

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2021.05.037>

УДК 533.6.011.6+523.682

Л. Ф. Черногор, Ю. Б. Милованов

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

**Динаміка падіння Челябінського метеороїда:
розміри, випромінювання та руйнування**

Мета роботи — отримання уточнених висотно-часових залежностей інтенсивності випромінювання та маси Челябінського метеороїда під час падіння, визначення розмірів боліда та побудова моделі руйнування з оцінкою параметрів розподілу фрагментів за масою. Вивчення впливу великих небесних тіл на навколишнє середовище є актуальною задачею для прогнозу екологічних наслідків. Для розрахунку інтенсивності випромінювання використовувалися часова залежність блиску боліда й емпірична формула Е. Епіка. Для моделі випромінювання абсолютно чорного тіла в обмеженому діапазоні довжин хвиль застосовувався закон Стефана — Больцмана та формула М. Планка. Знайдено спосіб визначення розміру боліда за опублікованими спостереженнями з відеореєстратора. При побудові моделі безперервного дроблення застосовано адаптоване рівняння руху окремих фрагментів. Випробовувалися три види розподілу уламків за масами: логарифмічно нормальний, степеневий і рівномірний. У результаті числового моделювання визначено внесок енергії випромінювання. Показано, що на випромінювання витрачається 21 % кінетичної енергії метеороїда. Розраховано зміни маси, висотно-часові залежності розміру боліда та значення параметрів для різних розподілів фрагментів за масою. Діаметр голови боліда досягав 2 км, а довжина хвоста — 3.5...4 км. Встановлено, що на початковому етапі руху фрагменти дроблення підкоряються степеневому закону розподілу, а у щільніших шарах атмосфери — логнормальному. Оцінено характеристики рою кам'яних уламків, які, можливо, слідували за метеороїдом. Довжина рою досягала 30 км, максимальну масу рою оцінено значенням 400 тонн, а енергія випромінювання сягала 0.6 % від початкової кінетичної енергії метеороїда.

Ключові слова: Челябінський метеороїд, болід, блиск, абсолютно чорне тіло, формула Планка, закон Стефана — Больцмана, розміри боліда, дроблення, розподіл фрагментів за масою, рій уламків.

ВСТУП

Поблизу м. Челябінськ (Російська Федерація) 15 лютого 2013 р. о 03:20:26 UT вибухнув метеороїд у точці з координатами 54 57 19 пн. ш. та 60 19 36 сх. д. До теперішнього часу це явище було різнобічно досліджено в роботах [1, 2, 8, 12, 14, 16, 17, 20—30, 33, 35—38]. В основному ці дослідження носять або теоретичний, або описовий характер. Найважливіші параметри, такі як зміна реальних розмірів метеороїда, енергія випромінювання та розподіл фрагментів у процесі руйнування вивчено недостатньо. У даній роботі ми спробуємо вивчити ці параметри, спираючись у першу чергу на книги [4, 10, 11, 19]. Ця стаття є продовженням досліджень, розпочатих в роботах [15, 31, 32].

ВИХІДНІ ДАНІ ТА СПІВВІДНОШЕННЯ

Серед фізичних процесів, які супроводжують падіння метеороїда, значну роль відіграє випромінювання. Оптичне випромінювання оцінено в роботі [37] у вигляді висотно-часової залежності видимої зоряної величини. У роботі [32] за допомогою емпіричної формули Е. Епіка розраховано інтенсивність випромінювання за приладом спостереження для стандартного видимого діапазону $\lambda = 0.4...0.76$ мкм. Пізніше робочий діапазон оптичного випромінювання у приладах спостереження Е. Епіка було уточнено [3], і він становив $\lambda = 0.45...0.57$ мкм. Skorистаємося кривою блиску, наведеною в роботах [37, 38] (рис. 1), і уточнимо інтенсивність випромінювання.

При проникненні метеороїда до щільніших шарів атмосфери енергія взаємодії постійно збільшується. Згідно з моделлю випромінювання абсолютно чорного тіла температура та інтенсивність випромінювання за законом Стефана — Больцмана повинні одночасно монотонно збільшуватися або зменшуватися. Але на пологих ділянках 1 і 2 інтенсивність випромінювання не змінюється (див. рис. 1). Відповідно постійна і температура поверхні тіла, що випромінює. Дана

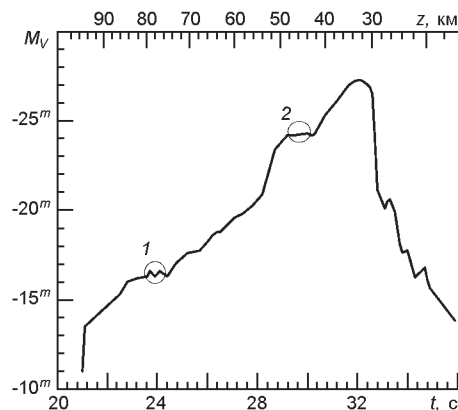


Рис. 1. Висотно-часові зміни зоряної величини боїда M_V (03:20:00 UT): 1 і 2 — пологі ділянки

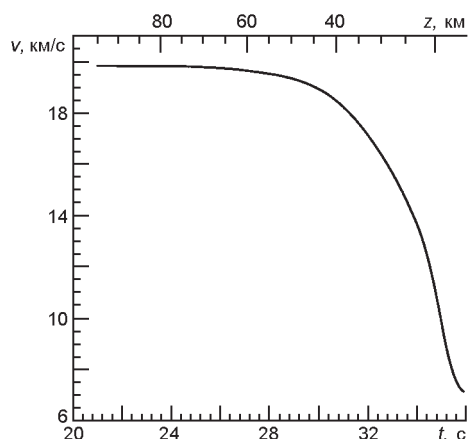


Рис. 2. Висотно-часові зміни швидкості v метеороїда (03:20:00 UT)

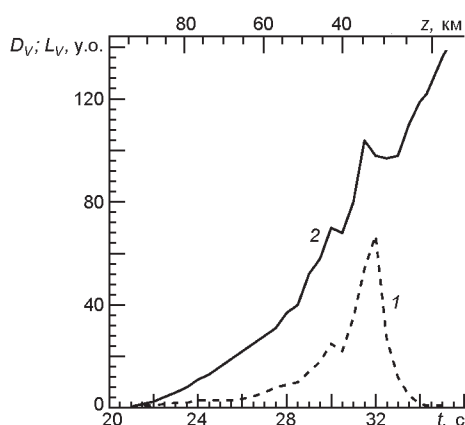


Рис. 3. Висотно-часові зміни відносних розмірів діаметра D_V голови (крива 1) і довжини L_V метеороїда (03:20:00 UT)

ситуація можлива при зміні агрегатного стану метеорної речовини. При цьому приріст енергії взаємодії витрачається на перетворення стану речовини. Виділені пологі ділянки кривої блиску 1 і 2 пов'язуємо з процесами плавлення та випаровування поверхневого шару відповідно.

З роботи [31] використаємо часову залежність абсолютної швидкості (рис. 2). Цю залежність було отримано в результаті регресійного аналізу та застосування алгоритму регуляризації до спостережуваних координат тіла, що падає. Розрахунки траєкторії велися у геоцентричній системі координат.

Далі під терміном «болід» будемо розуміти видиме світне утворення, а під терміном «метеороїд» — кам'яне небесне тіло та його фрагменти. Еволюція та відносні розміри боліда було зафіксовано на відеореєстраторі автомобіля в районі міста Кам'янськ-Уральський. На рис. 3 показано висотно-часові залежності розміру голови та довжини боліда в умовних одиницях [9].

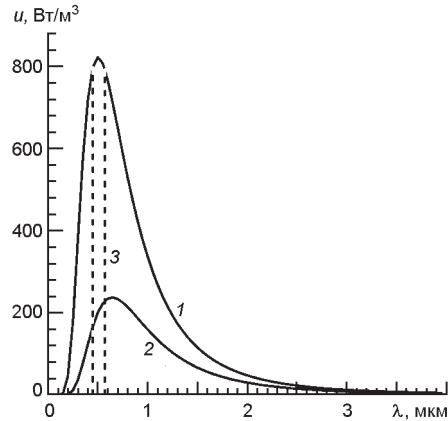


Рис. 4. Щільність випромінювання абсолютно чорного тіла для температур поверхні випромінювання 5772 К (крива 1) і 4500 К (крива 2). Площа виділеної області 3 під кривими дорівнює інтенсивності випромінювань 1 м^2 в діапазоні $\lambda = 0.45 \dots 0.57 \text{ мкм}$

Синхронізування вимірювань швидкості (рис. 2) та розмірів болюда (рис. 3) провадилося за часом виникнення першого спалаху випромінювання. Згідно з роботою [9] «...при $t = 9 \text{ с}$ происходит первая вспышка болида...» і роботою [38] «...first peak 03:20:29.8...». Для оцінки інтенсивності випромінювання за кривою блиску (див. рис. 1) скористаємося емпіричним співвідношенням з робіт [3, 11] і результатами розрахунків з [31, 32]:

$$\lg I_{opt} = 2.72 - 0.4M_V, \quad (1)$$

де I_{opt} — інтенсивність видимого оптичного випромінювання; M_V — магнітуда видимої абсолютної зоряної величини. Дане емпіричне співвідношення було отримано Е. Епіком для видимої частини спектру від $\lambda_1 = 0.45 \text{ мкм}$ до $\lambda_2 = 0.57 \text{ мкм}$ і взято з робіт [3, 11].

