. Algmassid m_0 ja -kiirused v_0 on antud suvaliselt suurtes piirides, mille järgi arvutati m_k, v_k, E_k . Tulemused on esitatud tabelis 2 ja joonisel 2.

Peakraatri (diameeter 100 m) kohta leitud väärtusele $E_k = 4 \cdot 10^{19}$ ergi vastavad masside ja kiiruste järgmised piirid:

$$\begin{aligned}m_0 &= 400 - 10\,000 \text{ t} \\m_k &= 20 - 80 \text{ t} \\v_k &= 10 - 20 \text{ km/sek} \\v_0 &= 15 - 45 \text{ km/sek.}\end{aligned}$$

Killud, mis moodustasid väiksemad kraatrid, eraldusid peamassist väikesel kõrgusel ja langesid sama kiirusega. Nende kogumass ei ületa 18–20% üldmassist.

*NSV Liidu Teaduste Akadeemia
Meteoriitide Komitee*

ON THE FALL OF KAALI METEORITE

V. BRONSTEN, K. STANYUKOVICH

Summary

On the basis of the theory on the origin of meteorite craters, developed by K. Stanyukovich the authors have computed the energy — E_k — necessary for the formation of the seven meteorite craters at Kaali. The data on these computations and the values of E_k computed according to the formula (7) are presented in table 1. On the basis of the condition (8), the minimum velocity of the impact of the meteorite upon the earth is 5.5 km/sec.

For the finding of probable initial and final masses and velocities of the meteorite (m_0, v_0, m_k, v_k), the formula (9) concluded from the solution of basic equations (5) on the motion of the meteorite in the atmosphere, was used. The computation was based on the supposition that the drag coefficient $c_x = 2$, the form coefficient $A = 0,3$, the parameter $\sigma = 10^{-12}$, and the incline of the trajectory $i = 45^\circ$. The errors caused by an insufficient

knowledge of these parameters do not exceed 20% in the mass of meteorite, and 30% in the velocity of meteorite. The initial masses m_0 and velocities v_0 are given within large limits, and according to them m_k , v_k , and E_k are computed. The results are presented in table 2 and figure 2.

The following ranges of masses and velocities correspond to the value $E_k = 4 \cdot 10^{19}$ found for the main crater (100 m in cross-section):

$$400 < m_0 < 10\,000 \text{ t}$$

$$20 < m_k < 80 \text{ t}$$

$$10 < v_k < 20 \text{ km/sec}$$

$$15 < v_0 < 45 \text{ km/sec}$$

The fragments which formed the smaller craters were separated from the main mass at an inconsiderable height and fell with the same velocity. Their total mass does not exceed 18—20 per cent of the main mass.

*Academy of Sciences of the U.S.S.R.,
Committee on Meteorites*