

УДК 523.51+523.34

Метеоритные кратеры на поверхности Земли

В. Г. Кручиненко

Астрономическая обсерватория Киевского Национального университета им. Тараса Шевченко
04053, Киев-53, ул. Обсерваторная, 3

Предложен критерий разделения метеоритных кратеров на ударные и взрывные. Принимается, что ударные кратеры образуются метеороидами, высота максимального торможения которых находится над земной поверхностью. Если максимальное торможение тел происходит на поверхности Земли или не достигается вследствие столкновения с поверхностью планеты, то такие метеороиды образуют взрывные кратеры. Поэтому минимальный взрывной кратер будет образован телом, максимальное торможение которого будет находиться на поверхности нашей планеты. На основании полученных результатов с использованием теорий кратерообразования К. П. Станюковича и Э. Эпика вычислены минимальные размеры взрывных кратеров. Расчеты проведены для случаев столкновения каменных тел, каменных с железными; каменных и железных с глинистой почвой. Коэффициент абляции в наибольшей степени влияет на полученные результаты. Дано объяснение различию результатов при использовании упомянутых выше теорий кратерообразования.

МЕТЕОРИТНІ КРАТЕРИ НА ПОВЕРХНІ ЗЕМЛІ, Кручиненко В. Г. — Запропоновано критерій розділення метеоритних кратерів на ударні та вибухові. Допускаємо, що ударні кратери утворюють метеороїди, висота максимального гальмування яких знаходиться над поверхнею Землі. Якщо максимальне гальмування тіл відбувається на поверхні Землі або не досягається внаслідок зіткнення з поверхнею планети, то такі метеороїди будуть утворювати вибухові кратери. Тому мінімальний вибуховий кратер буде утворений тілом, максимальне гальмування якого буде знаходитись на поверхні нашої планети. На підставі отриманих результатів з використанням теорій кратероутворення К. П. Станюковича та Е. Епіка обчислені мінімальні розміри вибухових кратерів. Розрахунки виконані для випадків зіткнення кам'яних тіл, кам'яних з залізними та кам'яних і залізних з глинистим ґрунтом. Коефіцієнт абляції найбільше впливає на отримані результати. Дано пояснення розходженню результатів, яке отримане при використанні згаданих вище теорій кратероутворення.

METEORITIC CRATERS ON THE EARTH'S SURFACE, by Kruchynenko V. G. — A criterion for the separation of impact and explosive meteoritic craters is offered. It is assumed that impact craters are formed by meteoroids whose maximum deceleration heights are above the Earth's surface. If the maximum deceleration occurs either on the Earth surface or is not reached, the

meteoroids form explosive craters. Thus, a minimum explosive crater will be formed by a body whose maximum deceleration is reached on the surface of our planet. Based on the results obtained using the theories of crater formation by K. P. Stanyukovich and E. Opik, minimum sizes of explosive craters are determined. The calculations are done for the cases of collision of stony bodies, stony bodies with iron ones, and stony and iron bodies with clay soil. The ablation factor is the parameter which influences most of all the results obtained. The differences in the results are explained using the above mentioned theories of crater formation.

ВВЕДЕНИЕ

При падении на поверхность планеты метеориты могут образовывать ударные или взрывные кратеры. При неупругих столкновениях тел предел их разрушения определяется условием, что гидродинамическое давление на ударном фронте, движущемся со скоростью V_1 в среду с плотностью ρ , должно быть не меньше прочности вещества на разрушение, т. е. $\rho V_1^2/2 \geq \sigma_p$. Если принять, например, прочность на разрушение σ_p равной прочности на сжатие для Сихотэ-Алинского метеорита, т. е. $\sigma_p = \sigma_{сж} = 4.1 \cdot 10^9$ Н/м² [5] при $\rho = 7.8$ г/см³, то необходимая скорость V_1 столкновения для разрушения кристаллической решетки вещества должна быть не меньше 0.32 км/с. При столкновениях в космосе это условие, как правило, всегда выполняется. Безусловно, тип столкновения (упругое или неупругое) зависит не только от скорости столкновения, но и от реологических свойств обоих тел. На основании различных опытов, в том числе и опытов со стальным шариком при его ударе по свинцовой пластине, можна привести приближенную схему соударений монолитных и прочных тел.

При скоростях удара, меньших V_1 , происходит упругое столкновение — в мишени и снаряде не возникает остаточных деформаций.

При $V_1 < V \leq 0.5$ км/с глубина проникновения снаряда в мишень увеличивается линейно со скоростью. Прочный снаряд не деформируется. При скоростях удара до 1 км/с при столкновениях каменных или металлических тел образуются только вмятины порядка размера «ударника».

При $0.5 < V \leq 2.5$ км/с снаряд деформируется или разрушается. Глубина его проникновения сначала резко уменьшается, а потом медленно увеличивается, и на верхней границе скорости достигает примерно того же значения, что и при $V \approx 0.5$ км/с.

При $2.5 < V \leq 4$ км/с снаряд и примыкающие к нему участки мишени начинают течь подобно жидкости. Глубина проникновения снаряда медленно увеличивается, а снаряд в образованной им полости «выворачивается наизнанку», так что кратер оказывается покрытым остатками метеорита. Большинство ударных кратеров на Земле образуется в упомянутых выше режимах, хотя параметры возникающего кратера сильно зависят от материала метеорита и особенно от материала мишени.