Для оцінки повного випромінювання скористаємося формулою М. Планка для абсолютно чорного тіла:

$$\frac{I_{opt}}{S} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} u(T, \lambda) d\lambda, \quad (2)$$

де $u(T, \lambda)$ — щільність випромінювання абсолютно чорного тіла з температурою T ; S — площа поверхні, що випромінює; $[\lambda_1 \dots \lambda_2]$ — вимірюваний спектр випромінювання.

У формулах (1) та (2) інтенсивність оптичного випромінювання I_{opt} вимірювалася в діапазоні довжин хвиль $\lambda = 0.45 \dots 0.57 \text{ мкм}$. Як приклад наведемо графіки функції М. Планка у вигляді залежності щільності випромінювання поверхні 1 м^2 від довжини хвилі для температури поверхні Сонця $T = 5772 \text{ К}$ та тестової температури $T = 4500 \text{ К}$ (рис. 4).

РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

Оптична поправка. Для оцінки інтенсивності випромінювання у всьому діапазоні довжин хвиль скористаємося оптичною поправкою [31, 32]

$$r_{opt}(T) = \frac{I_{opt}}{I} \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} u(T, \lambda) d\lambda}{T^4}, \quad (3)$$

де I_{opt} — інтенсивність випромінювання в оптичному діапазоні $[\lambda_1 \dots \lambda_2]$; I — інтенсивність випромінювання у всьому діапазоні довжин хвиль; $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К}^4)$ — стала Стефана — Больцмана; $T, \text{ К}$ — температура поверхні, що випромінює.

Температурну залежність оптичної поправки для робочого та стандартного діапазонів випромінювання наведено на рис. 5.

Використовуючи розраховане значення температури з роботи [32], уточнимо повну інтенсивність випромінювання за формулою

$$I = \frac{I_{opt}}{r_{opt}(T)}.$$

Результат розрахунку наведено на рис. 6. Енергія випромінювання (площа під кривою I на рис. 6) дорівнює 398 ТДж. По відношенню до початкової кінетичної енергії 1880 ТДж частка енергії випромінювання становить 21 %, що дуже близько до оцінок роботи [34].

Розміри світної поверхні. В результаті вивчення фотографій, наведених в роботах [9, 20, 38], було встановлено, що форму боліда можна апроксимувати півкулею діаметром D для голови та конусом довжиною L для хвоста (рис. 7).

Будемо вважати площу боліда верхньою оцінкою площі поверхні, що випромінює. У цьому випадку середня температура на такій поверхні буде нижньою оцінкою температури поверхні метеороїда. Площу

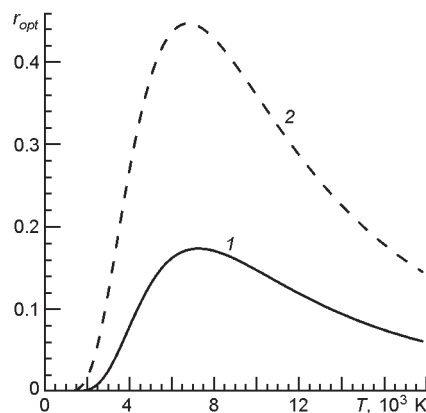


Рис. 5. Залежність оптичної поправки r_{opt} від температури T : 1 — для робочого діапазону $\lambda = 0.45 \dots 0.57 \text{ мкм}$, 2 — для стандартного діапазону $\lambda = 0.4 \dots 0.76 \text{ мкм}$

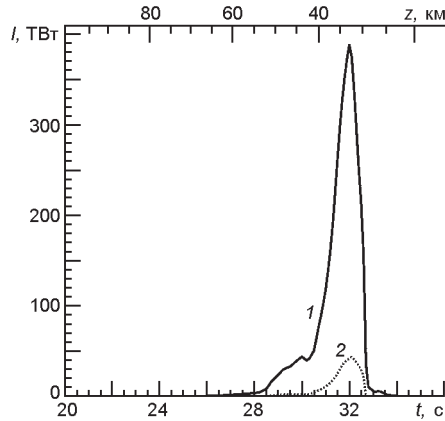


Рис. 6. Висотно-часові зміни інтенсивностей випромінювань: 1 — повного, 2 — спостережуваного (03:20:00 UT)

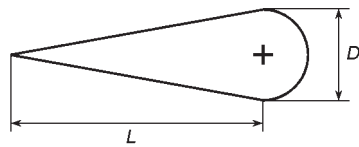


Рис. 7. Модель форми світної поверхні боїда

повної поверхні S геометричної фігури, наведеної на рис. 7, можна знайти шляхом нескладних розрахунків:

$$S = \frac{1}{2} D(\sqrt{L^2 + 0.25D^2} + D). \quad (4)$$

Положення спостерігача у м. Кам'янську-Уральському та еволюція боїда зображені на рис. 8. Зліва внизу показано проєкцію боїда на площину спостереження. Використано такі позначення: \mathbf{v} — вектор швидкості боїда, γ — кут між вектором швидкості та напрямком на спостерігача, позначеного літерою «O». Зі схеми руху, наведеної на рис. 8, знаходимо кут між напрямком швидкості та напрямком на спостерігача:

$$\cos \gamma = \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{r}}{vr},$$

де \mathbf{v} , v — вектор швидкості боїда і його абсолютне значення, \mathbf{r} , r — вектор від спостерігача до розрахункової точки та його довжина.

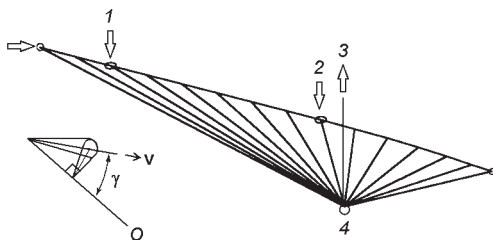


Рис. 8. Схема спостереження боїда з м. Кам'янськ-Уральський. Лініями відзначено відстані між спостерігачем 4 і боїдом, точка 1 — початок плавлення, 2 — початок випаровування, 3 — напрямком на зеніт

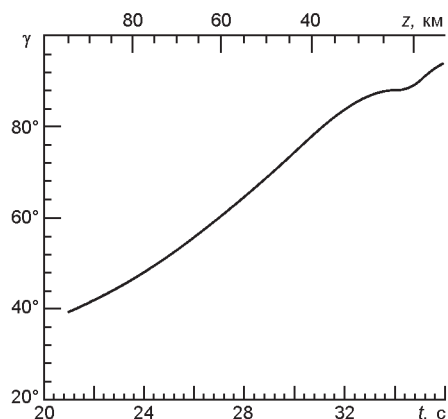


Рис. 9. Висотно-часові зміни кута між напрямком руху боліда та лінією спостереження (03:20:00 UT)

Оцінки кута наведено на рис. 9. Кутова поправка використовується тільки для довжини боліда:

$$L = L / \sin \gamma,$$

де L — довжина хвоста боліда з урахуванням кутової поправки.

Далі довжина L хвоста боліда використовується з урахуванням кутової поправки.

Нерухоме положення спостерігача до площини траєкторії передбачає наявність коефіцієнта пропорційності, «масштабу» x , що залежить від відстані між спостерігачем та болідом. У цьому випадку зображення боліда з видимими розмірами D_V і L_V співвідносяться до його фізичних розмірів як $D = xD_V$ і $L = xL_V$. У роботі [9] уточнюється, що «...диаметр голови и длина болида (с хвостом) измерены линейкой на дисплее, и поэтому даны в условных единицах...».

Формула для площі поверхні боліда, що випромінює, в цьому випадку набуде вигляду

$$S = \frac{1}{2} D_V (\sqrt{L_V^2 + 0.25 D_V^2} + D_V) x^2. \quad (5)$$

Для визначення «масштабу» x досить знати площу поверхні боліда в довільній точці траєкторії, та навпаки, для розрахунку площі поверхні достатньо знати видимі розміри та коефіцієнт пропорційності x у розрахунковій точці траєкторії.

В роботі [32] площа світної поверхні визначалася у момент початку випаровування речовини метеороїда (відмітка 2 на рис. 1). Для оцінки світної площі поверхні боліда також скористаємося законом Стефана — Больцмана в діапазоні видимої частини спектру (3).

В результаті фізико-хімічного аналізу складу речовини метеорита встановлено, що найбільшу приховану теплоту пароутворення серед основних хімічних елементів метеороїда має кремній [37]. Утворення насичених парів кремнію відбувається при досягненні температури $T = 3523$ К. Далі скористаємося формулами (2) і (3) для оцінки площі

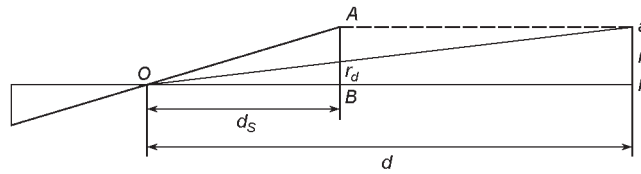


Рис. 10. Схема розрахунку «масштабу» (див. текст)

поверхні боліда, що випромінює, на момент початку випаровування:

$$S = \frac{I_{opt}}{T^4 r_{opt}(T)} = 6.2 \cdot 10^6 \text{ м}^2. \quad (6)$$

«Масштаб» x_s в області випаровування при видимих розмірах D_V і L_V знаходимо з формули (5):

$$x_s = \sqrt{\frac{2S}{D_V(\sqrt{L_V^2 + 0.25D_V^2} + D_V)}} = 31 \text{ м/у.о.} \quad (7)$$

«Масштаби» x для інших точок траєкторії розраховуються в залежності від відстані до точки спостереження. На рис. 10 представлено схему розрахунку «масштабу» на основі моделі «камера-обскура». Цю модель точкової перспективи (її ще називають центральною перспективою) вперше запропоновано Ф. Брунеллеском на початку XV століття. Вона зручна з математичної точки зору та часто є прийнятним наближенням описом процесу формування зображення.

