

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2023.05.024>

УДК 533.6.011.6+523.682

Л. Ф. Черногор

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
пл. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна
e-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com

Фізичні ефекти Київського метеороїда. 1

Мета роботи — комплексний аналіз та оцінка механічних, оптичних і газодинамічних ефектів, які супроводжували політ і вибух Київського метеороїда. Вибух стався над Білоцерківським районом Київської області (Україна). За даними Міжнародної метеорної організації (ІМО) зоряна величина становила -18^m . За нашими оцінками потужність свічення була 215 ГВт за ефективної тривалості 2.4 ± 0.2 с, а повна енергія свічення — 25.2 ± 2.5 ГДж, початкова кінетична енергія — 0.09 ± 0.01 кт ТНТ або 375 ± 35 ГДж. Початкову масу космічного тіла оцінено у 0.89 ± 0.09 т, об'єм — 0.250 ± 0.025 м³, а розмір — 79 ± 3 см. Початкова швидкість метеороїда сягала 29 км/с. Кут нахилу траєкторії до горизонту дорівнював 32° . За висотою вибуху, яка дорівнювала 38 км, і кутом нахилу оцінено щільність речовини, яка є близькою до щільності кам'яного тіла (близько 3.5 т/м³). Проаналізовано енергетику процесів, механічні, оптичні та газодинамічні ефекти космічного тіла. Основне енерговиділення, яке супроводжувало гальмування фрагментів тіла, що руйнувалося при динамічному тиску порядку 2.5 МПа, мало місце в області довжиною 2 км на висоті близько 38 км. Припускались квазібезперервне дроблення та степеневий закон розподілу по масі фрагментів. Оцінено основні параметри балістичної та вибухової ударної хвилі. При числі Маха, яке дорівнювало 97, радіус балістичної ударної хвилі був близьким до 77 м, а фундаментальний період — 0.7 с. За рахунок дисперсії він збільшувався від 3.7 до 11.5 с при збільшенні відстані, яку проходить хвиля, від 50 до 5000 км. Радіуси циліндричної та сферичної вибухових ударних хвиль були близькими до 0.28 та 0.34 км відповідно, а фундаментальні періоди — 2.6 та 3.2 с відповідно. Ці періоди збільшувалися від 9.5 до 30.0 с та від 11.1 до 35.1 с при збільшенні відстані від 50 до 5000 км. Поблизу вибуху метеороїда відносний надлишковий тиск був максимальним. При

зменшенні висоти він зменшувався, а при збільшенні висоти зростає приблизно до висоти 120...150 км, де він досягав 6...7 процентів, а потім зменшувався до одиниць процентів. Абсолютне значення надлишкового тиску було максимальним поблизу висоти вибуху, потім зменшувалося при зменшенні висоти до 20...25 км, далі знову збільшувалося. В епіцентрі вибуху воно було близьким до 94 Па для хвилі циліндричного типу або 99 Па для хвилі сферичного типу, чого недостатньо для пошкодження наземних об'єктів. При збільшенні висоти надлишковий тиск зменшувався від 8...15 Па до одиниць мікропаскалів. Максимальна потужність світлового спалаху при її ефективній тривалості близько 2.4 с дорівнювала 21 ГВт, щільність потоку потужності поблизу вогняної кулі, точніше конуса довжиною 0.5 км і діаметром 2.4 м, становила 5.1 МВт/м². При цьому температура поверхні була близькою до 3100 К, а довжина хвилі Віна — $9.4 \cdot 10^{-7}$ м.

Ключові слова: метеороїд, механічний ефект, гальмування, абляція, кут нахилу, оптичний ефект, газодинамічний ефект, балістична ударна хвиля, сферична ударна хвиля, фундаментальний період, надлишковий тиск

ВСТУП

Відомо, що падіння кожного нового космічного тіла достатньо великих розмірів становить безсумнівний інтерес міждисциплінарного характеру. Політ і вибух метеороїда викликає цілий комплекс фізико-хімічних процесів у всіх геосферах — у літосфері, атмосфері, іоносфері та магнітосфері, а також у геофізичних полях.

Дослідження ефектів, які супроводжували падіння великих космічних тіл, розпочато більш ніж 100 років тому з унікального Тунгуського феномену.

Унікальною подією також стало падіння Челябінського метеороїда в 2013 р. І хоча енергія вибуху була на 1.5...2 порядки меншою від енергії вибуху Тунгуського тіла (20...50 Мт ТНТ), численні засоби дозволили добре зафіксувати комплекс процесів у всіх геосферах [1, 5—9, 11—21, 29—32, 38, 34, 41, 44, 51, 52]. За даними спостережень опубліковано сотні статей і книга [11].

Набагато менше досліджено ефекти інших метеороїдів метрового розміру. Порівняно детально досліджено ефекти Румунського [22—24, 53], Липецького [25—27, 35, 39], Камчатського (Берингово-морського) [28, 42, 46, 49] метеороїдів, метеороїда Юйшу [36]. Для цих метеороїдів автором виконано комплексне моделювання основних фізичних ефектів у всіх геосферах, детально вивчено інфразвукові, іоносферні, магнітосферні та геомагнітні ефекти.

Становить певний інтерес всебічне дослідження комплексу фізичних ефектів Київського метеороїда.

Київський метеороїд має низку особливостей. Він не належить до крупних. За своєю масою та розмірами він дуже поступається Челябінському, Камчатському, Індонезійському та навіть Румунському метеороїдам [22, 23, 26—30, 36, 39, 41, 51—53]. Київський метеороїд мав швидкість (29 км/с), що не набагато менше швидкості Румунського метеороїда (35.7 км/с). Космічне тіло вторглося в атмосферу Землі під досить малим кутом (близько 32°) до горизонту. Усе це визначило специфіку фізичних процесів у всіх геосферах, викликаних Київським метеороїдом.

Метою даної роботи є комплексний аналіз та оцінка механічних, оптичних і газодинамічних ефектів, які супроводжували політ і вибух Київського метеороїда 19 квітня 2023 р. над Україною. Методика аналізу в цілому подібна методикам, описаним у роботах [22, 25, 36].

Попередні результати досліджень ефектів Київського метеороїда коротко опубліковано в роботах [43, 45].

ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО МЕТЕОРОЇД

Космічне тіло, яке отримало назву Київського метеороїда, вторглося до атмосфери Землі на висоті $z_0 = 98$ км, над Україною 19 квітня 2023 р. о 18:57:20 UT (тут і далі — час всесвітній, місцевий час випереджає всесвітній на 3 год). Вибух, який мав місце на висоті $z_e = 38$ км, стався над Білоцерківським районом Київської області. Координати вибуху: 49.9 пн. ш., 29.9 сх. д. За даними [<https://www.imo.net/>] швидкість метеороїда дорівнювала $v_0 = 29$ км/с. Зоряна величина становила -18^m та дещо більше [<https://www.imo.net/>], що відповідало потужності свічення близько 215 ГВт за ефективної тривалості 2.4 ± 0.2 с. Повна енергія свічення боїда була близькою до 25.2 ± 2.5 ГДж, а обчислена початкова кінетична енергія E_{k0} метеороїда — 0.09 ± 0.01 кт ТНТ

375 ± 35 ГДж. Знаючи значення v_0 та E_{k0} , можна оцінити початкову масу $m_0 = 0.89 \pm 0.09$ т, об'єм $V_0 = 0.25 \pm 0.025$ м³ (типова щільність хондриту $\rho_b = 3.5$ т/м³) і розмір метеороїда $d_0 = 79 \pm 3$ см. Оцінено початковий кут нахилу траєкторії космічного тіла до горизонту $\theta_0 = 32^\circ$ [<https://www.imo.net/>].

Послідовні фотографії різних стадій спалахів метеороїда показано на рис. 1.

ФІЗИЧНІ ЕФЕКТИ, ЯКІ СУПРОВОДЖУВАЛИ ПАДІННЯ МЕТЕОРОЇДА

При вторгненні великого космічного тіла з гіперзвуковою швидкістю до атмосфери Землі на висоті біля 100 км або дещо нижче починає генеруватися ударна хвиля, має місце абляція, а потім і руйнування тіла. Збільшення тиску атмосфери та перерізу утвореної хмари фрагментів

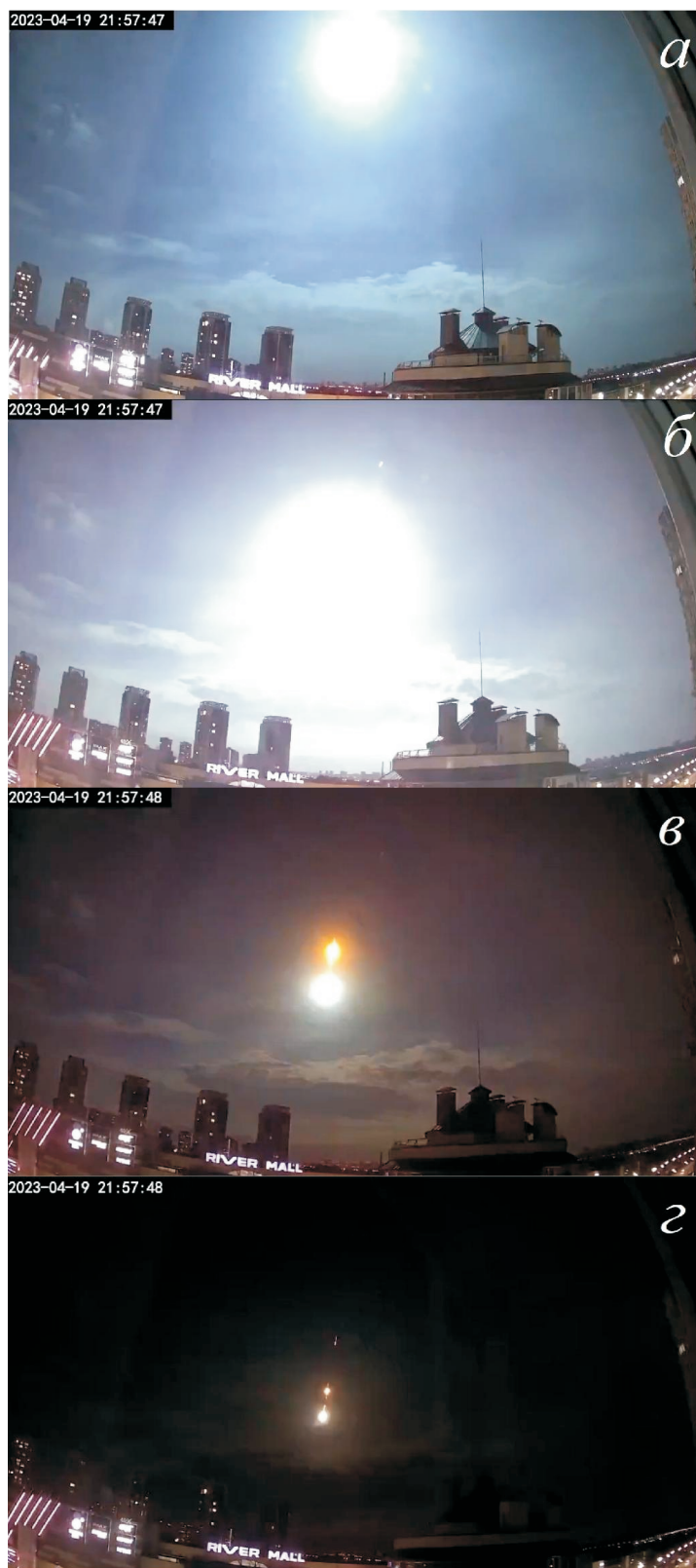


Рис. 1. Послідовні фотографії стадій падіння Київського метеороїда: а, б — 21:57:47 LT, в, г — 21:57:48 LT [<https://www.imo.net/april-19-superbolide-over-ukraine/>]

призводить до його різкого гальмування. Енерговиділення при цьому подібне до теплового вибуху. Генерація ударної хвилі та вибух супроводжуються світловим спалахом (явищем боліда), утворенням турбулентного іонізованого нагрітого сліду, спливанням продуктів вибуху (терміка, плюма). Нагрітий слід може релаксувати протягом декількох годин. Ударна хвиля, досягаючи поверхні Землі, може викликати землетрус. Після вибуху фрагменти космічного тіла, гальмуючись і рухаючись із дозвуковою швидкістю, випадають на поверхню Землі у вигляді метеоритів.

