



ISSN 1607–2855

Том 9 • № 1 • 2013 С. 43 – 47

УДК 523.682+551.501

Фізика Челябінського боліду

В.Г. Кручиненко, К.І. Чурюмов, А.М. Мозгова

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

В статті показано, що оцінки розміру Челябінського тіла порядку 20–30 м (явище 15.02.2013), які опубліковані в пресі, суттєво завищені. Помилкові також і оцінки висоти його вибуху. На підставі тих руйнувань, які утворені вибуховою хвилею, висота вибуху не повинна перевищувати 10–12 км. Вважаємо, що діаметр Челябінського метеориту складав ~5–6 м. І мав масу ~300 тон при густині 3 г/см³.

ФИЗИКА ЧЕЛЯБИНСКОГО БОЛИДА, Кручиненко В.Г., Чурюмов К.И., Мозговая А.М. — Показано, что оценки размера Челябинского тела порядка 20–30 м (явление 15.02.2013), опубликованные в прессе, существенно завышены. Ошибочны также оценки высоты его взрыва. На основании тех разрушений, которые образованы взрывной волной, высота взрыва не должна превышать 10–12 км. Считаем, что диаметр Челябинск метеорита составлял ~5–6 м и имел массу ~300 тонн при плотности 3 г/см³.

PHYSICS OF THE CHELYABINSK BOLIDE, by Kruchinenko V.G., Churyumov K.I., Mozgova A.M. — Shown, that estimations of the Chelyabinsk body size order of 20–30 m (15/02/2013 phenomenon), publishing in the press, are overstated significantly. Estimations of its explosion height are wrong. On the basis of the destructions by action of the shock wave, the height of explosion must be no more than 10–12 km. We think, that the Chelyabinsk meteorite had diameter ~5.6 m and mass ~300 tons if its density was 3 g/cm³.

Ключевые слова: болид; физические свойства болидов; ударная волна; разрушения.

Key words: bolide; physical properties of bolides; shock wave; destructions.

Незруйновані в атмосфері залишки космічних тіл знаходять на поверхні Землі або в її поверхневому шарі. Ці тіла називають метеоритами. Космічні прибульці кожного року залишають на нашій планеті близько 800 метеоритів, хоча знаходять всього 10–20. Залежно від хімічного складу метеорити поділяють на кам'яні, залізні та залізокам'яні. Кам'яні метеорити складають близько 92%, залізні — приблизно 6%, залізокам'яні — біля 2%.

Відзначимо, що земна атмосфера — газовий щит, який не пропускає до поверхні планети основну масу космічних частинок. На поверхні Місяця та в його поверхневому шарі, наприклад, метеоритів практично немає: всі космічні тіла — не залежно від розміру, — які стикаються з нашим природним супутником, вибухають на його поверхні, утворюючи вибухові кратери, бо там немає атмосфери, яка б їм завадила. “Практично”, бо все-таки, мабуть, є незначна кількість частинок, які наздоганяють Місяць і їх швидкості відносно нього будуть невеликими, ~2 км/с. Вибухають ще й тому, що швидкість при падінні перевищує 4–5 км/с. Із енергетичних міркувань впливає, що питома кінетична енергія тіла, яке рухається з такою швидкістю, перевищує питому енергію, яка потрібна для випаровування речовини. При миттєвій зупинці тіла вся енергія йде на нагрівання та випаровування тіла і речовини, що його оточує. Такі тіла можуть залишати лише дрібні фрагменти або ті, що утворилися в процесі конденсації вибухових випаровувань. Якщо швидкість при зіткненні з поверхнею планети менша 2–3 км/с, то таке тіло може залишитися практично незруйнованим. До цієї категорії можна віднести залізний метеорит Гоба Вест, вагою 60 тонн, знайдений у 1920 р. у Південно-Західній Африці, який лежить прямо на земній поверхні. Деякі дослідники стверджують, що при падінні його маса становила 90 тонн: зараз він на одну третину проржавів. Унікальність феномена Гоба — велика маса і відсутність “нормального” кратера: швидкість падіння була, ймовірно, біля 1 км/с. Мав він, ймовірно, мінімальну швидкість входження і дуже полого траєкторію. Звідси, нехтуючи у першому наближенні втратою маси при проходженні атмосфери, на основі рівняння гальмування можна отримати, що тіло увійшло в атмосферу маючи зенітний кут 79° зі швидкістю 12 км/с і пройшло в атмосфері шлях довжиною біля 500 км. У другому наближенні можна оцінити, що втрачена в атмосфері маса ≈ 10 тонн, тобто початкова маса (без врахування корозії) ≈ 70 тонн. Тіло досягло максимального гальмування на висоті 45 км, маючи швидкість 5.8 км/с. Для теплового вибуху (і спалаху блиску) такої швидкості недостатньо — тіло залишилося незруйнованим: аеродинамічне навантаження склало всього 8.5 · 10⁵ дин/см², тоді як для зруйнування залізного тіла ця величина повинна була дорівнювати ≈ 10⁹ дин/см².

