

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2023.03.025>

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 метеороїда Юйшу. 3**

*Проведено комплексне моделювання процесів в усіх геосферах, викликаних падінням і вибухом метеороїда Юйшу у провінції Цинхай (Китайська Народна Республіка) 22 грудня 2020 р. Оцінено магнітні, електричні, електромагнітні, іоносферні та сейсмічні ефекти, а також ефекти акустико-гравітаційних хвиль. Показано, що магнітний ефект турбулентності був незначним. Магнітний ефект іоносферних струмів і струму у сліді метеороїда міг бути істотним (~ 1 нТл). За рахунок захоплення електронів у полі атмосферної гравітаційної хвилі магнітний ефект міг досягати порядку 1 нТл. Ефект зовнішнього електричного поля міг призводити до короткочасного імпульсу струму силою до  $10^4$  А. Електростатичний ефект міг супроводжуватися накопиченням заряду величиною 1...10 мКл, напруженістю електричного поля порядку 1 МВ/м. Протікання електричного струму у сліді могло призводити до випромінювання електромагнітного імпульсу в діапазоні частот порядку 10 кГц з напруженістю 3...30 В/м. Встановлено, що електромагнітний ефект інфразвуку міг бути істотним (приблизно 3...20 В/м і 10...60 нТл). Поглинання ударної хвилі на висотах динамо-області іоносфери (100...150 км) могло супроводжуватися генерацією вторинних атмосферних гравітаційних хвиль з відносною амплітудою 0.1...1. Проліт метеороїда призвів до утворення плазмового сліду, до помітного збурення не лише нижньої, але і верхньої атмосфери на відстанях не менше 1 тис. км. Виникнення електрофонного ефекту видається малоімовірним. Обговорюються можливості генерації іонного та магнітного звуку інфразвуком, а також градієнтно-дрейфової та дрейфово-дисипативної нестійкостей. Розглянуті в роботі магнітні, електричні й електромагнітні ефекти частково заповнюють прогалини в теорії фізичних ефектів метеороїдів у системі Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера. Магнітуда землетрусу, викликаного вибухом метеороїда, не*

перевищувала 2.5. Середня частота падіння космічних тіл, подібних до метеороїда Юйшу, дорівнює  $0.49 \text{ рік}^{-1}$ .

**Ключові слова:** метеороїд Юйшу, комплексне моделювання, магнітні ефекти, електричні ефекти, електромагнітні ефекти, іоносферні ефекти, сейсмічні ефекти, акустичні та атмосферні гравітаційні хвилі, акустичні ефекти, плазмовий слід.

## ВСТУП

Фізичним ефектам метеороїда Юйшу присвячено роботи автора [43, 44]. В двох частинах даної роботи описано механічні, газодинамічні, оптичні, термодинамічні та плазмові ефекти, а також ефект турбулентності, викликані польотом і вибухом метеороїда Юйшу [43, 44].

Мета третьої частини роботи — викладення результатів розрахунків і оцінок магнітних, електричних, електромагнітних, іоносферних і сейсмічного ефектів, а також ефектів акустико-гравітаційних хвиль, які супроводжували падіння метеороїда Юйшу.

Позначення в цій частині роботи такі самі, як у першій і другій частинах [43, 44].

Відомо, що перераховані ефекти для крупних метеороїдів як у теоретичному, так і в експериментальному планах вивчені недостатньо. У наявності є лише результати дослідження окремих ефектів [7—9, 14, 15, 46, 47, 60]. Раніше автором зроблено спробу оцінки всього комплексу ефектів для Челябінського, Румунського та Липецького метеороїдів [30, 31, 36, 37, 39—41]. Зауважимо, що в узагальнених роботах інших дослідників з вивчення Челябінського метеороїда [1, 2, 17, 61—63] магнітні, електричні, електромагнітні ефекти взагалі не розглядалися.

## МАГНІТНИЙ ЕФЕКТ ТУРБУЛЕНТНОСТІ

Як показано в роботі [44], в області вибуху метеороїда могло бути  $Re_m \geq Re_{mcr}$ . Це означає, що міг виникнути магнітний ефект турбулентності. Оцінимо його величину.

Оцінка магнітного збурення. Турбулентність у плазмовому сліді може призводити до хаотизації («закручування», «заплутування» [7]) магнітних силових ліній і до підсилення магнітного поля. Для оцінки цього ефекту, як і в інших роботах автора, будемо виходити з того, що щільності енергії турбулентного руху плазми  $\epsilon_t$  та магнітного поля  $\epsilon_m$  зрівнюються. З урахуванням того, що

$$\epsilon_t = m_i N_t^2 / 2, \quad (1)$$

$$\epsilon_m = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0}, \quad (2)$$

отримаємо

$$B = \sqrt{0 m_i N} \quad (3)$$

Тут  $m_i$  — маса іона. При  $N = N(0) = 10^{17} \dots 10^{21} \text{ м}^{-3}$   $m_i = 5 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$ ,  $t = 1400 \text{ м/с}$  отримаємо характерне значення

$$B(0) = \sqrt{0 m_i N(0)} \quad 0.11 \dots 11 \text{ мТл.}$$

Таке значення  $B(0)$  здається аномально великим. При  $z = 35 \dots 40 \text{ км}$  час становлення турбулентності  $t = 14.3 \dots 4.8 \text{ мс} \gg t_{N1} = 0.2 \dots 1.2 \text{ мс}$ . За цей час  $N(t)$  і  $B$  істотно зменшаться на висотах  $35 \dots 40 \text{ км}$ . При  $z = 45 \dots 75 \text{ км}$   $t \ll t_{N1}$ , і тут  $B(0) = 1.1 \cdot 10^{-4} \dots 5.5 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}$ . На рівні Землі для змінного магнітного поля  $B = B(0)(L_t / z) = 9 \dots 760 \text{ нТл}$ . Якщо ж поле віднести до квазістатичних, то індукція  $B = (0.63 \dots 144) \cdot 10^{-7} \text{ нТл}$ . Такі значення варіацій геомагнітного поля не можуть бути виміряні на поверхні Землі.

Оцінка ЕРС. Зміни магнітного поля у сліді повинні призводити до виникнення електрорушійної сили (ЕРС). Виходимо із співвідношення

$$E_{EMF} = \frac{d}{dt} S \frac{dB}{dt} \quad (4)$$

Тут  $S$  — потік індукції магнітного поля від магнітного диполя довжиною  $L_m$  та діаметром  $d_0$ . Замінімо вираз (4) оцінкою:  $E_{EMF} = B(0) S_m / t_N$ , де  $S_m = d_0 L_m$ ,  $t_N = \min[t_{N1}, t_{N2}]$ . На висотах  $z = 45 \dots 75 \text{ км}$   $L_m = z / \sin \theta = 344 \text{ км}$ ,  $S_m = 6.7 \cdot 10^6 \text{ м}^2$ ,  $B(0) = 0.11 \dots 5.5 \text{ мТл}$ ,  $t_{N1} = 5.2 \text{ мс} \dots 4.6 \text{ с}$  відповідно. Тоді для цих же висот  $E_{EMF} = 140 \dots 8 \text{ кВ}$ . Якщо електричні струми всередині сліду замикаються завдяки турбулентним вихорам із розміром  $L_t$  і площею перерізу  $S_t = L_t^2 = 38 \text{ м}^2$ , опір замикання

$$R_t = \frac{L_t}{S_t} = \frac{1}{L_t} = 1.6 \dots 0.16 \text{ мОм.}$$

де  $R_m = 100 \dots 1000 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$  і  $L_t = 6.2 \text{ м}$ . Тоді сила струму  $I_t = E_{EMF} / R_t$  виявляється аномально великою. У більш загальному випадку сила струму при цьому

$$I = \frac{E_{EMF}}{R_m R_t},$$

де  $R_m = L_m / S(z) = 18 \text{ Ом}$ ,  $R_t = 1.6 \dots 0.16 \text{ мОм}$ , тобто  $R_e = R_t$ . При оцінках  $R_m$  покладалося, що  $R_m = 640 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$ ,  $S(z) = 30 \text{ м}^2$ ,  $L_m = 344 \text{ км}$ . При  $E_{EMF} = 140 \dots 8 \text{ кВ}$  отримаємо  $I = 7.8 \dots 0.44 \text{ кА}$ .

Можливість реалізації цього механізму генерації ЕРС та струму залишається гіпотетичною.

## МАГНІТНИЙ ЕФЕКТ

У принципі можливі декілька механізмів виникнення магнітного ефекту крупних метеороїдів. Збурення геомагнітного поля можуть генеруватися за рахунок дипольного моменту космічних тіл і за рахунок діамагнітного збурення, яке привноситься ударною хвилею від космічного тіла, яке вибухає [7, 9]. Геомагнітні пульсації (квазіперіодичні варіації геомагнітного поля) можуть генеруватися за рахунок МГД-ефекту при періодичному русі іоносферної плазми у полі акустико-гравітаційної хвилі, яка генерується при прольоті та вибуху метеороїда [27—29, 35].

*Магнітний ефект іоносферних струмів.* Механізми генерації геомагнітних збурень, перераховані в роботах [7, 9], не можуть вважатися ефективними. Можливим механізмом є модуляція іоносферних струмів, точніше струмового струменя в динамо-області іоносфери. Остання перебуває в основному на висотах  $z = 100 \dots 150$  км. Модуляція відбувається за рахунок руху газу у полі акустичної хвилі від вибуху. З роторного рівняння Максвелла для амплітуди збурення індукції магнітного поля маємо [28]:

$$B = \frac{j_0}{k_a} - \frac{j_0 N}{k_a},$$

де  $j_0$  — щільність іоносферних струмів,  $j_0 N$  — збурення щільності іоносферних струмів і концентрації електронів на висотах динамо-області,  $k_a$  — хвильове число акустичної хвилі. Тут

$$k_a = \frac{2}{s T_{a0}},$$

де  $s$  — швидкість звуку. Припускаючи на висоті 125 км  $s = 400$  м/с,  $T_{a0} = 1 \dots 10$  с,  $N = p / p_0 = 0.1$ ,  $j_0 = 10^{-7}$  А/м<sup>2</sup>, отримаємо, що  $B = 0.8 \dots 8$  нТл. При цьому геомагнітний ефект дуже слабкий навіть поблизу струмового струменя.