Крім механічних, гідродинамічних, ударно-хвильових і світлових ефектів мають місце плазмові, магнітні, електричні, електромагнітні, акустичні, сейсмічні та інші процеси, які більш детально вивчаються в цій і наступних частинах роботи.

Рух метеороїда в роботі описується за допомогою рівнянь метеороїдної фізики: рівняння гальмування, рівняння абляції (втрати маси), рівнянь для кута нахилу траєкторії та висоти космічного тіла, а також рівнянь для потужності свічення та лінійної концентрації електронів [2, 22, 25]. Позначення в цій роботі подібні до позначень у роботах [22, 23, 25, 36].

КІНЕМАТИЧНІ КРИТЕРІЇ

Для попередньої оцінки динаміки падіння метеороїда доцільно оцінити балістичний коефіцієнт b і параметр віднесення маси (абляції) b_a [22, 25, 36]:

$$b = \frac{C_d}{2} \frac{S_0 H}{m_0 \sin^2 \theta_0},$$

$$b_a = \frac{C_h}{2C_d} \frac{v_0^2}{Q},$$

де $S_0 = d_0^2 / 4 = 0.49 \text{ м}^2$ — початкове значення поперечного перерізу тіла (мідель), $C_d = 0.6$ — коефіцієнт динамічного опору (для кулі), $\rho = 1.225 \text{ кг/м}^3$ — щільність повітря, $H = 7.5 \text{ км}$ — висота однорідної атмосфери, $C_h = 0.03$ — коефіцієнт теплообміну, $Q = 6.5 \text{ МДж/кг}$ — питома теплота сублимації [22, 25, 36].

На висоті вибуху $z_e = 38 \text{ км}$ маємо $b(z_e) = 0.018$ та на будь-якій висоті $b = 3.2$. Малість $b(z_e)$ свідчить про те, що гальмування тіла було незначним, і при $z = z_e$ можна вважати, що $v(z) = v_0$. Нижче висоти z_e мідель хмари фрагментів за рахунок дроблення метеороїда збільшується на порядок і більше. Крім того, маса окремих фрагментів є значно меншою від m_0 . При цьому b збільшується на два порядки та більше. Настає різке гальмування фрагментів, яке збільшується при

зменшенні висоти. Починаючи з деякої висоти, сила опору приблизно врівноважується силою тяжіння, а фрагменти падають зі швидкістю, яка поступово зменшується зі зменшенням висоти та є істотно меншою за швидкість звуку для більшості фрагментів.

Малість коефіцієнта b свідчить про слабкість процесу абляції до висоти вибуху $z_e = 38$ км. Більш важливим процесом є руйнування космічного тіла на висоті біля 38 км.

КІНЕМАТИКА МЕТЕОРОЇДА

Розглянемо основні фізичні процеси, які були супутніми під час падіння Київського метеороїда.

Гальмування метеороїда. На висотах, більших за висоту вибуху метеороїда, сила опору повітря F_r набагато перевищує складову сили тяжіння $mg \sin \alpha$. При цьому рівняння руху набуває вигляду

$$m \frac{dV}{dt} = \frac{C_d}{2} \rho V^2 S, \quad (z) = (0) \exp(-z/H), \quad (1)$$

де при $z = z_e$ приймаємо $m = m_0$, $S = S_0$ і $V = V_0$. Врахуємо, що

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dV}{dz} \frac{dz}{dt} = \frac{dV}{dz} V \sin \alpha. \quad (2)$$

Тоді з рівнянь (1) і (2) отримаємо

$$\frac{dV}{dz} = \frac{C_d (0) S_0}{2 m_0 \sin \alpha} \exp(-z/H), \quad () = 0. \quad (3)$$

Інтегруючи (3), приходимо до співвідношення

$$V(z) = V_0 \exp(-b_0 \exp(-z/H)), \quad (4)$$

де

$$b_0 = \frac{C_d (0) S_0}{2 m_0 \sin \alpha} \Big|_{z=0}.$$

При $z = z_e$ з (4) маємо $V(z_e) = 0.98 V_0 = 28.5$ км/с.

Абляція метеороїда. Рівняння, яке описує віднесення маси космічного тіла, має вигляд

$$\frac{dm}{dt} = \frac{C_h}{2Q} \rho V^3 S. \quad (5)$$

Прийmemo, що при $z = z_e$ площа $S = S_0$. Тоді з (5) з урахуванням (2) маємо

$$\frac{dm}{dz} = 2 \frac{m_0 - b_0}{H} \exp(-z/H), \quad m() = m_0, \quad (6)$$

де

$$b_0 \frac{C_d}{2} \frac{(0)S_0 H}{m_0 \sin}, \quad b_0 \frac{C_h}{2C_d} \frac{z_0^2}{Q}.$$

Інтегруючи рівняння (6), отримаємо

$$m(z) = m_0 \left(1 - \frac{z}{H} \right)^2 \exp \left(-\frac{z}{H} \right). \quad (7)$$

При $z = z_e$ з (7) при $(0) = 1.3 \text{ кг/м}^3$, $b_0 = 1.8 \cdot 10^{-2}$, $b_0 = 3.2$ маємо $m(z_e) = 0.88m_0 = 792 \text{ кг}$.

При досягненні висоти z_e швидкість метеороїда зменшувалась на 2 %, маса — на 12 %, а кінетична енергія E_k — на 14.4 %.

Дроблення метеороїда. Космічне тіло при терті об повітря руйнується при умові, що міцність тіла d зрівнюється з величиною динамічного тиску, тобто при [40]

$$d = 0.365 \rho v^2. \quad (8)$$

Різні частини метеороїда мають різну міцність, яка априорі невідома. Міцність кам'яного тіла змінюється у межах $0.5 \dots 3 \text{ МН/м}^2$ [40]. Умова (8) виконується на висоті

$$z_d = H \ln \frac{0.365 (0) \rho_0^2}{d}. \quad (9)$$

Тут враховано, що при $z > z_e$ швидкість $v = 0$. Для $d = 2.5 \text{ МН/м}^2$ з (9) отримуємо $z_d = 38 \text{ км}$. Для більших значень d маємо $z_d < z_e$, що можливо лише для окремих фрагментів. Як показали спостереження, окремі фрагменти продовжували руйнуватися на висотах $32.5 \dots 29.5 \text{ км}$. Для $d = 3 \text{ МН/м}^2$ їхня швидкість була близькою до $22 \dots 18 \text{ км/с}$. Таким чином, $z_d = z_e = 38 \text{ км}$.

Після дроблення фрагменти рухаються як квазірідини, набуваючи поперечної швидкості, в результаті чого діаметр хмари фрагментів збільшується за таким законом [22, 25, 36]:

$$d(x) = d_0 [1 + k_d (e^{x/2} - 1)], \quad (10)$$

$$k_d = \frac{4H}{d_0 \sin \theta} \sqrt{\frac{(z_d)}{b}},$$

$$x = \frac{z - z_d}{H}.$$

При $(z_d) = (z_e) = 0.82 \cdot 10^{-2} \text{ кг/м}^3$, $b = 3.5 \text{ т/м}^3$, $H = 7.5 \text{ км}$ маємо $k_d = 111$. Таке велике значення k_d свідчить про те, що руйнування метеороїда та гальмування хмари фрагментів відбулося в дуже вузькому діапазоні висот, коли $x/2 \ll 1$. При збільшенні діаметра $d(x)$ в A разів маємо для діапазону висот співвідношення

$$z = z_d + z \frac{2H}{k_d} (A - 1). \quad (11)$$

Наприклад, при $A = 3$ значення $z = 0.275$ км, а при $A = 11$ маємо $z = 1.38$ км.

Степеневий закон дроблення. Прийmemo, що диференційний закон розподілу за масами фрагментів має вигляд [36]

$$dn = A_m \frac{dm_f}{m_f}, \quad (12)$$

де зазвичай показник A_m знаходиться з умови нормування

$$m_0 = \int_{m_{f \min}}^{m_{f \max}} m_f dn = A_m \ln \frac{m_{f \max}}{m_{f \min}} = A_m B_m.$$

Звідси

$$A_m = \frac{m_0}{B_m}, \quad B_m = \ln \frac{m_{f \max}}{m_{f \min}} = \frac{3}{2} \ln \frac{S_{f \max}}{S_{f \min}}. \quad (13)$$

При $m_{f \max} = 0.01m_0 = 9$ кг і $m_{f \min} = 1.8 \cdot 10^{-6}$ кг маємо $A_m = 58$ кг.

Обчислимо сумарний мідель хмари фрагментів, у якому масам $m_{f \min}$ і $m_{f \max}$ відповідають площі $S_{f \min}$ і $S_{f \max}$. Врахуємо, що

$$m_f = \frac{4}{3\sqrt{b}} S_f^{3/2}, \quad dm_f = \frac{2}{\sqrt{b}} S_f^{1/2} dS_f.$$

Тоді замість (12) отримаємо

$$dn = \frac{9\sqrt{b}}{8} \frac{A_m}{S_f^{5/2}} dS_f. \quad (14)$$

Сумарний мідель із урахуванням (14) дається співвідношенням

$$S_f = \int_{S_{f \min}}^{S_{f \max}} S_f dn = \frac{9\sqrt{b}}{4} \frac{A_m}{b} (S_{f \min}^{1/2} - S_{f \max}^{1/2}). \quad (15)$$

Оскільки $S_{f \max}^{1/2} \ll S_{f \min}^{1/2}$, з (15) маємо:

$$S_f = \frac{9\sqrt{b}}{4} \frac{A_m}{b S_{f \min}^{1/2}} = \frac{9\sqrt{b}}{4} \frac{m_0}{b B_m S_{f \min}^{1/2}} = \frac{3S_0}{B_m} \frac{S_0}{S_{f \min}}^{1/2}.$$

З цього виразу з урахуванням (13) отримаємо

$$\frac{S_f}{S_0} = \frac{3}{B_m} \frac{S_0}{S_{f \min}}^{1/2}. \quad (16)$$

Прийmemo, що $m_{f \max} = 9$ кг, $m_{f \min} = 1.8 \cdot 10^{-6}$ кг. При цьому $S_{f \min} = 7.85 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$, а $B_m = 15.4$, $S_f / S_0 = 154$. Мідель хмари фрагментів більш ніж на два порядки перевищує площу S_0 і дорівнює 75 м^2 , що й забезпечує вибухоподібне енерговиділення.