При дальнейшем увеличении скорости удара все меньшую роль будет играть природа метеорита и мишени, так как процесс носит взрывной характер. Для образования взрывного кратера обычно принимается [1, 9, 14], что удельная кинетическая энергия падающего тела должна превосходить удельную теплоту испарения Q_v метеорита и окружающих пород ($V^2 > 2Q_v$) или плотность энергии Q взрывчатого вещества ТНТ. Для большинства пород $Q_v \approx 10^7$ Дж/кг (для ТНТ $Q = 4.2 \cdot 10^6$ Дж/кг), поэтому взрывные кратеры начинают образовываться при скоростях удара $V \geq 3.0 \dots 4.5$ км/с. Если скорость падения меньше этой величины, то образо-

ванный кратер будет ударным, небольшого размера и основная масса метеорита (монокристаллического или разрушенного) будет находиться в поверхностном слое. Среди известных больших метеоритов к этой категории можно отнести железный метеорит Гоба (весом 60 т), который при падении образовал кратер, глубина которого в 1.5 раза меньше его диаметра. Если метеорит при падении имеет скорость больше 3.0—4.5 км/с, то его кинетической энергии достаточно для разрушения структуры твердого тела и превращения значительного количества вещества метеорита и окружающих его пород в сильно сжатый высокотемпературный газ. Объем вещества, который превращается в газ, в десятки и сотни раз превосходит размер метеорита. К таким кратерам можно отнести Аризонский, образованный железным метеороидом.

ВЫСОТА МАКСИМАЛЬНОГО ТОРМОЖЕНИЯ МЕТЕОРОИДА

Если из уравнений физической теории метеоров исключить такие переменные величины, как масса, поперечное сечение (мидель) и плотность атмосферы, и приравнять вторую производную от скорости нулю, то найдем условие максимального торможения метеороида. Возможны два варианта: мидель $S = S_0 = \text{const}$ и $S \neq \text{const}$, т. е. поперечное сечение изменяется со временем t или с высотой H . Первый случай реализуется для мелких метеорных частиц (так называемых микрометеоритов Уиппла [17]), у которых из-за торможения и теплового излучения температура поверхности не успевает достичь значения, необходимого для интенсивного испарения и разрушения. В зависимости от скорости входа в атмосферу их максимальный размер составляет от 0.5 до 100 мкм. Случай постоянства миделя (массы) используется также для больших тел, для которых влияние атмосферы Земли минимально и которые достигают поверхности нашей планеты практически без потери скорости и массы. Мы рассматриваем второй случай, когда мидель зависит от времени или высоты. При этом условие максимального торможения имеет вид [3, 15]

$$[E_i(U_0) - E_i(U_*)](1 - U_*)\exp(-U_*) = 1, \quad (1)$$

где

$$E_i(U) = \int_{-\infty}^U \frac{\exp t dt}{t}$$

— интегральная показательная функция,

$$U_0 = \sigma(1 - \mu)V_0^2/2,$$

$\sigma = \Lambda/(2\Gamma Q_d)$ — коэффициент абляции, Λ и Γ — коэффициенты теплопередачи и сопротивления, Q_d — удельная энергия разрушения, μ — параметр формы тела, V_0 — начальная (заатмосферная) скорость метеорного тела, $U_* = \sigma(1 - \mu)V_*^2/2$, V_* — скорость метеорного тела на высоте H_* максимального торможения. (Все величины с нижним индексом «*» относятся к высоте максимального торможения). Формула (1), определяющая зависимость скорости метеороида на высоте H_* от его начальной скорости, т. е. $V_*(V_0)$, выражает эту функцию в неявном виде и неудобна для практического пользования. Поэтому для нее нами найдена и впервые приведена в монографии [3] достаточно точная и сравнительно простая аналитическая аппроксимация, которую можно применять для всего диапазона метеорных скоростей и значений параметров σ и μ (см. рис. 1):

$$U_* = \text{th}(0.35U_0),$$

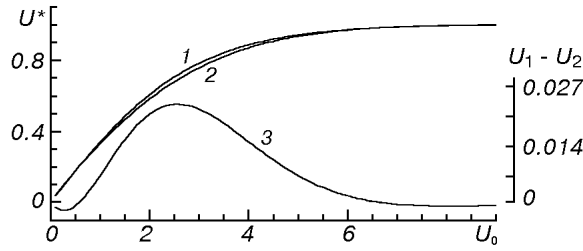


Рис. 1. Зависимость $U_*(U_0)$, полученная по формуле (1) (кривая 2), ее аппроксимация зависимостью (2) (кривая 1) и разность кривых 1 и 2 (кривая 3, шкала справа)

или

$$V_* = \left\{ 2 \operatorname{th} [0.175 \sigma (1 - \mu) V_0^2] / [\sigma (1 - \mu)] \right\}^{1/2}. \quad (2)$$