У випадку модуляції струмового струменя атмосферною гравітаційною хвилею (АГХ) з періодом  $T_{a0} > 5$  хв амплітуда геомагнітного збурення [29]

$$B = j_0 N z,$$

де  $z = 30$  км — товщина динамо-області. При тих же значеннях  $N$  і  $j_0$  отримаємо  $B = 0.4$  нТл. Такий ефект може спостерігатися за допомогою сучасних наземних магнітометрів.

*Магнітний ефект АГХ.* Ефект виникає за рахунок захоплення електронів у полі АГХ. Оцінку величини ефекту зверху можна отримати з такого співвідношення:

$$B = e N z,$$

де  $e$  — заряд електрона,  $v$  — масова швидкість частинок в АГХ. При  $N = 10^{10} \text{ м}^{-3}$ ,  $v = 1 \dots 10 \text{ м/с}$  маємо  $B = 0.06 \dots 0.6 \text{ нТл}$ . Якщо  $N = 10^{11} \text{ м}^{-3}$ , то  $B = 0.6 \dots 6 \text{ нТл}$ .

Магнітний ефект електричного струму у сліді. При силі струму у сліді  $I$  на відстані  $R$  зі співвідношення

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

можна оцінити  $B$ . Наприклад, при  $I = 10^3 \dots 10^4 \text{ А}$ ,  $R = 100 \text{ км}$  отримаємо, що  $B = 2 \dots 20 \text{ нТл}$ . Магнітного ефекту у випадку його реалізації могло бути достатньо для його реєстрації наземними магнітометрами.

Схоже, що найбільш істотним міг бути механізм генерування магнітного ефекту, пов'язаний із захопленням електронів у полі АГХ.

## ЕЛЕКТРИЧНІ ЕФЕКТИ

Проблема електричних і магнітних явищ, які супроводжували падіння великих метеороїдів, на даний час вельми далека від рішення [8, 30, 37, 41]. Розглянемо низку можливих механізмів, які призводять до електричного ефекту.

Струм, зумовлений розділенням заряду. У роботі [8] вважається, що рух електронів у сліді відбувається на фоні іонів, які утворюються та відстають від тіла. Це повинно призводити до виникнення струму силою

$$I = e n_i v_i,$$

де  $v_i$  — швидкість метеороїда. При  $n_i = 10^{19} \dots 4 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ ,  $v_i = 14 \text{ км/с}$  маємо  $I = 2.2 \cdot 10^4 \dots 9 \cdot 10^7 \text{ А}$ . Така сила струму є аномально великою. Вона виникала б, однак, при повному розділенні зарядів у сліді, що не є можливим. Часткове ж розділення заряду виключати не можна. Тоді наведені вище значення сили струму являють собою оцінку зверху.

Ефект зовнішнього електричного поля. Плазмовий слід перебуває у постійному електричному полі атмосферного походження (полі ясної погоди). Біля поверхні Землі напруженість цього поля  $E_0(0) = 100 \text{ В/м}$  [4]. Як відомо, зі збільшенням висоти напруженість поля зменшується [4]:

$$E_0(z) = E_0(0) \exp(-z/H_E),$$

де  $H_E = 2.5 \dots 4 \text{ км}$ . Тоді при середньому значенні  $H_E = 3.5 \text{ км}$  на висотах  $z = 35 \dots 95 \text{ км}$  маємо  $E_0(z) = 4.5 \cdot 10^{-3} \dots 1.6 \cdot 10^{-10} \text{ В/м}$ .

Між кінцями сліду виникає різниця потенціалів

$$U = \int_L E_0 dl = \int_{z_1}^{z_2} E_0(z) \frac{dz}{\sin \theta} = \frac{E_0(z_1) H_E}{\sin \theta} [1 - e^{-(z_2 - z_1)/H_E}]. \quad (5)$$

При  $z_1 = 35$  км і  $z_2 = 95$  км з (5) маємо  $U = \frac{E_0(z_1)H_E}{\sin} = 1800$  В. При опорі сліду

$$R_m(z) = \frac{L}{(z)S(z)} \quad (6)$$

з (5) і (6) отримаємо, що

$$I = \frac{U}{R_m} = (z_e)E_0(z_e)S(z_e)\frac{H_E}{H} [1 - e^{-(z_2 - z_1)/H}].$$

При  $U = 1800$  В та  $R_m = 18$  Ом маємо  $I = 100$  А.

Ефект ударної хвилі. Проліт достатньо крупного метеороїда призводить до генерації ударної хвилі. При цьому на фронті іонізації згенеровано ЕРС [8]:

$$E_{EMF} = \frac{kT_i}{e} \ln \frac{N(0)}{N_0},$$

де  $T_i = 14000$  К — критична температура, яка визначає початок іонізації,  $N_0 = 10^6$  м<sup>-3</sup> — фонове значення концентрації  $N$  в атмосфері. При  $N(0) = 4 \cdot 10^{21}$  м<sup>-3</sup> оцінка дає  $E_{EMF} = 43$  В. Сила струму у сліді

$$I = \frac{E_{EMF}}{R_m + R_0},$$

де  $R_m = 18$  Ом — опір сліду,  $R_0$  — опір замикання електричного кола. Якщо  $R_m \gg R_0$ , сила струму у сліді за рахунок цього механізму буде вкрай незначною. Якщо ж прийняти, що замкнення йде через опір  $R_0 = R_i = 1.6 \dots 0.16$  мОм,  $I = (2.7 \dots 26.9) \cdot 10^4$  А.

Електростатичний ефект. Оцінимо електростатичний ефект метеороїда, спираючись на співвідношення з роботи [19].

Електричний заряд системи плазма + навколишнє повітря визначається балансом прямого та зворотного потоків електронів у цій системі [19]. Будемо вважати поверхню плазмової оболонки метеороїда кулею радіусом  $r_s$ . З неї витікають вперед електрони, які є більш рухомими, ніж іони. Витікання електронів буде тривати доти, поки позитивний заряд не почне повертати їх назад. При цьому швидкість витоку електронів, яка є близькою до швидкості метеороїда, стає рівною швидкості повернення електронів, які мають рухомість  $\mu_e$ , тобто

$$\mu_e E_s, \quad (7)$$

де  $E_s$  — напруженість електричного поля на поверхні плазмової оболонки. Зі співвідношення (7) визначається потенціал електричного поля відносно Землі:

$$E_s r_s = \frac{r_s}{\mu_e}. \quad (8)$$

Знаючи  $v$ , можна обчислити заряд  $q$  і енергію  $E$  електричного поля:

$$q = 4 \pi \epsilon_0 r_s^2 \frac{4}{e} r_s^2, \quad (9)$$

$$E = q \frac{4}{2} \frac{0}{e} r_s^3, \quad (10)$$

де  $\epsilon_0$  — електрична стала. Важливо, що  $q \propto r_s^2$ , а  $E \propto r_s^3$ .

Покладемо для метеороїда Юйшу  $r_s = 3.1 \dots 9.3$  м,  $v = 13.6$  км/с,  $\epsilon_e = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$  [19] в діапазоні висот 35...40 км відповідно. Тоді з виразів (7)—(10) для цього ж діапазону висот отримаємо, що  $E_s = 4.5$  МВ/м,  $q = 14 \dots 42$  мКл і  $E = 0.06 \dots 1.83$  МДж. Додамо, що пробій ідеально чистого повітря біля поверхні Землі настає при  $E_s = 3$  МВ/м, а «брудного» повітря — при  $E_s = 1$  МВ/м. Таким чином, при прольоті метеороїда Юйшу цілком міг виникнути слабкий розряд блискавки, енергія якого порівняно невелика (0.1... 1 МДж).

### ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ЕФЕКТИ

Як уже відзначалось, механізми виникнення електромагнітних ефектів при падінні великих космічних тіл як у теоретичному, так і особливо в експериментальному планах вивчено поки що недостатньо (див., наприклад, [8, 14, 15, 30, 31, 37, 41]). Далі розглянемо можливі механізми генерації електромагнітних процесів, викликаних рухом метеороїдів, і оцінимо величину ефектів.

Імпульс електричного поля. Різка зміна магнітного поля у сліді супроводжується генерацією імпульсу електричного поля. З рівняння Максвелла

$$\text{rot} \mathbf{E} = - \frac{\mathbf{B}}{t},$$

заміняючи похідні оцінкою, маємо оцінку напруженості електричного поля:

$$E = \frac{B(0)}{2 t_{N1}}. \quad (11)$$

Покладаючи, що  $B(0) = 0.11 \dots 5.5$  мТл,  $t_{N1} = 5$  мс...5 с,  $L_e = 2L_e$

34.4 км — довжина електромагнітної хвилі (див. далі), отримаємо  $E = 120 \dots 6$  В/м для висот 45...75 км відповідно. Імпульс електричного поля за рахунок цього механізму був значним, хоча й короточасним (порядку  $t_{N1}$ ). Якщо в (11) замість  $t_{N1}$  використати  $t = 5$  мс, то на всіх висотах  $E = 120$  В/м.

Електромагнітне випромінювання сліду. При протіканні у сліді метеороїда струму силою  $I$  виникає імпульс електромагнітного поля з

амплітудою напруженості електричного поля  $E_I$ . Припустимо, що випромінювач являє собою елементарну антену типу диполя Герца, тоді  $E_I$  дається співвідношенням [11, 30]:

$$E_I = \frac{0IIf}{2R},$$

де  $l$  — довжина випромінювача,  $f = c/\lambda$  — частота електромагнітного поля. Наприклад, при  $I = 1 \dots 10$  кА,  $l = L_e = 17.2$  км,  $f = 8.7$  кГц і  $R = 35$  км маємо  $E_I = 2.7 \dots 27$  В/м.

Потужність випромінювання [11, 30] дорівнює

$$P = \frac{1}{3} Z_0 I^2 \left( \frac{l}{\lambda} \right)^2,$$

де  $\lambda$  — довжина хвилі випромінювання,  $Z_0 = 120$  Ом — опір вільного простору. Із співвідношення для  $P$  видно, що при  $(l/\lambda)^2 \ll 1$  потужність випромінювання невелика. Провідник зі струмом довжиною  $l$  ефективно випромінює при  $l = \lambda/2$ . Покладаючи, що  $l_{\min} = L_e = 17.2$  км, а  $l_{\max} = H / \sin \theta = 86$  км, отримаємо, що  $\lambda = 34 \dots 172$  км і  $f = 8.8 \dots 1.7$  кГц.