Гальмування фрагментів. Маючи менший розмір d_f , фрагменти гальмуються більш ефективно, ніж початкове космічне тіло. При цьому гальмування фрагмента $a_f = d_f^{-1}$. На висотах, де можна знехтувати силою тяжіння, рівняння руху фрагмента подібне до рівнянь (1) або (3). Відмінність полягає у значенні балістичного коефіцієнта

$$C_{d_f} = \frac{C_d(0) S_f H}{2 m_f \sin \theta} = \frac{3 C_d(0) H}{4 b d_f \sin \theta}. \quad (17)$$

Розв'язок рівняння руху при $\theta = 0$ має вигляд

$$v_f(z) = v_{f0} \exp\left[-\frac{v_{f0}}{H} \left(\exp(z_e / H) - \exp(z / H)\right)\right], \quad (18)$$

$$v_{f0} = v_f(z_e).$$

Оцінки за співвідношенням (18) показують, що пилінки з розміром до 0.1 мм залишаються в області вибуху. Фрагменти міліметрового розміру гальмуються на відстані в одиниці кілометрів від місця вибуху. Фрагменти сантиметрового розміру до майже повного гальмування здатні опуститися на десятки кілометрів.

Обчислені значення швидкості фрагментів для висот $z < z_e$ наведено у табл. 1.

На висоті z_{cr} сила опору повітря F_r стає рівною силі тяжіння, тобто

$$\frac{C_d}{2} v_f^2 S_f = m_f g \sin \theta. \quad (19)$$

Підставляючи (18) у (19), отримаємо співвідношення для обчислення висоти z_{cr} і $v_f(z_{cr})$. Результати розрахунків цих параметрів наведено у табл. 2.

З табл. 2 випливає, що швидкість падіння фрагментів поблизу висоти z_{cr} порядку 100 м/с.

Таблиця 1. Залежність швидкості (км/с) фрагментів від їхнього розміру d_f та висоти z

d_f , см	z , км							
	35	30	25	20	15	10	5	0
1	13.6	1.65	0.128	0.092	0.065	0.047	0.034	0.024
2	19.7	6.8	0.85	0.130	0.092	0.066	0.048	0.034
5	24.6	16.1	6.0	1.4	0.145	0.105	0.076	0.054
10	26.5	21.4	14.2	6.4	1.3	0.149	0.108	0.076
15	27.1	23.6	17.9	10.0	3.7	0.316	0.131	0.093

Таблиця 2. Залежність висоти z_{cr} та швидкості фрагментів v_f на цій висоті в залежності від розміру фрагмента. Вважалось, що $v_{f0} = 28.5$ км/с

d_f , см	z_{cr} , км	v_f , м/с
1	26.2	100.5
2	22	108
5	15.7	112
10	10.7	114
15	7.75	115

Зі співвідношення (19) отримаємо вираз для швидкості падіння фрагментів:

$$v_f = \sqrt{\frac{4}{3C_d} \frac{g d_f \sin \theta}{b}} = \sqrt{\frac{8}{3C_d} \frac{3m_f^{1/3}}{4} \frac{g \sin \theta}{b}}$$

У міру руху фрагмента до поверхні Землі кут збільшується, збільшується також щільність повітря. Це призводить до подальшого гальмування падіння. Важливо, що $v_f \propto d_f^{1/2} m_f^{1/6}$.

Абляція фрагментів. Розглянемо діапазон висот від z_e до z_{cr} , де кут $\theta = \theta_0$. Рівняння для маси та швидкості фрагментів мають такий вигляд:

$$\frac{dm_f}{dz} = \frac{C_h}{2Q} \frac{v_f^2 S_f}{\sin \theta_0}, \quad m_f(z_e) = m_{f0}, \quad (20)$$

$$\frac{dv_f}{dz} = \frac{C_d}{2} \frac{v_f S_f}{\sin \theta_0}, \quad v_f(z_e) = v_{f0} = 28.5 \text{ км/с}. \quad (21)$$

Враховуючи, що $m_f = \frac{4}{3} \pi \rho_b d_f^3 / 6$ та $S_f = \pi d_f^2 / 4$, замість рівнянь (20), (21) отримаємо

$$\frac{dd_f}{dz} = \frac{C_h}{Q} \frac{v_f^2}{b \sin \theta_0}, \quad d_f(z_e) = d_{f0}, \quad (22)$$

$$\frac{dv_f}{dz} = \frac{3C_d}{4 \sin \theta_0} \frac{v_f}{b d_f}.$$

Звідси

$$\frac{dd_f}{d_f} = \frac{C_h}{4 \sin \theta_0} \frac{v_f^2}{b d_f}, \quad d_f|_{z_e} = d_{f0} \quad (23)$$

Інтегрування (23) дало

$$d_f = d_{f0} \exp \left[\frac{2}{ch} \frac{v_{f0}^2}{d_f} \right], \quad \frac{2}{ch} = \frac{3C_d Q}{2C_h}. \quad (24)$$

При цьому $c_h = 14$ км/с. Із (24) випливає, що зміна v_f на 10 % призводить до зміни d_f на 54 %. Тобто, розмір фрагмента зменшується набагато швидше, ніж зменшення швидкості. Це дозволяє у першому наближенні вважати, що у рівнянні (22) $v_f = v_{f0}$. Тоді розв'язок (22) матиме вигляд

$$d_f = d_{f0} d_H (1 - \exp(-(z - z_e)/H)), \quad (25)$$

$$d_H = \frac{C_h}{Q} \frac{(z_e)^2}{b \sin^2 \theta_0} H.$$

За оцінками $d_H = 12.4$ см.

Із (25) маємо $d_f(z_a) = 0$ за умови

$$z_a - z_e = z_a - H \ln \left(1 + \frac{d_{f0}}{d_H} \right).$$

При $(z_a - z_e)/H \ll 1$ отримаємо $z_a = d_{f0} H / d_H$.

Наприклад, для $d_f = 1$ см $z_a = 0.6$ км, а для $d_f = 10$ см $z_a = 13$ км. Це означає, що висоти z_{cr} , а значить і поверхні Землі, досягнуть лише фрагменти з початковим діаметром d_{f0} понад 10 см.

Розглянемо процес абляції на висотах $z < z_{cr}$. Швидкість фрагментів при цьому становить 100 м/с та менше (табл. 2). Як буде показано далі, на висоті, дещо меншій за z_{cr} , кут нахилу траєкторії $\theta = 90^\circ$, а $\sin \theta = 1$. Тоді з рівняння (7) маємо

$$\frac{dd_f}{dz} = \frac{C_h}{Q} \frac{v_f^2}{b}, \quad d_f(z_{cr}) = d_{f_{cr}},$$

де

$$v_f^2 = \frac{4}{3C_d} \frac{b}{\rho} g d_f.$$

Тоді

$$\frac{dd_f}{dz} = \frac{d_f}{L_Q}, \quad L_Q = \frac{3C_d Q}{4C_h g} = 9.9 \cdot 10^3 \text{ км.}$$

Розв'язок цього рівняння має такий вигляд:

$$d_f(z) = d_{f_{cr}} e^{-(z - z_{cr})/L_Q}.$$

Оскільки $z_{cr} / L_Q \ll 1$, навіть на поверхні Землі $d_f(0)$ практично не відрізняється від $d_{f_{cr}}$, тобто на висотах $z < z_{cr}$ абляцією можна повністю знехтувати. При цьому $m_f(z) = m_f(z_{cr})$, де $m_f(z_{cr}) = m_f(z_e)$.

Кут нахилу траєкторії метеороїда. Зміна з часом кута нахилу описується таким рівнянням [2, 11, 22]:

$$m \frac{d}{dt} = mg \cos \frac{m}{R_E} \cos \frac{C_L}{2} S,$$

де $R_E = 6400$ км — радіус Землі, C_L — коефіцієнт підйимальної сили. Кут нахилу збільшується за рахунок сили тяжіння (перший член у правій частині рівняння) або зменшується за рахунок дії відцентрової сили (другий член) та підйимальної сили (третій член). З урахуванням співвідношення (2) отримаємо

$$\sin \frac{d}{dz} = \frac{g}{g^2} \cos \frac{\cos}{R_E} \frac{3C_L}{4} \frac{1}{d}, \quad (26)$$

де d — діаметр метеороїда або його фрагмента.

1. Розглянемо діапазон висот $z > z_e$, де z_0, d, d_0 і θ_0 . Тоді з (26) для характерних масштабів зміни кута θ маємо такі співвідношення:

$$L_{g0} = \frac{z_0^2}{g \cos \theta_0} = 10^8 \text{ м},$$

$$L_{R0} = \frac{R_E}{\cos \theta_0} = 7.5 \cdot 10^6 \text{ м},$$

$$L_{L0} = \frac{4d_0}{3C_L} \frac{b}{(z_d)} = 4.5 \cdot 10^6 \text{ м}.$$

Вважатимемо, що $C_L = 0.1$. Тоді для $L_0 = z_0 / \sin \theta_0 = 113$ км ($z_0 = z_0 - z_e$) маємо

$$L_g = \frac{L_0}{L_g} = 1.1 \cdot 10^8,$$

$$L_R = \frac{L_0}{L_R} = 1.5 \cdot 10^2,$$

$$L_L = \frac{H}{L_L \sin \theta_0} = 3.5 \cdot 10^3.$$

Звідси $\frac{L_g}{L_R} = -7 \cdot 10^{-4} = 0.04$.

2. Розглянемо діапазон висот $z_{cr} < z < z_e$. Тут швидкість фрагментів зменшується від 28.5 до 0.1 км/с. На висоті z_{cr1} маємо $L_g = L_L$, де

$$L_g = \frac{z^2}{g \cos \theta},$$

$$L_L = \frac{4d_f}{3C_L} \frac{b}{(z_{cr1})}.$$

У цьому діапазоні висот відношення $(z_{cr1})/d_f$ змінюється у межах $4...3 \text{ кг/м}^4$. Тоді при θ_0 маємо

$$v_{cr1} = \frac{4d_f}{3C_L} \frac{b g}{(z_{cr1})^{1/2}} \sin \theta_0 = 310...358 \text{ м/с.}$$

При швидкості v_{cr1} та θ_0 отримаємо $L_g = L_L = 11.5 \text{ км}$. Очевидно, що $L_g = L_L = L_{R0}$. При цьому $\theta_0 = 0$.

