

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2022.03.020>

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 метеороїда Юйшу. 1**

*Мета роботи — оцінка механічних, оптичних і газодинамічних ефектів, які супроводжували політ і вибух метеороїда Юйшу. Вибух стався над малонаселеною місцевістю — провінцією Цинхай (Тибетське узгір'я, Китайська народна республіка). За даними NASA початкова кінетична енергія космічного тіла становила приблизно 9.5 кт ТНТ, або 40 ТДж. В енергію світлового спалаху перетворилось приблизно 4.9 ТДж, тобто 12.25 % від початкової кінетичної енергії тіла. Проекції швидкості метеороїда дорівнювали:  $v_x = -2.6$  км/с,  $v_y = 5.9$  км/с,  $v_z = -12.1$  км/с, що відповідає куту нахилу траєкторії до горизонту приблизно  $5^\circ$ . За висотою вибуху, яка дорівнювала 35.5 км, і кутом нахилу оцінено щільність речовини, яка є близькою до щільності звичайного хондриту (приблизно  $3.5$  т/м<sup>3</sup>). Знання кінетичної енергії та швидкості дозволило обчислити масу метеороїда (432 т) та його характерний розмір (6.2 м). Проаналізовано енергетику процесів, механічні, оптичні та газодинамічні ефекти космічного явища. Основне енерговиділення, яке супроводжувало гальмування фрагментів тіла, що руйнувалося при динамічному тиску порядку 1 МПа, мало місце в області довжиною 17.2 км на висоті приблизно 35 км. Припускались квазібезперервне дроблення та степеневий закон розподілу за масою фрагментів. Оцінено основні параметри балістичної та вибухової ударних хвиль. При числі Маха, яке дорівнює 45, радіус балістичної ударної хвилі був близьким до 280 м, а фундаментальний період — 2.6 с. За рахунок дисперсії період збільшувався від 9.5 до 30.1 с при збільшенні хвилею пройденої відстані від 50 до 5000 км. Радіус циліндричної та сферичної вибухових ударних хвиль був близьким до 0.8 та 2 км відповідно, а фундаментальний період — 7.5 та 18.8 с відповідно. Цей період збільшувався від 21.1 до 66.7 с та від 42 до 132.9 с при збільшенні відстані від 50 до 5000 км. Поблизу вибуху метеороїда від-*

носний надлишковий тиск був максимальним. При зменшенні висоти він зменшувався, а при збільшенні висоти збільшувався приблизно до висоти 120...150 км, де він досягав 10...20 %, а потім зменшувався до декількох процентів. Абсолютне значення надлишкового тиску для сферичної хвилі було максимальним поблизу висоти вибуху, потім зменшувалось при зменшенні висоти до 15 км, далі знову збільшувалось. В епіцентрі вибуху воно було близьким до 310 Па для хвилі циліндричного типу або 48.5 Па для хвилі сферичного типу, чого недостатньо для пошкоджень наземних об'єктів. При збільшенні висоти надлишковий тиск зменшувався від багатьох десятків паскалів до мікропаскалів. Середня потужність світлового спалаху при її тривалості 1.26 с становила 3.9 ТВт, щільність потоку потужності поблизу вогняної кулі, точніше конуса довжиною 3.4 км і діаметром 18.6 м, — 19.5 МВт/м<sup>2</sup>. При цьому температура поверхні була близькою до 4300 К, а довжина хвилі Віна — 0.67 мкм.

**Ключові слова:** метеороїд, механічний ефект, оптичний ефект, газодинамічний ефект, балістична ударна хвиля, сферична ударна хвиля, фундаментальний період, надлишковий тиск.

## ВСТУП

Падіння кожного нового космічного тіла достатньо великих розмірів (більш ніж 1 м) становить безсумнівний інтерес міждисциплінарного характеру. Справа в тому, що політ і вибух метеороїда викликає цілий комплекс фізико-хімічних процесів у всіх геосферах — у літосфері, атмосфері, іоносфері та магнітосфері, а також у геофізичних полях. Вивчення таких процесів ведуть сейсмологи, спеціалісти з фізики атмосфери, іоносфери та магнітосфери. Астрономи визначають орбіту та походження космічного тіла. Спеціалісти з метеоритів збирають фрагменти, які впали. Фізики та хіміки сучасними методами досліджують склад і властивості метеоритної речовини. Радіофізики вивчають вплив виниклих збурень на параметри радіоканалів, поширення радіохвиль і функціонування радіосистем різного призначення (телекомунікацію, радіонавігацію, радіолокацію, дистанційне радіозондування тощо).

Дослідження ефектів, які супроводжували падіння великих космічних тіл, розпочато більш ніж 100 років тому, і пов'язане воно з унікальним тунгуським феноменом. Аналіз його наслідків триває й у наш час [3, 4, 34]. На жаль, у 1908 р. не було чутливих приладів, які змогли б задокументувати процеси у всіх геосферах. Через мізерну інформацію досі не встановлено природу тунгуського феномену.

Унікальною подією стало падіння Челябінського метеороїда в 2013 р. (табл. 1). І хоча енергія вибуху була на 1.5...2 порядки меншою від енергії вибуху Тунгуського тіла (20...50 Мт ТНТ), наявні засоби дозволили добре зафіксувати комплекс процесів у всіх геосферах [2,

**Таблиця 1.** Відомості про суперболіди останнього часу [<https://cneos.jpl.nasa.gov/fireballs/>]

Дата та час спостереження/назва	(пн. ш.)	(сх. д.)	$z_e$ , км	$E_T$ , ТДж	$v$ , км/с	$E_{\text{к0}}$ , кт ТНТ	$m$ , т
08.10.2009 02:57:00 UT/ Індонезійський	4.25	120.6	19.1	20.0	19.2	33	750
15.02.2013 03:20:26 UT/ Челябінський	54.956	60.28	23.3	375	18.5	440	$1.1 \cdot 10^4$
07.01.2015 01:05:56 UT/ Румунський	45.7	26.9	45.5	0.136	35.7	0.4	2.6
21.06.2018 01:16:20 UT/ Липецький (Озерки)	52.8	38.1	27	1.22	14.4	2.8	113
18.12.2018 23:48:20 UT/ Камчатський (Беринговоморський)	56.9	172.4	25.6	130	32	173	$1.41 \cdot 10^3$
22.12.2020 23:23:33 UT/ Юйшу	31.9	96.2	35.5	4.9	13.6	9.5	432

7—22, 31, 32, 35, 51, 52, 62, 63]. За даними спостережень опубліковано книгу [11] і сотні статей. Зокрема, багато результатів досліджень автора зі співробітниками можна знайти у номерах цього журналу за 2013, 2017 і 2021 рр.

Прикладом детального вивчення космічного тіла метрового розміру служить метеороїд Моравка [37—39, 43]. Детально описано траєкторію і орбіту цього космічного тіла [38], сейсмічні та інфразвукові ефекти [43], структуру та склад [39], а також змодельовано динаміку та дроблення метеороїда [37].

Істотно менше досліджено ефекти інших метеороїдів метрового розміру [36, 40—42, 45, 48, 49, 53, 56, 59, 61].

Порівняно детально досліджено ефекти Румунського [24—26, 64], Липецького [27—29] та Камчатського (Беринговоморського) [30, 54] метеороїдів. Для цих метеороїдів виконано комплексне моделювання основних фізичних ефектів у всіх геосферах, детально вивчено інфразвукові, іоносферні, магнітосферні та геомагнітні ефекти (див. табл. 1). Систематичні багаторічні дослідження процесів, що супроводжували прольоти та вибухи метеороїдів, провадяться автором з колегами. Зокрема, у цьому журналі у різні роки опубліковано дані досліджень Липецького (2019—2020 рр.), Челябінського (2014, 2017, 2021 рр.), Індонезійського (2018 р.), Камчатського метеороїдів (2020 р.), а також статистичні характеристики тіл (2018, 2020 рр.).