Максимальное значение разности аппроксимационной функции (2) и точной формулы (1) равно 0.0276 при $U_0 = 2.56$. С удалением от значения $U_0 = 2.56$ величина разности приведенных функций плавно стремится к нулю (рис. 1). Оценим возможную максимальную ошибку скорости V_* на высоте максимального торможения аппроксимации, которая будет иметь место при $U_0 = 2.56$. Для крупных тел при изменении параметра формы μ от 0 до $2/3$ величина $\sigma(1 - \mu)$ будет принимать значения от $8.3 \cdot 10^{-12}$ до $2.0 \cdot 10^{-13}$ (среднее $1.29 \cdot 10^{-12} \text{ c}^2/\text{cm}^2$), а коэффициент абляции σ — от $2.5 \cdot 10^{-11}$ до $2.0 \cdot 10^{-13}$ (среднее $2.24 \cdot 10^{-12} \text{ c}^2/\text{cm}^2$). В этом случае начальная скорость V_0 будет находиться в интервале от 7.85 до 50.6 км/с. Аппроксимационное значение скорости V_{*a} при тех же значениях $\sigma(1 - \mu)$ будет: $V_{*a} = 4.15 \dots 8.45$ км/с. При этом вычисленные по точной формуле (1) интервалы скоростей равны: $V_{*p} = 4.07 \dots 3.80$ км/с для минимальной скорости $V_{*a} = 4.15$ км/с и $V_{*p} = 8.41 \dots 8.28$ км/с для максимальной $V_{*a} = 8.45$ км/с. Максимальное значение разности $V_{*a} - V_{*p}$, вычисленных скоростей по формулам (1) и (2), т. е. возможная максимальная ошибка не превышает 0.35 км/с.

На основе зависимости (2) легко получить формулу для максимального торможения в зависимости от начальной скорости:

$$\left[\frac{dV}{dt} \right]_* = - \frac{\operatorname{th} [0.175 \sigma (1 - \mu) V_0^2] \cos Z_R}{\{ 1 - \operatorname{th} [0.175 \sigma (1 - \mu) V_0^2] \} H^* \sigma (1 - \mu)}, \quad (3)$$

где H^* — высота однородной атмосферы (шкала высот), Z_R — зенитное расстояние радианта. Высоту максимального торможения метеороида можно определить из совместного решения (3) и уравнения торможения, записанного для высоты H_* :

$$\left[\frac{dV}{dt} \right]_* = - \frac{\Gamma A_0}{M_0^{1/3} \delta^{2/3}} \exp [0.5 \sigma (1 - \mu) (V_0^2 - V_*^2)] \rho (H_*) V_*^2,$$

где M_0 — начальная масса метеороида, δ — его плотность, A_0 — коэффициент формы, ρ — плотность атмосферы. Зависимость для плотности атмосферы на высоте максимального торможения получим в виде:

$$\rho (H_*) = \frac{M_0^{1/3} \delta^{2/3} \cos Z_R \exp \{ \operatorname{th} [0.175 \sigma (1 - \mu) V_0^2] - 0.5 \sigma (1 - \mu) V_0^2 \}}{2 \Gamma A_0 H^* \{ 1 - \operatorname{th} [0.175 \sigma (1 - \mu) V_0^2] \}}.$$

Если в этом уравнении принять $\rho (H_* = 0) = 1.225 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$, то получим условие максимального торможения на поверхности Земли. Массу метеоро-

ида на высоте максимального торможения определяем по классической формуле Фишера [11]:

$$M_* = M_0 \exp \left[- \frac{\sigma(1 - \mu)}{2} (V_0^2 - V_*^2) \right].$$

КРИТЕРИЙ РАЗДЕЛЕНИЯ МЕТЕОРИТНЫХ КРАТЕРОВ НА УДАРНЫЕ И ВЗРЫВНЫЕ

Для определения критерия разделения метеоритных кратеров на ударные и взрывные нами использована высота H_* максимального торможения метеорных тел. Принимаем, что ударные кратеры порождают метеороиды, высота максимального торможения которых находится над земной поверхностью, т. е. $H_* > 0$. Если максимальное торможение тел происходит на поверхности Земли или не достигается вследствие столкновения с поверхностью планеты, то такие метеороиды образуют взрывные кратеры. Поэтому критерием для определения минимального заатмосферного размера тела, образующего взрывной кратер, является его максимальное торможение вблизи (формально «на») поверхности нашей планеты. Основываясь на приведенных выше зависимостях и результатах работ [6, 7], можно получить формулу для определения начального радиуса метеороида R_{0*} , высота максимального торможения которого будет находиться на поверхности Земли. Она следует из соотношения для начального радиуса тела R_0 , высота H_* которого произвольна:

$$R_0 = 1.24 \Gamma A_0 H_*^* \exp \{ \sigma(1 - \mu) V_0^2 / 2 - \text{th} [0.175 \sigma(1 - \mu) V_0^2] \} \times \\ \times \rho(H_*) \{ 1 - \text{th} [0.175 \sigma(1 - \mu) V_0^2] \} / (\delta \cos Z_R). \quad (4)$$

Для вычисления R_{0*} принимаем, что $H_* = 0$ и используем следующие значения параметров: $\Gamma = 0.5$, $A_0 = 1.65$, $\mu = 0.4$, $H_*^* = 7.5$ км, $\Lambda = 0.025$, $\sigma = 1.25 \cdot 10^{-12}$ с²/см², $Q_d = 2 \cdot 10^6$ Дж/кг, $Z_R = 45^\circ$. Результаты вычислений по формуле (4) при $\rho(H_*) = \rho(H_* = 0)$ приведены в табл. 1.