Під розміром боліда далі будемо розуміти довжину його хвоста. Подамо розмір боліда r у вигляді добутку двох співмножників: видимого розміру L_V в умовних одиницях (у.о.) і масштабу x , м/у. о.:

$$r = x L_V.$$

Видимий розмір L_V залежить від відстані від спостерігача до боліда. Що далі болід, то меншим є видимий розмір. Отже, для коректного вимірювання розміру боліда параметр x повинен враховувати цю залежність від відстані. Для настроювання «масштабу» необхідно знати положення боліда з відомим розміром на траєкторії.

Виберемо момент початку випаровування кремнію. Уявімо, що на схемі (див. рис. 10) розмір боліда відповідає довжині відрізка AB . Відповідно відстань від об'єктива камери в точці O до боліда позначимо d_s . В цьому випадку болід має розмір

$$r = x_s L_{VS}.$$

де L_{VS} , у. о. — умовний видимий розмір боліда; x_s , м/у. о. — «масштаб» (7) для даного положення боліда. Подумки перемістимо болід вздовж оптичної осі відеореєстратора на відстань d від об'єктива O (відрізок ab на рис. 10). У центральній проєкції на відрізок AB видимий розмір зменшиться і дорівнюватиме

$$r_d = r \frac{d_s}{d} = x_s L_{VS} \frac{d_s}{d} = x_s L_{VS} \frac{d_s}{d} = x_s L_V.$$

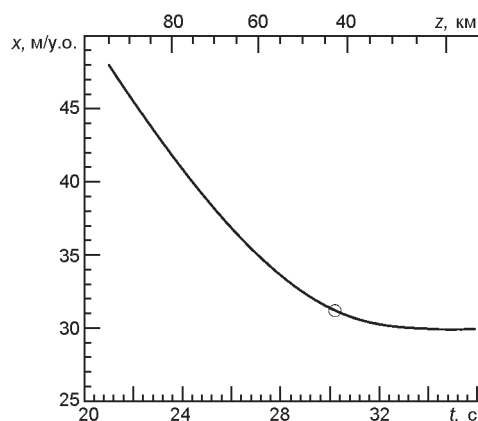


Рис. 11. Висотно-часові зміни «масштабу». Кружком позначено момент початку випаровування кремнію (03:20:00 UT)

Тут L_V — видимий розмір переміщеного об'єкта. Для компенсації цього зменшення видимого розміру введемо симетричну поправку на «масштаб»:

$$x = \frac{d}{d_S} x_S. \quad (8)$$

В цьому випадку розрахований розмір віддаленого тестового об'єкта дорівнюватиме

$$x L_V = \frac{d}{d_S} x_S L_V = \frac{d}{d_S} x_S L_{VS} = x_S L_{VS} = r.$$

Вважаючи, що співвідношення (8) справедливе для будь-якої точки траєкторії, отримуємо розміри боліда для всіх точок спостережуваної траєкторії:

$$r = x L_V = \frac{d}{d_S} x_S L_V,$$

де L_V , у. о. — видимий розмір боліда, d , м — відстань до боліда.

З урахуванням співвідношення (8) знаходимо «масштаби» для всіх розрахункових точок траєкторії (рис. 11).

За видимими розмірами боліда D_V і L_V (рис. 3) і величиною x , розрахованою за формулою (8) для кожної точки траєкторії (див. рис. 11), обчислимо реальні розміри боліда (див. рис. 12).

Витрата маси на фрагментацію та абляцію. Встановимо висотно-часові зміни маси та уточнимо масу метеороїда, виходячи з оновленого значення інтенсивності випромінювання (див. рис. 6), відомої абсолютної швидкості $v(t)$ (див. рис. 2) і співвідношення [32, 34]:

$$I = \frac{d}{dt} \frac{mv^2}{2}, \quad (9)$$

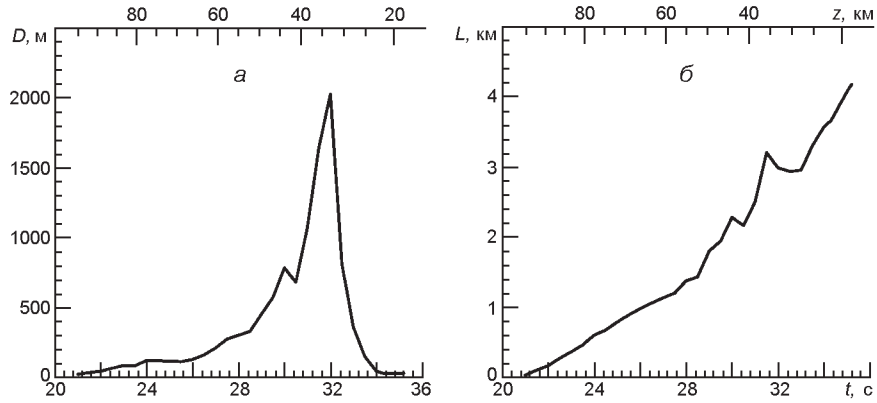


Рис. 12. Висотно-часові залежності розмірів боїда: а — діаметра голови D , б — довжини хвоста L (03:20:00 UT)

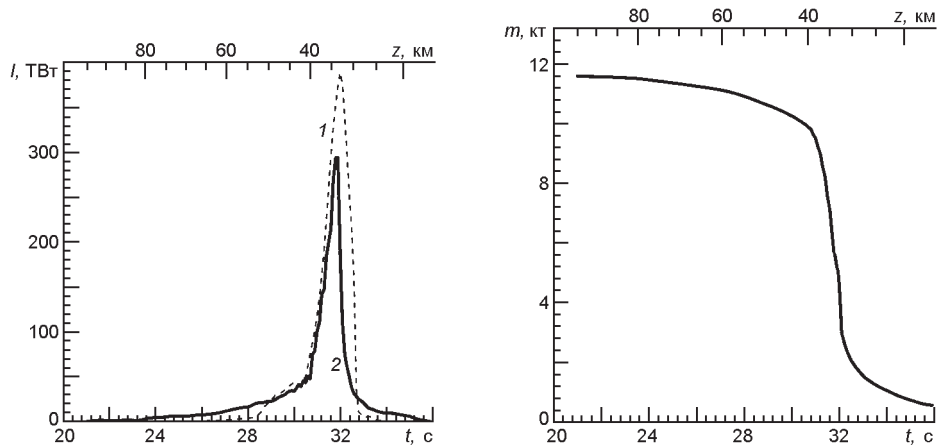


Рис. 13. Висотно-часові варіації інтенсивності випромінювання: 1 — за кривою блиску, 2 — за моделлю (9)

Рис. 14. Висотно-часові зміни маси (03:20:00 UT)

$$I = 0.092E^{0.13}, \quad (10)$$

де m та v — маса та швидкість метеороїда на поточній висоті, I — коефіцієнт світності, E — кінетична енергія космічного тіла в кілотоннах ТНТ.

Результати порівняльного аналізу часових залежностей інтенсивностей спостережуваного випромінювання та модельних оцінок (9) показано на рис. 13.

В результаті наближення (9) отримано висотно-часову залежність маси метеороїда (рис. 14). Також уточнено початкову масу, яка дорівнює 11.6 кт.

РУЙНУВАННЯ МЕТЕОРОЇДА

Процес руйнування розпочинається у той момент, коли аеродинамічний тиск повітря ρv^2 перевищує міцність σ_0 матеріалу метеороїда, де ρ — щільність атмосфери, а v — абсолютна швидкість метеороїда [5]. Формування хвоста з фрагментів кам'яного метеороїда відбувається при значеннях аеродинамічного тиску у межах 1...5 МПа [13]. Водночас міцність матеріалу на розтягнення у кілька разів менша, ніж на стиск, і відколювання бічних фрагментів може відбуватися при меншому аеродинамічному тиску.

Міцність речовини визначається складом і структурою метеороїда та залежить від його розміру [40]. Тіло метеороїда неоднорідне, і тому дроблення відбувається у місці тріщин або інших дефектів. Кожна фрагментація призводить до зменшення кількості дефектів і відповідно до збільшення міцності уламків. Згідно із статистичною теорією [40] міцність σ_f фрагмента масою m_f визначається співвідношенням

$$\sigma_f = \sigma_0 (m_0 / m_f)^{\alpha}, \quad (11)$$

де σ_0 і m_0 — початкові міцність і маса батьківського тіла; α — параметр, що залежить від однорідності матеріалу.

З експериментальних даних [7, 39] випливає, що для кам'яних метеоритів значення α може варіювати у широкому інтервалі 0.1...0.5.

Процес дроблення відбувається в законах розподілу уламків по масі або розмірах і у динаміці формування довжини метеороїда. Представимо руйнування метеороїда як послідовну втрату маси, відповідно до залежності, наведеної на рис. 14. Маси фрагментів можна розподілити різними способами. Припустимо, що закон розподілу фрагментів у процесі падіння не змінюється, крім значень його параметрів. Оскільки процес дроблення безперервний, то слід ввести такий фіксований проміжок часу, протягом якого параметри розподілу фрагментів можна буде вважати постійними. Покладемо тривалість такого проміжку часу $\Delta t = 1$ с, так що кожна секунда падіння метеороїда має розподіл маси з постійними параметрами.

