

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2023.06.017>

УДК 533.6.011.6+523.682

Л. Ф. Черногор

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

Фізичні ефекти Київського метеороїда. 2

Виконано комплексне моделювання теплових, турбулентних і плазмових процесів у всіх геосферах, зумовлених падінням та вибухом Київського метеороїда 19 квітня 2023 р. Оцінено термодинамічні та плазмові ефекти, а також ефекти турбулентності, які супроводжували падіння Київського метеороїда. Показано, що проліт космічного тіла призвів до утворення газопилового плюму. Нагрітий слід від метеороїда охолоджувався протягом декількох секунд. Розглянуто спрощену одновимірну модель руху плюму у вертикальному напрямку. Оцінено прискорення та швидкість плюму. Початкове прискорення плюму спочатку досягало максимального значення 117 м/с^2 та тривало протягом часу порядку 1 мс. Його швидкість збільшувалася від 0 до 1 м/с, потім поступово зменшувалась до 0 м/с. За такої швидкості висота підйому плюму практично не збільшилася. Продукти вибуху (пилінки, аерозолі), що входили до складу терміка, надалі брали участь у трьох процесах: повільному осіданні на поверхню Землі, турбулентному перемішуванні з навколишнім повітрям, у перенесенні вітрами навколо Землі. Встановлено, що ефект турбулентності у сліді метеороїда був чітко виражений, тоді як ефект магнітної турбулентності був відсутній. Оцінено головні параметри плазми у сліді: а саме висотні залежності лінійної та об'ємної концентрацій електронів, часів їхньої релаксації, частот зіткнень частинок, питомої провідності плазми, часів релаксації температури електронів. Показано, що лінійна й об'ємна концентрації електронів у сліді у момент утворення відповідно становили $10^{17} \dots 10^{23} \text{ м}^{-1}$ та $10^{17} \dots 10^{22} \text{ м}^{-3}$, питома провідність плазми становила близько $10^3 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$. Роль пилового компонента плазми була незначною.

Ключові слова: Київський метеороїд, комплексне моделювання, термодинамічні ефекти, ефекти плюму, ефекти турбулентності, плазмові ефекти.

ВСТУП

Механічні, оптичні та газодинамічні ефекти Київського метеороїда описано у першій частині роботи автора [34]. Мета другої частини роботи — викладення результатів розрахунків і оцінок термодинамічних і плазмових ефектів, а також ефектів плюму та турбулентності, які супроводжували падіння Київського метеороїда 19 квітня 2023 р. Позначення в цій частині роботи такі ж, як і в першій частині.

Нагадаємо, що перераховані ефекти для крупних метеороїдів як в теоретичному, так і в експериментальному планах вивчено недостатньо. Відомі лише оцінки окремих ефектів [3—7, 13, 18, 19, 25, 37, 38]. Автором зроблено спробу оцінки всього комплексу ефектів для Челябінського [21—24, 35], Румунського [26, 27], Липецького [28—30] метеороїдів та метеороїда Юйшу [31—33]. В численних роботах інших дослідників, присвячених найбільш вивченому Челябінському метеороїду [10—12, 14, 15, 17, 40, 41], перераховані вище ефекти взагалі не згадувалися.

ТЕПЛОВИЙ ЕФЕКТ

Динаміка ударної хвилі. Метеороїд, рухаючись в атмосфері, створив за собою нагрітий слід, який генерував ударні хвилі, випромінював електромагнітну енергію та розширювався до тих пір, поки тиск газу в ньому не зрівнявся з атмосферним. При цьому щільність повітря істотно (у десятки разів) зменшувалась [16]. Для оцінки параметрів сліду від метеороїда врахуємо, що поперечна швидкість ударної хвилі дається відомим співвідношенням [16]:

$$\frac{dR_{sw}}{dt} = \frac{r}{R_s}, \quad R_{sw}(0) = r, \quad (1)$$

де r — радіус тіла. Інтегрування співвідношення (1) при $t=0$ дає

$$R_{sw} = r \sqrt{1 + \frac{2}{r} t}. \quad (2)$$

Оскільки характерний час руху метеороїда дорівнює $t_e = H / \sin \alpha$,

$$R_{sw}(t_e) = \sqrt{\frac{2rH}{\sin \alpha}} = \sqrt{\frac{Hd}{\sin \alpha}} = \sqrt{Ld}. \quad (3)$$

На висоті вибуху метеороїда, де $z = z_e$, для значень $d = 2.6$ м, $H = 7.5$ км, $\alpha = 32^\circ$, $L = 14.2$ км із (3) тоді маємо $R_{sw}(t_e) = 192$ м. Характерний час розширення сліду до $R_s = r$, як це впливає з (2), дорівнює

$$t_d = \frac{1}{2} r.$$

Для $v = 28.5$ км/с на висоті $z = z_e, r_e = d/2 = 1.3$ м і $R_{sw} / r = 148$ маємо значення $t_d = 0.4$ с, яке є зіставним із $t_L = 0.5$ с та меншим від ефективної тривалості свічення (2.4 с) [34].

У міру випромінювання та розширення сліду газ в ньому охолоджується, пари вибуху конденсуються, та утворюється видимий слід. Візуалізації сліду сприяє також конденсація парів, які виникли в результаті абляції речовини метеороїда. При діаметрі сліду $2R_{sw}(r_e)$

0.38 км кутовий розмір сліду на відстані $R = 100$ км дорівнює

$$\frac{2R_{sw}(r_e)}{R} = 3.8 \cdot 10^{-3} \text{ рад} = 0.22^\circ.$$

Кутовий розмір сліду метеороїда був помітно меншим за кутовий розмір Сонця, який становить близько 0.5° .

При радіусі сферичної вибухової хвилі $R_s = 0.34$ км

$$\frac{2R_s}{R} = 3.4 \cdot 10^{-3} = 0.19^\circ.$$

При цьому $t_s = 0.34$ с.

Охолодження сліду. Нагрітий слід від метеороїда (термік) в загальному випадку охолоджується за рахунок теплового випромінювання, теплового розширення, підйому з приєднанням холодного повітря, гідростатичного розширення в результаті зменшення тиску навколишнього повітря при підйомі терміка та збільшення об'єму в результаті турбулентної дифузії.

Розглянемо охолодження терміка.

Рівняння для температури продуктів вибуху має вигляд

$$Cm \frac{dT}{dt} = -(T^4 - T_0^4)S(t), \quad T(0) = T_m, \quad (4)$$

де C та m — питома теплоємність і маса утворених продуктів вибуху, $S(t) = 2\pi r(t)L_e$ — площа поверхні вогняного утворення при його моделюванні циліндром. Будемо вважати, що $m(t) = m(z_e) = m_e = 792$ кг.

Для циліндричного вибуху радіус утворення [27, 29, 32]

$$r(t) = \frac{E_L t^2}{\rho_p}^{1/4} = r_e \frac{t}{t_0}^{1/2}. \quad (5)$$

Тут $r_e = d_e / 2, d_e = 2.6$ м, $t_0 = r_e^2 \sqrt{\rho_p / E_{Le}} = (r_e / r_e)(2 /)^{1/2}$. При щільності продуктів вибуху $\rho_p = 7.5 \cdot 10^{-2}$ кг/м³, $E_{Le} = 1.6 \cdot 10^8$ Дж/м, $r_e = 1.3$ м, $v_e = 28.5$ км/с маємо $t_0 = 36$ мкс, що є набагато меншим за t_L, t_r і t_d .

Маса продуктів вибуху m_e і маса нагрітого повітря m_a визначають загальну масу речовини в терміку.