Становить значний інтерес всебічне дослідження комплексу фізичних ефектів метеороїда Юйшу [45, 47, 50]. В роботі [45] визначено

траєкторію та орбіту космічного тіла, а в роботі [50] вивчено його сейсмічний та інфразвуковий ефекти.

Метеороїд Юйшу має низку особливостей. Він належить до найкрупніших. За своєю масою та розмірами він поступається лише Челябінському, Камчатському й Індонезійському метеороїдам [1, 30, 62, 63]. Метеороїд Юйшу мав найменшу швидкість (13.6 км/с), яка приблизно в 2.5 раза менша від швидкості Румунського метеороїда. Крім того, космічне тіло Юйшу вторглося в атмосферу Землі під аномально малим кутом ( $\approx 5^\circ$ ) до горизонту. Усе це визначило специфіку фізичних процесів у всіх геосферах.

Метою даної роботи є оцінка механічних, оптичних і газодинамічних ефектів, які супроводжували політ і вибух метеороїда Юйшу 22 грудня 2020 р. над Китаєм.

## ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО МЕТЕОРОЇД

Космічне тіло, яке отримало назву метеороїда Юйшу, вторглося до атмосфери Землі над південною частиною Китаю, 22 грудня 2020 р. о 23:23:33 UT (тут і далі UT — всесвітній час, місцевий час випереджає всесвітній на 7 год). Вибух, який мав місце на висоті 35.5 км, стався над малонаселеною місцевістю — провінцією Цинхай, більша частина якої належить Тибетському узгір'ю, поблизу м. Юйшу. Координати вибуху:  $31.9^\circ$  пн. ш.,  $96.2^\circ$  сх. д. [<https://cneos.jpl.nasa.gov/fireballs/>]. За даними НАСА [47] проєкції швидкості метеороїда становили:  $v_x = -2.6$  км/с,  $v_y = 5.9$  км/с,  $v_z = -12.1$  км/с, а її модуль  $v_0 = 13.6$  км/с. Енергія свічення боліда була близькою до 4.9 ТДж, а обчислена початкова кінетична енергія  $E_{k0}$  метеороїда — 9.5 кт ТНТ  $\approx 40$  ТДж. Знаючи  $v_0$  та  $E_{k0}$ , можна оцінити початкову масу  $m_0 \approx 432$  т, об'єм  $V_0 \approx 123.6$  м<sup>3</sup> (типова щільність хондриту  $\rho_b \approx 3.5$  т/м<sup>3</sup>) і розмір метеороїда  $d_0 \approx 6.2$  м. За проєкціями швидкості оцінено початковий кут нахилу траєкторії космічного тіла до горизонту:  $\theta_0 \approx 5^\circ$ .

## ФІЗИЧНІ ЕФЕКТИ, ЩО СУПРОВОДЖУВАЛИ ПАДІННЯ МЕТЕОРОЇДА

При вторгненні достатньо крупного космічного тіла з надзвуковою швидкістю до атмосфери Землі на висоті біля 100 км починає генеруватися ударна хвиля, виникає абляція, а потім і руйнування тіла. Збільшення тиску атмосфери та перерізу хмари фрагментів, яка утворилася, 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, викликає 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.

Методика досліджень подібна розробленій автором [24, 25, 27].

Рух метеороїда, як і раніше, описувався за допомогою рівнянь метеорної 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, 24, 27]. Позначення в цій роботі такі ж самі, як і в роботах [24, 25, 27].

## КІНЕМАТИЧНІ КРИТЕРІЇ

Для попередньої оцінки динаміки падіння метеороїда доцільно оцінити балістичний коефіцієнт  $b$  і параметр  $b$  віднесення маси (абляції) [24, 27]:

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

$$b = \frac{C_h}{2C_d} \frac{Q}{Q_0},$$

де  $S_0 = d_0^2 / 4 = 30.2 \text{ м}^2$  — початкове значення поперечного перерізу тіла (мідель),  $C_d$  — коефіцієнт динамічного опору (для кулі  $C_d = 0.6$ ),  $\rho$  — 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 [14, 27].

На висоті вибуху  $z_e = 35 \text{ км}$  маємо  $b(z_e) = 0.02$ , та на будь-якій висоті  $b = 0.71$ . Малість  $b(z_e)$  свідчить про те, що гальмування тіла було незначним, і при  $z = z_e$  можна вважати, що  $(z) = \theta_0$ . Нижче висоти  $z_e$  мідель  $S$  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 чи більше. Настає різке гальмування фрагментів, яке збільшується при зменшенні висоти. Починаючи з деякої висоти, сила опору приблизно врівноважується силою тяжіння, і фрагменти падають зі швидкістю, яка поступово зменшується зі зменшенням висоти та є істотно меншою за швидкість звуку для більшості фрагментів (див. далі).

Малість коефіцієнта  $b$  свідчить про слабкість процесу абляції до висоти вибуху  $z_e = 35$  км. Більш важливим процесом є руйнування космічного тіла на висоті  $z_e = 35$  км.

### КІНЕМАТИКА МЕТЕОРОЇДА

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

**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

$$m \frac{d}{dt} \left( \frac{C_d}{2} v^2 S \right) = -mg \sin \alpha, \quad (z) = (0) e^{-z/H}, \quad (1)$$

де при  $z = z_e$  приймаємо  $m = m_0$ ,  $S = S_0$  і  $v = v_0$ . Врахуємо, що

$$\frac{d}{dt} = \frac{d}{dz} \frac{dz}{dt} = \frac{d}{dz} v \sin \alpha. \quad (2)$$

Тоді з (1) і (2) отримаємо

$$\frac{d}{dz} \left( \frac{C_d}{2} v^2 S_0 \right) = - \frac{m_0 g \sin \alpha}{v}, \quad (z) = (0) e^{-z/H}. \quad (3)$$

Інтегруючи (3), приходимо до співвідношення

$$\left( \frac{C_d}{2} v^2 S_0 \right) = b_0 \exp(-b_0 e^{-z/H}), \quad (4)$$

де

$$b_0 = \frac{C_d}{2} v_0^2 S_0 \sin \alpha.$$

При  $z = z_e$  з (4) маємо  $(z_e) = 0.98$ .

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

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

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

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

де

$$b_0 = \frac{C_d}{2} \frac{(0) S_0 H}{m_0 \sin \alpha}, \quad b_0 = \frac{C_h}{2 C_d} \frac{v_0^2}{Q}.$$

Інтегруючи (6), отримаємо

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

Для  $z = z_e$  з (7) при  $m_0 = 1.3 \text{ кг/м}^3$ ,  $b_0 = 2.36$ ,  $b_0 = 0.71$  маємо  $m(z_e) = 0.97m_0$ .

При досягненні висоти  $z_e$  швидкість метеороїда зменшувалась на 2 %, маса — на 3 %, а кінетична енергія  $E_k$  — на 7 %.

**Дроблення метеороїда.** Космічне тіло при терті об повітря руйнується при умові, що міцність тіла  $\sigma_d$  зрівнюється з величиною динамічного тиску, тобто при [46]

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

Різні частини метеороїда мають різну міцність, яка апіорі невідома. Міцність хондриту змінюється у межах  $0.5 \dots 3 \text{ МН/м}^2$  [46]. Умова (8) виконується на висоті

$$z_d = H \ln \frac{0.365 \rho_0}{\sigma_d}. \quad (9)$$

Тут враховано, що при  $z = z_e$  швидкість  $v = v_0$ . Для  $\sigma_d = 0.8 \text{ МН/м}^2$  з (9) отримуємо  $z_d = 35 \text{ км}$ . При більших значеннях  $\sigma_d$  маємо  $z_d < z_e$ , що неможливо. Таким чином,  $z_d = z_e = 35 \text{ км}$ .