Якщо  $I = 1 \dots 10$  кА і  $l = \lambda/2$ , потужність випромінювання  $P = 0.1 \dots 10$  ГВт. При цьому у випромінювання перетворюється доля потужності  $P_L = 6.35$  ТВт [43]

$$\eta = \frac{P}{P_L} = 1.6 \cdot 10^{-3} \dots 0.16 \%$$

Імпульс електромагнітного поля тривав, доки провідність, а значить  $N(t)$ , у сліді були достатньо великими, тобто при  $t = 5$  мс...5 с. Спектр цього імпульсу займав смугу частот  $\nu = 0.2$  кГц...0.2 Гц.

*Електромагнітний ефект інфразвуку.* Встановлено, що вплив на геосфери цілої низки високоенергійних джерел призводить до генерації синхронних збурень акустичного та геоелектричного (атмосферного) полів [20, 21, 37, 41]. До таких джерел відносяться: рух атмосферного фронту та сонячного термінатора, сонячні затемнення, мікробароми та ін. [20, 21, 37, 41]. Важливо, що при цьому спостерігається приблизна пропорційність амплітуди збурень атмосферного електричного поля  $E_a$  та амплітуди тиску  $p$ . Механізм генерації збурень електричного поля пов'язаний, скоріше за все, з варіаціями щільності об'ємного заряду  $\rho_{el}$  у приземній атмосфері (висоти 10...100 м) при періодичних змінах тиску повітря у полі інфразвукової або ударної хвилі [20, 21, 37, 41]. Оцінимо величину  $E_a$ .

Із рівняння Максвелла

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = \frac{\rho_{el}}{\epsilon_0}$$

отримаємо співвідношення для оцінки амплітуди:



$$\frac{E_a}{L_z} = \frac{eI}{0}, \quad (12)$$

де  $L_z = \min\{L_a, k_a^{-1}, H_E\}$ . Тут  $L_t = 10...100$  м — товщина приземного шару атмосфери з об'ємним електричним зарядом  $eI_0$ ,  $k_a$  — хвильове число інфразвуку,  $H_E = 2.5...4$  км — характерний висотний масштаб зміни  $E$ . При періоді інфразвуку  $T > 0.2...2$  с маємо  $L_z = L_a = 10...100$  м. Оскільки заряджений компонент у приземній атмосфері є малою домішкою, зміна  $eI$  становить

$$eI = eI_0 \frac{N_n}{N_{n0}} = eI_0 \frac{p}{p}. \quad (13)$$

Тоді з (12) і (13) випливає, що

$$E_a = \frac{eI_0 L_a}{0} \frac{p}{p}, \quad (14)$$

тобто амплітуда  $E_a$  дійсно пропорційна надлишковому тиску  $p$ .

Надлишковий тиск  $p$  для метеороїда Юйшу поблизу епіцентру дорівнює 50 Па і 310 Па для вибухових хвиль сферичного та циліндричного типів відповідно [43]. При  $eI_0 = 5 \cdot 10^{-10}$  Кл/м<sup>3</sup>,  $L_a = 100$  м,  $p = 10^5$  Па зі співвідношення (14) маємо  $E_a = 2.8...17.5$  В/м. Для порівняння вкажемо, що для Челябінського метеороїда  $p = 1...2$  кПа та значення  $E_a$  були набагато більшими. Як відомо, незбурене електричне поле (поле ясної погоди) біля поверхні Землі зазвичай є близьким до 100 В/м. При чутливості електрометрів 0.01 В/м реєстрація збурень приземного електричного поля, викликаного акустичною хвилею від метеороїда Юйшу, була легко здійснюваною.

Поширення інфразвуку вздовж поверхні Землі супроводжувалось біжучою хвилею збурення електричного поля з частотою інфразвуку та амплітудою  $E_a$  (див. вираз (14)). Періодичні варіації  $p$  у полі інфразвуку викликали періодичні зміни  $E$ . При цьому слід було очікувати періодичних варіацій магнітного поля. Оцінимо амплітуду індукції магнітного поля  $B_a = \mu_0 H_a$ . З рівняння Максвелла

$$\text{rot}\mathbf{H} = \frac{\mathbf{E}}{t}$$

для амплітуди  $B_a$  маємо

$$B_a = \frac{\mu_0}{k} E_a = \frac{E_a}{kc^2} = \frac{E_a}{c}, \quad (15)$$

де  $k = \omega/c$  — хвильове число електромагнітного поля. У виразі (15) враховано, що  $|\text{rot}\mathbf{B}| = kB_a$ ,  $|\mathbf{E}/t| = E_a$ . Якщо  $E_a = 2.8...17.5$  В/м, то  $B_a = 9.3...58.3$  нТл. Такий ефект можна було легко зареєструвати.

Генерація іонного та магнітного звуку інфразвуком. Як відзначалося у першій частині роботи автора [43], амплітуда інфразвуку на висотах більших за 100 км залишалась достатньо великою, щоб створити передумови для перетворення енергії інфразвуку в енергію іонно-звукової хвилі. Таке перетворення стає можливим завдяки тому, що в діапазоні висот 60...130 км електрони на відміну від іонів є замагніченими. Виникає роздільний рух електронів та іонів, що й сприяє генерації іонного звуку з частотою інфразвуку. Для метеороїда Юйшу ця частота становить 0.1...1 Гц.

Як відомо, в діапазоні висот 130...150 км газокінетичний тиск стає сумірним із магнітним тиском, який становить порядку 1 мПа. При цьому інфразвукова хвиля може трансформуватися у магнітозвукову хвилю, яка може досягати магнітосфери та тим самим забезпечувати взаємодію підсистем у системі Земля (внутрішні оболонки) — атмосфера — іоносфера — магнітосфера (ЗАІМ).

З іншого боку, частина енергії магнітозвукової хвилі може каналюватися у F-області іоносфери та поширюватися вздовж цієї області зі швидкістю 20...40 км/с. Проходячи значні відстані, магнітозвукова хвиля на висотах 130...150 км може зворотно трансформуватися в інфразвук.

Генерація нестійкостей. Вище 100 км інфразвукова хвиля стає нелінійною, оскільки тут  $p / \rho > 0.1...0.2$ . При цьому її профіль поступово стає пилоподібним. На крутому фронті може генеруватися градієнтно-дрейфова нестійкість іонного звуку з тією ж частотою (періодом 1...10 с). За рахунок іоносферного електричного поля з напруженістю 0.1...1 мВ/м в результаті дрейфово-дисипативної нестійкості у напрямку, перпендикулярному до напрямку іонно-звукової хвилі, може генеруватися короткоперіодна (з періодом  $T \ll 1...10$  с) іонно-звукова хвиля. За нашими оцінками, її частота може дорівнювати 10...100 МГц.

Очевидно, розглянуті вище електричні, магнітні та електромагнітні ефекти не можуть претендувати на закінченість теорії електромагнітних явищ, які генеруються метеороїдами. У майбутньому слід ще розвинути відповідну теорію та проранжувати за величиною основні ефекти. Тут же додамо, що всі електромагнітні ефекти тісно пов'язані з плазовими процесами.

## ЕФЕКТ АКУСТИКО-ГРАВІТАЦІЙНИХ ХВИЛЬ

Рух метеороїда в атмосфері призводить до генерації хвиль щільності в широкому діапазоні частот: від акустичних частот порядку 1 кГц до частот, які відповідають АГХ (1...3 мГц). Ще до вибуху космічного тіла до енергії акустичних ( $E_{ac}$ ) і внутрішніх гравітаційних ( $E_g$ ) хвиль перетворюється близько 1 та 0.2 % кінетичної енергії метеороїда [14]. При  $E_k = 40$  ТДж маємо  $E_{ac} = 0.4$  ТДж,  $E_g = 80$  ГДж.

Генерація акустичних хвиль. За нашими оцінками при вибуху метеороїда Юйшу в енергію ударної хвилі могло трансформуватися близько 80 % його кінетичної енергії. Тоді  $E_{ac} = 32$  ТДж. На достатньо великих віддаленнях від місця вибуху енергія вибухової ударної хвилі перетворюється в енергію акустичних хвиль. При ефективній тривалості вибухової ударної хвилі в місці її генерації  $T_a = 57$  с енергії  $E_{ac}$  відповідає середня потужність близько 560 ГВт.

Період акустичних хвиль  $T_{a0}$  з найбільшою амплітудою пов'язаний із енергією джерела  $E_{ac}$  співвідношенням [13, 52]

$$E_{ac} = 2 \frac{T_a^{3.34}}{T_{a0}}, \quad T_{a0} = 5.92 \text{ с}, \quad (16)$$

де  $E_{ac}$  виражається в кілотоннах ТНТ, а  $T_a$  — в секундах. Покладаючи  $E_{ac} = 32$  ТДж  $= 7.65$  кт ТНТ, з (16) отримуємо, що  $T_a = 8.8$  с.

Формула (16) справедлива для приземних вибухів. При вибуху на висоті  $z_e$  співвідношення (16) спробуємо замінити таким [30]:

$$E_{ac} \frac{p(0)}{p(z_e)} = 2 \frac{T_0^{3.34}}{T_{a0}}, \quad (17)$$

де  $p(0) = 10^5$  Па,  $p(z_e) = 940$  Па. Тоді з (17) отримуємо, що  $T_a = 6T_{a0} = 36$  с.

Далі інших відстаней (аж до глобальних) поширюються хвилі з максимальним періодом [28]:

$$T_{\max} = 4.3T_a = 155 \text{ с} = 2.6 \text{ хв.}$$

При цьому в енергію хвиль із періодом  $T_a = T_{\max}$  переходить близько 10 % енергії вибуху.