3. Розглянемо діапазон висот $z < z_{cr}, z_{cr1}$. Із (26) маємо

$$\sin \frac{d}{dz} = \frac{g}{2} \cos \theta, \quad (27)$$

де

$$\frac{2}{z} = \frac{2}{z_{cr}} \frac{(z_{cr}) \sin \theta}{(z) \sin \theta_0} = \frac{2}{z_{cr}} e^{-y} \frac{\sin \theta}{\sin \theta_0}, \quad (28)$$

$$y = (z_{cr} - z) / H.$$

Інтегруючи (27) з урахуванням (28), отримаємо залежність кута від висоти z у такому вигляді:

$$\ln \frac{1-x}{1+x} = 2x \frac{2H}{L_{gcr}} (e^y - 1) = \ln \frac{1-x_0}{1+x_0} = 2x_0, \quad (29)$$

де $x = \sin \theta$, $x_0 = \sin \theta_0$, $L_{gcr} = \frac{2}{g \sin \theta_0}$.

Із рівняння (29) випливає, що y не перевищує 0.01 при $\theta_0 = 89^\circ$, тобто кут $\theta = 90^\circ$ вже поблизу висоти z_{cr} . Остання суттєво залежить від розміру фрагмента (див. табл. 2).

ЕНЕРГЕТИЧНІ ОЦІНКИ

Початкова кінетична енергія $E_{k0} = 375 \dots 35 \text{ ГДж}$ або $0.09 \dots 0.01 \text{ кт}$ ТНТ. Ця енергія є набагато меншою за енергію інших описаних метеороїдів [1, 5—20, 28—34, 37, 38, 41, 42, 44, 46, 49, 51, 52].

До вибуху метеороїда за рахунок його гальмування на висотах $z > z_e$ та абляції енергія E_k зменшилась на 14.4% до 321 ГДж .

Основне енерговиділення метеороїда відбувалося в шарі атмосфери довжиною

$$L = \frac{H}{\sin \theta_0} = 14.2 \text{ км.}$$

При цьому середня погонна щільність енергії становила

$$E_L = \frac{E_{k0}}{L} = 2.6 \cdot 10^7 \text{ Дж/м.}$$

Характерний час енерговиділення

$$L = \frac{L}{0} = 0.5 \text{ с.}$$

Тоді середня потужність цього процесу

$$P_L = \frac{E_{k0}}{L} = 0.75 \text{ ТВт.}$$

Дроблення. При питомій енергії дроблення $d = 10^5 \text{ Дж/кг}$ маємо енергію

$$E_d = d m(z_e) = 7.9 \cdot 10^7 \text{ Дж.}$$

Ефективність цього процесу

$$d = \frac{E_d}{E_{k0}} = 0.02 \text{ \%}.$$

Іонізація. Повне число молекул у метеороїді

$$N = \frac{m_0}{M_m},$$

де $M_m = 5 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$ — маса молекули. Тоді $N = 1.8 \cdot 10^{28}$. Повне число іонізованих молекул

$$N_i = i N.$$

Тут $i = 1.54 \cdot 10^{-2}$ — коефіцієнт іонізації [2, 22, 25, 36]. При цьому $N_i = 2.8 \cdot 10^{26}$. Середня енергія іонізації i дорівнює $50 \text{ еВ} = 8 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}$.

Тоді енергія, яка витрачається на іонізацію, дорівнює

$$E_i = i N_i = 2.2 \cdot 10^9 \text{ Дж.}$$

При цьому

$$i = \frac{E_i}{E_{k0}} = 0.59 \text{ \%}.$$

Енергія гальмування. Як видно з оцінок, на гальмування та абляцію на висотах $z > z_e$, дроблення та іонізацію витрачалась лише незначна частина кінетичної енергії космічного тіла. Більша частина енергії пішла на подолання опору повітря фрагментами метеороїда та вторинні процеси (генерацію ударної хвилі, нагрів фрагментів та повітря, випромінювання електромагнітних і акустичних хвиль).

Затрачена енергія дорівнює роботі вздовж траєкторії s тіла для подолання сили опору $F_r = 0.5 C_d \rho v^2 S_f$:

$$E_{dec} = \int_{L_e} F_r(s) ds = \int_{L_e} F_r(z) \frac{dz}{\sin \theta} = \frac{C_d}{2} \rho (z_e)^2 S_f L_e.$$

Оскільки основне гальмування мало місце поблизу висоти z_e , то $(z_e) = 28$ км/с, $S_f = 75$ м², $(z_e) = 8.3 \cdot 10^{-3}$ кг/м³. Тоді для $L_e = 2$ км отримуємо $E_{dec} = 2.8 \cdot 10^{11}$ Дж.

Поблизу z_e відбулося руйнування космічного тіла, в результаті чого мідель збільшився в 15.4 раза (див. співвідношення (16)), але й протяжність області вибуху z_e становила біля 1 км. Енергія вибуху $E_e = E_{dec} = 2.8 \cdot 10^{11}$ Дж, що становить близько 75 % від початкової кінетичної енергії метеороїда.

СВІЧЕННЯ

У міру гальмування хмари фрагментів її діаметр розширявся до значення $d = 3d_0 = 2.4$ м. Тоді $z = 0.275$ км, а $L_{e1} = z / \sin \theta_0 = 0.5$ км. Форма утворення є близькою до комбінації циліндра висотою L_{e1}

0.54 км і півсфери діаметром $d = 2.4$ м. Бічна поверхня такого утворення

$$S_r = dL_{e1} \frac{d^2}{2}.$$

Оскільки $L_{e1} = d/2$, $S_r = dL_{e1} = 4.1 \cdot 10^3$ м².

При потужності випромінювання $2.1 \cdot 10^{10}$ Вт щільність потоку випромінювання з поверхні конуса дорівнює

$$r = \frac{P_r}{S_r} = 5.1 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2.$$

Такій щільності відповідає температура

$$T = \sqrt[4]{\frac{r}{\sigma}},$$

де $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт м⁻²К⁻⁴ — стала Стефана — Больцмана. Звідси $T = 3100$ К. Згідно із законом Віна максимум випромінювання припадає на довжину хвилі

$$\frac{b}{T} = 9.4 \cdot 10^{-7} \text{ м}.$$

Тут $b = 2.9 \cdot 10^{-3}$ м К — стала Віна. На відстані R від джерела

$$\frac{E_r}{4R^2} e^{-\tau_r},$$

де $\tau_r = 0.05$ — інтегральний коефіцієнт ослаблення випромінювання в атмосфері на відстані $R = z_e = 38$ км. Тоді під епіцентром щільність потоку випромінювання дорівнює 1.3 Дж м⁻², що значно менше від порогу спалахування сухих матеріалів ($0.2 \dots 1$ МДж м⁻²) [47].

ПАРАМЕТРИ УДАРНОЇ ХВИЛІ

Політ космічного тіла з гіперзвуковою швидкістю призводить до генерації балістичної ударної хвилі. Хвиля починає генеруватися на висоті, де повітря для тіла, яке вторгається, є суцільним середовищем. Відповідним критерієм може бути число Кнудсена $Kn = l/d \ll 1$, де l — довжина вільного пробігу. Балістична хвиля відчутної інтенсивності виникає за умови, що $Kn \approx (0.7...1.2) \cdot 10^{-2}$. При $d = 0.79$ м значення висоти $z = 95...98$ км. Балістична хвиля спостерігається впритул до висоти вибуху $z_e = 38$ км. Для висоти $z = z_e$ є сенс говорити про вибухову ударну хвилю. Природно, що поділ ударної хвилі на балістичну та вибухову є умовним і зручним з методичної точки зору.

Балістична ударна хвиля. Радіус балістичної ударної хвилі обчислюється з такого співвідношення [48]:

$$R_b = M d,$$

де $M = v / v_s$ — число Маха, v і v_s — швидкості метеороїда та звуку. Для $v_0 = 29$ км/с і $v_s = 0.3$ км отримаємо, що $M = 97$, а $R_b = 77$ м.

Радіус R_b визначає фундаментальний період інфразвукових коливань [48]:

$$T_b = 2.81 \frac{R_b}{v_s}$$

При цьому $T_b = 0.72$ с. За рахунок дисперсії період T_b збільшується при збільшенні відстані R від джерела коливань [48]:

$$T_b(R) = T_b(R_b) \left(\frac{R}{R_b} \right)^{1/4}. \tag{30}$$

Розраховані значення $T_b(R)$ наведено в табл. 3.

Таблиця 3. Залежність періодів коливань від відстані

R , км	T_b , с	T_c , с	T_{ss} , с
50	3.7	9.5	11.1
100	4.2	11.3	13.2
200	5.1	13.4	15.7
300	5.6	14.9	17.4
500	6.5	16.9	19.8
1000	7.9	20.1	23.5
2000	9.3	23.9	28.0
3000	10.1	26.4	30.9
5000	11.5	30.0	35.1

Обчислимо залежність відносного надлишку тиску у фронті балістичної ударної хвилі з такого співвідношення [48]:

$$\frac{p}{p_0} = \frac{2}{1} \frac{0.4503}{(1 + 4.803R^2 / R_b^2)^{3/8} - 1}, \quad (31)$$

де $\gamma = 1.4$ — показник адіабати. При $R^2 / R_b^2 \gg 1$ з (31) отримуємо

$$\frac{p}{p_0} = 0.3 \frac{R_b^{3/4}}{R}. \quad (32)$$

Вирази (31) і (32) справедливі при віддаленні від джерела в горизонтальному напрямку. Ці вирази не враховують експоненційного зменшення тиску атмосфери при збільшенні висоти. Оскільки у загальному випадку $H = H(z)$, то вираз для тиску має вигляд [3]

$$p(z) = p(z_e) \exp \int_{z_e}^z \frac{dz}{H(z)} = p(z_e) e^{-I},$$

де

$$I = \int_{z_e}^z \frac{dz}{H(z)}.$$

При цьому

$$\frac{p}{p_0} = e^{-I/2}, \quad \frac{p}{p_0} = e^{-I}.$$

Тоді замість (32) маємо

$$\frac{p}{p_0} = 0.3 \frac{R_b^{3/4}}{R} e^{-I/2}. \quad (33)$$

На поверхні Землі при $z_e = 38$ км, $R_b = 77$ м і $I = -2.7$ з (33) маємо $p(0) / p_0 = 7.4 \cdot 10^{-4}$, а $p(0) = 74$ Па.

Вибухова ударна хвиля. Спочатку припустимо, що довжина інтенсивного гальмування $L_e = 2$ км. Тому слід очікувати ударну хвилю циліндричного типу. Тоді радіус ударної хвилі (характерний поперечний розмір області вибуху) дається таким співвідношенням [22, 25, 28]:

$$R_c = \sqrt{\frac{E_{Le}}{p(z_e)}},$$

де $E_{Le} = E_k(z_e) / L_e$, $p(z_e) = 630$ Па — тиск на висоті вибуху. При $E_k(z_e) = 3.2 \cdot 10^{11}$ Дж і $L_e = 2$ км маємо $E_{Le} = 1.6 \cdot 10^8$ Дж/м. Тоді R_c

$= 0.28$ км. Оскільки $2R_c \ll L_e$, хвилю дійсно слід вважати циліндричною. Розмір області вибуху становив $2R_c = 0.56 = 0.56$ км.