Вопрос о значении R_{0*} для кометных тел с плотностью $\delta \approx 1$ г/см³ требует дополнительных исследований, поэтому в табл. 1 эти величины заключены в скобки. Для тел, которые несколько меньше R_{0*} , характерным сценарием будет значительная, если не полная (в зависимости от плотности тела и его структуры) фрагментация в окрестности высоты H_* и тепловой

Таблица 1. Значения вычисленного заатмосферного радиуса тела R_{0*} в зависимости от скорости входа его в земную атмосферу и от плотности тела. Скорость V_* и масса M_* метеороида вычислены для высоты максимального торможения $H_* = 0$, т. е. на поверхности Земли

V_0 , км/с	δ , г/см ³	R_{0*} , м	V_* , км/с	M_* , кг
10	1.0	(18)		
	3.0	6.1	5.89	$1.89 \cdot 10^6$
	7.8	2.4	5.89	$2.92 \cdot 10^5$
30	1.0	(36.5)		
	3.0	12.2	14.8	$3.23 \cdot 10^5$
	7.8	4.7	14.8	$4.81 \cdot 10^4$
60	1.0	(700)		
	3.0	230	16.3	$1.36 \cdot 10^2$
	7.8	90	16.3	20.6

взрыв, обусловленный практически мгновенным испарением значительного количества мелких фрагментов. Вследствие этого образуется взрывная волна и световая вспышка, а также, если тело каменное или железное (не кометной природы), падение крупных фрагментов на Землю, которые образуют ударные кратеры.

Идея такого критерия возникла после вычисления и анализа высоты максимального торможения для такого явления, как Тунгусское, а также для метеоритных падений Сихотэ-Алинь, Стерлитамак [6, 7] и Куня — Ургенч [2, 8]. Для Тунгусского кометного тела приняли следующие исходные данные: начальный радиус $R_0 = 30$ м, плотность $\delta = 1$ г/см³, (начальная масса $M_0 \approx 10^{11}$ г), $Z_R = 82^\circ$, $V_0 = 45$ км/с. Получено: высота максимального торможения $H_* = 10$ —12 км, скорость на высоте максимального торможения $V_* = 16.3$ км/с. Для Сихотэ-Алинского железного метеороида использовали данные: $M_0 = 100$ т, $\delta = 7.8$ г/см³, ($R_0 \approx 145$ см), $Z_R = 45^\circ$, $V_0 = 15$ км/с. Результат вычислений: скорость $V_* = 8.8$ км/с, высота $H_* = 9.2$ км, $M_* = 80$ т. При этом принималось: $\sigma = 5 \cdot 10^{-13}$, $\mu = 0.4$. Полученные высоты максимального торможения в обоих случаях близки к известным оценкам высот взрыва этих космических тел. Для железного метеорита Стерлитамак [6, 7] (начальная масса 5 т, скорость входа 15 км/с) получено: высота $H_* = 10.5$ км, скорость $V_* = 9$ км/с. И в этом случае вычисленная высота H_* близка к оценке высоты наблюдавшейся яркой вспышки.

Используя данные [2, 8] о недавнем падении каменного метеорита Куня — Ургенч в Туркменистане (начальная масса тела $M_0 = 3$ т, скорость входа $V_0 = 13$ км/с, плотность метеорита $\delta = 3.32$ г/см³), на основании изложенной выше теории нами получены такие данные: высота $H_* = 14.8$ км, скорость $V_* = 7.6$ км/с, торможение $(dV/dt)_* = -4.8$ км/с². Масса выпавшего метеорита Куня — Ургенч, согласно работе [8], «должна быть 900—1000 кг», хотя найдено 800 кг. На основании наших вычислений выпавшая масса близка к указанной выше, и составляет 990 кг. Здесь также достаточное согласие с теорией, поскольку считаем, что после взрыва тело (или группа фрагментов) движется практически без потери массы (или ею можно пренебречь), так как относительная потеря массы во вспышке, как показано в [6], составляет незначительную величину. По оценкам очевидцев высота вспышки (в работе [8] она неправильно названа высотой задержки) 10—15 км, т. е. не противоречит тому, что получено нами как H_* . Кроме того, вычисленная нами скорость падения метеорита на поверхность Земли (1.5 км/с), совпадает с результатом, полученным в [2], хотя мы использовали другую методику — движение тела в сопротивляющейся среде при отсутствии абляции.

Таким образом, рассмотренные случаи падения крупных метеоритов, порождавших ударные кратеры, сопровождались вспышками (тепловыми взрывами) на высотах максимального торможения (9—15 км) и при этом имели скорости 6—9 км/с. При падении на поверхность Земли их скорости составляли 1—2 км/с. Поэтому мы принимаем: если максимальное торможение метеороида происходит в пределах земной атмосферы, т. е. $H_* > 0$, то такой метеороид не сможет образовать взрывной кратер.

Область высот максимального торможения, до которой проникают только крупные метеороиды и имеющие относительно небольшие скорости входа в атмосферу, характерна тем, что на интервале высот около 100 м на торможение расходуется энергия, которой достаточно для полного испарения всего тела. Это важный, с нашей точки зрения, физический аргумент в

пользу возникновения вспышки и образования теплового «точечного» взрыва, так как интервал высот значительно меньше характерной высоты H^* . Вспышка и ударная волна на высоте H_* образуются вследствие практически мгновенного ($\approx 10^{-3}$ с [6]) испарения большого количества мелких частиц (по массе всего 10 %), которые могут образоваться как сбросом расплавленной пленки, так и термическим разрушением поверхностного слоя тела [7].