При $m = m_e$ $m(z_e) = \text{const}$ із співвідношення (5) маємо

$$S(t) = S_0 \frac{t}{t_0}^{1/2}, \quad (6)$$

де $S_0 = 2 r_e L_e = 1.6 \cdot 10^4 \text{ м}^2$. Тоді з урахуванням (6) розв'язок рівняння (4) має вигляд

$$f(\theta) = \frac{4}{3} \frac{t}{t_1}^{3/2} = f(\theta_{m1}). \quad (7)$$

Тут $\theta = T / T_0$, $T_0 = 240 \text{ К}$, $\theta_{m1} = T_m / T_0 = 12.9$,

$$f(\theta) = \text{arctg} \frac{1}{2} \ln \frac{1}{1 - \theta^2}, \quad (8)$$

$$t_1 = (t_0^{1/2})^{2/3}, \quad (9)$$

$$t = \frac{C m_e}{T_0^3 S_0}. \quad (10)$$

При $C = 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг К})$, $m_e = 792 \text{ кг}$, $T_0 = 240 \text{ К}$ і $S_0 = 1.6 \cdot 10^4 \text{ м}^2$ із (10) і (9) отримаємо, що $t = 63 \text{ с}$, $t_1 = 0.52 \text{ с}$. Додамо для порівняння, що характерний час становить

$$t_m = \frac{C m_e}{T_m^3 S_0} = 0.03 \text{ с}.$$

Із рівняння (7) випливає, що

$$t = t_1 \frac{3}{4} (f(\theta) - f(\theta_{m1}))^{2/3}.$$

Якби охолодження сліду проходило лише за рахунок теплового випромінювання, тоді характерний час цього процесу становив би t . Час t_1 є характерним часом охолодження сліду при спільному впливі процесів термодинамічного розширення з характерним часом t_0

36 мкс та теплового випромінювання з характерним часом $t = 63 \text{ с}$.

Результати розрахунку часових залежностей θ , T і T за співвідношеннями (7) і (8) наведено в табл. 1. Видно, що час практично повного охолодження сліду метеороїда наближено дорівнює 1 с.

ПІДЙОМ МЕТЕОРОЇДНОГО ПЛЮМУ

У результаті падіння метеороїда під дією ударної хвилі в атмосфері утворився нагрітий приблизно до 3100 К слід, форма якого близька до циліндра. Його радіус у відповідності з виразом (3) дається таким співвідношенням:

Таблиця 1. Часові залежності відносної температури θ , абсолютної температури T та її перевищення $T - T_0$ у сліді метеороїда

t, c	θ	T, K	$T - T_0, K$
0.0021	10	2400	2160
0.0059	7	1680	1440
0.013	5	1200	960
0.036	3	720	480
0.083	2	480	240
0.10	1.8	432	192
0.14	1.6	384	144
0.18	1.4	336	96
0.28	1.2	288	48
0.36	1.1	264	24
0.45	1.05	252	12
0.57	1.03	247.2	7.2
0.65	1.01	242.4	2.4

$$R_{sw}(\theta) = \sqrt{Ld} \sqrt{Hd / \sin \theta}.$$

Нагріте до високої температури повітря разом із речовиною космічного тіла, яка випарувалась, розширюючись, спрямовується вздовж сліду та вгору. Так виникає ефект спливання речовини, який отримав назву ефекту плюму. У випадку Київського метеороїда через малість кута рух мав бути переважно вгору.

Наголосимо, що задача про рух плюму строго може бути розв’язана числовими методами тривимірної гідродинаміки. Проте через істотну відмінність повздовжніх (десятки кілометрів) і поперечних (сотні метрів) розмірів сліду числове розв’язання цієї задачі за допомогою сучасних комп’ютерів дуже ускладнене через необхідність застосовувати достатньо малі розміри просторової комірки. Результати гідродинамічних розрахунків для вельми крупних комірок наведено, наприклад, в роботі [16].

У роботах [25, 27, 29, 32] описано прості аналітичні моделі, які дозволяють оцінити основні параметри плюму. Для цього замість тривимірного руху плюму розглядається одновимірний рух по вертикалі [27, 29, 32]. Далі розглянемо цей рух.

Спочатку оцінимо кінематичні параметри плюму.

Як відомо, метеорний пил завжди наявний на висотах 20...30 км. Швидкість його утворення становить близько 10 кт/рік [39]. Так, під час вибуху Челябінського метеороїда у стратосферу було викинуто декілька кілотонн аерозолів. При вибуху Липецького космічного тіла маса пилу не перевищувала декілька десятків тонн [29]. Для метеороїда Юйшу ця маса досягала 50...100 т [33]. Для Київського метеороїда вона не перевищувала 50...100 кг. Пил разом із нагрітим до температури порядку 3100 К газом швидко розширились у напрямку, перпен-

Таблиця 2. Часові залежності відносної температури, відносного прискорення a/g та прискорення a

t, c		a/g	$a, m/c^2$
0.0021	10	9	88.2
0.0059	7	6	58.8
0.013	5	4	39.2
0.036	3	2	19.6
0.083	2	1	9.8
0.10	1.8	0.8	7.8
0.18	1.4	0.4	3.9
0.36	1.1	0.1	1
0.45	1.05	0.05	0.5
0.65	1.01	0.01	0.1

дикулярному до напрямку руху. В результаті виникло нагріте утворення довжиною L_e та радіусом R_e , яке за рахунок сили Архімеда F_A з початковим прискоренням a_p в результаті конвекції стало підніматися вгору. У процесі підйому утворення збільшувалося в об'ємі, охолоджувалося за рахунок випромінювання, розширення та турбулентного перемішування. За щільності продуктів вибуху, близької до щільності холодного повітря, сила Архімеда зменшувалась практично до нульової, і підйом утворення припинився.

Нагріте утворення (термік) у першому наближенні можна апроксимувати циліндром із довжиною $L_e = 2$ км і радіусом, який у часі змінювався згідно із співвідношенням (5) від $r_e = 1.3$ м до $R_e = 280$ м.

Через досить пологої траєкторії площа поперечного перерізу дорівнює $S_1 = 2rL_e$, де $r(t)$ — радіус циліндричного об'єму. Спочатку термік залишався практично нерухомим. Для швидкості руху газу та пилу масою m у вертикальному напрямку маємо таке рівняння [27, 29, 32]:

$$m \frac{d}{dt} = F_A - mg - \frac{C_d}{2} \rho_0^2 S_1 v^2, \quad (11)$$

де $m = \rho V$, ρ — щільність речовини у плюмі об'ємом V , $F_A = \rho_0 V g$ — сила Архімеда, g — прискорення вільного падіння, $C_d = 0.6$ — коефіцієнт аеродинамічного опору, ρ_0 — незбурена щільність повітря, S_1 — площа поперечного перерізу циліндра радіусом r і довжиною L_e . Припускаючи, що маса пилу та газу у процесі спливання та розширення залишається незмінною, отримаємо, що $V(t) = V_0$, $S_1(t) = S_{10}^{1/2}$, де згідно із (5) $r(t) = r_e^{1/2}$, $V_0 = \frac{2}{3} r_e^2 L_e$, $S_{10} = 2r_0 L_e$ та t/t_0 . Із співвідношення (11) при $r = r(t)$ та $v(t)$ маємо

$$\frac{d}{dt} = -\rho_0 (1 - g) \frac{3C_d}{2} \frac{\rho_0^2}{r(t)}. \quad (12)$$

При $t = 0.5$ с тиск всередині терміка практично зрівнявся із зовнішнім тиском. При цьому $\rho_0 / \rho = T / T_0$, $r(t) = R_c$. Тоді з (12) отримаємо рівняння

$$\frac{d}{dt} (a - 1)g = \frac{3C_d}{2} \frac{v^2}{R_e},$$

де $a = (T/T_0)^{\gamma}$ — прискорення терміка, $a_r = 3C_d v^2 / 2 R_e$ — його гальмування. За $v = 30$ м/с маємо $a \gg a_r$. Тоді

$$v(t) = \int_0^t a(t) dt = g \int_0^t (a - 1) dt. \quad (13)$$

Числове інтегрування (13) дало $v = 1$ м/с.