Генерація АГХ. Ці хвилі можуть генеруватися як прямим, так і непрямым способом. У першому випадку їхнім джерелом служить рух космічного тіла та пов'язані з цим ударні хвилі (балістична та вибухова). Розмір збуреної ударними хвилями області атмосфери відносно невеликий (див. вище), та ефективність генерації АГХ при цьому порівняно низька. Оцінки за формулами з роботи [10] дають  $E_g$

$$E_g = 80 \text{ ГДж}, \quad \text{а} \quad E_g / E_{k0} = 0.2 \text{ \%}.$$

У другому випадку механізм генерації може бути таким. Відносний надлишковий тиск у фронті ударної хвилі зі збільшенням висоти збільшується (див. табл. 5 і 7 в роботі [43]). При  $p / p_0 > 0.2$  спектр ударно-хвильового сигналу (інфразвуку) поступово збагачується вищими гармоніками, які сильніше поглинаються, ніж основна гармоніка, виникає дисипація енергії акустичної хвилі та нагрів атмосфери. Нагріта область атмосфери служить джерелом вторинних АГХ. Оцінимо її параметри.

Із геометричних міркувань випливає, що нагріту інфразвуком область атмосфери з висоти вибуху метеороїда видно під кутом  $2\alpha$ , де дається співвідношенням

$$\cos \alpha = \frac{z_1 - z_e}{z_2 - z_e}.$$

Тут  $z_1$  і  $z_2$  — висоти початку та закінчення нагрівання. При  $z_1 = 100$  км,  $z_2 = 150$  км і  $z_e = 35$  км маємо  $\alpha = 56^\circ = 0.97$  рад. Горизонтальний радіус нагрітої області змінюється від  $R_1 = (z_1 - z_e) \operatorname{tg} \alpha = 96$  км до  $R_2 = (z_2 - z_e) \operatorname{tg} \alpha = 170$  км. При цьому довжина АГХ змінюється від  $2R_1$  до  $2R_2$ , тобто у межах 190...340 км. При середній швидкості звуку  $v_s = 400$ ...450 м/с на висотах 100...150 км маємо для періоду АГХ  $T = 7.9$ ...12.6 хв відповідно.

Енергію АГХ можна оцінити із таких міркувань. Нехай

$$E_g = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 E_{k0},$$

де  $\alpha_1 = 0.6$  — доля енергії  $E_{k0}$ , яка перетворюється в енергію інфразвуку,  $\alpha_2 = \frac{S}{4\pi R^2} = 0.20$  — доля енергії в тілесному куті

$$\frac{S}{(z_2 - z_e)^2} = 2 \frac{z_2 - z_1}{z_2 - z_e} = 0.87,$$

$\alpha_3$  — доля енергії інфразвуку, який поглинається шаром атмосфери товщиною  $z_2 - z_1$ ,  $\alpha_4$  — доля поглиненої енергії інфразвуку, яка перетворюється в енергію АГХ. Тут  $S = 2(z_2 - z_e)(z_2 - z_1)$  — площа верхньої частини кульового сегмента радіусом  $z_2 - z_e$  і висотою  $z_2 - z_1$ . Покладаючи  $\alpha_3 = 0.5$ ,  $\alpha_4 = 1$ , отримаємо, що  $\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 = 0.06$ , а  $E_g = 2.4$  ТДж.

Далі оцінимо теплову енергію  $E_T$  в нагрітому об'ємі:

$$E_T = \int_V \rho_T dV = C_0 \int_V T_0 dV,$$

де  $\rho_T = C_0 T_0$  — щільність теплової енергії незбуреного повітря,  $T_0 = 210$  К — незбурена температура атмосфери на висоті  $z_1 = 100$  км,  $\rho_0 = 10^{-6}$  кг/м<sup>3</sup> — щільність атмосфери на висоті  $z_1$ ,  $C_0 = 1000$  Дж/(кг К) — питома теплоємність повітря при сталому тиску. Оцінка  $E_T$  матиме вигляд

$$E_T = C_0(z_1) T_0(z_1) R_1^2 H.$$

При  $R_1 = 100$  км,  $H = 7$  км маємо  $E_T = 46$  ТДж. Тоді відносне збурення температури

$$\frac{T}{T_0} = \frac{E_g}{E_T} = 0.052.$$

**Таблиця 1. Висотні залежності параметрів атмосфери, а також теплової та хвильової енергії для збурень циліндричного (сферичного) типу**

$z$ , км	$\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	$T_0$ , К	$T$ , МДж/м <sup>3</sup>	$w$ , МДж/м <sup>3</sup>	$w/T$
100	$10^{-6}$	300	300	74 (10)	24.7 (3.33)
120	$10^{-7}$	310	34	88 (21)	259 (62)
150	$10^{-8}$	350	3.5	36 (25)	1000 (714)
200	$10^{-9}$	600	0.6	5 (3.4)	830 (567)
300	$10^{-10}$	900	0.09	0.56 (0.2)	622 (222)

На висотах 120 і 150 км, де  $\rho_0$  дорівнює  $10^{-7}$  та  $10^{-8}$  кг/м<sup>3</sup>, значення  $T/T_0$  з урахуванням загасання інфразвуку мають порядок 10 та 100 % відповідно. При цьому відносний тиск у АГХ такого ж порядку. Враховуючи, що АГХ каналується у хвилеводі на висотах 100...200 км, відносна амплітуда АГХ залишається достатньо великою (3...30 %) на відстанях близько 1000 км.

Значення питомої хвильової енергії  $w$  та теплової енергії  $T$  приведено в табл. 1. Тут

$$w = \frac{p^2}{\rho_0} \frac{2}{s} \frac{p^2}{P_0}$$

Вважається, що нагрівання атмосфери інфразвуком вище 150 км неможливе через його поглинання в діапазоні висот 100...150 км.

Можливість електрофонного ефекту. Як відомо, під електрофонним ефектом розуміється чутність людиною звуку під час прольоту великих космічних тіл ще до того, як акустичне збурення, яке генерується рухом тіла, встигає досягти спостерігача [18]. Строгу теорію цього явища досі не розроблено, хоча спроби робилися багаторазово [46, 47, 53—60]. У літературі обговорюються три можливі механізми, здатні якісно пояснити електрофонний ефект [14, 15, 18].

1. Космічне тіло при падінні набуває електричного заряду, під дією якого з поверхні землі виникає стікання заряду протилежного знаку. Останнє супроводжується акустичним ефектом. За оцінками стікання заряду починається при напруженості електричного поля порядку одиниць кВ/м. У випадку метеороїда Юйшу напруженість могла досягати 4.5 МВ/м (див. вище), однак велика висота вибуху навряд чи допускає реалізацію цього механізму.

2. Електромагнітні хвилі звукового діапазону за рахунок п'єзоелектричного ефекту у предметах, що оточують спостерігача, або в самій людині можуть перетворюватися на звук. За оцінками при  $f \sim 1...10$  кГц напруженість електричного поля має бути не менше сотень В/м. Такі поля виникають на поверхні Землі при силі струму у сліді  $I \sim 5 \cdot 10^4$  А, який навряд чи виникав під час прольоту метеороїда Юйшу.

3. Розпад дисипативних градієнтно-дрейфових та іонно-циклотронних нелінійних хвиль внаслідок втрати стійкості, яка супровод-

жується генерацією електромагнітного шуму в діапазоні частот 10... 1000 Гц. Високочастотна частина шуму після перетворення на акустичний шум могла реєструватися як електрофонний ефект [15]. Цей механізм міг реалізовуватися під час прольоту Челябінського метеороїда. Незрозуміло, проте, якою є роль цього механізму при падінні метеороїда Юйшу.

Таким чином, при падінні метеороїда Юйшу жоден із механізмів не міг мати місце. Автору невідомі повідомлення свідків про електрофонний ефект.

### ІОНОСФЕРНІ ЕФЕКТИ

Вплив на іоносферу може здійснюватися кількома каналами [30, 31, 34, 35, 45]. По-перше, через потік нагрітої речовини вздовж плазмового пюму. По-друге, за допомогою ударної хвилі. По-третє, на іоносферу впливає електромагнітне випромінювання, яке генерується слідом (див. вище). По-четверте, за рахунок механізму, описаного у роботі [15].

*Ефект іонізованого сліду.* Ефекти плазмового пюму в іоносфері при падінні метеороїда Юйшу були, швидше за все, незначними через відносну малість енергії вибуху та положу траєкторію. Якщо плазмовий пюм все ж виникав, тоді плазмовий слід простягався за висотою не більше ніж на 7...8 км.

Результати розрахунку початкової лінійної  $i(0)$  та об'ємної концентрації електронів  $N(0)$  за співвідношеннями [6, 30, 37, 41]

$$i(0) = \frac{i}{M_m} \frac{C_h}{2Q} S,$$

$$N(0) = \frac{i}{M_m} \frac{C_h}{2Q} S^2$$

викладено в табл. 2. У цій таблиці також перераховано часи становлення концентрації електронів за рахунок амбіполярної дифузії  $t_D$ , прилипання електронів до молекул кисню та рекомбінації з метеорними іонами:

$$t_D = \frac{d_0^2}{D},$$

$$t_{N10} = (k_{a0} N_0^2 [\text{O}_2])^{-1},$$

$$t_{N20} = (r_0 N(0))^{-1},$$

де індекс «0» позначає незбурені умови,  $d_0$  — початковий розмір метеороїда,  $D$  — коефіцієнт амбіполярної дифузії,  $r_0 = 2 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$ . Для простоти вважалось, що  $T = T_0$  та  $N_0 = N(0)$ . Це справедливо на висотах, більших за 75...80 км, де відсутня балістична ударна хвиля.

**Таблиця 2.** Висотні залежності основних параметрів атмосфери та іоносфери у сліді метеороїда

$z$ , км	$i(0)$ , м <sup>-1</sup>	$N(0)$ , м <sup>-3</sup>	$D$ , м <sup>2</sup> /с	$t_{N1}$ , с	$t_{N2}$ , с	$t_D$ , с
300	$3.7 \cdot 10^{14}$	$1.2 \cdot 10^{13}$	$1.6 \cdot 10^4$	–	0.42	0.0024
200	$3.7 \cdot 10^{15}$	$1.2 \cdot 10^{14}$	1700	–	0.042	0.023
150	$3.7 \cdot 10^{16}$	$1.2 \cdot 10^{15}$	76	–	$4.2 \cdot 10^{-3}$	0.5
120	$3.7 \cdot 10^{17}$	$1.2 \cdot 10^{16}$	30	–	$4.2 \cdot 10^{-4}$	1.3
100	$7.8 \cdot 10^{18}$	$2.3 \cdot 10^{17}$	12	$3.9 \cdot 10^5$	335	3.2
80	$1.1 \cdot 10^{20}$	$3.7 \cdot 10^{18}$	1	310	21	38.4
60	$1.6 \cdot 10^{21}$	$5.4 \cdot 10^{19}$	0.1	0.5	1.4	384

Нижче 75 км вважалось  $T = 4300$  К. З табл. 2 видно, що на висотах  $z = 100 \dots 200$  км іонізаційний слід релаксує в основному за рахунок рекомбінації. В діапазоні висот 35...65 км концентрація  $N$  релаксує в основному за рахунок прилипання, а вище — за рахунок рекомбінації. Починаючи з висоти 200 км, починає переважати амбіполярна дифузія над рекомбінацією.