В Сонячній системі число частинок зі збільшенням маси зменшується приблизно обернено пропорційно квадрату маси. Тому частіше всього в атмосферу Землі влітають дрібні частинки, а зі збільшенням

Таблиця 1. Частота зустрічей нашої планети з космічними тілами — середній період часу T між двома падіннями тіл (частинок) на всю Землю в залежності від їхньої маси m

m	T
10^{-2} г	$7.2 \cdot 10^{-3}$ с (~ 140 за с)
0.1 г	$5.6 \cdot 10^{-2}$ с (~ 18 за с)
1 г	0.44 с
100 г	0.44 хвилин
1 кг	3.44 хвилин
10 кг	26.8 хвилин
100 кг	3.50 годин
1 т	27.2 годин
4.3 т (болід над Україною)	4.16 доби
10 т	8.84 доби
70 (60) т (метеорит Гоба)	50 (44) доби
100 т (Сіхоте-Алінь)	2.3 місяців
650 т	1 рік
$5 \cdot 10^3$ т	6.2 року
$2 \cdot 10^6$ т (Тунгуський, Аризонський)	1300 років
$2 \cdot 10^8$ т (діаметр ~ 0.5 км)	80 тис. років
$1.6 \cdot 10^9$ т (діаметр ~ 1 км)	0.5 млн. років
$2 \cdot 10^{11}$ т (діаметр ~ 5 км)	37 млн. років
$1.6 \cdot 10^{12}$ т (діаметр ~ 10 км)	240 млн. років

маси число їх швидко зменшується. В табл. 1 наводимо дані про частоту зіткнень нашої планети з тілами різних мас. Якщо малі частинки, утворюючи метеори, практично повністю згоряють на висотах 120–80 км над поверхнею Землі, то більші, які створюють боліди, можуть проникати значно глибше: до висот 40–30 км. Деякі з них в процесі польоту інтенсивно руйнуються і утворюють в нижніх шарах атмосфери потужні теплові вибухи і спалахи блиску. Ми вважаємо, що теплові вибухи великих тіл в земній атмосфері відбуваються тоді і там, коли метеороїд досягає максимального гальмування. Теплові вибухи в атмосфері Землі створюють як монолітні (кам'яні чи залізні) так і крихкі, з малою густиною, кометні тіла — кометоїди. Після теплового вибуху метеороїда в атмосфері Землі, як правило, на поверхню планети випадають його залишки-фрагменти, які утворюють ударні кратери. Одне із таких явищ — Сіхоте-Алінський залізний метеоритний дощ, який відбувся у 1947 р. в Усурійській тайзі і є результатом руйнування тіла масою близько 100 тонн. У поверхневому шарі — в ударних кратерах — зібрано біля 30 тонн метеоритів. Найбільший фрагмент-метеорит мав вагу 1745 кг. Згідно таблиці, тіла з масою 100 тонн зустрічаються з Землею 5 раз за рік. У той же час такі явища спостерігаються нечасто, тому що 70% поверхні нашої планети — океани та моря і ще не менше 25% — незаселені гористі та пустинні райони, тому лише, приблизно, на 5% поверхні Землі такі явища фіксуються.