Таким чином, для Київського метеороїда спливанням терміка та супутніми процесами можна нехтувати, тому що початково велике прискорення $a = 117$ м/с² дуже швидко, за час всього $t = 1$ с, зменшилося практично до нуля. Термік не зміг набрати швидкості більш ніж 1 м/с та помітно підійнятися догори.

ОСІДАННЯ АЕРОЗОЛІВ

У процесі абляції, а потім і вибуху метеороїда виникли його фрагменти з радіусом r_p від 10^{-6} до 0.01 м і масою m_p від 10^{-15} до 10^{-3} кг. Відносно важкі фрагменти космічного тіла (з масою понад 1 мг) могли випасти на поверхню Землі у вигляді метеоритів. Найлегші пилінки (аерозолі) зависли на висоті вибуху $z_p = 38$ км разом із гарячими продуктами вибуху. Надалі аерозолі могли брати участь у трьох процесах. По-перше, у повільному осіданні на поверхню Землі. По-друге, в турбулентному перемішуванні з навколишнім повітрям. По-третє, у переносі вітрами навколо планети, здійснюючи повний оберт приблизно за дві доби [1, 10—12, 36].

Як відомо, швидкість осідання аерозолів дається таким співвідношенням [20, 24]:

$$v_p = \frac{2}{9} \frac{a g}{\rho_p} r_p^2, \quad (14)$$

де $a = 3.3 \cdot 10^3$ кг/м³ — об'ємна щільність аерозолію, $g = 9.8$ м/с², $\rho_p = 1.7 \cdot 10^{-5}$ Па·с — коефіцієнт динамічної в'язкості атмосферного газу. Час осідання аерозолів з висоти z_p дорівнює $t_p = z_p / v_p$. Оцінки t_p , отримані з використанням виразу (14) і ρ_p для $z_p = 38$ км, наведено в табл. 3. Видно, що аерозолі радіусом 10^{-6} м можуть залишатися в атмосфері більше двох років. Цього, проте, не відбувається. За рахунок турбулентного перемішування з навколишнім газом ці аерозолі осідають на поверхню Землі за час

Таблиця 3. Залежність швидкості та часу осідання аерозолів від їхнього радіуса

r_p , МКМ	v_p , М/С	τ_p , 10^5 с	τ_p , діб
1	$4.6 \cdot 10^{-4}$	830	961
2	$1.8 \cdot 10^{-3}$	210	244
3	$4.1 \cdot 10^{-3}$	93	107
5	0.012	32	31
10	0.046	8.3	9.6
20	0.18	2.1	2.4
30	0.41	0.93	1.07
50	1.2	0.32	0.37
100	4.6	0.083	0.10

$$\tau_p = \frac{z_p^2}{D_{t0}}$$

де D_{t0} — коефіцієнт турбулентної дифузії. Припускаючи, що $z_p = 38$ км, $D_{t0} = 1000 \dots 3000$ м²/с, отримуємо, що $\tau_p = 16.7 \dots 5.6$ доби.

ЕФЕКТ ТУРБУЛЕНТНОСТІ

Як відомо, турбулентність у суцільному середовищі стає визначальною, якщо число Рейнольдса [2] дорівнює

$$\text{Re} = \frac{v_i d}{\nu} = \text{Re}_{cr} \cdot 10^3. \quad (15)$$

Тут v_i і d — швидкість і діаметр космічного тіла, ν — кінематична та динамічна в'язкості, ρ — щільність атмосфери на заданій висоті. Умова (15) при діаметрі $d_0 = 0.8$ м, $\nu = 1.7 \cdot 10^{-5}$ Па·с та $v_0 = 29$ км/с реалізується при $\rho > 7.3 \cdot 10^{-7}$ кг/м³, тобто на висотах $z < 100$ км. Наприклад, на висоті 38 км, де $\rho = 8.2 \cdot 10^{-3}$ кг/м³, $v = 28.5$ км/с, $d = 80$ см маємо $\text{Re} = 1.1 \cdot 10^7$. Поблизу висоти вибуху навіть для фрагментів з $d = 10^{-4}$ м маємо $\text{Re} = 1.4 \cdot 10^3 > \text{Re}_{cr}$. Для більшості фрагментів ефект турбулентності спостерігався майже до висоти z_{cr} [34].

Таким чином, слід метеороїда був сильно турбулізованим на висотах $z = 10 \dots 100$ км. Зовнішній масштаб турбулентності $L_t = d(z)$

$0.8 \dots 2.4$ м на висотах $100 \dots 38$ км відповідно. Час становлення процесу турбулентності

$$\tau_t = \frac{L_t}{v_t} = \frac{L_t}{v_t} \quad (2.8 \dots 8.3) \cdot 10^{-4} \text{ с}$$

для того ж діапазону висот. Тут $v_t = v_t / v_0$, v_t — характерна швидкість турбулентного руху. Зазвичай припускають $v_t = 0.1$ [2, 4].

Видно, що при $z = 38 \text{ км}$ $t \ll L = 0.5 \text{ с}$, тобто процес турбулізації був порівняно малоінерційним.

Коефіцієнт турбулентної дифузії оцінимо таким чином:

$$D_t = \nu_t L_t^2 \quad (16)$$

При $\nu_t = 2.9 \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{с}$ і $L_t = 0.8 \dots 2.4 \text{ м}$ маємо $D_t = (2.3 \dots 7.0) \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{с}$. У незбуреній атмосфері на висотах $38 \dots 100 \text{ км}$ $D_{t0} = 100 \dots 1000 \text{ м}^2/\text{с}$. Видно, що на всіх висотах величина D_t помітно більша від D_{t0} .

Слід метеороїда заповнено плазмою з питомою провідністю σ . Турбулентність плазми характеризується магнітним числом Рейнольдса

$$\text{Re}_m = \sigma_0 L_t \nu_t / D_t,$$

де σ_0 — магнітна стала. При вказаних вище значеннях величин ν_t, L_t і $10^3 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ (див. далі) отримаємо $\text{Re}_m = 2.9 \dots 8.8$ для $z = 100 \dots 38 \text{ км}$ відповідно. Критичне значення $\text{Re}_{mcr} = 40$. Таким чином, $\text{Re}_m < \text{Re}_{mcr}$, тобто магнітний ефект турбулентності був несуттєвим.