Після дроблення фрагменти рухаються як квазірідина, набуваючи поперечної швидкості, в результаті чого діаметр хмари фрагментів збільшується за законом [24, 27]:

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

$$k_d = \frac{4H}{d_0 \sin \theta} \sqrt{\frac{\rho(z_d)}{\rho_0}},$$

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

При  $\rho(z_d) = \rho(z_e) = 1.22 \cdot 10^{-2} \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_0 = 3.5 \text{ т/м}^3$ ,  $H = 7.5 \text{ км}$  маємо  $k_d$

104. 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 таке співвідношення:

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

Наприклад, при  $A = 3$  маємо значення  $z = 0.3 \text{ км}$ , а при  $A = 11$  маємо  $z = 1.5 \text{ км}$ .

**Степеневий закон дроблення.** Прийmemo, що диференціальний закон розподілу фрагментів по масах має вигляд

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

де часто 2. Константа  $A_m$  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  $m_{f \max} = 0.1m_0 = 43$  т і  $m_{f \min} = 4.3 \cdot 10^{-15}$  кг маємо  $A_m = 104$  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  $S_{f \max}^{1/2} \gg S_{f \min}^{1/2}$ , 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 отримаємо

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

Прийmemo, що  $m_{f \max} = 43$  т,  $m_{f \min} = 4.3 \cdot 10^{-15}$  кг. При цьому  $S_{f \min} = 1.4 \cdot 10^{-12}$  м<sup>2</sup>, а  $B_m = 19 \ln 10 = 43.7$ ,  $S_f / S_0 = 3.2 \cdot 10^5$ . Мідель хмари фрагментів на багато порядків перевищує площу  $S_0$ , що й забезпечує вибухоподібне енерговиділення.

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

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

Розв'язок рівняння руху при  $\theta_0$  має вигляд

$$f(z) = f_0 \exp\left[-f \left(e^{z/H} - e^{z_e/H}\right)\right], \quad f_0 = f(z_e). \quad (18)$$

На висоті  $z_{cr}$  сила опору повітря  $F_r$  стає рівною силі тяжіння:

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

Підставляючи (18) в (19) і вважаючи, що  $\theta_0$ , отримаємо співвідношення для обчислення висоти  $z_{cr}$  і  $f(z_{cr})$ . З результатів розрахунків (табл. 2) випливає, що швидкість падіння є близькою до 100 м/с.

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

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

У міру руху фрагмента до поверхні Землі кут  $\theta$  дещо збільшується, зростає й щільність повітря. Це призводить до подальшого гальмування та зменшення швидкості падіння. Важливо, що  $f \propto d_f^{1/2} m_f^{1/6}$ .

**Абляція фрагментів.** Рівняння абляції для фрагменту масою  $m_f$  та міделем  $S_f$ , який рухається зі швидкістю  $f$ , при  $\theta_0$  має вигляд (5). Розв'язок відповідного рівняння такий:

$$m_f(z) = m_{f0} [1 - B(1 - e^{2f(y_e - y)})], \quad (20)$$

де  $m_{f0} = m_f(z_e)$ ,  $f$  дається співвідношенням (17),

$$B = \frac{C_h}{6C_d} \frac{f_0^2}{Q} = 0.227, \quad y = e^{z/H}, \quad y_e = e^{z_e/H}. \quad (21)$$

З (21) випливає, що  $y_{\max} = 1$ . При цьому  $y_{\min} = y_e$ ,

$$m_{f \min} = m_{f0} [1 - B(1 - e^{2f})].$$

**Таблиця 2.** Залежність висоти  $z_{cr}$  та швидкості фрагментів  $f$  на цій висоті від розміру фрагмента. Вважалось, що  $f_0 = 13.3$  км/с

$d_f$ , м	$z_{cr}$ , км	$f$ , м/с	$d_f$ , м	$z_{cr}$ , км	$f$ , м/с
0.01	32.5	75	0.3	16.7	106
0.03	29.4	82	1	8.5	148
0.1	29.6	105	3	0.2	130

Оскільки для всіх розмірів фрагментів  $2 \beta_f \gg 1$ , то

$$m_{f \min} = m_{f0}(1 - B) = 0.773m_{f0},$$

тобто зменшення маси фрагментів за рахунок абляції не перевищує 23 %. Це справедливо при  $\beta_0$ . Насправді ж за рахунок гальмування збільшиться, а  $\beta_f$  зменшиться майже на порядок. При цьому лише для найкрупнішого фрагмента з  $d_f = 3$  м маса зменшиться на 14 %, а для інших фрагментів, як і раніше, зменшення дорівнює 20... 23 %.

### ЕНЕРГЕТИЧНІ ОЦІНКИ

Початкова кінетична енергія  $E_{k0} = 40$  ТДж, або 9.5 кт ТНТ. Ця енергія є близькою до енерговиділення при вибуху ядерної бомби над м. Хіросіма у 1945 р. (12 кт ТНТ).

За рахунок абляції маса всіх фрагментів зменшилась приблизно на 20 %. За рахунок гальмування найменших фрагментів маса зменшилась ще приблизно на 30 %. Поверхні Землі досягли фрагменти загальною масою приблизно 215 т. При середній швидкості падіння приблизно 100 м/с кінцева кінетична енергія не перевищувала 1 ГДж, тобто становила  $2.5 \cdot 10^{-3}$  % від  $E_{k0}$ .

Основне енерговиділення метеороїда відбувалося в шарі атмосфери довжиною

$$L = \frac{H}{\sin \beta_0} = 86 \text{ км.}$$

При цьому середня погонна щільність енергії становила

$$E_L = \frac{E_{k0}}{L} = 4.65 \cdot 10^8 \text{ Дж/м.}$$

Характерний час енерговиділення

$$t_L = \frac{L}{v_0} = 6.3 \text{ с.}$$

Тоді середня потужність

$$P_L = \frac{E_{k0}}{t_L} = 6.35 \text{ ТВт.}$$

**Абляція.** До вибуху маса метеороїда зменшилась всього на 3 %, а після вибуху — ще приблизно на 20 %, в сумі — на 23 %. Енергія, яку затрачено на абляцію, становить

$$E_{ab} = Q m_{ab} = 0.23 m_0 Q = 6.5 \cdot 10^{11} \text{ Дж.}$$

При цьому  $\frac{E_{ab}}{E_{k0}} = 1.6$  %.

**Дроблення.** При питомій енергії дроблення  $\epsilon_d = 10^5$  Дж/кг маємо енергію

$$E_d = \epsilon_d m_0 = 4.3 \cdot 10^{10} \text{ Дж.}$$

Ефективність цього процесу становить

$$\epsilon_d = \frac{E_d}{E_{k0}} = 0.11 \text{ \%} .$$

**Іонізація.** Повна кількість молекул у метеороїді дорівнює

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

де  $M_m = 5 \cdot 10^{-26}$  кг — маса молекули. Тоді  $N = 8.6 \cdot 10^{30}$ . Повне число іонізованих молекул

$$N_i = \epsilon_i N .$$

Тут  $\epsilon_i = 1.54 \cdot 10^{-2}$  — коефіцієнт іонізації [2, 24, 27]. При цьому  $N_i = 1.3 \cdot 10^{29}$ . Середня енергія іонізації  $\epsilon_i$  дорівнює приблизно 50 еВ  $8 \cdot 10^{-18}$  Дж. Тоді енергія, яка витрачається на іонізацію, дорівнює

$$E_i = \epsilon_i N_i = 1.1 \cdot 10^{12} \text{ Дж.}$$

При цьому

$$\epsilon_i = \frac{E_i}{E_{k0}} = 2.75 \text{ \%} .$$

**Енергія гальмування.** Як видно з оцінок, на абляцію, дроблення та іонізацію витрачалась лише незначна частина кінетичної енергії космічного тіла. Більша частина енергії пішла на подолання опору повітря та вторинні процеси (генерацію ударної хвилі, нагрівання метеороїда та повітря, випромінювання електромагнітних і акустичних хвиль).