Відомо, що високий аеродинамічний тиск, який діє на поверхню космічних тіл, що рухаються в атмосфері, переважає міцність всіх відомих матеріалів. Оцінимо, на яких висотах аеродинамічні навантаження досягають величин міцності тіл на стиск: $5 \cdot 10^6$ дин/см² — для льодяних кометних ядер, $5 \cdot 10^8$ дин/см² — для кам'яних тіл, $2 \cdot 10^9$ дин/см² — для залізних тіл. При швидкості входження тіла в атмосферу 20 км/с ці висоти відповідно дорівнюють 45, 14 і 4.4 км. На визначених висотах і повинно відбуватися інтенсивне дроблення тих тіл, які змогли їх досягти.

Необхідно зазначити, що руйнування космічних тіл в земній атмосфері на висоті максимального гальмування у першу чергу визначається великими навантаженнями дією масових сил інерції. При максимальному гальмуванні на метеороїд діє перевантаження (масова сила інерції), яка може досягати 1000 одиниць прискорень вільного падіння. Пояснимо на такому прикладі. Відомо, що тренувана людина — космонавт, який знаходиться у космічному апараті при спуску в атмосфері Землі, може витримати перевантаження 8–9 прискорень вільного падіння, а тут маємо в 100 разів більше. У стільки ж разів збільшується вага тіла у власній системі координат. Під дією цих сил метеороїд деформується і руйнується, бо такі навантаження більші граничних величин міцності, наприклад, кам'яних тіл на стиск, розтяг та зсув. Окремі, найбільш міцні фрагменти метеороїда, долітають до поверхні Землі. Спалах блиску відбувається на невеликому інтервалі висот (50–100 м), значно меншому висоті однорідної атмосфери. Тому вибух можна вважати точковим і застосовувати відому теорію вибуху в середовищі з експоненціально-змінною густиною. Згідно цій теорії, швидкість поширення вибухової хвилі в неоднорідній атмосфері залежить від напрямку: при переміщенні вниз, у напрямі найвищого можливого збільшення густини атмосфери, вибухова хвиля сповільнюється і максимально зменшує енергію; при переміщенні вертикально вгору, у напрямі максимального зменшення густини, вибухова хвиля прискорюється і за обмежений час “прориває” атмосферу. Вибухова хвиля розповсюджується вниз на відстань

не більше 2-х висот однорідної атмосфери (приблизно 15 км), у перпендикулярному напрямку на висоті вибуху — на відстань приблизно 3.5 висот однорідної атмосфери. Далі розповсюджується пружна або звукова хвиля. Таким чином, якщо тепловий вибух метеороїда відбудеться на висоті більше 15–20 км, то до поверхні Землі вибухова хвиля не дійде.

З наших обчислень випливає, що найбільше тіло, яке зустрічає Земля протягом року має масу (в залежності від хімічного складу та деяких інших параметрів) від 100 тонн до 600 тонн. Сумарний доплив космічної речовини на нашу планету складає 140 тисяч тонн за рік. Якщо такий доплив зберігався протягом останнього мільярда років існування нашої планети, то за цей час Земля “потовщала” на 8–10 см.

Кожну добу в атмосферу Землі входить біля 400 метеороїдів з масами не менше 1 кг. Приблизно 30% з них досягають висоти 30 км і менше, а біля 0.5% — залишають на поверхні Землі метеорити. Кожного року залишається їх на Землі близько 800. Явище типу Тунгуського падіння відбувається один раз за період 1300 років.

Космічні тіла, діаметр яких понад 0.5 км, а частота їх падінь наведена в останніх рядках табл. 1, — найбільш небезпечні для земної цивілізації, бо здатні призвести до глобальної катастрофи. Так при зіткненні кам'яного космічного тіла діаметром 1 км зі швидкістю 20 км/с виділиться — при вибуху на поверхні Землі — енергія близько ста тисяч мегатонн ТНТ, або 5 мільйонів Хіросим. Таке явище здатне викликати глобальні катастрофічні зміни клімату, фауни і флори на нашій планеті. Маса речовини, що буде викинута із кратера в атмосферу у 1000 разів перевищить масу ударника. Це може спричинити ефект ядерної зими: дрібна пилюка, що підніметься в атмосферу, надовго зависне в ній і буде поглинати сонячне випромінювання, в результаті чого на багато років знизиться температура на поверхні планети.