Идея взрыва на высоте максимального торможения была также подтверждена нами при исследовании разрушения фрагментов ядра кометы Шумейкер—Леви 9 в атмосфере Юпитера [12]. При этом основным аргументом является хорошее согласие времени выхода plume на «поверхность» атмосферы Юпитера с данными прямых регистраций с космических аппаратов. Расчет времени выхода plume производился на основании теории распространения взрывной волны в неоднородной атмосфере с экспоненциальным распределением плотности [4].

Скорость тела на высоте максимального торможения при увеличении заатмосферной скорости стремится к предельному значению, которое определяется только величинами параметров σ и μ . Этот вывод следует из зависимостей (2) — с увеличением U_0 значение U_* стремится к асимптоте $U_* = 1.0$, т. е. скорость

$$V_* \rightarrow \left[\frac{2}{\sigma(1-\mu)} \right]^{1/2} = 2 \left[\frac{\Gamma Q}{\Lambda(1-\mu)} \right]^{1/2}.$$

Максимальное значение V_* , которое определяется этой формулой, не зависит от начальной скорости и становится близким к реальному согласно (2), когда множитель

$$\{ \text{th}[0.175\sigma(1-\mu)V_0^2] \}^{1/2}$$

близок к единице, т. е. при $V_0 \geq 50$ км/с. При этом масса M_* составляет величину порядка 10^{-2} — 10^{-3} от начальной массы. Поэтому даже крупные метеороиды при больших скоростях входа либо не достигают высоты H_* , либо достигают ее, имея малую массу.

МИНИМАЛЬНЫЕ РАЗМЕРЫ ВЗРЫВНЫХ КРАТЕРОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Предложенный критерий разделения ударных и взрывных кратеров и данные табл. 2 дают возможность рассчитать минимальные размеры взрывных кратеров, образующихся на поверхности Земли. В табл. 2 приведены скорости V_* и массы M_* каменных (к) и железных (ж) метеороидов на высоте максимального торможения, которая в нашем случае находится на поверхности Земли, в зависимости от начальных значений скорости и массы и от параметра абляции σ . Эти данные получены по формулам, приведенным выше.

Запишем основные зависимости теории Эпика [14], основанной на передаче количества движения (импульса), а не энергии, как полагали многие исследователи. Теория [14] 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 [13]. («Энергия есть источник действия, само действие не пропорционально энергии» — писал Эпик [14]). Суть заключается в том, что взрыв происходит не в момент столкновения тел. Ударяющее тело некоторое время продолжает двигаться внутрь мишени (при этом значи-

Таблица 2. Минимальные диаметры взрывных кратеров на поверхности Земли: D_C — теория Станюковича [9], $D_Э$ — теория Эпика [14] ($A_0 = 1.21$; $\Gamma = 0.5$, $\delta = 3.5$ г/см³; $H^* = 7$ км)

V_0 , км/с	V_* , км/с	M_{0^*} , 10 ⁹ г	M_{*^*} , 10 ⁶ г	M_{0^*} , 10 ⁹ г	M_{*^*} , 10 ⁵ г	D_C , м				$D_Э$, м	
						к	ж	к—к	к—ж	к—г	ж—г
$\sigma = 2 \cdot 10^{-12}$ с ² /см ²											
11	6.5	0.43	200	0.086	400	93.0	54.4	149	87.0	52.1	23.2
15	8.8	0.56	130	0.11	260	98.6	57.6	158	92.2	53.2	23.5
20	11.5	0.82	56	0.16	110	89.0	51.7	142	82.7	47.4	21.0
25	13.6	1.3	16	0.26	32	65.5	38.3	105	61.3	34.1	15.5
30	15.3	2.4	3.1	0.48	6.2	41.0	24.0	65.6	38.4	20.9	9.55
35	16.3	5.5	0.37	1.1	0.74	21.1	12.3	33.7	19.7	10.3	4.73
40	16.9	15.0	0.030	3.0	0.06	9.34	5.46	14.9	8.74	4.37	2.00
45	17.2	52.0	0.016	10.5	0.003	3.56	2.08	5.69	5.69	1.57	0.722
50	17.3	513	(10 ⁻⁴)	103	(3 · 10 ⁻⁴)	(1.6)	(0.9)	2.55	1.49	(0.67)	(0.31)
55	17.3	2430	(4 · 10 ⁻⁶)	489	(7 · 10 ⁻⁶)	(0.6)	(0.4)	(1.0)	(0.6)	(0.2)	(0.1)
$\sigma = 5 \cdot 10^{-13}$ с ² /см ²											
11	6.50	2.61	21.4	5.26	43.1	205	120	328	192	120	53.6
15	8.86	2.90	20.1	5.84	40.5	246	145	394	231	140	62.4
20	11.8	3.44	17.9	6.93	36.0	287	168	460	269	164	73.5
25	14.6	4.22	15.1	8.50	30.4	313	183	500	293	178	81.9
30	17.3	5.29	11.8	10.6	23.8	323	189	516	303	188	85.9
35	19.8	6.87	8.56	13.8	17.2	317	186	507	297	187	85.8
40	22.0	9.28	5.69	18.7	11.4	297	174	475	278	176	80.5
45	23.8	13.2	3.45	26.6	6.95	265	155	424	248	157	71.9
50	25.3	20.1	1.92	40.5	3.86	227	133	363	213	134	61.2
55	26.3	33.0	0.973	66.4	1.96	186	109	297	174	109	49.6
60	27.1	58.7	0.454	118	0.914	147	86.1	235	138	85.3	38.7
65	27.6	113	0.196	228	0.395	112	65.9	180	105	64.2	29.2
70	27.9	234	0.078	471	0.158	83.4	48.9	133	78.2	46.9	21.2