Іоносферний ефект ударної хвилі. Ударна хвиля призводить до рухомого фронту підвищеної концентрації електронів  $N$ . Відносне збурення останньої  $N$  можна оцінити за відносним збуренням тиску  $p = p / p_0$ . При грубій оцінці  $N \approx p$ . Результати розрахунку  $p$  на іоносферних висотах наведено у табл. 5 та 7 у роботі [43]. Над епіцентром вибуху слід було очікувати значень  $N = 0.1 \dots 0.3$ .

Рух ударної хвилі є джерелом рухомих іоносферних збурень в діапазоні АГХ (див. вище). Їхні прояви для Челябінського та Липецького метеороїдів описано в роботах [39, 41].

Ефект електромагнітного імпульсу. Генерація електромагнітного імпульсу іонізованим слідом достатньої інтенсивності може призводити до збурення іоносфери та пробою атмосфери. При  $(2f)^2 \epsilon_0$  напруженість електричного поля пробою дається співвідношенням [5]

$$E_{cr}(z) = E_{cr}(0)e^{-z/H},$$

де  $E_{cr}(0) = 3$  МВ/м. Час пробою при  $E = E_{cr}$  дається таким виразом [5]:

$$t_{cr} = t_{cr}(0)e^{z/H}.$$

Тут  $t_{cr}(0) = 0.02$  мкс.

Результати розрахунку  $E_{cr}$  та  $t_{cr}$  наведено в табл. 3. Для пробою атмосфери на висотах 95...105 км (поле імпульсу вище не проникає через відбиття на границі іоносфери) потрібно  $E_{cr} = 5 \dots 1$  В/м відповідно. Оскільки при  $R = 50$  км  $E = 2 \dots 10$  В/м, тоді  $E < E_{cr}$ , тому пробій електромагнітним імпульсом був можливий.

Крім пробою атмосфери в нижній частині іоносфери ( $z = 80 \dots 100$  км), відбувається нагрівання електронів, зміна коефіцієнта прили-

Таблиця 3. Параметри, які описують пробій атмосфери

$z$ , км	$n_{e0}$ , $10^6 \text{ c}^{-1}$	$E_{cr}$ , В/м	$t_{cr}$ , мс	$t_{Te}$ , мс
80	2	30	2	0.07...0.11
85	1.1	17	1.2	0.08...0.12
90	0.63	9	7	0.09...0.14
95	0.35	5	12	0.38...0.68
100	0.2	3	20	1.7
105	0.11	1	34	3

пання  $n_e(T_e)$  та зменшення коефіцієнта рекомбінації  $\alpha_r(T_e)$  електронів з іонами  $\text{NO}^+$  та  $\text{O}_2$  [12, 33]. Час становлення процесу рекомбінації значно перевищує тривалість електромагнітного імпульсу, тому порушення іонізаційно-рекомбінаційного процесу помітної ролі не відіграє.

Нагрів електронів стає істотним при  $E = E_p$ , де в гіротропній іоносфері при квазіповздовжньому поширенні радіохвилі та її частоті  $f = f_B$

$$E_p^2 = \frac{3kT_{e0} m_{en} \left( \frac{2}{B} \frac{2}{en} \right)}{e^2}.$$

Тут  $E_p$  — плазмове поле [12, 33],  $T_{e0}$  — температура електронів у незбуреній плазмі,  $f_B = 8.5 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$  — гірочастота електронів, точніше її «повздовжня» складова. Важливо, що в нижній іоносфері  $E_p = 0.3$  В/м, тобто  $E_p \ll E_a = 2 \dots 10$  В/м. Це значить, що нагрів електронів біля границі іоносфери міг бути значним.

Нагрів електронів описується системою рівнянь [33]

$$\frac{d}{dt} n_e(z) = n_e(z) \left( 1 - \frac{E^2}{E_p^2} A(z) \right) - n_e(z), \quad (18)$$

$$\frac{dE}{dz} - \frac{1}{c} (v, z) E = 0. \quad (19)$$

Тут

$$T_e / T_{e0} = n_e(z) / n_{e0} \left( 1 - 0.014 \cdot 2^{(45)^{5/5}} \right),$$

$$n_e(z) = n_{e0}^{5/6}, \quad A(z) = \frac{\frac{2}{B} \frac{2}{en0}}{\frac{2}{B} \frac{2}{en(z)}},$$

— показник поглинання радіовипромінювання. Система рівнянь (18), (19) розв'язувалась числовими методами. Виявилось, що при  $E(z_e)$  порядку  $10 \dots 100$  кВ/м напруженість поля поблизу нижньої границі іоносфери могла перевищувати поле пробою, розрахунки якого наведено в табл. 3. На цих висотах значення  $n_e$  могли дорівнювати порядку 10.



Значний нагрів електронів на границі іоносфери призводить до збільшення  $\sigma_{en}(T_e) = \sigma_{en}(T_{e0})(T_e / T_{e0})^{5/6}$  [12, 33], а значить до збільшення показника заломлення плазми з горизонтальним розміром у сотні кілометрів. Таке утворення може слугувати фокусувальною лінзою для радіовипромінювання в широкому діапазоні частот.

Генерація альвенівського імпульсу та МГД-хвиль. Різка зміна провідності плазми на границі іоносфери внаслідок збурення  $\sigma_{en}$  та  $N$  призводить до генерації альвенівського імпульсу [16]. За оцінками, при прольоті метеороїда Юйшу амплітуда імпульсу становила 0.1...1 мВ/м. Як відомо, альвенівська хвиля поширюється вздовж магнітної силової лінії, досягаючи магнітосфери та магнітоспряженої області, стимулюючи взаємодію підсистем у системі ЗАІМ.

Нестаціонарний плазмовий слід метеороїда, взаємодіючи з геомагнітним полем, також є джерелом магнітогідродинамічних хвиль, які можуть поширюватися в іоносфері та магнітосфері. Внаслідок взаємодії цих хвиль з високоенергійними електронами радіаційного поясу Землі можуть виникнути висипання електронів в атмосферу та її додаткова іонізація [22, 24, 25, 28, 36, 49, 63].

Так могли виникнути канали впливу метеороїда Юйшу на магнітосферу.

Можливість фотоіонізації. У роботах [14, 15] оцінюється можливість фотоіонізації молекул NO під час прольоту Челябінського метеороїда. Ці молекули мають низький потенціал іонізації, а їхня концентрація в E-області іоносфери може досягати  $(1...3) 10^{14} \text{ м}^{-3}$ . За оцінками [14, 15] на висоті 105 км міг виникнути іонізований слід із концентрацією  $N$  до  $2 10^{10} \text{ м}^{-3}$  завдовжки близько 100 км. Для порівняння вкажемо, що в нічний час фонове значення  $N_0 = (0.3...1) 10^{10} \text{ м}^{-3}$ . Тоді  $N / N_0 = 6.7...2$ . Враховуючи, що енергія метеороїда Юйшу була приблизно в 46 разів менша за енергію Челябінського космічного тіла, величина додаткової іонізації навряд чи перевищувала  $10^8 \text{ м}^{-3}$ . В цьому випадку  $N / N_0 = 0.3...1 \%$ , і ефект фотоіонізації практичного значення не мав, а отже й не генерувалися пов'язані з ним нестійкості [14, 15].

## СЕЙСМІЧНИЙ ЕФЕКТ

Біля поверхні Землі акустична енергія та щільність її потоку дорівнюють

$$ac = \frac{p^2}{2 \rho_s},$$

$$ac = \rho_s \frac{p^2}{2}.$$

Покладаючи для величини  $p$  значення 50 і 310 Па для вибухової хвилі сферичного та циліндричного типів відповідно,  $\rho_s = 330 \text{ м/с}$  і

$\rho_0 = 1.3 \text{ кг/м}^3$ , отримаємо значення  $E_{ac}$ , близькі до 6 або 220 Дж/(м<sup>2</sup>с). При площі впливу ударної хвилі  $S_a = 1000 \text{ км}^2$  і тривалості впливу  $t_a = 57 \text{ с}$  маємо оцінку енергії ударної хвилі біля поверхні Землі, яка викликає землетруси,  $E_{ac} = 32 \text{ ТДж}$ . В енергію сейсмічних хвиль  $E_{sw}$  переходить близько  $10^{-5}$  енергії ударної хвилі від приземного вибуху [13]. При цьому  $E_{sw} = 3.2 \cdot 10^8 \text{ Дж}$ . Такому значенню  $E_{sw}$  відповідає магнітуда землетрусу  $M$ , яка дається таким співвідношенням [13]:

$$\lg E_{sw} = 4.8 + 1.5M.$$

Звідси  $M = 2.5$ . Землетруси із такою магнітудою слабо відчуються людиною.

### ЧАСТОТА ПАДІНЬ КОСМІЧНИХ ТІЛ

Частота падіння космічних тіл або інтервал часу  $T$  між падіннями залежить від їхньої початкової кінетичної енергії  $E_k$ . При цьому число падінь тіл протягом одного року надається відомим співвідношенням [13, 48]:

$$\lg N_s = 0.5677 + 0.9 \lg E_k,$$

де  $E_k$  вимірюється в кілотоннах ТНТ. При  $E_k = 2.8 \text{ кт ТНТ}$  маємо  $N_s = 0.49 \text{ год}^{-1}$ . Тоді  $T = N_s^{-1} = 2.05 \text{ років}$ .

Отже, тіла, подібні до метеороїда Юйшу, падають на Землю приблизно кожні два роки. На жаль, більшість із них не документується, а значить і не аналізується.

### ОБГОВОРЕННЯ

Падіння метеороїда Юйшу призвело до низки відчутних чи сильних ефектів у всіх геооболонках. Цю подію доцільно порівняти з падінням найбільшого в XXI сторіччі Челябінського тіла [1—3, 29, 30, 32, 42, 51, 61—63].