Для вибухової ударної хвилі фундаментальний період дається співвідношенням

$$T_c = 2.81 \frac{R_c}{s} \approx 2.6 \text{ с.}$$

Закон дисперсії для періоду T_c також дається співвідношенням (30). Результати розрахунку залежності T_c від R наведено у табл. 3.

Як відомо, поблизу області вибуху циліндрична хвиля є істотно нелінійною. Залежність p від R — складна. На відстані $R_L = 3.16R_c$ від висоти z_e надлишок тиску становить $p(z_e, R_L) = 0.1p(z_e)$ [48]. Для $R > R_L = 0.88 \text{ км}$ хвиля спочатку залишається циліндричною та надлишок тиску $p \propto R^{-1/2}$, а потім поступово при $R \gg R_L$ вона переходить у сферичну, для якої $p \propto R^{-1}$. У проміжній області $p \propto R^{-p}$, де 0.5

1. Результати моделювання залежностей p/p_0 за співвідношенням

$$\frac{p}{p_0} = 0.1 \frac{R_L}{R} \exp \left[-\frac{z - (z_e - R_L)}{2H} \right], \quad (34)$$

справедливі при $R = |z - z_e| > R_L$, наведено в табл. 4 і 5. При розрахунках для діапазону висот $z < z_e$ вважалось, що $p = 0.5$.

З табл. 4 видно, що при зменшенні висоти значення відносного й абсолютного надлишків тиску в хвилі зменшуються. Зокрема, на поверхні Землі $p = 20 \text{ Па}$, що в декілька разів менше від значення $p =$

74 Па, викликаного балістичною ударною хвилею.

З табл. 5 випливає, що при збільшенні висоти при $z > 50 \text{ км}$ відносний надлишок тиску спочатку збільшувався та досягав приблизно 5.6 %, а потім зменшувався до 0.67 %. Зменшення цього відношення пов'язано зі сферичною розбіжністю хвилі, яка починає переважати на висотах $z > 150 \text{ км}$, над його експоненціальним збільшенням (див. співвідношення (34)). Абсолютне значення p монотонно зменшується при збільшенні висоти від z_e . Важливо, що інтенсивність вибухової ударної хвилі є істотною на іоносферних висотах.

Далі розглянемо область найбільш ефективного гальмування. Вище продемонстровано, що діаметр області фрагментів збільшується втричі, а площа — на порядок у діапазоні висот $z = 0.275 \text{ км}$. При цьому $L_{e1} = 0.5 \text{ км}$. При такому значенні L_{e1} слід очікувати, що ударна хвиля буде практично сферичною. Радіус області вибуху обчислимо з такого співвідношення:

$$R_s = \sqrt[3]{\frac{3E_e}{4 p(z_e)}}.$$

Для $E_e = 3.2 \cdot 10^{11} \text{ Дж}$ і $p(z_e) = 630 \text{ Па}$ отримаємо $R_s = 340 \text{ м}$. Тоді розміри основної області вибуху $1 = 0.7 = 0.7 \text{ км}$, тобто область за фор-

Таблиця 4. Висотна залежність надлишкового тиску у вибуховій ударній хвилі циліндричного типу під областю вибуху

z , км	p_0 , кПа	$p/p_0, 10^{-3}$	p , Па
30	1.8	6.9	12.2
25	3.6	3.0	11.8
20	6.9	1.6	11.0
15	14	0.88	12.3
10	26	0.52	13.5
5	51	0.32	16.3
0	100	0.20	20

Таблиця 5. Висотна залежність надлишкового тиску у вибуховій ударній хвилі циліндричного типу над областю вибуху

z , км	$2H$, км	p	p_0 , Па	$p/p_0, 10^{-3}$	p , Па
300	87	1	10^{-5}	6.7	$6.7 \cdot 10^{-8}$
200	44	1	10^{-4}	21	$2.1 \cdot 10^{-6}$
150	26	1	0.001	56	$5.6 \cdot 10^{-5}$
120	21	1	0.01	51	$5.1 \cdot 10^{-4}$
100	19	1	0.1	35	$3.5 \cdot 10^{-3}$
90	18	1	0.3	29	$8.7 \cdot 10^{-3}$
80	17	1	1	23	0.023
70	16	1	3	19	0.057
60	15	1	10	16	0.16
50	15	1	70	15	1.05
40	15	0.75	250	31	7.8

мою є близькою до кулі. При $R_s = 340$ м маємо $T_s = 3.2$ с. Результати розрахунку $T_s(R)$ також наведено в табл. 3.

У табл. 6 та 7 наведено результати розрахунку надлишкового тиску у вибуховій ударній хвилі сферичного типу під і над областю вибуху. Порівнюючи результати табл. 4 і 6, а також табл. 5 і 7, можна бачити, що для сферичної хвилі ефект виявляється помітно меншим.

Енергія ударної хвилі в глибині атмосфери поширюється також і в горизонтальному напрямку. Цьому сприяють стратосферний і термосферний хвилеводи. Останній перебуває на висотах 120...200 км, де $p/p_0 = 2...7\%$. Для хвилеводних мод справедливий циліндричний закон розбіжності. При цьому на відстані порядку 1000 км амплітуда хвилі зменшується приблизно утричі і становить 0.7...2.3 %.

Оцінімо енергетику вибухової ударної хвилі. Припустимо, що в її енергію перетворюється 75 % початкової кінетичної енергії космічного тіла, тобто 0.28 ТДж. Тривалість стрибка тиску $T_{sw} = L_e / v_s = 6.7$ с при $L_e = 2$ км. Тоді середня потужність вибухової ударної хвилі дорівнює близько 42 ГВт.

Таблиця 6. Висотна залежність надлишкового тиску у вибуховій ударній хвилі сферичного типу під областю вибуху

z , км	p_0 , кПа	p/p_0 , 10^{-3}	p , Па
30	1.8	8.5	15.3
25	3.6	3.7	13.3
20	6.9	2	13.8
15	14	1.1	15.1
10	26	0.64	16.6
5	51	0.39	20
0	100	0.25	25

Таблиця 7. Висотна залежність надлишкового тиску у вибуховій ударній хвилі сферичного типу над областю вибуху

z , км	$2H$, км	p_0 , Па	p/p_0 , 10^{-3}	p , Па
300	87	10^{-5}	9.4	$9.4 \cdot 10^{-8}$
200	44	10^{-4}	29	$2.9 \cdot 10^{-6}$
150	26	10^{-3}	50	$5.0 \cdot 10^{-5}$
120	21	0.01	71	$7.1 \cdot 10^{-4}$
100	19	0.1	49	$4.9 \cdot 10^{-3}$
90	18	0.3	40	0.012
80	17	1	33	0.033
70	16	3	27	0.081
60	15	10	23	0.23
50	15	70	21	1.5
40	15	370	40	14.8

ОБГОВОРЕННЯ

Київський метеороїд не належить до унікальних космічних тіл, що вторгаються до атмосфери Землі. Його енергія свічення (~ 25 ГДж) була на межі чутливості систем контролю космічного простору НАСА [<https://cneos.jpl.nasa.gov/>] і тому ця система не зафіксувала падіння Київського метеороїда. За зоряною величиною (-18^m) оцінено максимальну потужність в оптичному діапазоні та у всьому діапазоні електромагнітного випромінювання (~ 21 ГВт). Ефективна тривалість спалаху $2.4 - 0.2$ с дозволила оцінити енергію свічення ($25.2 - 2.5$ ГДж). За енергією свічення оцінено початкову кінетичну енергію (377

35 ГДж). Кут нахилу (32°), орієнтація (з північного сходу на південний захід) траєкторії та висота вибуху (38 км) були оцінені Міжнародною метеорною організацією (ІМО). Висота вибуху та кут нахилу дозволили визначити тип метеороїда (кам'яний). За щільністю метеороїда (3.5 т/м³) та початковою кінетичною енергією оцінено масу ($0.9 - 0.1$ т), об'єм ($0.260 - 0.026$ м³) та розмір ($79 - 3$ см) метеороїда.

Незважаючи на помірну енергетику, метеороїд згенерував досить потужне свічення, балістичну та вибухову ударні хвилі. Сумарний надлишковий тиск в ударній хвилі на поверхні Землі наближався до 100 Па. За оцінками енергія вибухової ударної хвилі була близькою до 280 ГДж, а середня потужність — до 42 ГВт. Фундаментальний період коливань для балістичної ударної хвилі становив біля 0.7 с, а для вибухової ударної хвилі — 2.6...3.2 с. Зі збільшенням відстані від джерела ці періоди збільшувалися від одиниць до десятків секунд.

Аналіз основних фізичних ефектів доцільно окремо розглядати для трьох областей: від максимальної висоти виявлення свічення ($z_0 = 98$ км) до висоти руйнування та вибуху ($z_d = z_e = 38$ км), від висоти вибуху до критичної висоти ($z_{cr} = 26...8$ км), від z_{cr} до поверхні Землі ($z = 0$). У першій області висот внаслідок значної (29 км/с) швидкості мала місце помітна абляція метеороїда (маса зменшувалася до 12 %), а його швидкість при цьому зменшувалася не більш ніж на 2 %, кут нахилу траєкторії практично не змінився. Основне руйнування метеороїда мало місце поблизу висоти 38 км, де сила опору (тиск) повітря зрівнялася з силою руйнування (міцністю кам'яного тіла). Після руйнування фрагменти сильно гальмувалися та піддавалися інтенсивній абляції. Частинки з розміром від мікронів до міліметрів залишалися поблизу висоти вибуху та випаровувалися. Більші фрагменти продовжили свій політ зі швидкістю, яка поступово зменшувалася від 28.5 приблизно до 0.1 км/с. Кут нахилу траєкторії майже не змінювався через компенсацію сили тяжіння підйнятною силою. Фрагменти з розміром 1...10 см досить швидко втрачали свою масу за рахунок інтенсивної абляції. Поверхні Землі змогли досягнути лише частинки з розміром 1...10 мм. У третій області ($z < z_{cr}$) сила опору повітря та підймальна сила у сумі дорівнювали силі тяжіння. Кут нахилу траєкторії дуже швидко збільшився від 32° до майже 90°. Швидкість падіння (майже вертикального) змінювалася від сотень до десятків метрів за секунду. На цих висотах абляція практично не проявлялася.

ГОЛОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

1. Київський метеороїд мав низку особливостей: помірну кінетичну енергію (близько 0.09 кт ТНТ), невеликий розмір (близько 79 см), відносно значну швидкість (29 км/с) і полого траєкторію (кут $\alpha = 32^\circ$). Через таку траєкторію процеси гальмування, дроблення, енерговиділення та вибух тіла відбулися в дуже вузькому діапазоні висот (~1 км). Висота вибуху становила приблизно 38 км.

2. До висоти вибуху метеороїда через відносно високу початкову швидкість його швидкість зменшилась всього на 2 %, а маса — на 12 %. Після вибуху космічного тіла через абляцію маса більшості фрагментів зменшилась практично до нуля. Поверхні Землі змогли досягнути лише фрагменти з розміром порядку 1...10 мм.