Затрачена енергія дорівнює роботі з подолання сили опору вздовж траєкторії  $s$  тіла:  $F_r = C_d \rho v^2 S / 2$ ,

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

Тут  $S$  — мідель хмари фрагментів.

При  $z = z_e$  маємо  $S = S_0$ ,  $\rho_e = \rho_0$  і  $E_{dec} = 1.6$  ТДж. Поблизу  $z_e$  відбулося руйнування космічного тіла, в результаті чого мідель збільшився на декілька порядків (див. співвідношення (16)), але й протяжність області вибуху  $z_e$  становила 1.5 км. При  $z_e = 1.5$  км,  $L_e = z_e / \sin \theta = 17.2$  км,  $S_e = 3.2 \cdot 10^3 \text{ м}^2$  і  $\rho_e = 13.3$  км/с маємо значення  $E_{dec}$

$3.2 \cdot 10^{13}$  Дж. Енергія вибуху дорівнює  $E_e = E_{dec} = 3.2 \cdot 10^{13}$  Дж, тобто 80 % від початкової кінетичної енергії метеороїда.

### СВІЧЕННЯ

У міру гальмування хмари фрагментів її діаметр розширився до значення  $d = 3d_0 = 18.6$  м. Тоді  $z = 0.3$  км, а  $L_{e1} = z / \sin \theta = 3.4$  км. Форма утворення близька до комбінації конуса висотою  $L_{e1} = 3.4$  км і півсфери діаметром  $d = 18.6$  м. Бічна поверхня цього утворення

$$S_r = dL_e = \frac{d^2}{2}.$$

Оскільки  $L_e = d/2$ ,  $S_r = dL_e = 2 \cdot 10^5$  м<sup>2</sup>.

При вимірній енергії випромінювання  $E_r = 4.9 \cdot 10^{12}$  Дж і тривалості імпульсу  $\tau_r = L_e / c = 1.26$  с маємо середню потужність випромінювання

$$P_r = \frac{E_r}{\tau_r} = 3.9 \cdot 10^{12} \text{ Вт.}$$

Щільність потоку випромінювання з поверхні конуса дорівнює

$$\rho_r = \frac{P_r}{S_r} = 1.95 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2.$$

При цьому температура утворення

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

де  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт м}^{-2}\text{К}^{-4}$  — стала Стефана — Больцмана. Обчислення дають значення  $T = 4300$  К. Згідно із законом Віна максимум випромінювання припадає на довжину хвилі

$$\frac{b}{T} = 0.67 \text{ мкм.}$$

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

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

де  $\tau_r = 0.05$  — інтегральний коефіцієнт ослаблення світла в атмосфері на відстані  $R = z_e = 35$  км. Тоді під епіцентром  $303 \text{ Дж м}^{-2}$ , що набагато менше від порогу спалахування ( $0.2 \dots 1 \text{ МДж м}^{-2}$ ) [55].

## 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, можна вважати 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  $Kn = (0.7...1.2) 10^{-2}$ . При  $d = 6.2$  м значення висоти  $z = 95...98$  км. Балістична хвиля спостерігається впритул до висоти вибуху  $z_e = 35$  км. При  $z > z_e$  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 визначається із співвідношення [57]

$$R_b = Md,$$

де  $M = v/s$  — число Маха,  $v$  і  $s$  — швидкості метеороїда та звуку. При  $v_0 = 13.6$  км/с і  $s = 0.3$  км/с отримаємо, що  $M = 45.3$ . Тоді  $R_b = 280$  м.

Радіус  $R_b$  визначає фундаментальний період інфразвукових коливань [57]:

$$T_b = 2.81 \frac{R_b}{s}. \quad (22)$$

За рахунок дисперсії період  $T_b$  збільшується при збільшенні відстані від джерела коливань [57]:

$$T_b(R) = T_b(R_b) \left( \frac{R}{R_b} \right)^{1/4}. \quad (23)$$

Згідно із співвідношенням (22)  $T_b(R_b) = 2.6$  с. Результати розрахунку  $T_b(R)$  наведено в табл. 3.

Залежність відносного надлишку тиску у фронті балістичної ударної хвилі описується таким співвідношенням [57]:

Таблиця 3. Залежність періодів коливань від відстані

$R$ , км	$T_b$ , с	$T_c$ , с	$T_s$ , с
50	9.5	21.1	42
100	11.3	25.1	50
200	13.4	29.2	59.5
300	14.9	33	65.8
500	16.9	37.5	74.8
1000	20.1	44.6	88.9
2000	23.9	53	105.7
3000	26.5	58.7	117
5000	30.1	66.7	132.9

$$\frac{p}{p} = \frac{2}{1} \frac{0.4503}{(1 - 4.803R^2 / R_b^2)^{3/8} - 1}, \quad (24)$$

де 1.4 — показник адиабати. При  $R^2 / R_b^2 \gg 1$  з (24) отримуємо

$$\frac{p}{p} = 0.3 \frac{R_b}{R}^{3/4}. \quad (25)$$

Вирази (24) і (25) справедливі при віддаленні від джерела в горизонтальному напрямку. Вони не враховують експоненційного зменшення тиску атмосфери при збільшенні висоти. У загальному випадку  $H = H(z)$ , і вираз для тиску має вигляд

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

де

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

Оскільки

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

замість (25) маємо

$$\frac{p}{p} = 0.3 \frac{R_b}{R}^{3/4} e^{I/2}. \quad (26)$$

На поверхні Землі при  $z_e = 35$  км,  $R_b = 280$  м і  $I = 2.3$  з (26) маємо  $p(0)/p = 8 \cdot 10^{-4}$ , а  $p(0) = 80$  Па.

**Вибухова ударна хвиля.** Спочатку припустимо, що довжина гальмування  $L_e = 17.2$  км. Тому слід очікувати ударну хвилю циліндричного типу. Тоді радіус ударної хвилі (характерний поперечний розмір області вибуху) дається таким співвідношенням [24, 27]:

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

де  $E_{Le} = E_k(z_e)/L_e$ ,  $p(z_e) = 940$  Па — тиск на висоті вибуху. При  $E_k(z_e) = 3.2 \cdot 10^{13}$  Дж і  $L_e = 17.2$  км маємо  $E_{Le} = 1.86 \cdot 10^9$  Дж/м. Тоді  $R_c$

0.8 км. Оскільки  $2R_c \ll L_e$ , хвилю дійсно слід вважати циліндричною. Розмір еліпсоїдальної області вибуху становив  $17.2 \cdot 1.6 = 1.6$  км.

Для вибухової ударної хвилі фундаментальний період дається співвідношенням

$$T_c = 2.81 \frac{R_c}{s} = 7.5 \text{ с.}$$

Закон дисперсії для періоду  $T_c$  також дається співвідношенням (23). Результати розрахунку залежності  $T_c$  від  $R$  наведено в 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  $p(z_e, R_L) = 0.1p(z_e)$  [57]. При  $R > R_L = 2.5$  км хвиля спочатку залишається циліндричною, і  $p \propto R^{-1/2}$ , а потім поступово при  $R \gg R_L$  переходить у сферичну, при якій  $p \propto R^{-1}$ . У проміжній області  $p \propto R^{-p}$ , де  $0.5 < p < 1$ . Результати моделювання залежностей  $p/p_0$  за співвідношенням

$$\frac{p}{p_0} = 0.1 \frac{R_L}{R} \exp \left[ -\frac{z - (z_e - R_L)}{2H} \right], \quad (27)$$

справедливі при  $R \approx |z - z_e| \approx R_L$ , наведено у 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 надлишку тиску в хвилі зменшуються, а абсолютного — навпаки, збільшуються. Зокрема, на поверхні Землі  $p = 310$  Па, що в декілька разів більше від  $p$ , викликаного балістичною ударною хвилею (80 Па).