ПЛАЗМОВІ ЕФЕКТИ

Концентрація електронів. Відомо, що лінійна концентрація електронів обчислюється з рівняння [2, 27, 29, 32]:

$$i = \frac{C_h}{M_m} \frac{dm}{dt} \quad (17)$$

Видно, що процес іонізації тісно пов'язаний із процесом абляції, яка описується рівнянням [2, 27, 29, 32]:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{C_h}{2Q} S^3 \quad (18)$$

Для висоти $z < z_e$ наближено можна вважати $\sigma_0 = 29 \text{ км}/\text{с}$, $S = S_0 = 0.49 \text{ м}^2$. Із співвідношень (18) і (19) випливає, що

$$i = \frac{C_h}{2M_m Q} S^2 \quad (19)$$

Тоді

$$N = \frac{i}{S} = \frac{C_h}{2M_m Q} S \quad (20)$$

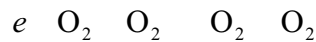
Будемо вважати $M_m = 5 \cdot 10^{26} \text{ кг}$, $C_h = 1.54 \cdot 10^2$ [2]. Результати розрахунку i та об'ємної концентрації електронів за співвідношеннями (19) і (20) наведено в табл. 4. Можна бачити, що поблизу висоти вибуху $i_{\text{max}}(0) = 3.0 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$, а $N_{\text{max}}(0) = 6.2 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$. На всіх висотах

Таблиця 4. Висотні профілі основних параметрів атмосфери та плазмового сліду метеороїда

z , км	N_n , M^{-3}	$N[O_2]$, M^{-3}	$i(0)$, M^{-1}	$N(0)$, M^{-3}	$s_i(0)$, 10^{-3}	N_n , M^{-3}
100	$9.6 \cdot 10^{18}$	$1.1 \cdot 10^{18}$	$1.4 \cdot 10^{17}$	$2.9 \cdot 10^{17}$	30	$6.1 \cdot 10^{13}$
95	$1.9 \cdot 10^{19}$	$4 \cdot 10^{18}$	$2.7 \cdot 10^{17}$	$5.5 \cdot 10^{17}$	29	$7.9 \cdot 10^{14}$
90	$3.9 \cdot 10^{19}$	$8.2 \cdot 10^{18}$	$5.5 \cdot 10^{17}$	$1.1 \cdot 10^{18}$	28	$3.3 \cdot 10^{15}$
85	$1.1 \cdot 10^{20}$	$2.2 \cdot 10^{19}$	$1.6 \cdot 10^{18}$	$3.3 \cdot 10^{18}$	15	$8.6 \cdot 10^{16}$
80	$2.9 \cdot 10^{20}$	$6.2 \cdot 10^{19}$	$4.1 \cdot 10^{18}$	$8.4 \cdot 10^{18}$	29	$1.9 \cdot 10^{17}$
75	$7.6 \cdot 10^{20}$	$1.6 \cdot 10^{20}$	$1.1 \cdot 10^{19}$	$2.2 \cdot 10^{19}$	29	$5.3 \cdot 10^{17}$
70	$2 \cdot 10^{21}$	$4.2 \cdot 10^{20}$	$2.8 \cdot 10^{19}$	$5.7 \cdot 10^{19}$	29	$8.8 \cdot 10^{18}$
65	$3.7 \cdot 10^{21}$	$7.9 \cdot 10^{20}$	$5.2 \cdot 10^{19}$	$1.1 \cdot 10^{20}$	30	$3.0 \cdot 10^{19}$
60	$7 \cdot 10^{21}$	$1.5 \cdot 10^{21}$	$9.9 \cdot 10^{19}$	$2.0 \cdot 10^{20}$	29	$1.1 \cdot 10^{20}$
55	$1.6 \cdot 10^{22}$	$3.2 \cdot 10^{21}$	$2.3 \cdot 10^{20}$	$4.7 \cdot 10^{20}$	29	$5.1 \cdot 10^{20}$
50	$3.4 \cdot 10^{22}$	$7.2 \cdot 10^{21}$	$4.9 \cdot 10^{20}$	10^{21}	29	$2.5 \cdot 10^{21}$
45	$7.3 \cdot 10^{22}$	$1.5 \cdot 10^{22}$	$1.0 \cdot 10^{21}$	$2 \cdot 10^{21}$	27	$1.1 \cdot 10^{22}$
40	$1.6 \cdot 10^{23}$	$3.3 \cdot 10^{22}$	$2.3 \cdot 10^{21}$	$4.7 \cdot 10^{21}$	29	$5.5 \cdot 10^{22}$
35	$3.3 \cdot 10^{23}$	$7 \cdot 10^{22}$	$3.0 \cdot 10^{23}$	$6.2 \cdot 10^{21}$	19	$2.4 \cdot 10^{23}$
30	$6.4 \cdot 10^{23}$	$1.4 \cdot 10^{23}$	$3.5 \cdot 10^{23}$	$9.0 \cdot 10^{21}$	14	10^{24}
25	$1.3 \cdot 10^{24}$	$2.7 \cdot 10^{23}$	$2.4 \cdot 10^{23}$	$8.4 \cdot 10^{21}$	6.5	$3.8 \cdot 10^{24}$
20	$2.4 \cdot 10^{24}$	$5.2 \cdot 10^{23}$	$8.2 \cdot 10^{22}$	$4.1 \cdot 10^{21}$	1.7	$1.3 \cdot 10^{25}$
15	$4.7 \cdot 10^{24}$	$1.0 \cdot 10^{24}$	$1.4 \cdot 10^{22}$	$1.2 \cdot 10^{21}$	0.26	$5.0 \cdot 10^{25}$
10	$9.3 \cdot 10^{24}$	$2.0 \cdot 10^{24}$	$1.2 \cdot 10^{21}$	$2.4 \cdot 10^{20}$	0.026	$2.0 \cdot 10^{26}$

ступінь іонізації плазми $s_i(0) = N(0) / N_n \ll 1$, де N_n — концентрація нейтралів у сліді (див. табл. 4).

Після закінчення процесу іонізації електрони зникають, по-перше, в результаті прилипання до молекул кисню при потрійних зіткненнях у реакції [8, 42]:



та, по-друге, — рекомбінації з метеорними іонами. Рівняння балансу числа заряджених частинок має вигляд

$$\frac{dN}{dt} = k_a N^2 - r N, \quad N|_{t=0} = N(0), \quad (21)$$

де $k_a = k_{a0} N^2 [O_2]$ — коефіцієнт прилипання, k_a — швидкість хімічної реакції, r — коефіцієнт радіативної рекомбінації метеорних частинок. Врахуємо, що [8, 42]

$$k_a = k_{a0} \frac{300}{T} e^{-600/T}, \quad k_{a0} = 1.4 \cdot 10^{41} \text{ м}^6 \text{ с}^{-1},$$

$$r = r_0 \frac{T_0}{T}^{3/2}, \quad r_0 = 10^{18} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1},$$

Індекс «0» означає незбурені умови. Розв'язок (21) має вигляд

Таблиця 5. Висотні залежності часів релаксації концентрації електронів у сліді метеороїда

z, км	t_{N1}, c	t_{N2}, c	z, км	t_{N1}, c	t_{N2}, c
100	$7.5 \cdot 10^5$	157	50	0.018	0.045
95	$5.7 \cdot 10^4$	83	45	$4.0 \cdot 10^{-3}$	0.022
90	$1.4 \cdot 10^4$	41	40	$8.3 \cdot 10^{-4}$	$9.6 \cdot 10^{-3}$
85	$1.9 \cdot 10^3$	14	35	$1.9 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$
80	24	5.4	30	$4.6 \cdot 10^{-5}$	$5.0 \cdot 10^{-3}$
75	86	2.1	25	$1.2 \cdot 10^{-5}$	$5.4 \cdot 10^{-3}$
70	5.2	0.8	20	$3.4 \cdot 10^{-6}$	0.011
65	1.5	0.4	15	$9.1 \cdot 10^{-7}$	0.038
60	0.4	0.23	10	$2.3 \cdot 10^{-7}$	0.2
55	0.089	0.096			

$$N = \frac{N(0)N_c}{(N(0) - N_c)e^{t/t_{N1}} - N(0)},$$

де $N_c = a / r$, $t_{N1} = 1 / a$ (див. табл. 5).