3. Енергія світлового спалаху становила 25 ГДж, а максимальна потужність — близько 21 ГВт при тривалості випромінювання 2.4 с. Температура вогняного утворення була близькою до 3100 К. Максимум випромінювання приходився на довжину хвилі 0.94 мкм.

4. Фундаментальні періоди коливань для балістичної та вибухової ударних хвиль були близькі до 0.72 і 2.6 с для хвилі циліндричного типу або 3.2 с для вибухової хвилі сферичного типу. За рахунок дисперсії на великих відстанях ці періоди збільшувались у багато разів.

5. Характерні радіуси балістичної та вибухової ударних хвиль становили 77 та 280 м для хвилі циліндричного типу відповідно. Для вибухової хвилі сферичного типу радіус дорівнював 743 м.

6. Сумарний надлишковий тиск балістичної та вибухової хвиль на поверхні Землі досягав 94 Па для хвилі циліндричного типу або 99 Па для хвилі сферичного типу.

7. Відносний надлишковий тиск в ударній хвилі на висотах іоносфери досягав 2...7 %. Він був відчутним (0.7...2.3 %) на горизонтальних відстанях порядку 1000 км.

8. Енергія та потужність вибухової ударної хвилі була близькою до 0.28 ТДж і 42 ГВт відповідно.

Роботу виконано за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України, проєкт 2020.02/0015 «Теоретичні та експериментальні дослідження глобальних збурень природного і техногенного походження в системі Земля — атмосфера — іоносфера». Робота також частково підтримувалась в рамках держбюджетних НДР, заданих МОН України (номери держреєстрації 0121U109881 та 0122U001476).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Астрономический вестник*. 2013. 47, № 4. (Тематический выпуск).
2. Бронштэн В. А. *Физика метеорных явлений*. М.: Наука, 1981. 416 с.
3. Госсард Э. Э., Хук У. Х. *Волны в атмосфере*. М.: Мир. 1978. 532 с.
4. *Динамические процессы в геосферах*. Выпуск 5. Геофизические эффекты падения Челябинского метеороида: сборник научных трудов ИДГ РАН. Специальный выпуск. Москва: ГЕОС, 2014. 160 с.
5. Емельяненко В. В., Попова О. П., Чугай Н. Н., Шеляков М. А., Пахомов Ю. В., Шустов Б. М., Шувалов В. В., Бирюков Е. Е., Рыбнов Ю. С., Маров М. Я., Рыхлова Л. В., Нароенков С. А., Карташова А. П., Харламов В. А., Трубецкая И. А. Астрономические и физические аспекты челябинского события 15 февраля 2013 года. *Астрономический вестник*. 2013. 47, № 4. С. 262—277.
6. Лазоренко О. В., Черногор Л. Ф. Системный спектральный анализ инфразвукового сигнала, сгенерированного Челябинским метеороидом. *Вісті вищих навчальних закладів. Радіоелектроніка*. 2017. 60, № 8. С. 427—437.
7. *Метеорит Челябинск — год на Земле: материалы Всероссийской научной конференции*. [редкол.: Н. А. Антипин и др.; сост. Н. А. Антипин]. Челябинск: Челябинский государственный краеведческий музей, 2014. 694 с.
8. Милованов Ю. Б., Черногор Л. Ф. Динамика падения Челябинского метеороида: материально-энергетический баланс. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2018. 23, № 3. С. 176—188. <https://doi.org/10.15407/rpra23.03.176>

9. *Челябинский суперболид*. Под ред. Н. Н. Горькавого, А. Е. Дудорова. Челябинск: Изд-во Челябинского университета. 2016. 223 с.
10. Черногор Л. Ф. *Физика и экология катастроф*. Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2012. 556 с.
11. Черногор Л. Ф. Плазменные, электромагнитные и акустические эффекты метеорита «Челябинск». *Инженерная физика*. 2013. 8. С. 23—40.
12. Черногор Л. Ф. Физические эффекты пролета Челябинского метеорита. *Доповіді Національної академії наук України*. 2013. № 10. С. 97—104.
13. Черногор Л. Ф. Крупномасштабные возмущения магнитного поля Земли, сопровождавшие падение Челябинского метеороида. *Радиофизика и электроника*. (2013). 4(18), № 3. С. 47—54.
14. Черногор Л. Ф. Основные эффекты падения метеорита Челябинск: результаты физико-математического моделирования. *Метеорит Челябинск — год на Земле: материалы Всероссийской научной конференции*. [редкол.: Н. А. Антипин и др.; сост. Н. А. Антипин]. Челябинск, 2014. С. 229—264.
15. Черногор Л. Ф. Эффекты Челябинского метеороида в геомагнитном поле. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2014. 54, № 5. С. 658—669.
16. Черногор Л. Ф. Эффекты Челябинского метеороида в ионосфере. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2015. 55, № 3. С. 370—385.
17. Черногор Л. Ф. Физические эффекты, сопровождавшие полет и взрыв Челябинского метеороида. *Радиотехника. Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник*. 2016. 184. С. 32—36.
18. Черногор Л. Ф. Атмосферные эффекты газо-пылевого следа Челябинского метеороида 2013 года. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2017. 53, № 3. С. 296—306.
19. Черногор Л. Ф. Акустические эффекты Челябинского метеороида. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2017. 22, № 1. С. 53—66.
20. Черногор Л. Ф. Возмущения в нижней ионосфере, сопровождавшие падение Челябинского космического тела. *Космические исследования*. 2017. 55, № 5. С. 342—352.
21. Черногор Л. Ф. Эффекты в магнитосфере при подлете Челябинского метеороида. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2018. 58, № 2. С. 267—280.
22. Черногор Л. Ф. Физические эффекты Румынского метеороида. 1. *Космічна наука і технологія*. 2018. 24, № 1. С. 49—70.
23. Черногор Л. Ф. Физические эффекты Румынского метеороида. 2. *Космічна наука і технологія*. 2018. 24, № 2. С. 18—35.
24. Черногор Л. Ф. Параметры акустических сигналов, сгенерированных атмосферным взрывом метеороида над Румынией 7 января 2015 г. *Астрономический вестник*. 2018. 52, № 3. С. 201—212.
25. Черногор Л. Ф. Физические эффекты Липецкого метеороида. *Кінематика і фізика небес. тіл*. 2019. 35, № 4. Ч. 1. С. 37—59. doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2019.04.037>, № 5. Ч. 2. С. 25—47. doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2019.05.025>, № 6. Ч. 3. С. 34—61. doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2019.06.034>
26. Черногор Л. Ф. Ионосферные эффекты Липецкого метеороида. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2020. 60, № 1. С. 83—92.
27. Черногор Л. Ф. Эффекты Липецкого метеороида в геомагнитном поле. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2020. 60, № 3. С. 375—392.
28. Черногор Л. Ф. Эффекты Камчатского метеороида в системе литосфера — атмосфера — ионосфера — магнитосфера. *Материалы 13-й международной шко-*

- лы-конференции «Проблемы геокосмоса» (24—27 марта 2021 г., Санкт-Петербург, Россия). С. 400—410.
29. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Ионосферные возмущения, сопровождавшие пролет Челябинского тела. *Кинематика и физика небес. тел.* 2014. 30, № 3. С. 27—42.
 30. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П. Возмущения в геокосмосе, сопровождавшие падение метеорита «Челябинск». *Радиофизика и радиоастрономия.* 2013. 18, № 3. С. 231—243.
 31. Черногор Л. Ф., Лящук А. И. Параметры инфразвуковых волн, сгенерированных Челябинским метеороидом 15 февраля 2013 г. *Кинематика и физика небес. тел.* 2017. 33, № 2. С. 60—72.
 32. Черногор Л. Ф., Милованов Ю. Б. Динамика падения Челябинского метеороида: высотно-временные зависимости. *Радиофизика и радиоастрономия.* 2018. 23, № 2. С. 104—115.
 33. Черногор Л. Ф., Шевелев Н. Б. Параметры инфразвукового сигнала, сгенерированного метеороидом над Индонезией 8 октября 2009 г. *Кинематика и физика небес. тел.* 2018. 34, № 3. С. 59—75.
 34. Черногор Л. Ф., Шевелев Н. Б. Характеристики инфразвукового сигнала, сгенерированного Челябинским космическим телом: глобальная статистика. *Радиофизика и радиоастрономия.* 2018. 23, № 1. С. 24—35.
 35. Черногор Л. Ф. Геомагнітні варіації, викликані прольотом і вибухом Липецького метеороїда: результати вимірювань. *Кінематика і фізика небес. тіл.* 2020. 36, № 2. С. 58—81.
 36. Черногор Л. Ф. Фізичні ефекти метеороїда Юйшу. *Кінематика і фізика небес. тіл.* Ч. 1: 2022. 38, № 3. С. 20—46. <https://doi.org/10.15407/kfnt2022.03.020> ; Ч. 2, 3: 2023. 39, № 3. С. 3—52. <https://doi.org/10.15407/kfnt2023.03.003> ; <https://doi.org/10.15407/kfnt2023.03.025>
 36. Черногор Л. Ф. Фізичні ефекти метеороїда Юйшу. *Кінематика і фізика небес. тіл.* 2022. 38, № 3. Ч. 1. С. 20—46. <https://doi.org/10.15407/kfnt2022.03.020>; 2023. 39, № 3. Ч. 2, Ч. 3. С. 3—52. <https://doi.org/10.15407/kfnt2023.03.003>; <https://doi.org/10.15407/kfnt2023.03.025>
 37. Черногор Л. Ф., Лящук О. І., Шевелев М. Б. Параметри інфразвукового сигналу, згенерованого Камчатським метеороїдом. *Кінематика і фізика небес. тіл.* 2020. 36, № 5. С. 31—54.
 38. Черногор Л. Ф., Милованов Ю. Б. Динаміка падіння Челябінського метеороїда: розміри, випромінювання та руйнування. *Кінематика і фізика небес. тіл.* 2021. 37, № 5. С. 37—65. <https://doi.org/10.15407/kfnt2021.05.003>
 39. Черногор Л. Ф., Шевелев М. Б. Характеристики інфразвукового сигналу, згенерованого Липецьким метеороїдом: результати статистичного аналізу. *Кінематика і фізика небес. тіл.* 2020. 36, № 4. С. 58—71.
 40. *Catastrophic Events Caused by Cosmic Objects.* Eds Adushkin V., Nemchinov I. Netherlands: Springer, 2008. XI + 357 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6452-4>
 41. Chernogor L. F. Large-scale disturbances in the Earth's magnetic field associated with the Chelyabinsk meteorite event. *Telecommunications and Radio Engineering.* 2014. 73. P. 1105—1115.
 42. Chernogor L. F. Kamchatka meteoroid effects in the lithosphere — atmosphere — ionosphere — magnetosphere system. In: Kostrov A., Bobrov N., Gordeev E., Kulakov E., Lyskova E., Mironova I. (eds) *Problems of Geocosmos-2020.* Springer Proc. in Earth and Environ. Sci. Springer, Cham., 2022. P. 365—377. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91467-7_27