**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	60	108
25	3.6	30	108
20	6.9	18	124
15	14	11	154
10	26	6.9	179
5	51	4.6	235
0	100	3.1	310

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

$z$ , км	$2H$ , км	$p$	$p_0$ , Па	$p/p_0$	$p$ , Па
300	87	1	$10^{-5}$	0.02	$2 \cdot 10^{-7}$
200	44	1	$10^{-4}$	0.06	$6 \cdot 10^{-6}$
150	26	1	$10^{-3}$	0.16	$1.6 \cdot 10^{-4}$
120	21	0.85	$10^{-2}$	0.25	$2.5 \cdot 10^{-3}$
100	19	0.75	0.1	0.23	$2.3 \cdot 10^{-2}$
90	18	0.7	0.3	0.21	$6.3 \cdot 10^{-2}$
80	17	0.65	1	0.19	0.19
70	16	0.57	3	0.17	0.51
60	15	0.52	10	0.14	1.4
50	15	0.50	70	0.09	6.3
40	15	0.50	370	0.08	29.6

З табл. 5 випливає, що при збільшенні висоти при  $z > z_e$  відносний надлишок тиску спочатку збільшувався та досягав приблизно 25 %, а потім зменшувався до одиниць процентів. Зменшення цього відношення пов'язане зі сферичною розбіжністю хвилі, яка починає переважати на висотах  $z > 120$  км, над його експоненційним зростанням (див. співвідношення (27)). Абсолютне значення  $p$  монотонно зменшується при збільшенні висоти від  $z_e$ . Важливо, що інтенсивність вибухової ударної хвилі є істотною на іоносферних висотах.

Тепер розглянемо область найбільш ефективного гальмування. Діаметр області фрагментів збільшується втричі, а площа — на порядок у діапазоні висот  $z = 0.3$  км. При цьому  $L_{e1} = 3.4$  км. При такому значенні  $L_{e1}$  слід очікувати, що ударна хвиля буде сферичною. Для радіуса області вибуху маємо таке співвідношення:

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

При  $E_e = 3.2 \cdot 10^{13}$  Дж і  $p(z_e) = 940$  Па маємо  $R_s = 2$  км. Тоді розміри основної області вибуху  $3.4 \times 4 \times 4$  км, тобто область за формою є близькою до кулі. При  $R_s = 2$  км маємо  $T_s = 18.8$  с. Результати розрахунку  $T_s(R)$  також наведені в табл. 3.

У табл. 6 та 7 наведено результати розрахунку надлишкового тиску в вибуховій ударній хвилі сферичного типу під областю вибуху і над нею. 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 у глибині атмосфери поширюється також і в горизонтальному напрямку. Цьому сприяють стратосферний і термосферний хвилевід. Останній розміщується на висотах 120...200 км, де  $p = 20...10$  %. Для хвилеводних мод справедливий циліндричний закон розбіжності. При цьому на відстані порядку 1000 км амплітуда хвилі зменшується приблизно у 3 рази, тобто становить 7...3 %.

Оцінімо енергетику вибухової ударної хвилі. Припустимо, що в її енергію перетворюється 80 % початкової кінетичної енергії космічно-

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

$z$ , км	$p_0$ , кПа	$p/p_0, 10^{-3}$	$p$ , Па
30	1.8	33	59
25	3.6	12	42.2
20	6.9	5.6	38.7
15	14	2.3	32.3
10	26	1.3	34
5	51	0.79	40
0	100	0.48	48.5

**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	$10^{-5}$	12	$1.2 \cdot 10^{-7}$
200	44	$10^{-4}$	49	$4.9 \cdot 10^{-5}$
150	26	$10^{-3}$	134	$1.34 \cdot 10^{-4}$
120	21	$10^{-2}$	122	$1.22 \cdot 10^{-3}$
100	19	0.1	85	$8.5 \cdot 10^{-3}$
90	18	0.3	69	$2.2 \cdot 10^{-2}$
80	17	1	56	$5.6 \cdot 10^{-2}$
70	16	3	45	0.13
60	15	10	37	0.37
50	15	70	32	2.2
40	15	370	49	18

го тіла, тобто 32 ТДж. Тривалість стрибка тиску  $T_{sw} = L_e / s = 57$  с. Тоді середня потужність вибухової ударної хвилі становитиме приблизно 560 ГВт.

## ГОЛОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

1. Метеороїд Юйшу мав низку особливостей: достатньо велику кінетичну енергію (приблизно 9.5 кт ТНТ), великий розмір (приблизно 6.2 м), відносно малу швидкість (13.6 км/с) і дуже полого траєкторію (кут  $5^\circ$ ). Через таку траєкторію гальмування, дроблення, енерговиділення та вибух тіла відбулися в дуже вузькому діапазоні висот (~1.5 км). Висота вибуху становила приблизно 35 км.

2. До висоти вибуху метеороїда через відносно низьку початкову швидкість його швидкість зменшилась всього на 2 %, а маса — на 3 %. Після вибуху космічного тіла через абляцію маса більшості фрагментів зменшилась приблизно на 20...23 %, а найбільш крупних (~3 м) — на 14 %.

3. Енергія світлового спалаху становила 4.9 ТДж, а середня потужність — приблизно 3.9 ТВт при тривалості випромінювання порядку 1 с. Температура вогняного утворення була приблизно 4300 К. Максимум випромінювання припадав на довжину хвилі 0.67 мкм.

4. Фундаментальні періоди коливань для балістичної та вибухової ударних хвиль були близькі до 2.6 і 7.5 с для хвилі циліндричного типу або 18.8 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 дорівнювали 280 та 800 м для хвилі циліндричного типу відповідно. Для вибухової хвилі сферичного типу радіус дорівнював 2 км.

6. Сумарний надлишковий тиск балістичної та вибухової хвиль на поверхні Землі досягав 390 Па для хвилі циліндричного типу або 130 Па для хвилі сферичного типу.

7. Відносний надлишковий тиск в ударній хвилі на висотах іоносфери досягав 10...20 %. Він був відчутним (1...10 %) на горизонтальних відстанях порядку 1000 км.

8. Значення енергії та потужності вибухової ударної хвилі були близькими до 32 ТДж і 560 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 0119U002538, 0121U109881 і 0121U109882).

1. *Астрономический вестник*. 2013. 47, № 4. (Тематический выпуск).
2. Бронштэн В. А. *Физика метеорных явлений*. М.: Наука, 1981. 416 с.
3. Васильев Н. В. *Тунгусский метеорит. Космический феномен лета 1908 г.* Москва: Русская панорама, 2004. 368 с.
4. Войцеховский А. И., Ромейко В. А. *Тунгусский метеорит. 100 лет великой загадке*. Москва: Вече, 2008. 432 с.
5. Госсард Э. Э., Хук У. Х. *Волны в атмосфере*. М.: Мир. 1978. 532 с.
6. *Динамические процессы в геосферах. Выпуск 5. Геофизические эффекты падения Челябинского метеороида: сборник научных трудов ИДГ РАН*. Специальный выпуск. Москва: ГЕОС, 2014. 160 с.
7. 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.
8. Лазоренко О. В., Черногор Л. Ф. Системный спектральный анализ инфразвукового сигнала, сгенерированного Челябинским метеороидом. *Вісті вищих учбових закладів. Радіоелектроніка*. 2017. 60, № 8. С. 427—437.
9. *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.
10. 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>
11. *Челябинский суперболид*. Под ред. Н. Н. Горькавого, А. Е. Дудорова. — Челябинск: Изд-во Челябинского университета. 2016. 223 с.
12. Черногор Л. Ф. *Физика и экология катастроф*. Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2012. 556 с.
13. Черногор Л. Ф. Плазменные, электромагнитные и акустические эффекты метеорита «Челябинск». *Инженерная физика*. 2013. 8. С. 23—40.
14. Черногор Л. Ф. Физические эффекты пролета Челябинского метеорита. *Доповіді Національної академії наук України*. 2013. № 10. С. 97—104.