Результати руйнування розділимо на дві групи уламків: дрібні та великі. Дрібні уламки згорають в атмосфері, викликаючи явище метеора. Для крупніших фрагментів внаслідок вищої міцності, ніж у основного, батьківського тіла, знехтуємо процесами вторинного руйнування та будемо у рівнянні руху фрагментів враховувати тільки опір повітря, силу Коріоліса та силу тяжіння. Рівняння руху в цьому випадку згідно з роботами [31, 32] має вигляд

$$m_f \frac{d\mathbf{v}_f}{dt} = C_d \frac{\rho v_f \mathbf{v}_f}{2} S_f - 2m_f \mathbf{v}_f - m_f g_0 \mathbf{1} - 2 \frac{h}{R} \frac{\mathbf{r}}{r}, \quad (12)$$

де \mathbf{v}_f — вектор швидкості фрагмента; $C_d = 0.76$ — коефіцієнт динамічного опору повітря [31, 32]; m_f — маса фрагмента; ρ — щільність по-

вітря на розрахунковій висоті; S_f — площа міделя; v_f — абсолютна швидкість фрагмента; \mathbf{e}_z — вектор кутової швидкості обертання Землі; \mathbf{e}_z — вектор земної осі в геоцентричній системі координат [18]; $7.29 \cdot 10^{-5}$ рад/с — кутова швидкість обертання Землі [18]; $R = 6378$ км — радіус Землі [18]; $g_0 = 9.81$ м/с² — прискорення вільного падіння на поверхні Землі; h , км — висота фрагмента над поверхнею Землі; \mathbf{r} , r — радіус-вектор в геоцентричній системі координат і його абсолютна величина.

Припустимо, що всі фрагменти мають кулясту форму. Отже, для таких фрагментів справедливі співвідношення

$$m_f = \rho_b V_f = \rho_b \frac{4}{3} r_f^3,$$

$$S_f = \pi r_f^2,$$

де r_f — радіус фрагмента; V_f — об'єм, $\rho_b = 3300$ кг/м³ — щільність речовини метеороїда [7].

Рівняння (12) в цьому випадку набуде вигляду

$$\frac{d\mathbf{v}_f}{dt} = \frac{3C_d}{8r_f} \rho_b \mathbf{v}_f \mathbf{v}_f - 2 \mathbf{v}_f g_0 - 1 - 2 \frac{h}{R} \frac{\mathbf{r}}{r}. \quad (13)$$

З рівняння (13) випливає, що при однаковій швидкості великі фрагменти зазнають меншого опору повітря, ніж дрібніші. Тому з часом очікується просторовий розподіл фрагментів по розмірах або масі уздовж шляху руху.

Нехай $w(m)$ — щільність розподілу фрагментів по масі, тоді частка фрагментів з масами від m_1 до m_2 буде приблизно дорівнювати

$$P_f = w(m_f)(m_2 - m_1),$$

де $m_f = 0.5(m_1 + m_2)$ — усереднена маса фрагмента. Витрата маси M за час t у вигляді фрагментів масою від m_1 до m_2 в цьому випадку досягне значення $P_f = M$.

Розглянемо різні закони розподілу.

Логарифмічно-нормальний. Про характер розподілу фрагментів по масі можна судити за знайденими на землі метеоритами. Їхній аналіз свідчить про логарифмічно нормальний (логнормальний) закон розподілу фрагментів по масі [37]

$$w(m) = \frac{1}{m\sqrt{2}} \exp \left(-\frac{(\lg m - \bar{X})^2}{2\sigma^2} \right), \quad (14)$$

де \bar{X} — математичне очікування, σ — середнє квадратичне відхилення випадкової величини $\lg m$.

Логнормальному закону також підкоряються розміри частинок порід при дробленні [6]. Походження логнормального закону зводиться до наступного. Якщо випадкова величина X розподілена за нормальним законом, то випадкова величина $Y = e^X$ позитивна і розподілена за логнормальним законом. В окремому випадку нормальний

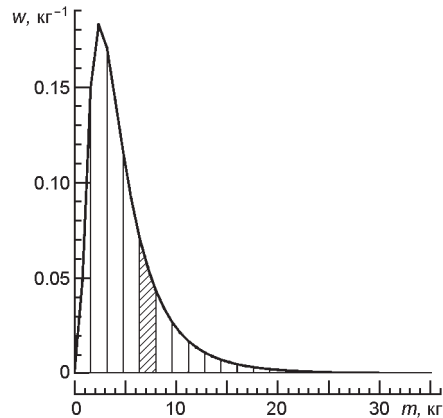


Рис. 15. Логнормальна щільність розподілу при моделюванні руйнування Челябінського метеороїда. Площа заштрихованої області дорівнює частці фрагментів з масою від 6.5 до 8 кг (03:20:23 UT)

закон можна моделювати сумою великого числа близьких за значенням незалежних випадкових величин $X = x_1 + \dots + x_n$. Тоді випадкову величину Y можна подати у вигляді

$$Y = e^X = e^{x_1 + x_2 + \dots + x_n} = e^{x_1} e^{x_2} \dots e^{x_n} = y_1 y_2 \dots y_n.$$

В даному вигляді формування випадкової величини Y відповідає закону зростання, коли значення підсумкової величини Y «масштабують» всі елементи y_1, y_2, \dots, y_n рівною мірою.

В цьому випадку у дробленні метеороїда беруть участь різні поверхневі шари рівною мірою, тобто руйнування зачіпає і глибоко розташовані шари речовини, сприяє утворенню великих фрагментів.

Будемо вважати, що у будь-який момент часу падіння метеороїда витрата результатів дроблення протягом наступної секунди складаються більш ніж з 20 груп фрагментів. У кожній групі фрагменти вважаємо однаковими, бо представники сусідніх груп розрізняються по масі не більше, ніж на 5%. Приклад логнормального розподілу при моделюванні руйнування Челябінського метеороїда, розділеного на такі групи, представлено на рис. 15.

Наприклад, за період часу 03:20:22...03:20:23 UT маса новостворених фрагментів становила 32 т (рис. 14). Заштрихована область на рис. 15 представляє частку фрагментів масою від 6.5 до 8 кг, яка дорівнює $0.05(8 - 6.5) = 0.075 = 7.5\%$. Отже, виділена маса фрагментів становитиме 2.4 т.

Використання параметрів логнормального розподілу дає можливість послабити обмеження підвищеної міцності невеликих фрагментів (див. співвідношення (11)). Для цього досить вибрати в щільності розподілу інші значення математичного очікування або середнього квадратичного відхилення.

Степеневий закон. Відомо, що маси астероїдів можуть бути розподілені по іншому, а саме, степеневому закону [11]. Розміри та маси

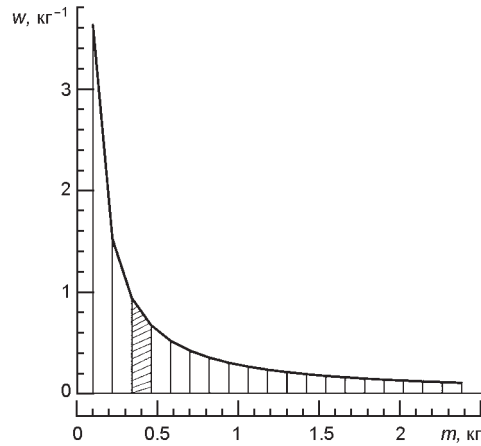


Рис. 16. Щільність розподілу мас фрагментів за степеневим законом (15) з параметрами $m_1 = 0.1$ кг; $m_2 = 2.5$ кг; $\alpha = 1.1$. Площа заштрихованої області дорівнює частці обраних фрагментів

цих небесних тіл формуються в результаті зіткнень з подальшим дробленням протягом тривалого періоду часу. Щільність розподілу за степеневим законом має вигляд

$$w(m) = \frac{1}{m_1^\alpha} \frac{1}{m_2^\alpha} \frac{1}{m}, \quad \alpha > 1, \quad (15)$$

$$w(m) = \frac{1}{\ln m_2} \frac{1}{\ln m_1} \frac{1}{m}, \quad \alpha = 1,$$

де m_1 і m_2 — мінімальна і максимальна межі розподілу маси фрагментів; α — показник степеня. Приклад такого розподілу наведено на рис. 16.

Основний розподіл мас за степеневим законом, як видно з рис. 16, зосереджено в області малих значень, тобто пилу. Це можливо у випадку руйнування метеороїда у тонкому поверхневому шарі при швидких ковзних ударах.

Рівномірний розподіл. Для пухких космічних тіл з низькою міцністю речовини використовуємо рівномірну щільність розподілу:

$$w(m) = \frac{1}{m_2} \frac{1}{m_1}, \quad (16)$$

де m_1 і m_2 — мінімальна та максимальна межі мас. Приклад рівномірного розподілу для $m_1 = 0.1$ кг; $m_2 = 6.5$ кг наведено на рис. 17. Використовується рівномірний розподіл у випадку нестачі даних про характер руйнувань.

Дрібні фрагменти. При безперервному руйнуванні речовини метеороїда утворюються дрібні фрагменти. Протягом 1...2 с ці фрагменти згоряють, викликаючи явище метеора, і далі не вносять вкладу у

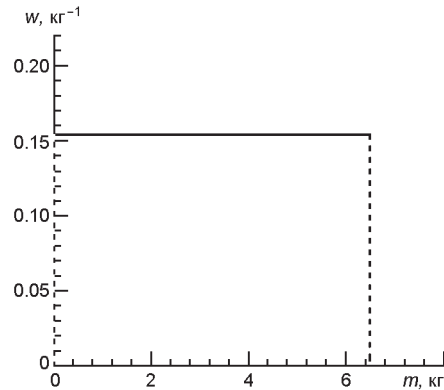


Рис. 17. Щільність рівномірного розподілу

формування довжини хвоста боліда. Дослідження [3] показують, що метеори масою до 1 кг повністю згорають у щільних шарах атмосфери, не досягаючи висоти 70 км. При відомій швидкості метеори різної маси досягають різних висот, званих висотою метеора [3], і згорають. Отже, для кожної висоти при відомій швидкості визначається гранична маса і час життя малого фрагмента.