43. Chernogor L. F. Physical effects of the Kyiv meteoroid. *International Conference «Astronomy and Space Physics in the Kyiv University» May 23—26, 2023. Book of Abstracts*. P. 98—99.
44. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. The physical effects associated with Chelyabinsk meteorite's passage. *Probl. Atomic Sci. and Technol.* 2013. 86, № 4. P. 136—139.
45. Chernogor L. F., Liashchuk O. I., Shevelev M. B. Infrasonic effect of the Kyiv meteoroid. *International Conference «Astronomy and Space Physics in the Kyiv University» May 23—26, 2023. Book of Abstracts*. P. 115—116.
46. Gavrilov B. G., Pilipenko V. A., Poklad Y. V., Ryakhovsky I. A. Geomagnetic effect of the Bering Sea meteoroid. *Russian J. Earth Sci.* 2020. 20, № 6. ES6009. <https://doi.org/10.2205/2020ES000748>
47. Glasstone S., Dolan P. J. *Effects of nuclear weapons*. Washington, DC (USA): Department of Defense, Department of Energy. 1977. 653 p.
48. *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*. Eds A. Le Pichon, E. Blanc, A. Hauchecorne. Dordrecht Heidelberg London New York: Springer, 2019. XXVIII + 1167 p.
49. Luo Y., Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Rozumenko V. T., Shulga S. N., Zheng Y. Ionospheric effects of the Kamchatka meteoroid: Results from multipath oblique sounding. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 2020. 207, 105336. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105336>
50. McCord T. B., Morris J., Persing D., Tagliaferri E., Jacobs C., Spalding R., Grady L., Schmidt R. Detection of a meteoroid entry into the Earth's atmosphere on February 1, 1994. *J. Geophys. Res.* 1995. 100, № E2. P. 3245—3249. <https://doi.org/10.1029/94JE02802>
51. Popova O., Jenniskens P., Emelyanenko V., Kartashova A., Biryukov E., Khaibrakhmanov S., Shuvalov V., Rybnov Y., Dudorov A., Grokhovsky V., Badyukov D., Qing-Zhu Yin, Gural P., Albers J., Granvik M., Evers L., Kuiper J., Kharlamov V., Solovyov A., Rusakov Y., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A., Larionov M., Glazachev D., Mayer A., Gisler G., Gladkovsky S., Wimpenny J., Sanborn M., Yamakawa A., Verosub K., Rowland D., Roeske S., Botto N., Friedrich J., Zolensky M., Le L., Ross D., Ziegler K., Nakamura T., Ahn I., Lee J., Qin Zhou, Xian-Hua Li, Qiu-Li Li, Liu Y., Guo-Qiang Tang, Hiroi T., Sears D., Weinstein I., Vokhmintsev A., Ishchenko A., Schmitt-Kopplin P., Hertkorn N., Nagao K., Haba M., Komatsu M., Mikouchi T. Supplementary material for Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization. *Science*. 2013. URL: www.sciencemag.org/cgi/content/full/Science.1242642/DC1.
52. Popova O., Jenniskens P., Emelyanenko V., Kartashova A., Biryukov E., Khaibrakhmanov S., Shuvalov V., Rybnov Y., Dudorov A., Grokhovsky V., Badyukov D., Qing-Zhu Yin, Gural P., Albers J., Granvik M., Evers L., Kuiper J., Kharlamov V., Solovyov A., Rusakov Y., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A., Larionov M., Glazachev D., Mayer A., Gisler G., Gladkovsky S., Wimpenny J., Sanborn M., Yamakawa A., Verosub K., Rowland D., Roeske S., Botto N., Friedrich J., Zolensky M., Le L., Ross D., Ziegler K., Nakamura T., Ahn I., Lee J., Qin Zhou, Xian-Hua Li, Qiu-Li Li, Liu Y., Guo-Qiang Tang, Hiroi T., Sears D., Weinstein I., Vokhmintsev A., Ishchenko A., Schmitt-Kopplin P., Hertkorn N., Nagao K., Haba M., Komatsu M., Mikouchi T. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization. *Science*. 2013. 342. P. 1069—1073.
53. Pricopi D., Dascalu M., Badescu O., Nedelcu D., Popescu M., Sonka A., Suran M. Orbit reconstruction for the meteoroid of the meteorite-producing fireball that exploded over Romania on January 7, 2015. *Proceedings Romanian Academy, Series A*. 2016. 17, № 2. P. 133—136.

REFERENCES

1. *Solar System Research*. (2013). 47(4) [In Russian].
2. Bronshten V. A. (1983). *Physics of meteoric phenomena* (Dordrecht, Holland: D. Reidel Publishing Company).
3. Gossard E. E., Hooke W. H. (1975). *Waves in the atmosphere: atmospheric infrasound and gravity waves, their generation and propagation* (Developments in Atmospheric Science). (Amsterdam: Elsevier Scientific Pub. Co.).
4. Dynamic Processes in Geospheres. (2014). Issue 5: Geodesic effects of the fall of Chelyabinsk meteoroid (Moscow, Russia: GEOS), in Ser.: *Collection of Scientific Papers of the Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences*, Special Issue [in Russian].
5. Emel'yanenko V. V., Popova O. P., Chugai N. N., Shelyakov M. A., Pakhomov Yu. V., Shustov B. M., Shuvalov V. V., Biryukov E. E., Rybnov Yu. S., Marov M. Ya., Rykhlova L. V., Naroenkov S. A., Kartashova A. P., Kharlamov V. A., Trubetskaya I. A. (2013). Astronomical and physical aspects of the Chelyabinsk event (February 15, 2013). *Solar Syst. Res.* 47(4), 240—254
<https://doi.org/10.1134/S0038094613040114>
6. Lazorenko O. V., Chernogor L. F. (2017). System spectral analysis of infrasonic signal generated by Chelyabinsk meteoroid. *Radioelectronics and Communications Systems.* 60(8), 331—338 <https://doi.org/10.3103/S0735272717080015>
7. *Chelyabinsk Meteorite — A Year on Earth. Proc. All-Russ. Sci. Conf.* (2014). Chelyabinsk, Feb. 14—15, 2014, Ed. by N. A. Antipin, et al. (Chelyabinsk: Chelyabinsk State Ethnograph. Mus.) [In Russian].
8. Mylovanov Yu. B., Chernogor L. F. (2018). Dynamics of the Chelyabinsk meteoroid entering the atmosphere: mass-energy balance. *Radio Phys. and Radio Astron.* 23(3), 176—188. <https://doi.org/10.15407/rpra23.03.176> [In Russian]
9. Gorkavyy N., Dudorov A., Taskaev S. (eds.) (2019). *Chelyabinsk Superbolide*. (Springer Nature Switzerland AG: Springer International Publishing).
DOI: 10.1007/978-3-030-22986-3
10. Chernogor L. F. (2012). Physics and ecology of catastrophes: Monograph (Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University) [In Russian].
11. Chernogor L. F. (2013). Plasma, electromagnetic, and acoustic effects of the «Chelyabinsk» meteorite. *Inzhenernaja Fizika.* (8), 23—40 [In Russian].
12. Chernogor L. F. (2013). Physical effects of the Chelyabinsk meteorite passage. *DAN Ukraine*, (10), 97—104. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/86192>. [In Russian].
13. Chernogor L. F. (2013). Large-scale disturbances in the Earth's magnetic field associated with the Chelyabinsk meteorite event. *Radiophys. and Electronics.* 4(18) (3), 47—54.
14. Chernogor L. F. (2014). Basic effects of Chelyabinsk meteoroid fall: the results of physical-mathematic simulation. Proc. of All-Russian Sci. Conf. on Chelyabinsk meteorite — a year at the Earth, 2014. (Chelyabinsk, Russia) [In Russian].
15. Chernogor L. F. (2014). Geomagnetic field effects of the Chelyabinsk meteoroid. *Geomagnetism and Aeronomy.* 54(5), 613—624.
<https://doi.org/10.1134/S001679321405003X>
16. Chernogor L. F. (2015). Ionospheric effects of the Chelyabinsk meteoroid. *Geomagnetism and Aeronomy.* 55(3), 353—368. <https://doi.org/10.1134/S0016793215030044>
17. Chernogor L. F. (2016). Physical effects, that accompanied a passage and explosion of Chelyabinsk meteoroid. *All-Ukrainian Interdepartmental Scientific and Technical Journal "Radiotekhnika"*. 184, 32—36 [In Russian].

18. Chernogor L. F. (2017). Atmospheric effects of the gas-dust plume of the Chelyabinsk meteoroid of 2013. *Izvestiya, Atmos. and Oceanic Phys.* 53(3), 259—268. <https://doi.org/10.1134/S0001433817030033>
19. Chernogor L. F. (2017). Chelyabinsk meteoroid acoustic effects. *Radio Physics and Radio Astronomy.* 22(1), 53—66. <https://doi.org/10.15407/rpra22.01.053> [In Russian].
20. Chernogor L. F. (2017). Disturbance in the lower ionosphere that accompanied the re-entry of the Chelyabinsk cosmic body. *Cosmic Res.* 55(5), 323—332. <https://doi.org/10.1134/S0010952517050033>
21. Chernogor L. F. (2018). Magnetospheric effects during the approach of the Chelyabinsk meteoroid. *Geomagnetism and Aeronomy.* 58(2), 252—265. <https://doi.org/10.1134/S0016793218020044>
22. Chernogor L. F. (2018). The physical effects of Romanian meteoroid. 1. *Space Sci. and Technol.* 24(1), 49—70. <http://dx.doi.org/10.15407/knit2018.01.049>
23. Chernogor L. F. (2018). The physical effects of Romanian meteoroid. 2. *Space Sci. and Technol.* 24(2), 18—35. <https://doi.org/10.15407/knit2018.02.018>
24. Chernogor L. F. (2018). Parameters of acoustic signals generated by the atmospheric meteoroid explosion over Romania on January 7, 2015. *Solar Syst. Res.* 52(3), 206—222. <https://doi.org/10.1134/S0038094618030048>
25. Chernogor L. F. (2019). Physical effects of the Lipetsk meteoroid: 1. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies.* Part 1: 35(4), 174—188. <https://doi.org/10.3103/S0884591319040020>; Part 2: 35(5), 217—230. <https://doi.org/10.3103/S0884591319050027>; Part 3: 35(6), 271—285. <https://doi.org/10.3103/S0884591319060023>
26. Chernogor L. F. (2020). Ionospheric effects of the Lipetsk meteoroid. *Geomagnetism and Aeronomy.* 60(1), 80—89. <https://doi.org/10.1134/S0016793219060057>
27. Chernogor L. F. (2020). Effects of the Lipetsk meteoroid in the geomagnetic field. *Geomagnetism and Aeronomy.* 60(3), 355—372. <https://doi.org/10.1134/S0016793220030032>
28. Chernogor L. F. (2021). Kamchatka meteoroid effects in the lithosphere — atmosphere — ionosphere — magnetosphere system. Proceedings of the XII International Conference and School «Problems of Geocosmos-2021». (March 24—27, 2021, St. Petersburg, Russia). [In Russian].
29. Chernogor L. F., Barabash V. V. (2014). Ionosphere disturbances accompanying the flight of the Chelyabinsk body. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies.* 30(3), 126—136. <https://doi.org/10.3103/S0884591314030039>
30. Chernogor L. F., Garmash K. P. (2013). Disturbances in Geospace Associated with the Chelyabinsk Meteorite Passage. *Radio Physics and Radio Astronomy.* 18(3), 231—243 [in Russian]. <http://rpra-journal.org.ua/index.php/ra/article/view/1142>
31. Chernogor L. F., Liashchuk O. I. (2017). Parameters of Infrasonic Waves Generated by the Chelyabinsk Meteoroid on February 15, 2013. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies.* 33(2), 79—87. <https://doi.org/10.3103/S0884591317020027>
32. Chernogor L. F., Mylovanov Yu. B. (2018). Dynamics of the Chelyabinsk meteoroid fall: altitude and time dependences. *Radio Physics and Radio Astronomy.* 23(2), 104—115 [In Russian]. <https://doi.org/10.15407/rpra23.02.104>
33. Chernogor L. F., Shevelev M. B. (2018). Parameters of the infrasound signal generated by a meteoroid over Indonesia on October 8, 2009. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies.* 34(3), 147—160. <https://doi.org/10.3103/S0884591318030030>
34. Chernogor L. F., Shevelev N. B. (2018). Characteristics of the infrasound signal generated by Chelyabinsk celestial body: global statistics. *Radio Phys. and Radio Astron.* 23(1), 24—35. [In Russian]. <https://doi.org/10.15407/rpra23.01.024>