Земна атмосфера дуже добре захищає нас від метеоритно-астероїдно-кометної небезпеки: більшість метеорних тіл руйнується при взаємодії з земною атмосферою. Якби не було атмосфери, то, звичайно, не було б ні метеорів, ні болідів, а метеорні частинки без перешкод врзалися б в ґрунт з космічною швидкістю. Навіть маленьке тіло при падінні утворювало б кратер. Так відбувається, наприклад, на Місяці або Меркурії, де немає атмосфери.

Фрагменти зруйнованих великих метеорних тіл на висоті максимального гальмування випадають на поверхню планети, утворюючи ударні кратери. Величина їх еліпсу розсіювання залежить від висоти руйнування та нахилу траєкторії або зенітної відстані радіанта. Так при падінні залізного Сіхоте-Алінського метеоритного дощу декілька тисяч уламків розташувалися в еліпсі з великою віссю біля 6 км і малою 2 км. Фрагменти кам'яного метеорита Жовтневий Хутір (падіння 9 жовтня 1938 р.) випали на площі еліпса розсіювання з великою віссю 11 км, яка орієнтована з півночі на південь. Кам'яний дощ метеорита Каїнсаз (13 вересня 1937 р.) мав еліпс розсіювання з осями 40×7 км.

Найбільший кам'яний метеорит, який знайдений на теренах Радянського Союзу (і третій за величиною у світі) був метеорит Царьов — 1979 р., біля села Царьов Ленінського району Волгоградської області. Знайшлися свідки, які в дитинстві восени в цій місцевості 1921 або 1922 р. спостерігали політ потужного боліда. Знайдено 44 фрагмента загальною масою 1225 кг.

Уламки, які випадають, покриті характерною темною корою плавлення, по якій їх відрізняють від земних гірських порід. Випадають космічні тіла холодними — інколи покриваються інеем, — бо за короткий час прольоту через атмосферу теплота плавлення і випаровування не встигає проникнути всередину. Густина метеоритів має такі межі: 2.5–8.8 г/см². Густина гірських порід, які складають земну кору: 2.0–3.4 г/см³, в земному ядрі, на глибинах понад 2900 км, густина підвищується до 11 г/см³. Нікелісте залізо метеоритів утворює специфічні кристали, які невідомі на Землі, — великі октаедрити. На відполірованих зрізах залізних метеоритів можна побачити більш-менш густу сітку ліній, які є наслідком кристалізації нікеля — так звані відманштеттенові фігури та нейманові лінії. Характер кристалізації нікелістого заліза метеоритів спонукає прийняти, що залізні метеорити утворилися в умовах високої температури при малій силі тяжіння. Такі умови могли виникати або в надрах невеликих планет, або в невеликих згустках розжареної речовини, яка викинута Сонцем з великою початковою швидкістю, а потім, віддалившись від нього, швидко охолола.

Мінералогічний склад кам'яних метеоритів дещо відрізняється від мінералогічного складу гірських порід. Найбільш розповсюдженими мінералами метеоритів є нікелісте залізо, олівін (силікат магнія і заліза) і піроксени (безводні силікати). Є мінерали, що належать лише метеоритам, — троїліт (моносульфат заліза), шрейберзіт (фосфіт заліза, нікеля і кобальта) та деякі інші.

Частинки різних мінералів часто об'єднуються у сферичні утворення, які називають хондрами. Метеорити, які складаються з хондр, називаються хондритами. Наявність хондр свідчить, що умови походження метеоритів суттєво відрізняються від умов виникнення земних гірських порід [1, 4–8].