Як випливає з рівняння (21), релаксація іонізованого сліду в загальному випадку визначається як прилипанням електронів, так і їхньою рекомбінацією з метеорними іонами. Часи релаксації за рахунок цих процесів, як видно з (21), даються співвідношеннями

$$t_{N1} = \frac{1}{a},$$

$$t_{N2} = [r \cdot N(0)]^{-1}.$$

Результати розрахунку цих параметрів атмосфери наведено в табл. 5. Вважалось, що при $t = t_{N1}, t_{N2}$ температура газу в сліді $T(t) = T_m$

3100 К . Тоді $k_a(T_m) = 1.1 \cdot 10^{42} \text{ м}^6 \text{ с}^{-1}$, $r(T_m) = 2.2 \cdot 10^{20} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$. Із табл. 5 видно, що часи релаксації t_{N1} та t_{N2} різні, причому $t_{N1} \ll t_{N2}$ при $z = 40 \text{ км}$.

Якщо ж $T = T_0 = 240 \text{ К}$, то $k_a = 1.4 \cdot 10^{42} \text{ м}^6 \text{ с}^{-1}$, а $r = 10^{18} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$. При цьому порядок k_a не змінився, а коефіцієнт r збільшився майже на два порядки.

Частота зіткнень електронів. Електрони плазми стикаються з іонами та нейтралами. При цьому в системі СІ [9]

$$\nu_{ei} = 5.5 \cdot 10^6 N T_e^{3/2} \ln(2.2 \cdot 10^4 T_e N^{1/3}),$$

$$\nu_{en} = 5.7 \cdot 10^{20} N_n T_e^{-1/2}, \quad T_e = (kT_e / m)^{1/2},$$

де N, T_e, m, T_e — концентрація, температура, маса та теплова швидкість електронів, k — стала Больцмана, N_n — концентрація нейтралів у розрідженому сліді (див. табл. 4). Враховуючи, що час релаксації температури електронів t_{Te} набагато менший за час релаксації температури нейтралів t_T , будемо вважати, що у всьому об'ємі газу

$T_e(t) = T(t) = T_m = 3100$ К. Крім того, припускаємо, що $N = N(0)$. Поблизу висоти вибуху, де $N(0) = 5 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$, $\nu_{ei} = 2.2 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$, $\nu_{en} = 3.0 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$, а $\nu_e = 2.2 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$. Видно, що $\nu_e \gg \nu_{en}$ та $\nu_e \approx \nu_{ei}$.

Частоти зіткнень ν_{ei} і ν_{en} визначають час становлення T_e :

$$t_{Te} = \left(\nu_{ei} \nu_{en} \right)^{-1},$$

де ν_{ei} і ν_{en} — відносна доля енергії, яка втрачається при одному акті зіткнень із іоном і нейтралом відповідно. Припускаємо, що $\nu_{ei} = 10^4$ і $\nu_{en}(T_m) = 0.003$. Час $t_{Te} = 4.5 \cdot 10^{-8} \text{ с} \ll t_T$.

Питома провідність плазми. У сліді питома електронна провідність дорівнює

$$\frac{e^2 N}{m_e}.$$

Поблизу висоти вибуху $\nu_{ei} \approx \nu_{en}$, і

$$\frac{e^2 N}{m_{ei}} = 640 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}.$$

Оскільки $\nu_{ei} \approx N$, питома провідність електронів при $t = t_{N1}, t_{N2}$ практично не залежить від N і приблизно дорівнює $1000 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$. При $t = t_{N1}, t_{N2}$ значення швидко зменшуються через зменшення $N(t)$ та вплив ν_{en} .

Пиловий компонент плазми. Крім електронно-іонної плазми, слід від метеороїда заповнено атомами метеорної речовини та пилом, які несуть на собі заряд. Пил у сліді з'являється в результаті конденсації речовини, яка випарувалася, та вибухоподібного виділення енергії при різкому гальмуванні космічного тіла. Така плазма є газопиловою. Відомо, що її властивості помітно відрізняються від властивостей електрон-іонної плазми. Так, у дисперсійній залежності з'являються нові гілки, що описують інші види хвиль і коливань. Пил істотно впливає на швидкість дифузійних процесів. Роль метеорного пилу, однак, для невеликого за розміром Київського метеороїда була незначною.

ОБГОВОРЕННЯ

Досить малі розміри (79 см) Київського метеороїда призвели до короткочасного життя (~ 1 с) нагрітих продуктів вибуху. Незважаючи на значне початкове прискорення (117 м/с^2), термік не встиг за час порядку 1 мс набрати швидкість, яка б значно перевищувала 1 м/с. Це означало, що термік практично не змістився під дією сили Архімеда вгору.

Висока початкова швидкість сприяла інтенсивній турбулізації сліду метеороїда, а малий розмір тіла, навпаки, заважав цьому процесу. Ефект турбулентності був чітко вираженим на висотах 10...100 км.

Водночас магнітний ефект турбулентності був практично відсутній.

Плазмові ефекти відігравали значну роль. Лінійна концентрація електронів у сліді метеороїда сягала $3 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-1}$, а об'ємна концентрація — 10^{22} м^{-3} . Величина іонізації була приблизно на порядок меншою у порівнянні з цим параметром для великих метеороїдів (6...18 м) [21, 33].

Таким чином, для Київського метеороїда термодинамічний та плазмові ефекти, а також ефект турбулентності були яскраво вираженими. Водночас низка ефектів, характерних для великих метеороїдів, була відсутньою. До них належить тривале охолодження, спливання терміка, приєднання холодного повітря у процесі підйому, рух нагрітих продуктів вздовж сліду, магнітний ефект турбулентності тощо.

ВИСНОВКИ

Виконано комплексний аналіз теплових, турбулентних і плазмових процесів у системі Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера, які супроводжували падіння Київського метеороїда, та встановлено таке.

1. Нагрітий приблизно до 3100 К слід від метеороїда охолоджувався головним чином за рахунок випромінювання та термодинамічного розширення. Нагрітий термік існував протягом кількох секунд.

2. Розглянуто спрощену одновимірну модель руху плюму у вертикальному напрямку. Оцінено прискорення та швидкість плюму. Показано, що початкове прискорення плюму спочатку досягало максимального значення 117 м/с^2 та тривало протягом 1 мс. Його швидкість збільшувалася від 0 до 1 м/с, потім поступово зменшувалася до 0 м/с. За такої швидкості висота підйому плюму практично не збільшилася.

3. Продукти вибуху (пилинки, аерозолі), які входили до складу терміка, надалі брали участь у трьох процесах: повільному осіданні на поверхню Землі, турбулентному перемішуванні з навколишнім повітрям, у переносі переважними вітрами навколо планети.

Показано, що за відсутності турбулентного перемішування час життя мікрометрових пилинок становив би близько двох-трьох років. Реально час їхнього осідання обмежувався турбулентним перемішуванням і залежно від розміру не перевищував 6...17 діб.

4. Показано, що ефект турбулентності в сліді метеороїда був чітко виражений, а ефект магнітної турбулентності був відсутній.

5. Оцінено головні параметри плазми в сліді: висотні залежності лінійної та об'ємної концентрацій електронів, часу їхньої релаксації, частот зіткнень частинок, питомої провідності плазми, часів релаксації температури електронів. Показано, що лінійна та об'ємна концентрації електронів у сліді у початковий момент залежно від висоти становили близько $10^{17} \dots 10^{23} \text{ м}^{-1}$ і $10^{17} \dots 10^{22} \text{ м}^{-3}$, питома провідність плазми приблизно становила $10^3 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$. Роль пилового компонента плазми була незначною.