тельная часть энергии уносится наружу), и для расчета такого движения необходимо пользоваться законом сохранения импульса, а не энергии. Аналогично, закон сохранения импульса используется при расчете движения метеороида в атмосфере Земли (уравнение торможения), а закон сохранения энергии — при расчете потери массы (уравнение абляции). Единственное, чего не знал Эпик, разрабатывая свою теорию [14], — в какой момент (или на какой глубине) внутри тела произойдет взрыв. Поэтому для согласования своей теории с различными экспериментами использовал аппроксимации и приближения. Нам представляется, что взрыв тела будет происходить в момент достижения им максимального торможения в данной среде. Если скорость тела в этот момент ниже взрывной, то будет образован ударный кратер.

Соотношение для глубины h кратера от первоначально неразрушенной поверхности и диаметра d выпавшего метеорита представляем в виде

$$\frac{h}{d} = 1.785 \left(\frac{\delta}{\rho}\right)^{1/2} \left(\frac{V^2}{\sigma_p}\right)^{1/30} \cos Z_R. \quad (5)$$

Для диаметра D кратера используем формулу

$$\frac{D}{d^{3/2}} = 1.20 \left(\frac{\eta V \delta}{h}\right)^{1/2} (\rho \sigma_p)^{-1/4}, \quad (6)$$

где η — безразмерный фактор передачи импульса, который определяется из уравнения

$$\eta = CV^2(1 - 0.04\eta^2)^{1/2} + 2. \quad (7)$$

Константа C имеет значение $4.2 \cdot 10^{-13} \text{ с}^2/\text{см}^2$ для удара камня по камню и $6.5 \cdot 10^{-13} \text{ с}^2/\text{см}^2$ для удара железа по камню. Численные величины η , полученные из формулы (7), приведены в табл. 3. Прочность на разрушение, согласно [14], составляет

$$\sigma_p = \sigma_{\text{сж}} + 0.38g\rho h,$$

где второе слагаемое возникает из-за трения, вызванного вышележащими слоями почвы, g — ускорение свободного падения. Прочность на сжатие

$$\sigma_{\text{сж}} = 7.1 \cdot 10^8 D^{1/4} \text{ Н/м}^2 \text{ (} D \text{ в см)}.$$

Если для какого-либо кратера известны размеры h и D и плотности ударяющего тела и мишени δ и ρ , то на основании приведенных зависимостей можно получить следующее соотношение:

$$\eta V^{4/5} / \cos^3 Z_R = \text{const}, \quad (8)$$

где const — известная величина. Из (8) можно вычислить скорость падения метеорита, если предположить зенитный угол падения Z_R . Поскольку зависимость (8) от Z_R достаточно крутая, а коэффициент η приблизительно пропорционален $V^{1/2}$, то скорость будет пропорциональной $(\cos Z_R)^{2.3}$, т. е. имеем существенную зависимость полученной скорости от принятого угла падения.

Таблица 3. Значение фактора η передачи импульса в зависимости от скорости соударения каменных (к-к) или железного и каменного тел (ж-к)

V, км/с	η		V, км/с	η	
	к-к	ж-к		к-к	ж-к
1.0	2.00	2.00	20	3.27	3.73
3.0	2.03	2.05	30	4.13	4.51
6.0	2.14	2.21	40	4.61	4.81
10	2.37	2.56	50	4.82	4.92
15	2.78	3.14	70	4.95	4.98

Для Аризонского кратера, например, ($D = 1.2$ км, $h = 175$ м, $\delta = 7.85 \text{ г/см}^3$, $\rho = 2.62 \text{ г/см}^3$ [10]) значение const равно $5.50 \cdot 10^5$. Поэтому при вертикальном падении ($Z_R = 0^\circ$) скорость столкновения метеорита с почвой $V = 25$ км/с, диаметр метеорита $d = 41.2$ м (его масса $M \approx 290000$ т), а для случая, когда $Z_R = 45^\circ$, получим существенно отличные от предыдущих результаты: скорость падения близка к минимальной, 11.5 км/с, а диаметр метеорита равен 61.4 м ($M \approx 950000$ т). При такой массе выпавшего железного метеорита можно с достаточной степенью точности принять, что она равна заатмосферной. Скорость входа такого тела в атмосферу (при значении коэффициента абляции $\sigma = 1.25 \cdot 10^{-13} \text{ с}^2/\text{см}^2$) может быть на 5—7 км выше скорости падения. Более вероятной для Аризонского кратера представляется вторая оценка (скорость столкновения около 11 км/с, зенитный угол траектории удара 45°), поскольку кратер имеет некоторую асимметрию и значительное количество мелкодисперсного метеоритного вещества (12000 т) [10, 16]. 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° [10]. Большое количество мелкодисперсного метеоритного вещества также, с нашей точки зрения, свидетельствует о небольшой скорости удара.