При русі фрагментів до поверхні Землі густина атмосфери збільшується, а швидкість метеороїда зменшується. Припустимо, що гранична маса m_b фрагментів, що повністю згорають, пропорційна аеродинамічному тиску $p \propto v^2$:

$$\frac{m_b}{m_2} = \frac{m_1}{m_1} \frac{p}{p_2} = \frac{p}{p_1}, \quad (17)$$

де p_1 і p_2 — граничні значення аеродинамічного тиску; m_1 і m_2 — межі мас фрагментів, що згорають. Масу $m_b = 37.5$ кг розраховано в результаті процедури наближення спостережуваних довжин хвостів до розрахункових. Результат наближення для Челябінського метеороїда за формулою (17) з зазначенням граничних точок 1 і 2, представлено на рис. 18.

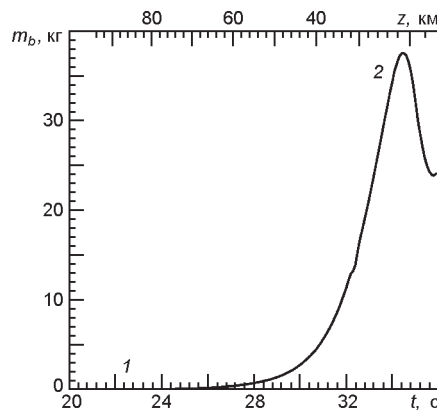


Рис. 18. Висотно-часові зміни маси фрагментів, що згорають (03:20:00 UT)

Методика розрахунку дроблення метеороїда та переміщення фрагментів, що відокремилися, задавалась такою.

Кожну секунду падіння метеороїда, з 03:20:21 по 03:20:36 UT, відокремлюємо фрагменти, відповідні поточним витратам (див. рис. 14). Маса фрагментів вибираємо згідно з прийнятим законом розподілу.

Фрагменти з масою, що не досягають граничної метеорної висоти (див. рис. 18), виключаються з подальшого розрахунку. Велика кількість дрібних фрагментів, тобто пил, створює поверхню гальмування та відповідно поверхню випаровування. Викиди великої кількості таких дрібних фрагментів призводять до додаткових втрат кінетичної енергії фрагментів з наступним спалахом випромінювання.

Через те що фрагментів з однаковою масою безліч, то розрахунок ведеться за окремим фрагментом, званим представником.

Фрагмент, що відокремився, має початкову швидкість, яка дорівнює поточній швидкості метеороїда на момент відділення. Далі розраховується траєкторія руху представника відповідно до рівняння руху (13).

З інтервалом $t = 1$ с розраховується відстань від голови метеороїда до фрагмента. Положення голови метеороїда визначається за даними спостережень [37].

Підбором параметрів розподілу та граничної маси згоряння m_b проводиться узгодження розрахункової довжини хвоста з аналогічним параметром боліда, що спостерігається (див. рис. 12).

Таким чином, керовані параметри є ланцюжком розподілів маси фрагментів і граничної маси згоряння m_b у формулі (17).

РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ

Об'єм боліда, що спостерігається завдяки свіченню, відрізняється від об'єму метеороїда у більшу сторону. Водночас довжини хвостів боліда та метеороїда мало відрізняються один від одного і можуть служити основою для моделювання процесу дроблення.

Наближення логнормальним розподілом. Результат наближення довжини хвоста метеороїда з фрагментами логнормального розподілу (16) до довжини хвоста спостережуваного боліда представлено на рис. 19.

На рис. 19а інтерес становлять дві ділянки припинення зростання та навіть зменшення довжини хвоста боліда. Це пов'язано з внутрішніми перетвореннями речовини метеороїда в інтервалі часу 26...28 с, рис. 19б. Можливо, це була зміна агрегатного стану речовини [32] або каскадне вибухове руйнування [7].

Як видно з рис. 19б (крива 1), на інтервалі часу 26...28 с дрібні фрагменти стали причиною явища метеорів. Перший спалах стався в інтервалі 29...30 с [9]. При цьому відсутність достатньої кількості великих фрагментів, які формують хвіст, знайшла відгук на 32...33-й с

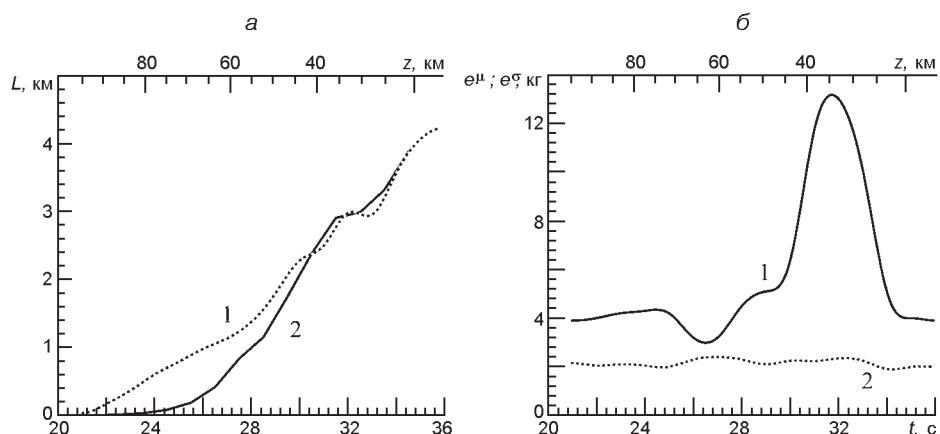


Рис. 19. Висотно-часові зміни (03:20:00 UT): a — довжини хвоста L (1 — спостережуваної, рис. 12б, 2 — розподіленої логнормально); b — параметрів розподілу (1 — середнього значення e , 2 — середнього квадратичного значення e^2)

(рис. 19а), і призвела навіть до зменшення довжини хвоста (рис. 12б). Приблизно за 5...6 с відгук від внутрішнього перетворення речовини перемістився на 3 км. Це дає величину відносної швидкості руху фрагментів вздовж хвоста, близьку до 500...600 м/с.

В інтервалі часу 21...29 с та в діапазоні висот 100...50 км (див. рис. 19а) мають місце суттєві відмінності між розрахунковою та спостережуваною довжинами хвоста. На цих висотах сили в рівнянні руху (12) ще слабкі та не забезпечують утворення спостережуваної довжини хвоста.

Відмінності довжин хвостів можна пояснити так. Припустимо, що за метеороїдом прямує рій дрібних уламків. Уламки рою стають видимими у метеорній зоні та згорають у процесі входження у щільні шари атмосфери. Схему входження метеороїда з роєм наведено на рис. 20, де показано довжину L_m видимої частини хвоста, утворену власними фрагментами метеороїда, та повну довжину L_o хвоста з урахуванням фрагментів рою, що згорають. Різницю $L - L_o - L_m$ між довжиною хвоста, що спостерігається, та розрахунковою можна

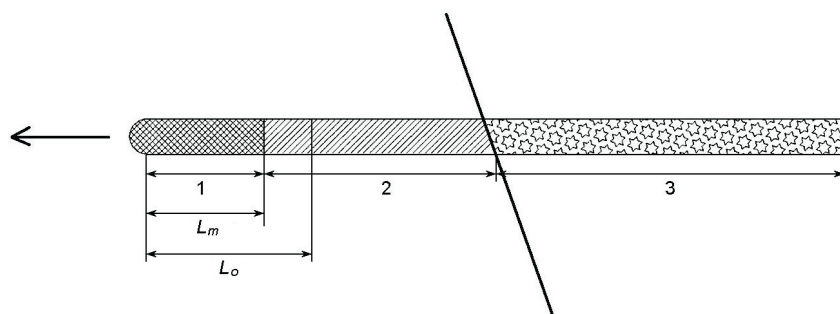


Рис. 20. Схема входу рою фрагментів в атмосферу. Стрілкою вказано напрямок руху метеороїда. Ділянки хвоста: 1 — метеороїд із фрагментами власного дроблення, 2 — частина рою, яка увійшла в атмосферу, 3 — невидима частина рою, поза атмосферою

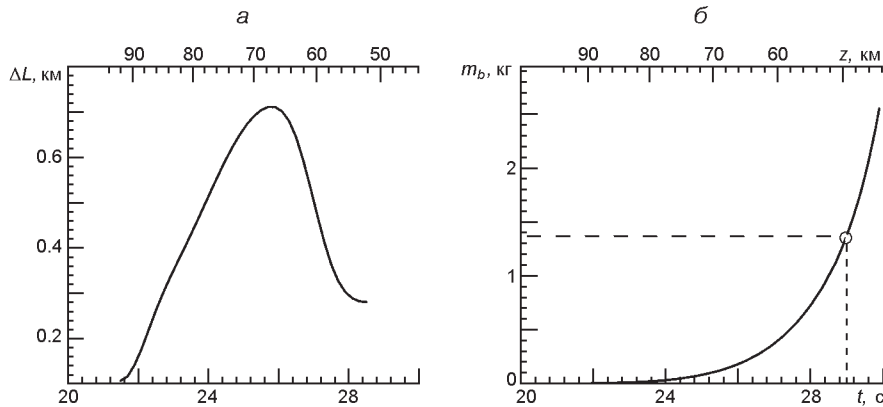


Рис. 21. Висотно-часові зміни: *a* — довжини рою; *б* — граничних мас фрагментів, що згоряють (03:20:00 UT)

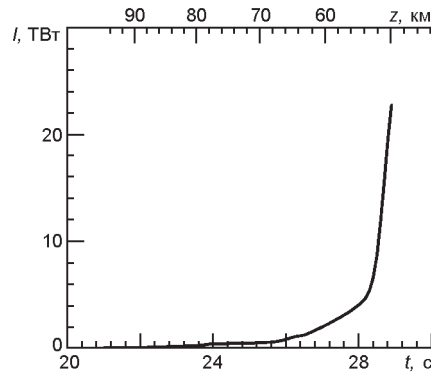


Рис. 22. Висотно-часові зміни інтенсивності I випромінювання метеороїда в інтервалі згоряння рою фрагментів (03:20:00 UT)

розглядати як довжину рою. Її висотно-часову зміни представлено на рис. 21*a*. Як видно, максимальна видима довжина рою досягається у момент часу 26 с на висоті 67 км. Отже, для висоти входу в атмосферу $z = 97$ км мінімальна повна довжина рою досягає 30 км, а максимальна виявлена довжина рою становила 0.76 км. В інтервалі висот 100... 67 км, згідно з рис. 21*б*, згоряли фрагменти масою 0.001...0.2 кг, а в інтервалі висот 67...50 км — фрагменти масою 0.2...1.4 кг.