15. Черногор Л. Ф. Крупномасштабные возмущения магнитного поля Земли, сопровождавшие падение Челябинского метеороида. *Радиофизика и электроника*. (2013). 4(18), № 3. С. 47—54.
16. 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.
17. Черногор Л. Ф. Эффекты Челябинского метеороида в геомагнитном поле. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2014. 54, № 5. С. 658—669.
18. Черногор Л. Ф. Эффекты Челябинского метеороида в ионосфере. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2015. 55, № 3. С. 370—385.
19. Черногор Л. Ф. Физические эффекты, сопровождавшие полет и взрыв Челябинского метеороида. *Радиотехника. Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник*. 2016. 184. С. 32—36.
20. Черногор Л. Ф. Атмосферные эффекты газо-пылевого следа Челябинского метеороида 2013 года. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2017. 53, № 3. С. 296—306.
21. Черногор Л. Ф. Акустические эффекты Челябинского метеороида. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2017. 22, № 1. С. 53—66.
22. Черногор Л. Ф. Возмущения в нижней ионосфере, сопровождавшие падение Челябинского космического тела. *Космические исследования*. 2017. 55, № 5. С. 342—352.
23. Черногор Л. Ф. Эффекты в магнитосфере при подлете Челябинского метеороида. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2018. 58, № 2. С. 267—280.
24. Черногор Л. Ф. Физические эффекты Румынского метеороида. 1. *Космічна наука і технологія*. 2018. 24, № 1. С. 49—70.
25. Черногор Л. Ф. Физические эффекты Румынского метеороида. 2. *Космічна наука і технологія*. 2018. 24, № 2. С. 18—35.
26. Черногор Л. Ф. Параметры акустических сигналов, сгенерированных атмосферным взрывом метеороида над Румынией 7 января 2015 г. *Астрономический вестник*. 2018. 52, №3. С. 201—212.
27. Черногор Л. Ф. Физические эффекты Липецкого метеороида. 1. *Кінематика і фізика небес. тіл*. 2019. 35, № 4. С. 37—59.
28. Черногор Л. Ф. Ионосферные эффекты Липецкого метеороида. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2020. 60, № 1. С. 83—92.
29. Черногор Л. Ф. Эффекты Липецкого метеороида в геомагнитном поле. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2020. 60, № 3. С. 375—392.
30. Черногор Л. Ф. *Эффекты Камчатского метеороида в системе литосфера – атмосфера – ионосфера – магнитосфера*. Материалы 13-ой международной школы-конференции «Проблемы геокосмоса» (24–27 марта 2021 г., Санкт-Петербург, Россия). С. 400—410.
31. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П. Возмущения в геокосмосе, сопровождавшие падение метеорита «Челябинск». *Радиофизика и радиоастрономия*. 2013. 18, № 3. С. 231—243.
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. Глобальная статистика болидов в атмосфере Земли. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2017. 22, № 2. С. 138—145.  
<https://doi.org/10.15407/rpra22.02.138>

34. Черногор Л. Ф., Шевелев Н. Б. Зависимость амплитуды инфразвуковой волны, сгенерированной Тунгусским космическим телом, от расстояния. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2018. 23, № 2. С. 94—103.
35. Черногор Л. Ф., Шевелев Н. Б. Характеристики инфразвукового сигнала, сгенерированного Челябинским космическим телом: глобальная статистика. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2018. 23, №1. С. 24—35.
36. Arrowsmith S. J., Drob D. P., Hedlin M. A. H., Edwards W. A joint seismic and acoustic study of the Washington State bolide: Observation and modeling. *J. Geophys. Res.* 2007. 112, id. D09304. <http://dx.doi.org/10.1029/2006JD008001>
37. Borovička J., Kalenda P. The Morávka meteorite fall: 4. Meteoroid dynamics and fragmentation in the atmosphere. *Meteoritics and Planetary Sci.* 2003. 38, № 7. P. 1023—1043. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2003.tb00296.x>
38. Borovička J., Spurný P., Kalenda P., Tagliaferri E. The Morávka meteorite fall: 1. Description of the events and determination of the fireball trajectory and orbit from video records. *Meteoritics and Planetary Sci.* 2003. 38, № 7. P. 975—987. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2003.tb00293.x>
39. Borovička J., Weber H. W., Jopek T., Jakeš P., Randa Z., Brown P. G., ReVelle D. O., Kalenda P., Schultz L., Kucera J., Haloda J., Týcová P., Frýda J., Brandstätter F. The Morávka meteorite fall: 3. Meteoroid initial size, history, structure, and composition. *Meteoritics and Planetary Sci.* 2003. 38, № 7. P. 1005—1021. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2003.tb00295.x>
40. Brown P. G., Hildebrand A. R., Green D. W. E., Pagé D., Jacobs C., ReVelle D., Tagliaferri E., Wacker J., Wetmiller B. The fall of the St-Robert meteorite. *Meteoritics and Planetary Sci.* 1999. 31, № 4. P. 502—517. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.1996.tb02092.x>
41. Brown P. G., Kalenda P., ReVelle D. O., Borovička J. The Morávka meteorite fall: 2. Interpretation of infrasonic and seismic data. *Meteoritics and Planetary Sci.* 2003. 38, № 7. P. 989—1003. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2003.tb00294.x>
42. Brown P. G., Pack D., Edwards W. N., ReVelle D. O., Yoo B. B., Spalding R. E., Tagliaferri E. The orbit, atmospheric dynamics, and initial mass of the Park Forest meteorite. *Meteoritics and Planetary Sci.* 2004. 39, № 11. P. 1781—1796. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2004.tb00075.x>
43. Brown P. G., ReVelle D. O., Tagliaferri E., Hildebrand A. R. An entry model for the Tagish Lake fireball using seismic, satellite and infrasound records. *Meteoritics and Planetary Sci.* 2002. 37. P. 661—675. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2002.tb00846.x>
44. Brown P. G., Whitaker R. W., ReVelle D. O., Tagliaferri E. Multi-station infrasonic observations of two large bolides: signal interpretation and implications for monitoring of atmospheric explosions. *Geophys. Res. Lett.* 2002. 29, № 13. id. 1636. P. 14-1—14-4. <https://doi.org/10.1029/2001GL013778>
45. Carbognani A. The great Chinese fireball of December 22, 2020. *The Eur. Phys. J. Plus.* 2021. 136, № 6. id. 616. P. 1—9. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01504-x>
46. *Catastrophic Events Caused by Cosmic Objects*. Ed.: Adushkin V., Nemchinov I. Netherlands: Springer, 2008. XI + 357 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6452-4>
47. *Center for Near Earth Object Studies*. URL: <https://cneos.jpl.nasa.gov/>
48. Cevolani G., Foschini L., Trivellone G. The «Lugo» fireball of January 19, 1993. *Il Nuovo Cimento*. 1993. 16C, № 4. P. 463—471.
49. Cevolani G., Hajdukova M., Foschini L., Trivellone G. The spectacular airburst over Lugo (Italy) on January 19, 1993. *Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso*. 1994. 24. P. 117—124.