Согласно [14] полный объем разрушения

$$W = 0.363hD^2 = 0.0915 \text{ км}^3,$$

где h и D в км. Если принять, что кратер имеет форму шарового сегмента, то получим приблизительно такой же объем:

$$W = \pi h(4h^2 + 3D^2)/24 = 0.102 \text{ км}^3.$$

Отсюда средняя удельная энергия разрушения

$$Q = E_k/(W\rho) = MV^2/(2W\rho) \approx 3 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}.$$

Для оценки частоты падений метеоритов, близких по массе к Аризонскому, используем зависимость, полученную в [18] для лунных кратеров, поскольку она лучше всего подходит по интервалу масс, и запишем ее в виде интегрального потока числа тел с массой (в граммах) не меньше M на всю Землю за год:

$$\lg N^* = 2.92 - 0.6 \lg M.$$

Очевидно, средний интервал времени между двумя такими падениями равен

$$T = 1/N^* \approx 9.1 \div 18.5 \text{ тыс. лет } (M = 2.9 \cdot 10^{11} \div 9.5 \cdot 10^{11} \text{ г})$$

(Полученный возраст Аризонского кратера не противоречит различным независимым оценкам, согласно которым он равен от 5 до 50 тыс. лет).

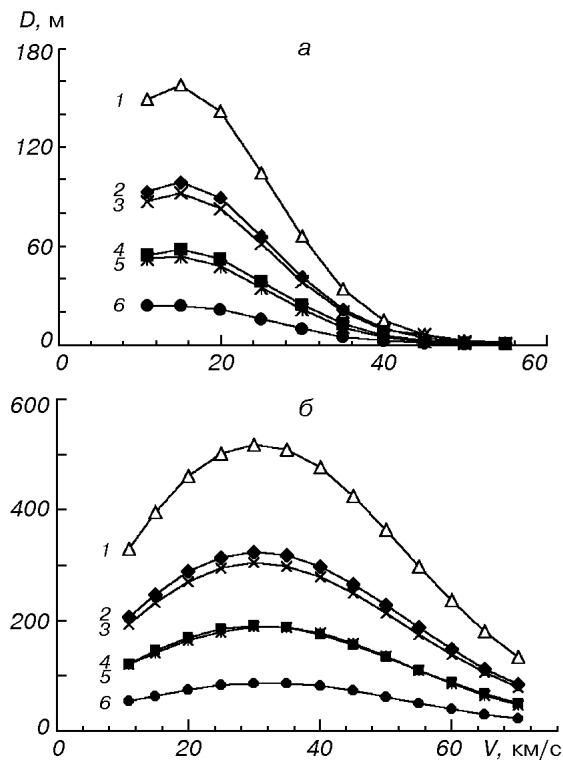
Для определения минимальных размеров (диаметров) взрывных кратеров на поверхности Земли используем теорию [14], основные формулы которой приведены выше, и для сравнения теорию [9], из которой следует, что диаметр такого кратера

$$D_c = 2\lambda(E_k \beta / Q)^{1/3}, \quad (9)$$

где параметр $\lambda = 8$ для глины и равен 5 для гранита, $\beta \approx 0.8$ — коэффициент полезного использования кинетической энергии, $Q = 4.2 \cdot 10^6$ Дж/кг — плотность энергии ТНТ, E_k — энергия взрыва, которую мы в данном случае приравниваем к кинетической энергии метеороида в точке максимального торможения, находящуюся на поверхности Земли, т. е. $E_k = M_* V_*^2 / 2$. На основании формулы (9) в работе [1] получено, что минимальные размеры взрывных кратеров на поверхности Земли могут составлять от 10 до 20 м. При расчете принималась минимальная скорость удара, необходимая для образования взрывного кратера, и из физической теории метеоров находилась падающая масса метеорита. Необходимо отметить, что минимальный размер взрывного кратера существенно зависит не только от начальной скорости и параметра формы тела, но, прежде всего, от значения принятого коэффициента абляции σ (табл. 2).

Нами проведены расчеты с использованием обеих теорий [9, 14] для случаев удара камня по камню, камня по глинистой почве, а также железного метеорита по камню и по глинистой почве при значениях параметра абляции $\sigma = 2 \cdot 10^{-12}$ и $5 \cdot 10^{-13}$ с²/см²). При первом значении σ (рис. 2, а), независимо от применяемой теоретической модели и материала метеорита и мишени, для минимальной скорости входа (11 км/с) размеры минимальных кратеров составляют от 50 до 150 м. При увеличении заатмосферной скорости размеры кратеров несколько увеличиваются и достигают максимума при $V_0 = 15$ км/с. При дальнейшем увеличении V_0 они достигают значений близких к нулю уже при $V_0 = 45$ —50 км/с. При $\sigma = 5 \cdot 10^{-13}$ с²/см² (рис. 2, б) размеры минимальных кратеров имеют