Для оцінки маси рою скористаємося інтенсивністю випромінювання $I(t)$ в інтервалі часу 21...29 с. Енергія випромінювання, згідно з рис. 22, розраховується як

$$E_o = \int_{21}^{29} I(t) dt \approx 20 \text{ ТДж.}$$

Припустимо, що енергія випромінювання рівномірно розподілена по довжині хвоста метеороїда, тоді спостережувана і модельна енергії випромінювання частин хвоста також будуть пропорційні відповідним довжинам, усередненим за часом:

$$E_o = \langle L_o \rangle_t, \quad E_m = \langle L_m \rangle_t,$$

де $L_o(t)$, $L_m(t)$ — довжини частини хвоста, що спостерігається та моделюється. Тоді частка енергії випромінювання виявленої частини рою в цьому випадку оцінимо як

$$\frac{\langle L_o \rangle_t}{\langle L_m \rangle_t} = 0.55,$$

де усереднення за часом відбувається уздовж відповідних частин хвоста. Енергія випромінювання рою дорівнює $E_r = 0.55E_o = 11$ ТДж. Для такої енергії випромінювання рою коефіцієнт світності дорівнює [34]

$$I = 0.1212(E_r / 4.185)^{0.115} = 0.14.$$

Згідно з визначенням коефіцієнта світності кінетична енергія рою дорівнюватиме $E = E_r / I = 11/0.14 = 81$ ТДж, де E_r — енергія випромінювання рою. Вважаючи швидкість рою постійною та рівною початковій швидкості метеороїда 19.8 км/с, отримуємо оцінку маси рою:

$$M = \frac{2E}{v^2} = 0.4 \text{ кт.}$$

Частка маси рою у порівнянні з масою метеороїда 11.6 кт досягає 0.034, або 3.4 %. Енергетична частка випромінювання рою становить $E_r / E_o = 100 \% = 0.6 \%$, де E_o — початкова кінетична енергія метеороїда.

Згідно з рис. 19а і 21б рій згоряє повністю до моменту часу $t = 29$ с, де гранична маса згоряння досягає 1.4 кг. Для степеневого закону розподілу маси з максимальною масою фрагмента 1.4 кг і $\alpha = 1$ розподіл рою по значеннях маси представлено на рис. 23.

Як приклад, на рис. 23 під кривою виділимо прямокутником частину фрагментів рою. Інтервал мас фрагментів тут становить 0.35...0.42 кг, а щільність розподілу змінюється у межах 1.1...0.9 кг^{-1} . Отже, масова частка виділених фрагментів у рої дорівнює

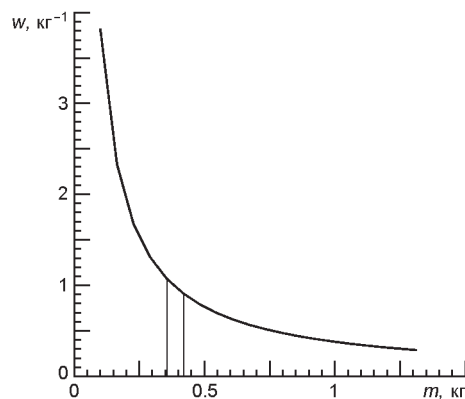


Рис. 23. Щільність розподілу фрагментів рою по масі

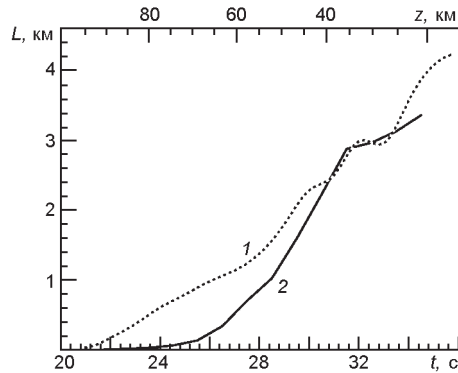


Рис. 24. Висотно-часові залежності довжини хвоста (03:20:00 UT): 1 — крива, що спостерігається, 2 — згідно із степеневим розподілом

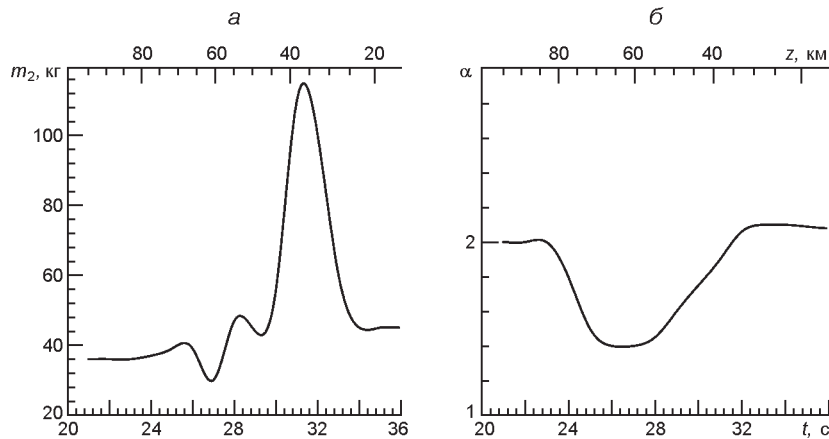


Рис. 25. Висотно-часові зміни параметрів розподілу за степеневим законом (03:20:00 UT): а — верхня межа значень маси m_2 , б — показник степеня

$$P = 1.0 (0.42 - 0.35) = 0.07.$$

З урахуванням маси рою 0.4 кт маса виділених фрагментів приблизно дорівнює 28 т.

Наближення степеневим законом розподілу. Результат наближення степеневим законом представлено на рис. 24. Параметри розподілів за степеневим законом (17) досягли значень, наведених на рис. 25.

Зменшення частки великих фрагментів на користь дрібніших в інтервалі часу 26...28 с призводить до викиду великої кількості дрібних фрагментів, пилу, які, згоряючи протягом 1 с, призводять до першого спалаху. Якби в цьому розподілі були більші фрагменти, то вони б перемістилися до хвоста на 32-гу секунду після початку спостереження. Але через їхню відсутність в цей час зростання уповільнилось та навіть зменшилась довжина хвоста.

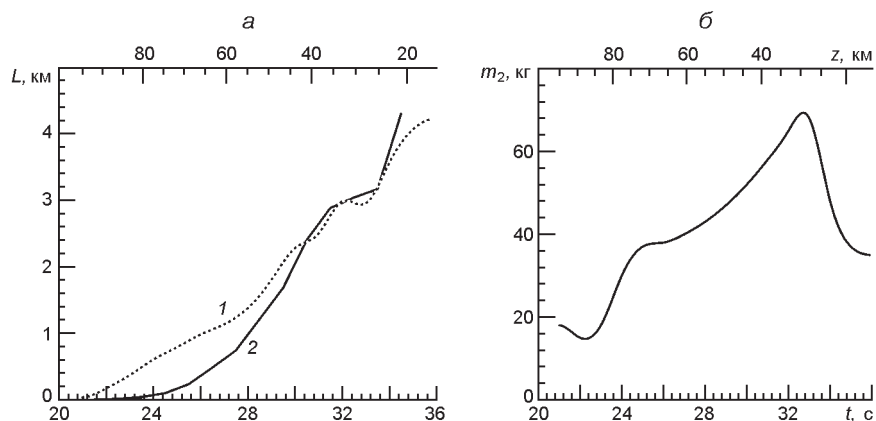


Рис. 26. Висотно-часові залежності (03:20:00 UT): а — довжини хвоста (1 — спостережувана, 2 — згідно із рівномірним розподілом); б — верхня межа розподілу мас

Наближення рівномірним законом розподілу. Результат наближення наведено на рис. 26. Безперервне збільшення великих фрагментів при рівномірному розподілі (16), викликане збільшенням аеродинамічного тиску, призупиняється на 25-й секунді, залишаючи тільки дрібні фрагменти (рис. 26б). Тим самим породжується велика кількість метеорів, які забезпечують перший спалах і «скорочення» довжини метеороїда.

Рівномірний розподіл характерний для метеороїдів з коротким, але товстим хвостом. Наявність значної кількості великих фрагментів у рівномірному розподілі забезпечує і збільшення розмірів голови болюда.

Порівняння трьох різних розподілів мас фрагментів вказує на те, що для забезпечення прийнятної наближення у початковому проміжку часу 21...25 с необхідна досить велика кількість дрібних уламків, які не пов'язані безпосередньо з метеороїдом. Для опису дрібних фрагментів найкраще підходить степеневий закон розподілу мас.