50. Cheng W., Teng P., Lyu J., Dai Yi. Infrasound detection and altitude estimation associated with the December 22, 2020 Yushu fireball. *Geosci. Lett.* 8, 26 (2021). <https://doi.org/10.1186/s40562-021-00196-6>
51. 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.
52. 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.
53. Foschini L. On the airburst of large meteoroids in the Earth's atmosphere. The Lugo bolide: reanalysis of a case study. *Astron. and Astrophys.* 1998. 337. P. L5—L8. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.14059>
54. 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>
55. Glasstone S., Dolan P. J. *Effects of nuclear weapons.* Washington, DC (USA): Department of Defense, Department of Energy. 1977. 653 p.
56. Hildebrand A. R., Brown P. G., Wacker J. F., Wetmiller R. J., Pagé D., Green D. W. E., Jacobs C. F., ReVelle D. O., Tagliaferri E., Kissin S. A. The St-Robert bolide of June 14, 1994. *J. Roy. Astron. Soc. Canada.* 1997. 91. P. 261—275.
57. *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies.* A. Le Pichon, E. Blanc, A. Hauchecorne (Eds.). Dordrecht Heidelberg London New York: Springer, 2019. XXVIII + 1167 p.
58. Le Pichon A., Guérin J. M., Blanc E. Trail in the atmosphere of the 29 December 2000 meteor as recorded in Tahiti: Characteristics and trajectory reconstitution. *J. Geophys. Res.* 2002. 107, № D23. P. ACL 17-1—ACL 17-10. <https://doi.org/10.1029/2001JD001283>
59. Llorca J., Trigo-Rodríguez J. M., Ortiz J. L., Docobo J. A., García-Guinea J., Castro-Tirado A. J., Rubin A. E., Eugster O., Edwards W., Laubenstein M., Casanova I. The Villalbeto de la Peña meteorite fall: 1. Fireball energy, meteorite recovery, strewn field, and petrography. *Meteoritics and Planetary Sci.* 2005. 40, № 6. P. 795—804.
60. 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. ID 105336. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105336>
61. 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>
62. 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., Gislér 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](http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1242642/DC1).

63. 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.
64. 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. *Proc. Romanian Acad., Ser. A*. 2016. 17, № 2. P. 133—136.

#### REFERENCES

1. *Sol. Syst. Res.* (2013). 47(4).
2. Bronshten V. A. (1983). *Physics of Meteoric Phenomena* (Dordrecht, Holland: D. Reidel Publishing Company).
3. Vasilyev N. V. (2004). *The Tunguska Meteorite: A Space Phenomenon of the Summer of 1908*. (Moscow, Russia: Russkaya Panorama Publ.) [in Russian].
4. Voitsekhovskii A. I., Romeiko V. A. (2008). *The Tunguska meteorite. 100 years of the Great Puzzle*. (Moscow, Russia: Veche Publ.) [in Russian].
5. 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.).
6. *Dynamic Processes in Geospheres. Issue 5: Geodesic Effects of the Fall of Chelyabinsk Meteoroid (Moscow, Russia: GEOS)* (2014). Ser.: Collection of Scientific Papers of the Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Special Issue [in Russian].
7. 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>
8. 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>
9. *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].
10. Mylovanov Yu. B., Chernogor L. F. (2018). Dynamics of the chelyabinsk meteoroid entering the atmosphere: mass-energy balance. *Radio Physics and Radio Astronomy*. 23(3), 176—188 [In Russian]. <https://doi.org/10.15407/rpra23.03.176>
11. *Chelyabinsk Superbolide*. (2019). Eds Gorkavyi N., Dudorov A., Taskaev S. Springer Nature Switzerland AG: Springer International Publishing.  
DOI: 10.1007/978-3-030-22986-3

12. Chernogor L. F. (2012). *Physics and Ecology of Catastrophes: Monograph* (Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University) [In Russian].
13. Chernogor L. F. (2013). Plasma, electromagnetic, and acoustic effects of the «Chelyabinsk» meteorite. *Inzhenernaja Fizika*. (8), 23—40 [In Russian].
14. Chernogor L. F. (2013). Physical effects of the Chelyabinsk meteorite passage. *DAN Ukraine*, (10), 97—104. [In Russian].  
URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/86192>.
15. Chernogor L. F. (2013). Large-scale disturbances in the Earth's magnetic field associated with the Chelyabinsk meteorite event. *Radiophysics and Electronics*. 4(18) (3), 47—54 [In Russian].
16. 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].
17. Chernogor L. F. (2014). Geomagnetic field effects of the Chelyabinsk meteoroid. *Geomagnetism and Aeronomy*. 54(5), 613—624.  
<https://doi.org/10.1134/S001679321405003X>
18. Chernogor L. F. (2015). Ionospheric effects of the Chelyabinsk meteoroid. *Geomagnetism and Aeronomy*. 55(3), 353—368. <https://doi.org/10.1134/S0016793215030044>
19. Chernogor L. F. (2016). Physical effects, that accompanied a passage and explosion of Chelyabinsk meteoroid. *All-Ukrainian Interdepart. Sci. and Tech. J. "Radiotekhnika"*. 184, 32—36 [In Russian].
20. 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>
21. 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]
22. Chernogor L. F. (2017). Disturbance in the Lower Ionosphere That Accompanied the Reentry of the Chelyabinsk Cosmic Body. *Cosmic Research*. 55(5), 323—332.  
<https://doi.org/10.1134/S0010952517050033>
23. 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>
24. 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>
25. 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>
26. 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>
27. Chernogor L. F. (2019). Physical effects of the Lipetsk meteoroid: 1. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*. 35(4), 174—188.  
<https://doi.org/10.3103/S0884591319040020>
28. Chernogor L. F. (2020). Ionospheric effects of the Lipetsk meteoroid. *Geomagnetism and Aeronomy*. 60(1), 80—89. <https://doi.org/10.1134/S0016793219060057>
29. 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>
30. 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].
31. 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>
  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. (2017). Global statistics of bolides in the terrestrial atmosphere. *Radio Physics and Radio Astronomy*. 22(2), 138—145 [In Russian]. <https://doi.org/10.15407/rpra22.02.138>
  34. Chernogor L. F., Shevelev N. B. (2018). Infrasound wave generated by the Tunguska celestial body: amplitude dependence on distance. *Radio Physics and Radio Astronomy*. 23(2), 94—103 [In Russian]. <https://doi.org/10.15407/rpra23.02.094>
  35. Chernogor L. F., Shevelev N. B. (2018). Characteristics of the infrasound signal generated by Chelyabinsk celestial body: global statistics. *Radio Physics and Radio Astronomy*. 23(1), 24—35. [In Russian]. <https://doi.org/10.15407/rpra23.01.024>
  36. Arrowsmith S. J., Drob D. P., Hedlin M. A. H., Edwards W. (2007). A joint seismic and acoustic study of the Washington State bolide: Observation and modeling. *J. Geophys. Res.* 112, D09304. <http://dx.doi.org/10.1029/2006JD008001>
  37. Borovička J., Kalenda P. (2003). The Morávka meteorite fall: 4. Meteoroid dynamics and fragmentation in the atmosphere. *Meteoritics and Planetary Sci.* 38(7), 1023—1043. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2003.tb00296.x>
  38. Borovička J., Spurný P., Kalenda P., Tagliaferri E. (2003). The Morávka meteorite fall: 1. Description of the events and determination of the fireball trajectory and orbit from video records. *Meteoritics and Planetary Sci.* 38(7), 975—987. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2003.tb00293.x>
  39. Borovička J., Weber H. W., Jopek T., Jakeš P., Randa Z., Brown P. G., ReVelle D. O., Kalenda P., Schultz L., Kucera J., Haloda J., Týcová P., Frýda J., Brandstätter F. (2003). The Morávka meteorite fall: 3. Meteoroid initial size, history, structure, and composition. *Meteoritics and Planetary Sci.* 38(7), 1005—1021. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2003.tb00295.x>
  40. Brown P. G., Hildebrand A. R., Green D. W. E., Pagé D., Jacobs C., ReVelle D., Tagliaferri E., Wacker J., Wetmiller B. (1999). The fall of the St-Robert meteorite. *Meteoritics and Planetary Sci.* 31(4), 502—517. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.1996.tb02092.x>
  41. Brown P. G., Kalenda P., ReVelle D. O., Borovička J. (2003). The Morávka meteorite fall: 2. Interpretation of infrasonic and seismic data. *Meteoritics and Planetary Sci.* 38(7), 989—1003. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2003.tb00294.x>
  42. Brown P. G., Pack D., Edwards W. N., ReVelle D. O., Yoo B. B., Spalding R. E., Tagliaferri E. (2004). The orbit, atmospheric dynamics, and initial mass of the Park Forest meteorite. *Meteoritics and Planetary Sci.* 39(11), 1781—1796. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2004.tb00075.x>
  43. Brown P. G., ReVelle D. O., Tagliaferri E., Hildebrand A. R. (2002). An entry model for the Tagish Lake fireball using seismic, satellite and infrasound records. *Meteoritics and Planetary Sci.* 37(5), 661—675. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2002.tb00846.x>
  44. Brown P. G., Whitaker R. W., ReVelle D. O., Tagliaferri E. (2002). Multi-station infrasonic observations of two large bolides: signal interpretation and implications for monitoring of atmospheric explosions. *Geophys. Res. Lett.* 29(13), 1636, 14-1—14-4. <https://doi.org/10.1029/2001GL013778>