Проліт і вибух Челябінського метеороїда викликав цілий комплекс фізичних (і не лише фізичних) процесів у навколоземному середовищі. Висота основного енерговиділення приблизно дорівнювала 35 км.

Розмір (близько 18 м) і початкова енергія (близько 0.44 Мт ТНТ) челябінського космічного тіла були достатньо великими, щоб тіло віднести до астероїдів.

Ефекти Челябінського метеороїда помітно відрізнялися від ефектів, викликаних вибухом метеороїда Юйшу. Основна причина полягає в тому, що початкова енергія челябінського тіла була у 46 разів більшою, ніж метеороїда Юйшу. Друга причина полягає в тому, що траек-

торія челябінського тіла була пологою ( $\theta \approx 18^\circ$ ). Для метеороїда Юйшу  $\theta \approx 5^\circ$ , тому він досяг висоти 35 км. Зона часткових руйнувань при падінні Челябінського тіла становила близько  $6000 \text{ км}^2$  [1—3, 17, 51, 61—63]. Полога траєкторія та порівняно велика висота вибуху Челябінського метеороїда призвела до відносно незначних руйнувань елементів житлових будівель (вікон, віконних рам, дверей, дахів тощо). Цим же пояснюється й відносна легкість поранень жителів постраждалого регіону. Якби траєкторія челябінського тіла була крутішою, наслідки могли б бути більш значними.

У випадку метеороїда Юйшу руйнування були відсутні, оскільки вони виникають за надлишкового тиску більше 1 кПа. Для цього космічного тіла надлишковий тиск на поверхні Землі поблизу епіцентру не перевищував 50 або 310 Па.

Магнітний ефект Тунгуського тіла склав гігантську величину — близько 50...70 нТл [13], що пояснюється рухом плюму, для якого площа перерізу була більше ніж  $10^6 \text{ м}^2$ , а сила струму  $I \approx 3 \cdot 10^4 \text{ А}$ . При цьому  $B \approx 60 \text{ нТл}$ . Ця оцінка добре відповідає результатам спостережень (див., наприклад, [9, 13]). Водночас для челябінського тіла  $B \approx 1 \text{ нТл}$ . Приблизно така сама величина  $B$ , зумовлена захопленням електронів у полі АГХ, могла бути й для метеороїда Юйшу.

Важливо, що збурення, спричинені вибухами Челябінського метеороїда та метеороїда Юйшу, поширювалися як по вертикалі на сотні кілометрів вгору, так і по горизонталі на відстані не менше тисячі кілометрів. Реєстровані збурення виникли не лише в літосфері, атмосфері, але й в іоносфері, а також у геомагнітному полі [31, 32, 34, 35, 42, 45]. Результати спостереження ефектів у цих середовищах для метеороїда Юйшу ще належить детально проаналізувати. Важливо, що при падінні досить великих ( $d \approx 1...10 \text{ м}$ ) космічних тіл сама природа надає рідкісну можливість вивчення цілого комплексу явищ на поверхні Землі, в атмосфері та геокосмосі астрономам, фізикам, геофізикам, мінералогам, хімікам, сейсмологам і іншим спеціалістам. Звичайно, вивчення цього комплексу явищ вимагає системного підходу до об'єкту ЗАІМ [25, 26, 28, 33, 49, 50, 64].

## ВИСНОВКИ

Проведено комплексний аналіз основних процесів у системі ЗАІМ, які супроводжували падіння метеороїда Юйшу, та встановлено таке.

1. Проліт і вибух метеороїда Юйшу викликав у всіх геооболонках помітні або сильні збурення.

2. Проліт космічного тіла супроводжувався плазмовими, магнітними, електричними, електромагнітними й акустичними ефектами. Збурення геомагнітного поля на поверхні Землі поблизу вибуху метеороїда могло досягати порядку 1 нТл.

3. Показано, що магнітний ефект турбулентності був незначним. Магнітний ефект іоносферних струмів і струму у сліді метеороїда міг бути суттєвим (близько 1 нТл).

За рахунок захоплення електронів у полі АГХ магнітний ефект міг досягати близько 1 нТл.

Ефект зовнішнього електричного поля міг призводити до короткочасного імпульсу струму силою до  $10^4$  А. Електростатичний ефект міг супроводжуватися накопиченням заряду величиною 1...10 мКл, напруженістю електричного поля 1 МВ/м. Протікання електричного струму у сліді могло призводити до випромінювання електромагнітного імпульсу в діапазоні частот порядку 10 кГц з напруженістю 3...30 В/м.

4. Встановлено, що електромагнітний ефект інфразвуку міг бути істотним (3...30 В/м і 10...60 нТл). Поглинання ударної хвилі на висотах динамо-області іоносфери (100...150 км) могло супроводжуватися генерацією вторинних атмосферних гравітаційних хвиль із відносною амплітудою 0.1...1.

5. Проліт метеороїда призвів до утворення плазмового сліду, до збурення не лише нижньої, а й верхньої атмосфери.

Помітні збурення від вибуху та вторинних процесів поширювалися по горизонталі на відстань щонайменше в тисячу кілометрів. За оцінками, період вторинних АГХ становив 8...13 хв, а відносна амплітуда — 1...100 %.

Відносні збурення концентрації електронів над епіцентром вибуху сягали десятків відсотків.

6. Якісно оцінено можливість виникнення електрофонного ефекту, генерації іонного та магнітного звуку інфразвуком, а також генерації градієнтно-дрейфової та дрейфово-дисипативної нестійкостей.

7. Розглянуті у статті магнітні, електричні й електромагнітні ефекти частково заповнюють прогалини в теорії фізичних ефектів метеороїдів у системі Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера.

8. Магнітуда землетрусу, спричиненого вибухом метеороїда Юйшу, не перевищувала 2.5.

9. Космічні тіла, подібні до метеороїда Юйшу, падають на Землю в середньому кожні 2 роки.

10. Для вивчення всього комплексу явищ знадобився системний підхід до об'єкту ЗАІМ.

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 у рамках держбюджетних НДР, заданих МОН України (номери держреєстрації 0121U109881 та 0122U001476).

1. Алпатов В. В., Буров В. А., Вагин Ю. П. и др. *Геофизические условия при взрыве Челябинского (Чебаркульского) метеороида 15.02.2013 г.* Москва: ФГБУ ИПГ. 2013. 37 с.

2. *Астероиды и кометы. Челябинское событие и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль*. Материалы конференции. Международная научно-практическая конференция (Чебаркуль, 21—22 июня 2013 г.). 168 с.
3. *Астрономический вестник*. 2013. 47, № 4. (Тематический выпуск).
4. *Атмосфера. Справочник*. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 510 с.
5. Борисов Н. Д., Гуревич А. В., Милих Г. М. *Искусственная ионизированная область в атмосфере*. Москва: ИЗМИРАН. 1985.—184 с.
6. Бронштэн В. А. *Физика метеорных явлений*. Москва: Наука. 1981. 416 с.
7. Бронштэн В. А. Магнитогидродинамический механизм генерации радиоизлучения ярких болидов. *Астрономический вестник*. 1983. 17, № 2. С. 94—98.
8. Бронштэн В. А. Электрические и электромагнитные явления, сопровождающие полет метеоров. *Астрон. вестн.* 1991. 25, № 2. С. 131—144.
9. Бронштэн В. А. Магнитный эффект Тунгусского метеорита. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2002. 42, № 6. С. 854—856.
10. Голицын Г. С., Григорьев Г. Н., Докучаев В. П. Излучение акустико-гравитационных волн при движении метеоров в атмосфере. *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1977. 13, № 9. С. 926—936.
11. Гольдштейн Л. Д., Зернов Н. В. *Электромагнитные поля и волны*. Москва: Сов. радио. 1971. 664 с.
12. Гуревич А. В., Шварцбург А. Б. *Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере*. Москва: Физ.-мат. изд-во. 1973. 272 с.
13. *Катастрофические воздействия космических тел*. Под ред. В. В. Адушкина, И. В. Немчинова. Москва: ИКЦ «Академкнига». 2005. 310 с.
14. Ковалева И. Х., Ковалев А. Г., Попель С. И., Попова О. П. Электромагнитные эффекты, генерируемые в ионосфере Земли при падении метеороида. *Триггерные эффекты в геосистемах*. Материалы Всероссийского семинара-совещания. Под редакцией В. В. Адушкина, Г. Г. Кочеряна. ИДГ РАН. Москва: ГЕОС. 2013. С. 41—50.
15. Ковалева И. Х., Ковалев А. Г., Попова О. П. и др. Электромагнитные эффекты, генерируемые в ионосфере Земли при падении метеороида. *Динамические процессы в геосферах*. Выпуск 5. Геофизические эффекты падения Челябинского метеороида: сборник научных трудов ИДГ РАН. Специальный выпуск. Москва: ГЕОС. 2014. С. 26—48.
16. Ляцкий В. Б. *Токовые системы магнитосферно-ионосферных возмущений*. Ленинград.: Наука. 1978. 199 с.
17. *Метеорит Челябинск — год на Земле: материалы Всероссийской научной конференции* [редкол.: Н. А. Антипин и др.; сост. Н. А. Антипин]. Челябинск. 2014. 694 с.
18. Ольховатов А. Ю. Анализ механизмов генерации электрофонных звуков, сопровождающих болидные явления. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1993. 33, № 2. С. 154—155.
19. Райзер Ю. П. О дискуссии по поводу приобретения электрического потенциала метеоритным телом. *Астрономический вестник*. 2003. 37, № 4. С. 364—366.
20. Соловьев С. П., Рыбнов Ю. С., Харламов В. А. Синхронные возмущения акустического и электрического полей, вызванные источниками природного и техногенного происхождения. *Триггерные эффекты в геосистемах*. Материалы третьего Всероссийского семинара-совещания. Под ред. В. В. Адушкина, Г. Г. Кочеряна. ИДГ РАН. Москва: ГЕОС. 2015. С. 317—326.
21. Сурков В. В. *Электромагнитные эффекты при взрывах и землетрясениях*. Москва: МИФИ. 2000. 448 с.
22. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2003. 8, № 1. С. 59—106.