Логнормальний закон розподілу краще, ніж степеневий і рівномірний, описує ефект уповільнення росту довжини хвоста на завершальному етапі падіння завдяки кращому врахуванню великих фрагментів.

Руйнування метеороїда можна поділити на три етапи.

Етап 1. 21...29 с. «Пуголовок ... Куля з тонким хвостом» [9]. Діаметр хвоста відноситься до довжини хвоста як 1:4. Подібний розподіл мас характерний для розподілу за степеневим законом завдяки наявності досить великої кількості дрібних фрагментів. Припускаємо, що руйнування метеороїда відбувається у вигляді відколу та лущення бічної поверхні. Цей процес руйнування є основним при невисокому аеродинамічному тиску. Рівномірний розподіл мас, у свою чергу, забезпечує швидке зростання діаметра голови за рахунок зменшення довжини хвоста. Фотографію з межами болюда представлено на рис. 27а.

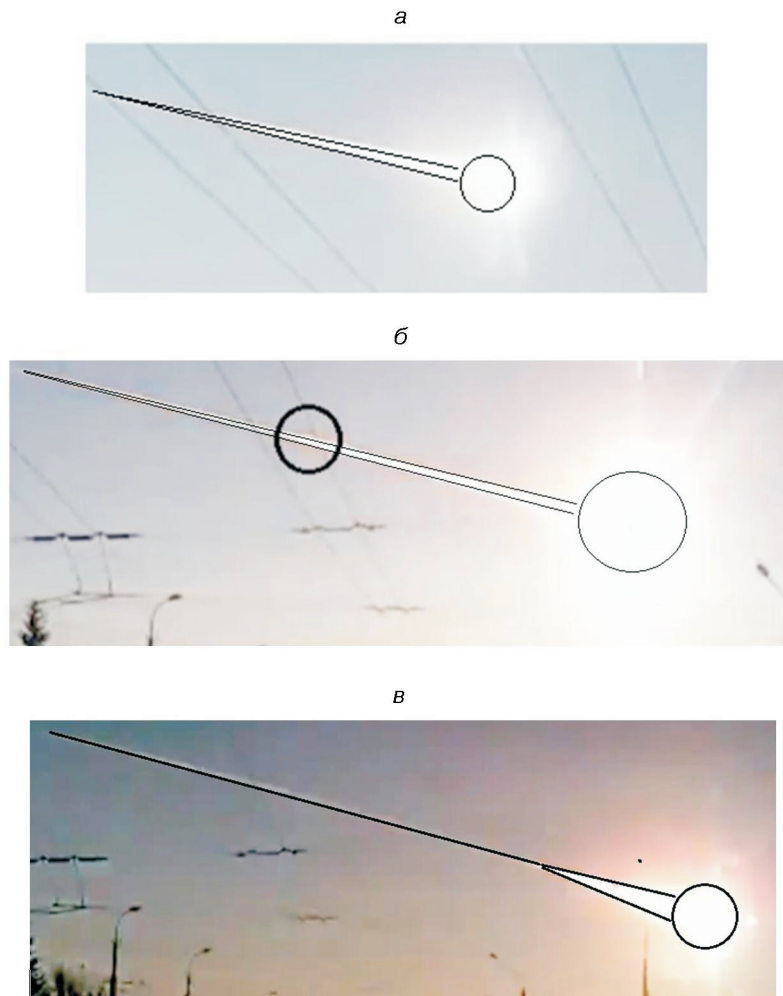


Рис. 27. Послідовні зображення боїда: *а* — характерний вид з початку реєстрації (момент часу 03:20:28 UT), *б* — початок першого спалаху (відмічено колом на хвості) — момент часу 03:20:31 UT, *в* — момент часу 03:20:32 UT

Етап 2. 30...31 с. «Перший спалах. Куля з потовщеним хвостом» [9]. Для даної події найкраще підходить розподіл за степеневим і частково рівномірним законом. Спалах викликаний наявністю чималої кількості пилу. Фотографію представлено на рис. 27б.

Етап 3. 31.5...33 с. «Основний спалах. Куля з променями. Куля з тонким хвостом» [9]. Для даного етапу підходить логнормальний і частково рівномірний закон. Фотографію представлено на рис. 27в.

ОБГОВОРЕННЯ

Використання робочого діапазону довжин хвиль у приладах спостереження Е. Епіка дозволило оцінити енергію випромінювання в 21 % від початкової кінетичної енергії метеороїда [3]. Це узгоджується з

результатами робіт відомої групи американських астрономів на чолі з П. Брауном, де енергія випромінювання для даної початкової кінетичної енергії дорівнювала приблизно 20 % [34]. Незначну відмінність результатів можна пояснити індивідуальними характеристиками Челябінського метеороїда.

При визначенні реальних розмірів боліда за даними С. Замоздри основні похибки вносять оціночні умовні вимірювання розмірів і вибір напрямку камери спостереження на точку траєкторії [9]. Нагадаємо, що напрямок руху метеороїда був приблизно зі сходу на захід, а камеру спостереження було спрямовано на південь, приблизно у напрямку на точку випаровування кремнію з відомою площею випромінювання боліда.

Поділ фрагментів на дрібні уламки, що згоряють на своїй метеорній висоті, та великі уламки, що не руйнуються, дозволив забезпечити спостереження за хвостом і вимірювання його довжини. У той же час великі фрагменти до моменту входження до області власних метеорних висот не проявляються у видимому діапазоні. Під час вибуху з різким гальмуванням основної хмари дрібних уламків спостерігався подальший рух великих фрагментів. Моделювання вторинного та наступних руйнувань є досить складною задачею.

ВИСНОВКИ

1. Уточнення меж робочого оптичного діапазону Е. Епіка дозволило поліпшити оцінку енергії випромінювання, яка дорівнює 21 %, що є близьким до результатів П. Брауна.

2. Розрахункові розміри боліда досягали в діаметрі 2 км, а в довжину — 3.5...4 км.

3. Для кам'яного метеороїда типу LL5 руйнування призводило до утворення фрагментів, розподілених за масою на початковій фазі за степеневим законом. На проміжній фазі закон розподілу встановити не вдалося. На завершальній фазі до вибуху розподіл, близький до лог-нормального.

4. Оцінено характеристики рою уламків, які, можливо, супроводжували основне космічне тіло. Енергія випромінювання рою становила 0.6 % відносно початкової енергії метеороїда. Маса рою досягала 3.4 % відносно початкової маси метеороїда.

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». Також робота частково фінансувалася у рамках держбюджетних НДР, заданих МОН України (номери держреєстрації 0119U002538, 0121U109881 та 0121U109882).

1. Алпатов В. В., Буров В. А., Вагин Ю. П., Галкин К. А., Гивишвили Г. В., Глухов Я. В., Давиденко Д. В., Зубачев Д. С., Иванов В. Н., Кархов А. Н., Коршунов В. А., Лапшин В. Б., Лещенко Л. Н., Лысенко Д. А., Минлигареев В. Т., Морозова М. А., Перминова Е. С., Портнягин Ю. И., Русаков Ю. С., Сталь Н. Л., Сыроешкин А. В., Тертышников А. В., Тулинов Г. Ф., Чичаева М. А., Чудновский В. С., Штырков А. Ю. *Геофизические условия при взрыве Челябинского (Чебаркульского) метеороида 15.02.2013 г.* Москва: ФГБУ ИПГ. 2013. 37 с.
2. *Астрономический вестник*. 2013. 47. № 4. (Тематический выпуск).
3. Бабаджанов П. Б. *Метеоры и их наблюдения*. Москва: Наука. Главная редакция физ.-мат. наук, 1987. 176 с.
4. Бронштэн В. А. *Физика метеорных явлений*. Москва: Наука, 1981. 416 с.
5. Бронштэн В. А. Дробление и разрушение крупных метеорных тел в атмосфере. *Астрон. вестн.* 1995. 29. № 5. С. 450—458.
6. Ворошилов В. Г. *Математическое моделирование в геологии. Учебное пособие*. Томск: Изд-во ТПУ, 2001. 124 с.
7. Дудоров А. Е., Майер А. Е. Движение и разрушение челябинского метеороида в атмосфере. *Вестн. Челябинского гос. ун-та. Физика*. 2014. № 1 (330). Вып. 19. С. 47—57.
8. Емельяненко В. В., Попова О. П., Чугай Н. Н., Шеляков М. А., Пахомов Ю. В., Шустов Б. М., Шувалов В. В., Бирюков Е. Е., Рыбнов Ю. С., Маров М. Я., Рыхлова Л. В., Нароенков С. А., Карташова А. П., Харламов В. А., Трубецкая И. А. Астрономические и физические аспекты челябинского события 15 февраля 2013 года. *Астрон. вестн.* 2013. 47, № 4. С. 262—277.
9. Замоздра С. Н. Характеристики Челябинского суперболида. *Вестн. Челябинского гос. ун-та. Физика*. 2014. № 1 (330). Вып. 19. С. 6—15.
10. *Катастрофические воздействия космических тел*. Под ред. В. В. Адушкина и И. В. Немчикова. Москва: ИХЦ Академкнига, 2005. 310 с.
11. Кручиненко В. Г. *Математико-фізичний аналіз метеорного явища*. Київ: Наук. думка, 2012. 294 с.
12. *Материалы международной научно-практической конференции. Астероиды и кометы. Челябинское событие и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль*. Под ред. В. А. Алексеева. Челябинск: Край Ра, 2013. 168 с.
13. Медведев Р. В. Определение механических и тепловых свойств метеоритов Кунашак и Еленовка. *Метеоритика*. 1974. 33. С. 100—104.
14. *Метеорит Челябинск — год на Земле: материалы Всероссийской научной конференции*. Под ред. Н. А. Антипина. Челябинск: Изд-во Каменный пояс, 2014. 694 с.
15. Милованов Ю. Б., Черногор Л. Ф. Регуляризация алгоритма расчета высотновременных характеристик, описывающих динамику падения Челябинского метеороида. *Вісник Харків. нац. ун-та ім. В. Н. Каразіна. Сер. Радіофізика та електроніка*. 2017. Вип. 26. С. 75—79.
16. Попова О. П., Шувалов В. В., Рыбнов Ю. С., Харламов В. А., Глазачев Д. О., Емельяненко В. В., Карташова А. П., Дженнискенс П. Параметры Челябинского метеороида: анализ данных. *Динамические процессы в геосферах: сб. науч. тр. ИДГ РАН*. Москва: Геос., 2013. Вып. 4. С. 1—10.
17. Попова О. П., Шувалов В. В., Рыбнов Ю. С., Харламов В. А., Глазачев Д. О., Емельяненко В. В., Карташова А. П., Дженнискенс П. Параметры Челябинского метеороида: анализ данных. *Метеорит Челябинск — год на Земле: материалы Всероссийской научной конференции*. Под ред. Н. А. Антипина. Челябинск: Изд-во Каменный пояс, 2014. С. 364—376.