35. Chernogor L. F. (2020). Geomagnetic Variations Caused by the Lipetsk Meteoroid's Passage and Explosion: Measurement Results. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies.* 36(2), 79—93. <https://doi.org/10.3103/S0884591320020038>
36. Chernogor L. F. (2022). Physical Effects of the Yushu Meteoroid. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies.* Part 1: 38(3), 132—147. <https://doi.org/10.3103/S0884591322030035>; Part 2, 3: 2023. 39(3), 123—153. <https://doi.org/10.3103/S0884591323030029>, <https://doi.org/10.3103/S0884591323030030>
37. Chernogor L. F., Liashchuk O. I., Shevelev M. B. (2020). Parameters of the Infrasonic Signal Generated by the Kamchatka Meteoroid. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies.* 36(5), 222—237. <https://doi.org/10.3103/S0884591320050037>
38. Chernogor L. F., Mylovanov Yu. B. (2021). Dynamic falling of the Chelyabinsk meteoroid: Sizes, radiation, and destruction. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies.* 37(5), 241—262. <https://doi.org/10.3103/S0884591321050056>
39. Chernogor L. F., Shevelev M. B. (2020). Characteristics of infrasonic signals generated by the Lipetsk meteoroid: Statistical analysis. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies.* 36(4), 186—194. <https://doi.org/10.3103/S0884591320040030>
40. Catastrophic Events Caused by Cosmic Objects. (2008). Ed.: Adushkin V., Nemchinov I. (Netherlands: Springer). <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6452-4>
41. Chernogor L. F. (2014). Large-scale disturbances in the earth's magnetic field associated with the Chelyabinsk meteorite event. *Telecommunications and Radio Engineering.* 73, 1105—1115.
42. Chernogor L. F. (2022). *Kamchatka meteoroid effects in the lithosphere — atmosphere — ionosphere — magnetosphere system.* In: Kosterov A., Bobrov N., Gordeev E., Kulakov E., Lyskova E., Mironova I. (eds) Problems of Geocosmos-2020. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham., 365—377. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91467-7_27
43. Chernogor L. F. (2023). *Physical effects of the Kyiv Meteoroid.* International Conference «Astronomy and Space Physics in the Kyiv University» May 23—26. Book of Abstracts. P. 98—99.
44. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. (2013). The physical effects associated with Chelyabinsk meteorite's passage. *Probl. Atomic Sci. and Technol.*, 86(4), 136—139.
45. Chernogor L. F., Liashchuk O. I., Shevelev M. B. (2023). *Infrasonic effect of the Kyiv meteoroid.* International Conference «Astronomy and Space Physics in the Kyiv University» May 23—26. Book of Abstracts. P. 115—116.
46. Gavrilov B. G., Pilipenko V. A., Poklad Y. V., Ryakhovsky I. A. (2020). Geomagnetic effect of the Bering Sea meteoroid. *Russian J. Earth Sci.* 20(6), ES6009. <https://doi.org/10.2205/2020ES000748>
47. Glasstone S., Dolan P. J. (1977). *Effects of nuclear weapons.* (Washington, DC (USA): Department of Defense, Department of Energy).
48. *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies* (2019). Eds A. Le Pichon, E. Blanc, A. Hauchecorne. (Dordrecht Heidelberg London New York: Springer).
49. Luo Y., Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Rozumenko V. T., Shulga S. N., Zheng Y. (2020). Ionospheric effects of the Kamchatka meteoroid: Results from multipath oblique sounding. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 207, 105336. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105336>
50. McCord T. B., Morris J., Persing D., Tagliaferri E., Jacobs C., Spalding R., Grady L., Schmidt R. (1995). Detection of a meteoroid entry into the Earth's atmosphere on February 1, 1994. *J. Geophys. Res.* 100(E2), 3245—3249. <https://doi.org/10.1029/94JE02802>

51. Popova O., Jenniskens P., Emelyanenko V., Kartashova A., Biryukov E., Khaibrakhmanov S., Shuvalov V., Rybnov Y., Dudorov A., Grokhovsky V., Badyukov D., Qing-Zhu Yin, Gural P., Albers J., Granvik M., Evers L., Kuiper J., Kharlamov V., Solovyov A., Rusakov Y., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A., Larionov M., Glazachev D., Mayer A., Gisler G., Gladkovsky S., Wimpenny J., Sanborn M., Yamakawa A., Verosub K., Rowland D., Roeske S., Botto N., Friedrich J., Zolensky M., Le L., Ross D., Ziegler K., Nakamura T., Ahn I., Lee J., Qin Zhou, Xian-Hua Li, Qiu-Li Li, Liu Y., Guo-Qiang Tang, Hiroi T., Sears D., Weinstein I., Vokhmintsev A., Ishchenko A., Schmitt-Kopplin P., Hertkorn N., Nagao K., Haba M., Komatsu M., Mikouchi T. (2013). Supplementary material for Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization. *Science*. 1242642/DC1. URL: www.sciencemag.org/cgi/content/full/
52. Popova O., Jenniskens P., Emelyanenko V., Kartashova A., Biryukov E., Khaibrakhmanov S., Shuvalov V., Rybnov Y., Dudorov A., Grokhovsky V., Badyukov D., Qing-Zhu Yin, Gural P., Albers J., Granvik M., Evers L., Kuiper J., Kharlamov V., Solovyov A., Rusakov Y., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A., Larionov M., Glazachev D., Mayer A., Gisler G., Gladkovsky S., Wimpenny J., Sanborn M., Yamakawa A., Verosub K., Rowland D., Roeske S., Botto N., Friedrich J., Zolensky M., Le L., Ross D., Ziegler K., Nakamura T., Ahn I., Lee J., Qin Zhou, Xian-Hua Li, Qiu-Li Li, Liu Y., Guo-Qiang Tang, Hiroi T., Sears D., Weinstein I., Vokhmintsev A., Ishchenko A., Schmitt-Kopplin P., Hertkorn N., Nagao K., Haba M., Komatsu M., Mikouchi T. (2013). Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization. *Science*. 342, 1069—1073.
53. Pricopi D., Dascalu M., Badescu O., Nedelcu D., Popescu M., Sonka A., Suran M. (2016). Orbit reconstruction for the meteoroid of the meteorite-producing fireball that exploded over Romania on January 7, 2015. *Proceedings Romanian Academy, Series A*. 17(2), 133—136.

L. F. Chernogor

V. N. Karazin Kharkiv National University

PHYSICAL EFFECTS FROM THE KYIV METEOROID. 1.

The purpose of this work is a comprehensive simulation and estimation of the effects in gas dynamics as well as mechanical and optical effects from the Kyiv meteoroid that entered the terrestrial atmosphere and exploded over Bila Tserkva district, Kyiv region (Ukraine). According to the International Meteor Organization (IMO), the apparent magnitude was -18^m . According to our estimates, the luminous power was 215 GW with an effective duration of 2.4–0.2 s, and the total luminous energy was 25.2–2.5 GJ, the initial kinetic energy was 0.09–0.01 kt of TNT or 375–3 GJ. The initial mass of the cosmic body was estimated to be 0.89–0.09 t, the volume was 0.250–0.025 m³, and the size was 79–3 cm. The initial velocity of the meteoroid reached 29 km/s. The inclination angle, the angle that the trajectory makes with the horizontal plane was 32°. The altitude of the explosion, 38 km and the angle, 32°, give an estimate of the material density of approximately 3.5 t/m³, close to the rock density. The energy of the processes and effects in gas dynamics as well as mechanical and optical effects from the celestial body have been analyzed. The main release of energy associated with the deceleration of the fragments of the celestial body, which was defragmented under a dynamical pressure of ~ 2.5 MPa, took place in the region of 2 km in length at an altitude of about 38 km. A quasi-continuous defragmentation was suggested to produce a mass distribution that follows a power law. The main parameters of the ballistic and explosive shock waves have been estimated. For the Mach number of 97, the radius of the ballistic shock wave was estimated to be about 77 m and the fundamental period to be

0.7 s, which showed a dispersive increase from 3.7 s to 11.5 s with the propagation path length increasing from 50 km to 5,000 km. The radii of cylindrical and spherical wavefront shock wave were approximately 0.28 km and 0.34 km respectively, and fundamental period was about 2.6 s and 3.2 s respectively. This period had been increasing from 9.5 s to 30.0 s and from 11.1 s to 35.1 s with the propagation path length increasing from 50 km to 5,000 km. In the vicinity of the meteoroid terminal point, the excess pressure was a maximum on a relative scale. It decreased with decreasing altitude, and increased with increasing altitude up to an altitude of approximately 120...150 km where it attained values of ~ 6...7 of percent, and further it decreased down to units of percent. The absolute value of the excess pressure was estimated to be near the altitude of the explosion, subsequently it decreased with decreasing altitude down to 20...25 km, and further it again increased. At the epicenter of the explosion, it was estimated to be about 94 Pa for cylindrical wavefront and ~ 99 Pa for spherical wavefront, which is not enough to damage objects on the ground. The excess pressure decreased with increasing altitude from 8...15 pascals to micropascals. Given the average duration of the effective light flash of 2.4 s, the maximum power of the fireball was estimated to be 21 GW, the flux of power near the fireball (or more precisely, the cone of 0.5 km in length and of 2.4 m in diameter) to be 5.1 MW/m². At the same time, the temperature was estimated to be about 3,100 K, and Wien wavelength to be $9.4 \cdot 10^{-7}$ m.

Key words: meteoroid, mechanical effect, deceleration, ablation, inclination angle, optical effect, effect in gas dynamics, ballistic shock wave, spherical shock wave, fundamental period, excess pressure

Стаття надійшла до редакції 26.05.2023

Після доопрацювання 26.05.2023

Прийнята до друку 16.06.2023