Рис. 2. Минимальные размеры взрывных кратеров на поверхности Земли в зависимости от заатмосферной скорости и природы сталкивающихся тел: *a* — для $\sigma = 2 \cdot 10^{-12} \text{ с}^2/\text{см}^2$, *б* — для $\sigma = 5 \cdot 10^{-13} \text{ с}^2/\text{см}^2$. Кривые 1 (для столкновений камень—глина), 2 (камень—камень), 3 (железо—глина) и 4 (камень—железо) рассчитаны согласно теории Станюковича; кривые 5 (камень—камень) и 6 (камень—железо) рассчитаны согласно теории Эпика



широкий спектр значений: от 20 до 520 м. Независимо от теоретической модели и материала метеорита и мишени — все кривые подобные. При этом максимальные размеры минимальных взрывных кратеров соответствуют скорости входа 30 км/с, а минимальные — при максимально возможных заатмосферных скоростях (72 км/с). Последние составляют от 20 до 130 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из предыдущих результатов следует, что коэффициент абляции является тем параметром, который в наибольшей степени влияет на полученные результаты. При уменьшении σ максимум в распределении размеров минимальных кратеров смещается в область больших скоростей входа. Очевидно, если $\sigma \rightarrow 0$ (или $= 0$), то перейдем в область столь больших тел, когда выполняется условие $S = S_0 = \text{const}$ и этот максимум будет совпадать с максимальной скоростью входа тел в атмосферу Земли.

Необходимо отметить, что размеры минимальных кратеров, вычисленные по формуле (9) теории [9], систематически больше соответствующих размеров, полученных по формулам (5) — (7) теории [14]. Связано это с тем (и это видно из формулы (9)), что теория образования взрывных кратеров Станюковича [9] построена на основе передачи энергии в тот самый момент, когда происходит столкновения тел. Из вычислений следует: чтобы диаметры кратеров, вычисленные на основании теорий [9] и [14], приблизительно были равны по величине, необходимо принять долю β кинетической энергии, которая ответственна за взрыв, равной не 0.8, а 0.063 в случае столкновения железного тела с каменным и 0.16 — при столкновении каменных тел.

Очевидно, что размер кратера при одной и той же энергии взрыва будет зависеть от глубины, на которую помещена взрывчатка, но как определить эту глубину при столкновении тел — неизвестно [14]. Мы полагаем, что

это глубина максимального торможения при движении тела в данной среде. Основная энергия освобождается там, где достигается максимальное торможение.

1. *Бронштэн В. А.* Об ударных и взрывных метеоритных кратерах на Земле и Луне // Астрон. вестн.—1977.—11, № 2.—С. 78—84.
2. *Бронштэн В. А.* Астрономические условия падения и орбита метеорита Куны-Ургенч // Письма в Астрон. журн.—1999.—25, № 2.—С. 153—155.
3. *Волощук Ю. И., Кащеев Б. Л., Кручиненко В. Г.* Метеоры и метеорное вещество. — Киев: Наук. думка, 1989.—294 с.
4. *Компанец А. С.* Точечный взрыв в неоднородной атмосфере // Докл. АН СССР.—1960.—130, № 5.—С. 1001—1003.
5. *Кринов Е. Л.* Метеоритный дождь. — М.: Наука, 1981.—192 с.
6. *Кручиненко В. Г.* Определение физических характеристик метеоритообразующего тела Стерлитамак // Астрон. вестн.—1992.—26, № 4.—С. 104—112.
7. *Кручиненко В. Г.* Анализ изменения физических характеристик метеоритообразующего тела Стерлитамак вдоль пути // Астрон. вестн.—1993.—27, № 6.—С. 87—94.
8. *Мухамедназаров С.* Наблюдения болида и падения первого крупного метеорита в Туркменистане // Письма в Астрон. журн.—1999.—25, № 2.—С. 150—152.
9. *Станюкович К. П.* Неустановившиеся движения сплошной среды. — М.: Наука, 1971.—855 с.
10. *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.
11. *Fisher W. I.* Mass and velocity of meteorites and the air density along their luminous paths // Harv. Circ.—1934.—N 385.—P. 1—16.
12. *Kruchinenko V. G.* The collision of the comet Shoemaker-Levy 9 with Jupiter // Astron. and Astrophys. Transactions.—1997.—13.—P. 191—197.
13. *Opik E. J.* The lunar surface as an impact counter // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1960.—120.—P. 404—411.
14. *Opik E. J.* Interplanetary encounters. — New York: Elsevier scient. publ., 1976.—155 p.
15. *Pecina P., Cepelcha Z.* New aspects in single-body meteor physics // Bull. Astron. Inst. Czech.—1983.—34, N 2.—P. 102—121.
16. *Rinehart J. S.* Distribution of meteoritic debris about the Arisona meteorite crater // Smithson. Contr. Ap.—1958.—2, N 7.—P. 145—159.
17. *Whipple F. L.* The theory of micro-meteorites. Part I. In an isothermical atmosphere // Proc. Nat. Acad. Sci. Amer.—1950.—36, N 12.—P. 686—695.
18. *Whipple F. L.* On maintaining the meteoritic complex // Studies in interplanetary particles. — Smithson. Astrophys. Obs., 1967.—P. 3—45.—(Spec. Rep. N 239).

Поступила в редакцию 26.10.00