23. Черногор Л. Ф. Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 1. *Нелинейный мир*. 2006. 4, № 12. С. 655—697.
24. Черногор Л. Ф. Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 2. *Нелинейный мир*. 2007. 5, № 4. С. 225—246.
25. Черногор Л. Ф. *О нелинейности у природе и науке*. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина. 2008. 528 с.
26. Черногор Л. Ф. Каналы воздействия вариаций космических и атмосферных факторов на биосферу и человека. *Фізіологічний журнал*. 2010. 56, № 3. С. 25—40.
27. Черногор Л. Ф. Колебания геомагнитного поля, вызванные пролетом Витимского болида 24 сентября 2002 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2011. 51, № 1. С. 119—132.
28. Черногор Л. Ф. *Физика и экология катастроф*. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина. 2012. 556 с.
29. Черногор Л. Ф. Крупномасштабные возмущения магнитного поля Земли, сопровождавшие падение Челябинского метеороида. *Радиофизика и электроника*. 2013. 4 (18), № 3. С. 47—54.
30. Черногор Л. Ф. Плазменные, электромагнитные и акустические эффекты метеорита “Челябинск”. *Инженерная физика*. 2013. № 8. С. 23—40.
31. Черногор Л. Ф. Физические эффекты пролета Челябинского метеорита. *Доповіді Національної академії наук України*. 2013. № 10. С. 97—104.
32. Черногор Л. Ф. Эффекты Челябинского метеороида в геомагнитном поле. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2014. 54, № 5. С. 658—669.
33. Черногор Л. Ф. *Физика мощного радиоизлучения в геокосмосе*. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина. 2014. 448 с.
34. Черногор Л. Ф. Эффекты Челябинского метеороида в ионосфере. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2015. 55, № 3. С. 370—385.
35. Черногор Л. Ф. Возмущения в нижней ионосфере, сопровождавшие падение Челябинского космического тела. *Космические исследования*. 2017. 55. № 5. С. 342—352.
36. Черногор Л. Ф. Физические эффекты Румынского метеороида. 1. *Космічна наука і технологія*. 2018. 24, № 1. С. 49—70.
37. Черногор Л. Ф. Физические эффекты Румынского метеороида. 2. *Космічна наука і технологія*. 2018. 24, № 2. С. 18—35.
38. Черногор Л. Ф. Эффекты в магнитосфере при подлете Челябинского метеороида. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2018. 58, № 2. С. 267—280.
39. Черногор Л. Ф. Физические эффекты Липецкого метеороида. 1. *Кінематика і фізика небес. тїл*. 2019. 35, № 4. С. 37—59.
40. Черногор Л. Ф. Физические эффекты Липецкого метеороида. 2. *Кінематика і фізика небес. тїл*. 2019. 35, № 5. С. 25—47.
41. Черногор Л. Ф. Физические эффекты Липецкого метеороида. 3. *Кінематика і фізика небес. тїл*. 2019. 35, № 6. С. 34—61.
42. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П. Возмущения в геокосмосе, сопровождавшие падение метеорита “Челябинск”. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2013. 18, № 3. С. 231—243.
43. Черногор Л. Ф. Фізичні ефекти метеороїда Юйшу. 1. *Кінематика і фізика небес. тїл*. 2022. 38, № 3. С. 20—46.
44. Черногор Л. Ф. Фізичні ефекти метеороїда Юйшу. 2. *Кінематика і фізика небес. тїл*. 2023. 39, № 3. С. 3—24.

45. Черногор Л. Ф., Милованов Ю. Б., Федоренко В. Н., Цымбал А. М. Спутниковые наблюдения ионосферных возмущений, последовавших за падением Челябинского метеорита. *Космічна наука і технологія*. 2013. 19, № 6. С. 38—46.
46. Beech M., Foschini L. A. A space charge model for electrophonic bursters. *Astron. and Astrophys.* 1999. 345. P. L27—L31.
47. Beech M., Brown P., Jones J. VLF detection of fireballs. *Earth, Moon, and Planets*. 1995. 68. P. 181—188.
48. Brown P., Spalding R. E., Re Velle D. O., et al. The flux of small near-Earth objects colliding with Earth. *Nature*. 2002. 420. P. 294—296.
49. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. Earth — atmosphere — geospace as an open non-linear dynamical system. *Radio Phys. and Radio Astron.* 2008. 13, № 2. P. 120—137.
50. Chernogor L. F. The Earth — atmosphere — geospace system: main properties and processes. *Int. J. Remote Sensing*. 2011. 32, № 11. P. 3199 — 3218.
51. 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.
52. Infrasound monitoring for atmospheric studies. Le Pichon A., Blanc E., Hauchecorne A. (Eds.). *Springer, Dordrecht, Heidelberg, London, New York*. 2010. 734 p.
53. Kaznev V. Y. Observational characteristics of electrophonic bolides: Statistical analysis. *Solar. Syst. Res.* 1994. 28. P. 49—60.
54. Keay C. S. L. Anomalous sounds from the entry of meteor fireballs. *Science*. 1980. 210. P. 11—15.
55. Keay C. S. L. Audible sounds excited by aurorae and meteor fireballs. *J. Roy. Astron. Soc. Can.* 1980, 74. P. 253—260.
56. Keay C. S. L. Meteor fireball sounds identified. *Asteroids, Comets, Meteors*. 1991, 1992. P. 297—300.
57. Keay C. S. L. Electro-phonic sounds from large meteor fireballs. *Meteoritics*. 1992. 27. P. 144—148.
58. Keay C. S. L. Electro-phonic Sounds Catalog. *WGN Obs. Rep. Ser. Int. Meteor. Org.* 1994. 6. P. 151—172.
59. Keay C. S. L., Cepelcha Z. Rate of observation of electrophonic meteor fireballs. *J. Geophys. Res.* 1994. 99. P. 13,163—13,165.
60. Popel S. I. Electromagnetic effects in the Earth's ionosphere and magnetosphere caused by a cosmic body. *Planet. Space Sci.* 1997. 45. № 7. P. 869—875.
61. 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. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization. *Science*. 2013. 342. P. 1069—1073.
62. 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.
63. Popova O. *Chelyabinsk Meteorite*. Oxford Research Encyclopedia of Planetary Science.—2021. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190647926.013.22>
64. Zalyubovskiy I. I., Chernogor L. F., Rozumenko V. T. The Earth — Atmosphere — Geospace System: Main Properties, Processes and Phenomena. *Space Research in Ukraine*. 2006—2008. Kyiv. 2008. P. 19—29.

## REFERENCES

1. Alpatov V. V., Burov V. N., Vagin J. P., Galkin K. A., Givishvili G. V., Gluhov J. V., Davidenko D. V., Zubachev D. S., Ivanov V. N., Karhov A. N., Kolomin M. V., Korshunov V. A., Lapshin V. B., Leshenko L. N., Lysenko D. A., Minligareev V. T., Morozova M. A., Perminova E. S., Portnyagin J. I., Rusakov J. S., Stal N. L., Syroeshkin A. V., Tertyshnikov A. V., Tulinov G. F., Chichaeva M. A., Chudnovsky V. S., Shtyrkov A. Y. (2013). Geophysical conditions at the explosion of the Chelyabinsk (Chebarkulsky) meteoroid in February 15, 2013. Moscow: FGBU “IPG” Publ. [in Russian].
2. Materials and reports of international scientific practical conference “Asteroids and comets. Chelyabinsk event and the study of meteorite falling into the lake Chebarkul”, 21–22 June 2013, Chebarkul. [in Russian].
3. *Solar System Research*. (2013). 47 (4). (Thematical issue) [in Russian].
4. *Atmosphere: A Handbook*. (1991). Leningrad: Gidrometeoizdat, 510 p. [in Russian].
5. Borisov N. D., Gurevich A. V., Milih G. M. (1985). *Artificially Ionized Region in the Atmosphere*. Moscow: IZMIRAN [in Russian].
6. Bronshten V.A. (1983). *Physics of Meteor Phenomena*. Netherlands: Springer.
7. Bronshten V. A. (1983). A magneto-hydrodynamic mechanism for generating radio waves by bright fireballs. *Solar System Research*. 17 (2). 70—74
8. Bronshten V.A. (1991). Electrical and electromagnetic phenomena associated with meteor flight. *Solar System Research*. 25 (2). 93—104.
9. Bronshten V. A. (2002). Magnetic Effect of the Tungus Meteorite. *Geomagnetism and Aeronomy*. 42 (6). 816—818.
10. Golitsyn G. S., Grigoriev G. I., Dokuchaev V. P. (1977). Radiation of acoustic gravity waves during the motion of meteors in the atmosphere. *Izvestiya Rossiyskoy Akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, 13 (9), 926—936 [In Russian].
11. Goldshtein L. D., Zernov N. V. (1971). *Electromagnetic fields and waves*. Moscow: Sov. radio [In Russian].
12. Gurevich A. V., Shvartsburg A. B. (1973). *Nonlinear theory of radio wave propagation in the ionosphere*. Moscow: Nauka [In Russian].
13. Adushkin V. V., Nemchinov I. V. (eds). (2005). *Catastrophic impacts of cosmic bodies*. Moscow: ECC Akademkniga Publ. [in Russian].
14. Kovaleva I. H., Kovalev A. G., Popel S. I., Popova O. P. (2013). The electromagnetic effects generated in the Earth ionosphere during the meteoroid falling. *Triggernyye efekty v geosistimah. Materialy Vserossiyskogo seminara-soveshaniya*. Ed.:



- V. V. Adushkin, G. G. Kocheryan, Moscow: GEOS, 41—50. [In Russian].
15. Kovaleva I. H., Kovalev A. G., Popova O. P. et al. (2014). The electromagnetic effects generating in the Earth ionosphere during the meteoroid falling. *Dinamicheskije processy v geosferah. Vypusk 5. Geophysicheskije efekty padeniya Chelyabinskogo meteoroida: sbornik nauchnyh trudov IDG RAN. Special'nyj vypusk*, 26—48 (Moscow: GEOS, 2014) [in Russian].
  16. Liatskij V. B. (1978). The Current Systems of the magnetospheric and ionospheric disturbances. Leningrad: Nauka [in Russian].
  17. Antipin N. A., ed. (2014). *The Chelyabinsk Meteorite — one year on the Earth: Proceedings of All-Russian Scientific Conference*. Chelyabinsk, Russia: Kamennyi poyas Publ., (Chelyabinsk, 2014) (in Russian).
  18. Ol'khovarov A. Yu. (1993). The electrophone sounds mechanisms generation analysis that accompany bolide effects. *Geomagnetism and Aeronomy*. 33 (2), 154—155 [in Russian].
  19. Raizer Yu. L. (2003). A debate over the acquisition of an electric potential by a meteoroid. *Solar Syst. Res.* 37 (4). 333—335.
  20. Soloviev S. P., Rybnov Yu. S., Kharlamov V. A. The synchronic disturbances of the acoustic and electric fields caused by artificial and natural sources. *Triggernyye efekty v geosistemah. Materialy tretego Vserossiyskogo seminara-soveshaniya*. Pod red. V. V. Adushkina, G. G. Kocheryana, 317—326 (GEOS, Moskva, 2015) [in Russian].
  21. Surkov V. V. Electromagnetic effects caused by earthquakes and explosions, 448 p. (MEPhi, Moscow, 2000) [in Russian].
  22. Chernogor L. F. Physics of Earth, atmosphere, and geospace from the standpoint of system paradigm. *Radiophysika i Radioastronomija*. 8 (1), 59—106 (2003) [in Russian].
  23. Chernogor L. F. Earth — atmosphere — ionosphere — magnetosphere as opened dynamic nonlinear physical system. 1. *Nelinejnyj mir*. 4 (12). 655—697 (2006) [in Russian].
  24. Chernogor L. F. Earth — atmosphere — ionosphere — magnetosphere as opened dynamic nonlinear physical system. 2. *Nelinejnyj mir*. 5 (4). 225—246 (2007) [in Russian].
  25. Chernogor L. F. (2008). *On the nonlinearity in nature and science*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University [in Russian].
  26. Chernogor L. F. (2010). The ways in which variations in space and tropospheric weather impact the biosphere (humans). *Phyzyologichnyj journal*. 56 (3). 25—40 [in Russian].
  27. Chernogor L. F. (2011). Oscillations of the geomagnetic field caused by the flight of Vitim bolide on September 24, 2002. *Geomagnetism and Aeronomy*. 51 (1), 116—130.
  28. Chernogor L. F. (2012). *Physics and ecology of disasters*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ. [in Russian].
  29. Chernogor L. F. (2013). Large-scale disturbances in the Earth's magnetic field associated with the Chelyabinsk meteorite event. *Radiophysika i electronica*. 4 (18) (3), 47—54 [in Russian].
  30. Chernogor L. F. (2013). Plasma, electromagnetic and acoustic effects of meteorite «Chelyabinsk». *Engineering Physics*. 8, 23—40 [in Russian].
  31. Chernogor L. F. (2013). Physical effects of the Chelyabinsk meteorite passage. *Dopovidy Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*. 10, 97—104 [in Russian].
  32. Chernogor L. F. (2014). Geomagnetic field effects of the Chelyabinsk meteoroid. *Geo-*

- magnetism and Aeronomy*. 54 (5), 613—624.
33. Chernogor L. F. (2014). *Physics of high-power radio emissions in geospace: monograph*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University [in Russian].
  34. Chernogor L. F. (2015). Ionospheric effects of the Chelyabinsk meteoroid. *Geomagnetism and Aeronomy*. 55, No. 3, 353—368.
  35. Chernogor L. F. (2017). Disturbance in the lower ionosphere that accompanied the re-entry of the Chelyabinsk cosmic body. *Cosmic Research*. 55 (5), 323—332.
  36. Chernogor L. F. (2018). Physical effects of the Romanian meteoroid. 1. *Space Science and Technology*. 24 (1), 49—70 [in Russian].
  37. Chernogor L. F. (2018). Physical effects of the Romanian meteoroid. 2. *Space Science and Technology*. 24 (2), 18—35 [in Russian].
  38. Chernogor L. F. (2018). Magnetospheric effects during the approach of the Chelyabinsk meteoroid. *Geomagnetism and Aeronomy*. 58 (2), 252—265.
  39. Chernogor L. F. (2019). The physical effects of Lipetsk meteoroid. 1. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*. 35 (4), 37—59.
  40. Chernogor L. F. (2019). The physical effects of Lipetsk meteoroid. 2. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*. 35 (5) 25—47.
  41. Chernogor L. F., Barabash V. V. (2014). Ionosphere disturbances accompanying the flight of the Chelyabinsk body. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*. 30 (3), 126—136.
  42. Chernogor L. F., Garmash K. P. (2013). Disturbances in geospace associated with the Chelyabinsk meteorite passage. *Radio Phys. Radio Astron.* 18 (3), 231—243 [In Russian].
  43. Chernogor L. F. (2022). Physical effects from the Yushu meteoroid. 1. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*. 38 (3). C. 20—46.
  44. Chernogor L. F. (2022). Physical effects from the Yushu meteoroid. 2. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*. [In Press].
  45. Chernogor L. F., Milovanov Yu. B., Fedorenko V. N., Tsymbal A. M. (2013). Satellite observations of ionospheric disturbances which followed the Chelyabinsk meteorite passage. *Space Sci. and Technol.* 19 (6), 38—46 [in Russian].
  46. Beech M., Foschini L. A. (1999). A space charge model for electrophonic bursters. *Astron. and Astrophys.* 345, L27—L31.
  47. Beech M., Brown P., Jones J. (1995). VLF detection of fireballs. *Earth, Moon, and Planets*. 68, 181—188.
  48. Brown P., Spalding R. E., Re Velle D. O., et al. (2002). The flux of small near-Earth objects colliding with Earth. *Nature*. 420, 294—296.
  49. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. (2008). Earth — atmosphere — geospace as an open nonlinear dynamical system. *Radio Physics and Radio Astronomy*. 13 (2), 120—137.
  50. Chernogor L. F. (2011). The Earth — atmosphere — geospace system: main properties and processes. *Int. J. Remote Sensing*. 32 (11). 3199—3218.
  51. 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.
  52. Le Pichon A., Blanc E., Hauchecorne A. (Eds). (2010). *Infrasound monitoring for atmospheric studies*. Dordrecht Heidelberg London New York: Springer.
  53. Kaznev V. Y. (1994). Observational characteristics of electrophonic bolides: Statistical analysis. *Solar Syst. Res.* 28, 49—60.
  54. Keay C. S. L. (1980). Anomalous sounds from the entry of meteor fireballs. *Science*. 210, 11—15.

55. Keay C. S. L. (1980). Audible sounds excited by aurorae and meteor fireballs. *J. Roy. Astron. Soc. Can.* 74, 253—260.
56. Keay C. S. L. (1991, 1992). Meteor fireball sounds identified. *Asteroids, Comets, Meteors.* 297—300.
57. Keay C. S. L. (1992). Electrophonic sounds from large meteor fireballs. *Meteoritics.* 27, 144—148.
58. Keay C. S. L. (1994). Electrophonic sounds catalog. *WGN Obs. Rep. Ser. Int. Meteor. Org.* 6, 151—172.
59. Keay C. S. L., Cepelcha Z. (1994). Rate of observation of electrophonic meteor fireballs. *J. Geophys. Res.* 99, 13,163—13,165.
60. Popel S. I. (1997). Electromagnetic effects in the Earth's ionosphere and magnetosphere caused by a cosmic body. *Planet. Space Sci.* 45 (7), 869—875.
61. 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. (2013). Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization. *Science.* 342. 1069—1073.
62. 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. (2013). Supplementary material for Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization. *Science.* 342. 146.
63. Popova O. (2021). Chelyabinsk Meteorite. *Oxford research encyclopedia of planetary science.* <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190647926.013.22>
64. Zalyubovsky I. I., Chernogor L. F., Rozumenko V. T. (2008). The Earth — atmosphere — geospace system: main properties, processes and phenomena. *Space Research in Ukraine.* 2006—2008. Kyiv, 19—29.

*L. F. Chernogor*

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

### PHYSICAL EFFECTS OF YUSHU METEOROID. 3

Comprehensive modeling studies of the processes induced in all geospheres by the passage and explosion of the meteoroid Yushu at the Province of Quinghai (People's Republic of China) at 22 December 2020 have been conducted. Magnetic, electric, electromagnetic, ionospheric, and seismic effects, the effects of acoustic-gravity waves have been estimated. The magnetic effect of turbulence has been shown to be insignificant. The magnetic

effect of the ionospheric currents and the current in the wake of the meteoroid could be substantial ( $\sim 1$  nT). Due to the accumulation of electrons in the atmospheric gravity wave field, the magnetic effect could reach the order of 1 nT. Under the action of an external electric field, a transient current pulse with the current density up to  $\sim 10^4$  A could occur. The electrostatic effect could be accompanied by the accumulation of an electric charge of  $\sim 1...10$  mC producing the electric field intensity of  $\sim 1$  MV/m. The flow of the electric current in the wake of the meteoroid could result in the generation of an electromagnetic pulse in the 10 kHz band with the electric field intensity of 3...30 V/m. The electromagnetic effect of infrasound has been determined to be significant (3...20 V/m and 10...60 nT). The absorption of the shock wave at ionospheric dynamo region altitudes (100...150 km) could generate secondary atmospheric gravity waves with the  $\sim 0.1...1$  relative amplitude. The passage of the meteoroid acted to produce a plasma wake not only in the lower but also in the upper atmosphere in the range no less than 1,000 km. The possibility of appearance of electrophonic effect was improbable. The possibilities of appearing the generation of the ion and magnetic sound by infrasound, as well as the generation of gradient-drift and drift-dissipative instabilities are discussed. A magnetic, electric, and electromagnetic effects dealt with in this paper partially fill up gaps in the theory of physical effects produced by meteoroids in the Earth — atmosphere — ionosphere — magnetosphere system. The magnitudes of magnetic, electric, electromagnetic, ionospheric, and acoustic effects were significant. The magnitude of the earthquake caused by the meteoroid explosion did not exceeded 2.5. The mean rate of the fall of celestial bodies similar to the Yushu meteoroid is equal to  $0.49 \text{ yr}^{-1}$ .

**Key words:** Yushu meteoroid, comprehensive simulation, magnetic effects, electric effects, electromagnetic effects, ionospheric effects, seismic effects, acoustic and atmospheric gravity waves, acoustic effects, plasma wake.

Стаття надійшла до редакції 22.03.2022

Після доопрацювання 22.03.2022

Прийнята до друку 16.02.2023