Дослідження проведено в рамках проєкту Національного фонду досліджень України (номер 2020.02/0015 «Теоретичні та експериментальні дослідження глобальних збурень природного і техногенного походження в системі Земля — атмосфера — іоносфера»). Роботу також підтримано в рамках держбюджетних НДР, заданих МОН України (номери держреєстрації 0121U109881 та 0122U001476).

1. Артемьева Н. А., Шувалов В. В. Атмосферный шлейф Челябинского метеороида. *Динамические процессы в геосферах: сб. науч. тр. ИДГ РАН. Спец. выпуск.* Москва: ГЕОС, 2014. Вып. 5. Геофизические эффекты падения Челябинского метеороида. С. 134—146.
2. Бронштэн В. А. *Физика метеорных явлений.* Москва: Наука, 1981. 416 с.
3. Бронштэн В. А. Магнитогидродинамический механизм генерации радиоизлучения ярких болидов. *Астрон. вестн.* 1983. 17, № 2. С. 94—98.
4. Бронштэн В. А. Вход в атмосферу крупных метеороидов. *Астрон. вестн.* 1993. 27, № 1. С. 102—121.
5. Бронштэн В. А. О физическом механизме квазинепрерывного дробления крупных метеорных тел. *Астрон. вестн.* 1993. 27, № 3. С. 65—74.
6. Бронштэн В. А. Применение теории Григоряна к расчету дробления гигантских метеороидов. *Астрон. вестн.* 1994. 28, № 2. С. 118—124.
7. Бронштэн В. А. Дробление и разрушение крупных метеорных тел в атмосфере. *Астрон. вестн.* 1995. 29, № 5. С. 450—459.
8. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. *Физика ионосферы.* Москва: Наука, 1988. 527 с.
9. Гинзбург В. Л. *Распространение электромагнитных волн у плазме.* Москва: Наука, 1967. 684 с.
10. Горькавый Н. Н., Лихарев Д. С., Миннибаев Д. Н. Цветовые вариации аэрозольного следа Челябинского болида. *Метеорит Челябинск — год на Земле: Матер. Всероссийской науч. конф.* Редкол.: Н. А. Антипин и др. Челябинск, 2014. С. 118—123.
11. Горькавый Н. Н., Тайдакова Т. А. Взаимодействие Челябинского болида с атмосферой. *Метеорит Челябинск — год на Земле. Матер. Всероссийской науч. конф.* Редкол.: Н. А. Антипин и др. Челябинск, 2014. С. 124—129.
12. Горькавый Н. Н., Тайдакова Т. А., Проворникова Е. А. и др. Аэрозольный шлейф Челябинского болида. *Метеорит Челябинск — год на Земле. Матер. Всероссийской науч. конф.* Редкол.: Н. А. Антипин и др. Челябинск, 2014. С. 130—135.
13. Григорян С. С. О движении и разрушении метеороидов у атмосферах планет. *Космич. исслед.* 1979. 17, № 6. С. 875—893.
14. *Динамические процессы в геосферах:* сб. науч. тр. ИДГ РАН. Спец. выпуск. Москва: ГЕОС, 2014. Вып. 5. Геофизические эффекты падения Челябинского метеороида. 160 с.
15. Емельяненко В. В., Попова О. П., Чугай Н. Н. и др. Астрономические и физические аспекты Челябинского события 15 февраля 2013 года. *Астрон. вестн.* 2013. 47, № 4. С. 262—277.
16. *Катастрофические воздействия космических тел.* Под ред. В. В. Адушкина, И. В. Немчинова. Москва: ИКЦ «Академкнига», 2005. 310 с.
17. *Метеорит Челябинск — год на Земле: Матер. Всероссийской науч. конф.* Редкол.: Н. А. Антипин и др. Челябинск, 2014. 694 с.
18. Стулов В. П., Мирский В. Н., Вислый А. И. *Аэродинамика болидов.* Москва: Наука; Физматлит, 1995. 240 с.

19. Челябинский суперболид. Под ред. Н. Н. Горькавого, А. Е. Дудорова. Челябинск: Изд-во Челябинского ун-та, 2016. 223 с.
20. Черногор Л. Ф. *Физика и экология катастроф*. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2012. 556 с.
21. Черногор Л. Ф. Плазменные, электромагнитные и акустические эффекты метеорита «Челябинск». *Инж. физ.* 2013. 8. С. 23—40.
22. Черногор Л. Ф. Физические эффекты пролета Челябинского метеорита. *Доп. Нац. акад. наук України*. 2013. № 10. С. 97—104.
23. Черногор Л. Ф. Основные эффекты падения метеорита Челябинск: результаты физико-математического моделирования. *Метеорит Челябинск — год на Земле: Матер. Всероссийской науч. конф.* Редкол.: Н. А. Антипин и др. Челябинск, 2014. С. 229—264.
24. Черногор Л. Ф. Атмосферные эффекты газо-пылевого следа Челябинского метеороида 2013 года. *Изв. РАН. Физ. атмос. и океана*. 2017. 53, № 3. С. 296—306.
25. Черногор Л. Ф. Магнито-ионосферные эффекты метеороидного плюма. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2018. 58, № 1. С. 125—132.
26. Черногор Л. Ф. Физические эффекты Румынского метеороида. 1. *Космічна наука і технологія*. 2018. 24, № 1. С. 49—70.
27. Черногор Л. Ф. Физические эффекты Румынского метеороида. 2. *Космічна наука і технологія*. 2018. 24, № 2. С. 18—35.
28. Черногор Л. Ф. Физические эффекты Липецкого метеороида. 1. *Кінематика і фізика небес. тел.* 2019. 35, № 4. С. 37—59.
<https://www.mao.kiev.ua/biblio/jscans/kfnt/2019-35/kfnt-2019-35-4-03-chernogor.pdf>
29. Черногор Л. Ф. Физические эффекты Липецкого метеороида. 2. *Кінематика і фізика небес. тіл.* 2019. 35, № 5. С. 25—47.
30. Черногор Л. Ф. Физические эффекты Липецкого метеороида. 3. *Кінематика і фізика небес. тіл.* 2019. 35, № 6. С. 34—61.
31. Черногор Л. Ф. Фізичні ефекти метеороїда Юйшу. 1. *Кінематика і фізика небес. тіл.* 2022. 38, № 3. С. 20—46.
32. Черногор Л. Ф. Фізичні ефекти метеороїда Юйшу. 2. *Кінематика і фізика небес. тіл.* 2023. 39, № 3. С. 3—24. <https://doi.org/10.15407/kfnt2023.03.003>
33. Черногор Л. Ф. Фізичні ефекти метеороїда Юйшу. 3. *Кінематика і фізика небес. тіл.* 2023. 39, № 3. С. 25—52. <https://doi.org/10.15407/kfnt2023.03.025>
34. Черногор Л. Ф. Фізичні ефекти Київського метеороїда. 1. *Кінематика і фізика небес. тіл.* 2023. 39, № 5. С. 24—53. <https://doi.org/10.15407/kfnt2023.05.024>
35. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. The physical effects associated with Chelyabinsk meteorite's passage. *Probsl. Atom. Sci. and Technol.* 2013. 86, № 4. P. 136—139.
36. Gorkavyi N. N., Taidakova T. A., Provornikova E. A. Aerosol plume after the Chelyabinsk bolide. *Solar System Res.* 2013. 47, № 4. P. 275—279.
37. Grigoryan S. S. Physical mechanism of Chelyabinsk superbolide explosion. *Solar Syst. Res.* 2013. 47, № 4. P. 268—274.
38. Hills J. G., Goda M. P. The fragmentation of small asteroids in the atmosphere. *Astron. J.* 1993. 105, № 3. P. 1114—1144.
39. Hunten D. M., Turco R. P., Toon O. B., et al. Smoke and dust particles of meteoric origin in the mesosphere and stratosphere. *J. Atmos. Sci.* 1980. 37, № 6. P. 1342—1357.
40. Popova O. P., Jenniskens P., Emel'yanenko V., Kartashova A., Biryukov E., Khaibrakhmanov S., Shuvalov V., Rybnov Y., Dudorov A., Grokhovsky V. I., Badyukov D. D., Yin Q.-Z., Gural P. S., Albers J., Granvik M., Evers L. G., Kuiper J., Kharlamov V., Solovyov A., Rusakov Yu. S., Korotkiy S., Serdyuk I.,