45. Carbognani A. (2021). The great Chinese fireball of December 22, 2020. *Eur. Phys. J. Plus.* 136(6), 616, 1—9. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01504-x>
46. *Catastrophic Events Caused by Cosmic Objects.* (2008). Eds Adushkin V., Nemchinov I. (Netherlands: Springer). <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6452-4>
47. *Center for Near Earth Object Studies.* URL: <https://cneos.jpl.nasa.gov/>
48. Cevolani G., Foschini L., Trivellone G. (1993). The «Lugo» fireball of January 19, 1993. *Il Nuovo Cimento.* 16C(4), 463—471.
49. Cevolani G., Hajdukova M., Foschini L., Trivellone G. (1994). The spectacular airburst over Lugo (Italy) on January 19, 1993. *Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso.* 24, 117—124.
50. Cheng W., Teng P., Lyu J., Dai Yi. (2021). Infrasound detection and altitude estimation associated with the December 22, 2020 Yushu fireball. *Geosci. Lett.* 8, 26 <https://doi.org/10.1186/s40562-021-00196-6>
51. 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.
52. 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.
53. Foschini L. (1998). On the airburst of large meteoroids in the Earth's atmosphere. The Lugo bolide: reanalysis of a case study. *Astron. and Astrophys.* 337, L5—L8. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.14059>
54. 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>
55. Glasstone S., Dolan P. J. (1977). *Effects of nuclear weapons.* (Washington, DC (USA): Department of Defense, Department of Energy).
56. Hildebrand A. R., Brown P. G., Wacker J. F., Wetmiller R. J., Pagé D., Green D. W. E., Jacobs C. F., ReVelle D. O., Tagliaferri E., Kissin S. A. (1997). The St-Robert bolide of June 14, 1994. *J. Roy. Astron. Soc. Canada.* 91, 261—275.
57. *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies* (2019). Eds A. Le Pichon, E. Blanc, A. Hauchecorne. (Dordrecht Heidelberg London New York: Springer).
58. Le Pichon A., Guérin J.M., Blanc E. Trail in the atmosphere of the 29 December 2000 meteor as recorded in Tahiti: Characteristics and trajectory reconstitution. *J. Geophys. Res.* 2002. 107, № D23. P. ACL 17-1—ACL 17-10. <https://doi.org/10.1029/2001JD001283>
59. Llorka J., Trigo-Rodríguez J. M., Ortiz J. L., Docobo J. A., García-Guinea J., Castro-Tirado A. J., Rubin A. E., Eugster O., Edwards W., Laubenstein M., Casanova I. (2005). The Villalbeto de la Peña meteorite fall: 1. Fireball energy, meteorite recovery, strewn field, and petrography. *Meteoritics and Planetary Sci.* 40(6), 795—804.
60. 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>
61. 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>
62. 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*. URL: [www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1242642/DC1](http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1242642/DC1)
63. 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.
64. 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. *Proc. Romanian Acad., Ser. A*. 17(2), 133—136.

*L. F. Chernogor*

V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

#### PHYSICAL EFFECTS FROM THE YUSHU METEOROID. 1.

The purpose of this work is to estimate effects in gas dynamics as well as mechanical and optical effects from the Yushu meteoroid that entered the terrestrial atmosphere and exploded over a sparsely populated area near the City of Yushu, the Province of Qinghai (the Tibetan Plateau, the People's Republic of China). According to the NASA, the initial kinetic energy of the celestial body was estimated to be about 9.5 kt of TNT or 40 TJ, of which 4.9 TJ, i.e., 12.25 %, were transformed into the energy of light flash. The velocity components have been estimated to be  $v_x = -2.6$  km/s,  $v_y = 5.9$  km/s,  $v_z = -12.1$  km/s, which yield an estimate of about  $5^\circ$  for the inclination angle, the angle that the trajectory makes with the horizontal plane. The altitude of the explosion, 35.5 km and the angle,  $5^\circ$ , give an estimate of the material density of approximately  $3.5$  t/m<sup>3</sup>, close to the chondrite density. The kinetic energy and the velocity yield an estimate of the meteoroid mass to be 432 t and its characteristic size scale of 6.2 m. 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  $\sim 1$  MPa, took place in the region of 3.6 km in length at an altitude of about 35 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 45, the radius of the ballistic shock wave was estimated to be about 280 m and the fundamental period to be 2.6 s, which showed a dispersive increase from 9.5 s to 30.1 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 to 0.8 km and 2 km respectively, and fundamental period was about 7.5 s and 18.8 s respectively. This period had

been increased from 21.1 s to 66.7 s and from 42 s to 132.9 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 ~10...20 of percent, and further it decreased down to a few percent. The absolute value of the excess pressure for spherical wavefront was estimated to be near the altitude of the explosion, subsequently it decreased with decreasing altitude down to 15 km, and further it again increased. At the epicenter of the explosion, it was estimated to be about 310 Pa for cylindrical wavefront and ~ 48.5 Pa for spherical wavefront, which is not enough to damage objects on the ground. The excess pressure decreased with increasing altitude from many tens of pascals to micropascals. Given the average duration of the light flash of 1.26 s, the average power of the fireball was estimated to be 3.9 TW, the flux of power near the fireball (or more precisely, the cone of 3.4 km in length and of 18.6 m in diameter) to be 19.5 MW/m<sup>2</sup>. At the same time, the temperature was estimated to be about 4,300 K, and Wien wavelength to be  $6.7 \cdot 10^{-7}$  m.

**Key words:** meteoroid, mechanical effect, optical effect, gas dynamics effect, ballistic shock wave, spherical shock wave, fundamental period, excess pressure

Стаття надійшла до редакції: 16.09.2021

Після доопрацювання: 16.09.2021

Прийнято до друку: 17.02.2022