15 лютого 2013 над Південним Уралом спостерігалось незвичайне явище — яскравий болід. Політ цієї несподіваної вогненної кулі закінчився на висоті 15–30 км потужним вибухом, після якого в небі залишився інверсійний слід, який з часом розсіявся. Вибух метеорного тіла в атмосфері на висоті 23.3 км

в районі Челябінська відбувся о 9 годині 20 хвилин 33 секунди за місцевим часом (3:20:26 UTC).

Сенсори, встановлені на геостационарних супутниках, працюючих в інтересах Міністерства оборони США і Міністерства енергетики США, зафіксували повітряний вибух від Челябінського боліду і визначили його світимість, яка за даними НАСА (NASA) склала $E_0 = 3,75 \cdot 10^{14}$ Дж, з чого по емпіричній формулі для повної енергії вибуху

$$E = 8,2508 \cdot E_0^{0,885}$$

слідє, що повна енергія метеорита, що породив цей болід, дорівнює 440 кілотон. Швидкість боліда за тими ж даними у момент максимальної яскравості склала 18,3 км/с. Подія сталася в точці з координатами $54,8^\circ$ півн.ш. $61,1^\circ$ сх. д. на висоті 23,3 км в 03:20:33 по Гринвичу. Оцінка маси і розміру при густині $3,6 \text{ г/см}^3$ склала відповідно порядку 10 000 – 12 000 тонн і діаметр близько 18 м. Сфотографувати “слід” метеорита в атмосфері вдалося європейському супутнику *Meteosat-7* за допомогою приладу *SEVIRI*. Знімок супутника *MET-7* чітко демонструє, що метеорні тіло рухалося зі сходу на захід. Це вказує на те, що нема ніякого зв’язку челябінського метеориту з астероїдом 2013 DA14, який в той же день але пізніше на 16 годин події над Південним Уралом проходив від Землі на відстані 27 700 км.

Подібні події якщо взяти до уваги наведені параметри Челябінського боліду повинні відбуватися в атмосфері Землі в середньому кожні 7 років, але імовірність побачити таке явище дуже мала. Теоретичні розрахунки, проведені авторами показують, що наведені фізичні параметри Челябінського метеориту є завищеними.

Загальна маса атмосфери у циліндричному об’ємі, утвореному прольотом метеорного тіла до висоти максимального гальмування H_* , дорівнює:

$$m_{\text{атм}} = \frac{S_0 H^* \rho(H_*)}{\cos Z_R} \quad (1)$$

де S_0 — площа поперечного перерізу метеороїда (мідель), $\rho(H_*)$ — густина атмосфери на висоті максимального гальмування, Z_R — зенітна відстань радіанта. Якщо у це рівняння підставити величину для $\rho(H_*)$ [1]:

$$\rho(H_*) = \frac{m_0 \cos Z_R}{2\Gamma S_0 H^*}$$

де m_0 — початкова маса метеороїда, Γ — коефіцієнт гальмування, H^* — висота однорідної атмосфери, то отримаємо, що ця маса атмосфери дорівнює початковій масі метеороїда m_0 (точніше, $m_0/2\Gamma$, але коефіцієнт гальмування для великих тіл $\approx 0,5$).

Ця формула дає змогу оцінити максимальну масу метеорного тіла $m_{0\text{max}}$, яке буде мати максимальне гальмування у межах земної атмосфери. Оскільки така маса визначається максимальним гальмуванням поблизу поверхні Землі, тому підставляємо в (1) замість $\rho(H_*)$ величину ρ_0 (густину атмосфери біля поверхні Землі) та величину міделя залежно від маси:

$$S_0 = \frac{A m_0^{2/3}}{\delta^{2/3}},$$

де A — коефіцієнт форми тіла, δ — густина тіла. Отримаємо співвідношення:

$$m_{0\text{max}} = 1,84 \cdot 10^9 \left(\frac{A H^*}{\delta^{2/3} \cos Z_R} \right). \quad (2)$$