- Korochantsev A. V., Larionov M. Yu., Glazachev D., Mayer A. E., Gisler G., Gladkovsky S. V., Wimpenny J., Sanborn M. E., Yamakawa A., Verosub K. L., Rowland D. J., Roeske S., Botto N. W., Friedrich J. M., Zolensky M. E., Le L., Ross D., Ziegler K., Nakamura T., Ahn I., Lee J. I., Zhou Q., Li X.-H., Li Q.-L., Liu Yu, Tang G.-Q., Hiroi T., Sears D., Weinstein I. A., Vokhmintsev A. S., Ishchenko A. V., Schmitt-Kopplin P., Hertkorn N., Nagao K., Haba M. K., Komatsu M., Mikouchi T. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization. *Science*. 2013. 342. P. 1069—1073.
41. Popova O. P., Jenniskens P., Emel'yanenko V., Kartashova A., Biryukov E., Khaibrakhmanov S., Shuvalov V., Rybnov Y., Dudorov A., Grokhovsky V. I., Badyukov D. D., Yin Q.-Z., Gural P. S., Albers J., Granvik M., Evers L. G., Kuiper J., Kharlamov V., Solovyov A., Rusakov Yu. S., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A. V., Larionov M. Yu., Glazachev D., Mayer A. E., Gisler G., Gladkovsky S. V., Wimpenny J., Sanborn M. E., Yamakawa A., Verosub K. L., Rowland D. J., Roeske S., Botto N. W., Friedrich J. M., Zolensky M. E., Le L., Ross D., Ziegler K., Nakamura T., Ahn I., Lee J. I., Zhou Q., Li X.-H., Li Q.-L., Liu Yu, Tang G.-Q., Hiroi T., Sears D., Weinstein I. A., Vokhmintsev A. S., Ishchenko A. V., Schmitt-Kopplin P., Hertkorn N., Nagao K., Haba M. K., Komatsu M., Mikouchi T. Supplementary material for Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization. *Science*. 2013. 342. 146 p.
42. Schunk R. W., Nagy A. *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry*. Cambridge University Press. 2000. 554 p.

REFERENCES

1. Artem'eva N. A., Shuvalov V. V. (2014). Atmospheric plume of the Chelyabinsk meteoroid. *Dynamic Processes in Geospheres, Vol. 5: Geophysical Effects of the Chelyabinsk Meteoroid's Fall*: Collection of Scientific Papers of the Institute of Geosphere Dynamics of the Russian Academy of Sciences. Special Issue. Moscow: GEOS, 2014, 134—146 [in Russian].
2. Bronshten V. A. (1983). *Physics of Meteor Phenomena*. Springer. 416 p.
3. Bronshten V. A. (1983) A magneto-hydrodynamic mechanism for generating radio waves by bright fireballs. *Solar System Res.* 17(2), 70—74.
4. Bronshten V. A. (1993). The entry of the large meteoroids into the atmosphere. *Solar System Res.* 27(1), 102—121 [In Russian].
5. Bronshten V. A. (1993). About physical mechanism of the large meteor bodies quasi-continuous fragmentation. *Solar System Res.* 27(3), 65—74 [In Russian].
6. Bronshten V. A. (1994). The way to use Grigor'yan theory for calculating giant meteoroids fragmentation. *Solar System Res.* 28(2), 118—122.
7. Bronshten V. A. (1995). Crushing and destruction of large meteoric bodies in the atmosphere. *Solar System Res.* 29(5), 450—458 [In Russian].
8. Brunelli B. E., Namgaladze A. A. (1988). *Physics of the Ionosphere*. Moscow: Nauka [in Russian].
9. Ginzburg B. L. (1960). *Propagation of Electromagnetic Waves in Plasma*. London: Addison Wesley.
10. Gor'kavyy N. N., Likharev D. S., Minnibayev D. N. (2014). Color variations of the aerosol plume of the Chelyabinsk bolide. *The Chelyabinsk Meteorite — One Year on the Earth: Proc. All-Russian Sci. Conf.*, Eds Antipin N. A., Dudorov A. E., Zamozdra S. N., Kolisnichenko S. V., Kocherov A. V., Shajgo-Rodskij E. A. Chelyabinsk: Kamennyi Poyas, 118—123 [in Russian].

11. Gor'kavyi N. N., Taydakova T. A. (2014). Interaction of the Chelyabinsk bolide with the atmosphere. *The Chelyabinsk Meteorite — One Year on the Earth: Proc. All-Russian Sci. Conf.*, Eds N. A. Antipin, A. E. Dudorov, S. N. Zamozdra, S. V. Kolisnichenko, A. V. Kocherov, E. A. Shajgo-Rodskij. Chelyabinsk: Kamennyi Poyas, 124—129 [in Russian].
12. Gor'kavyi N. N., Taydakova T. A., Provornikova Ye. A., et al. (2014). Aerosol plume of the Chelyabinsk bolide,” *The Chelyabinsk Meteorite — One Year on the Earth: Proc. All-Russian Sci. Conf.*, Eds N. A. Antipin, A. E. Dudorov, S. N. Zamozdra, S. V. Kolisnichenko, A. V. Kocherov, E. A. Shajgo-Rodskij. Chelyabinsk: Kamennyi Poyas, 130—135 [in Russian].
13. Grigor'yan S. S. (1979). On meteorites motion and fragmentation in planets atmospheres, *Kosm. Issl.*, 17(6), 875—893 [In Russian].
14. *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].
15. Emelyanenko V. V., Popova O. P., Chugaj N. N., Sheljakov M. A., Pahomov Ju. V., Shustov B. M., Shuvalov V. V., Birjukov E. E., Rybnov Ju. S., Marov M. Ja., Ryhlova L. V., Naroenkov S. A., Kartashova A. P., Harlamov V. A., Trubeckaja I. A. (2013) Astronomical and physical aspects of the Chelyabinsk event. (February 15, 2013). *Solar Syst. Res.* 47(4), 240—254.
16. *Catastrophic Events Caused by Cosmic Objects.* (2008). Eds V. V. Adushkin, I. V. Nemchinov. Dordrecht: Springer, XI, 357 p.
17. *The Chelyabinsk Meteorite — one year on the Earth: Proc. All-Russian Scientific Conference.* (2014). Eds N. A. Antipin, A. E. Dudorov, S. N. Zamozdra, S. V. Kolisnichenko, A. V. Kocherov, E. A. Shajgorodskij. Chelyabinsk: Kamennyi poyas Publ., 694 p. [in Russian].
18. Stulov V. P., Mirskii V. N., Vislyi A. I. (1995) *Aerodynamics of Bolides.* M.: Nauka Publ., 240 p. [in Russian].
19. *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
20. Chernogor L. F. (2012). *Physics and Ecology of Catastrophes: Monograph.* Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University [In Russian].
21. Chernogor L. F. (2013). Plasma, electromagnetic, and acoustic effects of the «Chelyabinsk» meteorite. *Inzhenernaja Fizika.* (8), 23—40 [In Russian].
22. Chernogor L. F. (2013). Physical effects of the Chelyabinsk meteorite passage. *DAN Ukraine,* 10, 97—104. [In Russian].
23. 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.* Chelyabinsk [In Russian].
24. Chernogor L. F. (2017). Atmospheric effects of the gas-dust plume of the Chelyabinsk meteoroid of 2013. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics,* 53(3), 259—268. <https://doi.org/10.1134/S0001433817030033>
25. Chernogor L. F. (2018). Magnetic and ionospheric effects of a meteoroid plume. *Geomagnetism and Aeronomy.* 58(1), 119—126.
26. 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> [In Russian].
27. Chernogor L. F. (2018). The physical effects of Romanian meteoroid. 2. *Space Science and Technology.* 24(2), 18—35. <https://doi.org/10.15407/knit2018.02.018> [In Russian].