Із формули (2) випливає, що максимальна маса такого метеороїда не залежить від швидкості, а визначається коефіцієнтом форми, величиною шкали висот, густиною тіла та $\cos Z_R$. Приймавши коефіцієнт форми $A = 1,21 \dots 1,65$; $H^* = (6,7 \dots 7,3) \cdot 10^5$ см; $\delta = 3 \text{ г/см}^3$ і $\cos Z_R = 1,0 \dots 0,5$, одержали $m_{0\text{max}} = 1,1 \cdot 10^8 \dots 2,8 \cdot 10^9$ г, тобто максимальна маса тіла, яке може досягти максимального гальмування у межах земної атмосфери, становить $\sim 3 \cdot 10^9$ г. Максимальний діаметр такого тіла дорівнює ~ 3 м, а не 100 м, як вважали автори роботи [2]. Звичайно, можливі випадки, коли тіло матиме дуже полого траєкторію (великий зенітний кут приблизно такий самий, як і в, імовірно, метеорита Гоба $\sim 79^\circ$) і тоді, згідно з (2), максимальна маса може досягти $\sim 7 \cdot 10^9$ г. Якщо у формулу (2) підставити густину залізного метеороїда ($7,8 \text{ г/см}^3$), то максимальна маса буде дещо меншою: $1,6 \cdot 10^7 \dots 4,1 \cdot 10^8$ г. Метеорні тіла, маси яких перевищують $3 \cdot 10^9$ г, будуть мати максимальне гальмування (формально) нижче поверхні Землі, тобто вони не будуть спричинювати вибухи-спалахи в атмосфері, а у разі падіння на поверхню планети утворять вибухові кратери [3].

Виходячи з наведеного, оцінки розміру Челябінського тіла порядку 20–30 м (явище 15.02.2013), які опубліковані в пресі, суттєво завищені. Помилкові також і оцінки висоти його вибуху. На підставі тих руйнувань, які утворені вибуховою хвилею, висота вибуху не повинна перевищувати 10–12 км. Якби розмір Челябінського тіла становив 20–30 м, воно б не досягло висоти максимального гальмування у межах земної атмосфери і вибухнуло б на поверхні Землі, утворивши великий вибуховий кратер — подібний Аризонському. Вважаємо, що Челябінський метеорит мав діаметр ~ 5 – 6 м і мав масу ~ 300 тон при густині 3 г/см^3 . А такі події відбуваються в атмосфері Землі кожні 5–6 місяців.

1. Кручиненко В.Г. Математико-фізичний аналіз метеорного явища. — Київ: Наукова думка, 2012. — 295 с.
2. Hills J.G., Goda P. Demage from the impacts of small asteroids // Planet Space Sci. — 1998. — **46**. — P. 219–229.
3. Кручиненко В.Г. Метеоритные кратеры на поверхности Земли // Кинематика и физика небес. тел. — 2000. — **16**, № 6. — С. 507–518.
4. Чурюмов К.И., Гулиев А.С., Кручиненко В.Г., Чурюмова Т.К. Кометно-астероидная опасность: реальность и вымыслы (монографія). — Баку: Изд. АН Азербайджана, 2012. — 175 с.
5. Чурюмов К., Кручиненко В., Чурюмова Т. Проблема кометно-астероїдної загрози для людства: реальність і міфи – 1 // Фізика та астрономія в сучасній школі. — 2012. — № 1. — С. 16–24.
6. Чурюмов К., Кручиненко В., Чурюмова Т. Проблема кометно-астероїдної загрози для людства: реальність і міфи – 2 // Фізика та астрономія в сучасній школі. — 2012. — № 2. — С. 20–26.
7. Чурюмов К., Кручиненко В., Чурюмова Т. Проблема кометно-астероїдної загрози для людства: реальність і міфи – 3 // Фізика та астрономія в сучасній школі. — 2012. — № 3. — С. 17–25.
8. Чурюмов К., Кручиненко В., Чурюмова Т. Проблема кометно-астероїдної загрози для людства: реальність і міфи – 4 // Фізика та астрономія в сучасній школі. — 2012. — № 4. — С. 15–23.

Надійшла до редакції 8.10.2013