28. 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>
29. Chernogor L. F. (2019). Physical Effects of the Lipetsk Meteoroid: 2. *Kinematics and Phys. of Celestial Bodies*. 2019. 35(5), 217—230.
30. Chernogor L. F. (2019). Physical Effects of the Lipetsk Meteoroid: 3. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*. 35(6), 271—285.
<https://doi.org/10.3103/S0884591319060023>
31. Chernogor L. F. (2022). Physical effects from the Yushu meteoroid. 1. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*. 2022. 38(3), 20—46.
32. Chernogor L. F. (2023). Physical Effects of the Yushu Meteoroid: 2. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*. 39(3), 123—136.
33. Chernogor L. F. (2023). Physical Effects of the Yushu Meteoroid: 3. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*. 39(3), 137—153.
34. Chernogor L. F. (2023). Physical Effects from the Kyiv Meteoroid. 1. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*. 39(5), 24—53.
35. 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.
36. Gorkavyi N. N., Taidakova T. A., Provornikova E. A. (2013). Aerosol plume after the Chelyabinsk bolide. *Solar Syst. Res.* 47(4), 275—279.
37. Grigoryan S. S. (2013). Physical mechanism of Chelyabinsk superbolide explosion. *Solar Syst. Res.* 47(4), 268—274.
38. Hills J. G., Goda M. P. (1993). The fragmentation of small asteroids in the atmosphere. *Astron. J.* 105(3), 1114—1144.
39. Huntten D. M., Turco R. P., Toon O. B., et al. (1980). Smoke and dust particles of meteoric origin in the mesosphere and stratosphere. *J. Atmos. Sci.* 37(6), 1342—1357.
40. Popova O. P., Jenniskens P., Emel'yanenko V., Kartashova A., Biryukov E., Khaibrakhmanov S., Shuvalov V., Rybnov Y., Dudorov A., Grokhovsky V. I., Badyukov D. D., Yin Q.-Z., Gural P. S., Albers J., Granvik M., Evers L. G., Kuiper J., Kharlamov V., Solovyov A., Rusakov Yu. S., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A. V., Larionov M. Yu., Glazachev D., Mayer A. E., Gislser G., Gladkovsky S. V., Wimpenny J., Sanborn M. E., Yamakawa A., Verosub K. L., Rowland D. J., Roeske S., Botto N. W., Friedrich J. M., Zolensky M. E., Le L., Ross D., Ziegler K., Nakamura T., Ahn I., Lee J. I., Zhou Q., Li X.-H., Li Q.-L., Liu Yu, Tang G.-Q., Hiroi T., Sears D., Weinstein I. A., Vokhmintsev A. S., Ishchenko A. V., Schmitt-Kopplin P., Hertkorn N., Nagao K., Haba M. K., Komatsu M., Mikouchi T. (2013). Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization. *Science*. 342. 1069—1073.
41. Popova O. P., Jenniskens P., Emel'yanenko V., Kartashova A., Biryukov E., Khaibrakhmanov S., Shuvalov V., Rybnov Y., Dudorov A., Grokhovsky V. I., Badyukov D. D., Yin Q.-Z., Gural P. S., Albers J., Granvik M., Evers L. G., Kuiper J., Kharlamov V., Solovyov A., Rusakov Yu. S., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A. V., Larionov M. Yu., Glazachev D., Mayer A. E., Gislser G., Gladkovsky S. V., Wimpenny J., Sanborn M. E., Yamakawa A., Verosub K. L., Rowland D. J., Roeske S., Botto N. W., Friedrich J. M., Zolensky M. E., Le L., Ross D., Ziegler K., Nakamura T., Ahn I., Lee J. I., Zhou Q., Li X.-H., Li Q.-L., Liu Yu, Tang G.-Q., Hiroi T., Sears D., Weinstein I. A., Vokhmintsev A. S., Ishchenko A. V., Schmitt-Kopplin P., Hertkorn N., Nagao K., Haba M. K., Komatsu M., Mikouchi T. (2013). Supplementary material for Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization. *Science*. 342. 146.

42. Schunk R. W., Nagy A. (2000). *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry*. Cambridge: Cambridge University Press, 554 p.

L. F. Chernogor

V. N. Karazin Kharkiv National University, Ukraine

PHYSICAL EFFECTS FROM THE KYIV METEOROID. 2

Comprehensive modeling studies of the thermal, turbulent and plasma processes induced in all geospheres by the passage and explosion of the Kyiv meteoroid on April 19, 2023 are performed. Thermodynamic and plasma effects, as well as the effects of the plume and turbulence, accompanying the passage of the Kyiv meteoroid were estimated. It has been shown that the passage of the Celestial body led to the formation of a gas-dust plume. The heated trail of the meteoroid cooled for several seconds. A simplified one-dimensional model of plume motion in the vertical direction is considered. The acceleration and speed of the plume are estimated. It has been shown that the initial acceleration of the plume initially reached a maximum value of 117 m/s^2 and lasted $\sim 1 \text{ ms}$. Its speed increased from 0 to $\sim 1 \text{ m/s}$, then gradually decreased to 0 m/s. At this speed, the height of the plume's ascent practically did not increase. The products of the explosion, contained in the thermic, specks of dust and aerosols, further took part in the following three processes: a slow precipitation to the surface of the Earth, turbulent mixing with the ambient air, and the transport by the predominant winds around the globe. The effect of turbulence in the trail has been shown to be well-pronounced, while the effect of magnetic turbulence has been shown to be absent. The following basic parameters of the plasma in the trail have been estimated: the height dependences of the electron densities per unit length and per unit volume, their relaxation times, the particle collision frequencies, the plasma specific conductivities, and the electron temperature relaxation time. At the initial moment, the linear and volume electron densities in the trail have been shown to be equal to about $10^{17} \dots 10^{23} \text{ m}^{-1}$ and $10^{17} \dots 10^{22} \text{ m}^{-3}$, respectively, and the plasma specific conductivity to be equal to $10^3 \text{ Ohm}^{-1} \text{ m}^{-1}$. The role of the dusty plasma component was insignificant.

Key words: Kyiv meteoroid, comprehensive simulation, thermodynamic effects, plume effects, turbulence effects, plasma effects.

Стаття надійшла до редакції 28.05.2023

Після доопрацювання 28.05.2023

Прийнята до друку 10.08.2023