18. *Справочное руководство по небесной механике и астродинамике*. Под ред. Г. Н. Дубошина. Изд. второе. Москва: Наука, 1976. 862 с.
19. Стулов С. П., Мирский В. Н., Вислый А. Н. *Аэродинамика болидов*. Москва: Наука. Физматлит, 1995. 240 с.
20. *Челябинский суперболид*. Под ред. Горькавого Н. Н., Дудорова А. Е.. Челябинск: Изд-во Челябинского ун-та, 2016. 223 с.
21. Черногор Л. Ф. Основные физические явления при полете Челябинского космического тела. *Материалы международной научно-практической конференции "Астероиды и кометы. Челябинское событие и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль"* (Чебаркуль, 21—22 июня 2013 г.). Челябинск: Край Ра, 2013. С. 148—152.
22. Черногор Л. Ф. Плазменные, электромагнитные и акустические эффекты метеорита "Челябинск". *Инженерная физика*. 2013. № 8. С. 23—40.
23. Черногор Л. Ф. Крупномасштабные возмущения магнитного поля Земли, сопровождавшие падение Челябинского метеороида. *Радиофизика и электроника*. 2013. 4 (18). № 3. С. 47—54.
24. Черногор Л. Ф. Эффекты Челябинского метеороида в геомагнитном поле. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2014. 54. № 5. С. 658—669. DOI: 10.7868/S0016794014050034
25. Черногор Л. Ф. Основные эффекты падения метеорита Челябинск: результаты физико-математического моделирования. *Метеорит Челябинск — год на Земле: материалы Всероссийской научной конференции*. Под ред. Н. А. Антипина. Челябинск: Изд-во Каменный пояс, 2014. С. 229—264.
26. Черногор Л. Ф. Эффекты Челябинского метеороида в ионосфере. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2015. 55. № 3. С. 370—385. DOI: 10.7868/S0016794015030049
27. Черногор Л. Ф. Акустические эффекты Челябинского метеороида. *Радиофізика і радіоастрономія*. 2017. 22, № 1. С. 3—66. DOI: 10.15407/rpra22.01.053
28. Черногор Л. Ф. Атмосферно-сейсмический эффект Челябинского метеороида. *Радиофізика і радіоастрономія*. 2017. 22, № 2. С. 123—137. DOI: 10.15407/rpra22.02.123
29. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Ионосферные возмущения, сопровождавшие пролет Челябинского тела. *Кинематика и физика небес. тел*. 2014. 30, № 3. С. 27—42.
30. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П. Возмущения в геокосмосе, сопровождавшие падение метеорита "Челябинск". *Радиофизика и радиоастрономия*. 2013. 18, № 3. С. 231—243.
31. Черногор Л. Ф., Милованов Ю. Б. Динамика падения Челябинского метеороида: высотно-временные зависимости. *Радиофізика і радіоастрономія*. 2018. 23, № 2. С. 104—115. DOI: 10.15407/rpra23.02.104
32. Черногор Л. Ф., Милованов Ю. Б. Динамика падения Челябинского метеороида: материально-энергетический баланс. *Радиофізика і радіоастрономія*. 2018. 23, № 3. С. 176—188. DOI: 10.15407/rpra23.03.176.
33. 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. DOI: 10.15407/knit2013.06.038
34. Brown P., Spalding R. E., ReVelle D. O., Tagliaferri E., Worden S. P. The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth. *Nature*. 2002. 420. № 6913. P. 294—296. DOI: 10.1038/nature01238.

35. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. The physical effects associated with Chelyabinsk meteorite's passage. *Probl. Atom. Sci. Technol.* 2013. 86. № 4. P. 136—139.
36. Grigoryan S. S., Ibadov F. S., Ibadov S. I. Physical mechanism of Chelyabinsk superbolide explosion. *Sol. Syst. Res.* 2013. 47, № 4. P. 268—274. DOI: 10.1134/S0038094613040151
37. Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko 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., Harlamov V., Solovyov A., Rusakov Y. S., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A. V., Larionov M. Y., 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 Y., 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. 6162. P. 1069—1073. DOI: 10.1126/science.1242642
38. Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko 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., Harlamov V., Solovyov A., Rusakov Y. S., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A. V., Larionov M. Y., 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 Y., 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 materials for Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization. *Science*. 2013. 342.
39. Svetsov V. V. Disintegration of large meteoroids in Earth's atmosphere: Theoretical models. *Icarus*. 1995. 116. P. 131—153. URL: <http://dx.doi.org/10.1006/icar.1995.1116>
40. Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability. *J. Appl. Mech.* 1951. 18. P. 293—297.

REFERENCES

1. Alpatov V. V., Burov V. A., Vagin Yu. P., Galkin K. A., Givishvili G. V., Glukhov Ya. V., Davidenko D. V., Zubachev D. S., Ivanov V. N., Karkhov A. N., Korshunov V. A., Lapshin V. B., Leshchenko L. N., Lysenko D. A., Minligareev V. T., Morozova M. A., Perminova E. S., Portnyagin Yu. I., Rusakov Yu. S., Stal N. L., Syroeshkin A. V., Tertysnikov A. V., Tulinov G. F., Chichaeva M. A., Chudnovsky V. S., Shtyrkov A. Yu. (2013). Geophysical conditions during the explosion of the Chelyabinsk (Chebarkul) meteoroid on February 15, 2013 Moscow: FGBU IPG. 37.
2. *Astronomicheskii Vestnik*. (2013). 47(4). (Thematic issue).
3. Babadjanov P. B. (1987). *Meteors and their observations*. Moscow: Science. Main editorial office physical math. nauk. 176.
4. Bronsten V. A. (1981). *Physics of meteoric phenomena*. Moscow: Nauka. 416 p.
5. Bronshten V. A. (1995). Crushing and destruction of large meteoric bodies in the atmosphere. *Astronomicheskii Vestnik*. 29(5). 450—458.

6. Voroshilov V. G. (2001). *Mathematical modeling in geology*. Tutorial. Tomsk: Ed. TPU. 124 p.
7. Dudorov A. E., Mayer A. E. (2014). Movement and destruction of the Chelyabinsk meteoroid in atmosphere. *Bull. Chelyabinsk State Univer. Phys.* 1(330). 19. 47—57.
8. Emelianenko V. V., Popova O. P., Chugay N. N., Shelyakov M. A., Pakhomov Yu. V., Shustov B. M., Shuvalov V. V., Biryukov E. E., Rybnov Yu. S., Marov M. Ya., Rykhlova L. V., Naroenkov S. A., Kartashova A. P., Kharlamov V. A., Trubetskaya I. A. (2013). Astronomical and physical aspects of the Chelyabinsk event on February 15, 2013. *Astron. Vestnik.* 47(4). 262—277.
9. Zamozdra S. N. (2014). Characteristics of the Chelyabinsk superbolide. *Chelyabinsk Bull. state univer. Phys.* 1(330). 19. 6—15.
10. Catastrophic effects of cosmic bodies. (2005). Eds V. V. Adushkin, I. V. Nemchikov. Moscow: Akademkniga. 310.
11. Kruchinenko V. G. (2012). *Mathematical and physical analysis of meteoric manifestation*. Kiev: Naukova dumka. 294.
12. Materials of the international scientific and practical conference. (2013). Asteroids and comets. Chelyabinsk event and study of the fall of a meteorite into Lake Chebarkul. Ed. V. A. Alekseeva. Chelyabinsk: Land of Ra. 168.
13. Medvedev R. V. (1974). Determination of the mechanical and thermal properties of the Kunashak meteorites and Yelenovka. *Meteoritics.* 33. 100—104.
14. Meteorite Chelyabinsk — a year on Earth: materials of the All-Russian scientific conference. (2014). Ed. N. A. Antipina. Chelyabinsk: From the Stone Belt. 694.
15. Mylovanov Yu. B., Chernogor L. F. (2017). Regularization of the algorithm for calculating the height temporal characteristics describing the dynamics of the fall of the Chelyabinsk meteoroid. *Visnik of Kharkiv National University for the Name of V. N. Karazin. Series «Radio physics and electronics».* 26. 75—79.
16. Popova O. P., Shuvalov V. V., Rybnov Yu. S., Kharlamov V. A., Glazachev D. O., Emelianenko V. V., Kartashova A. P., Jenniskens P. (2013). Parameters of the Chelyabinsk meteoroid: data analysis. *Dynamic processes in geospheres: collection of articles. scientific tr. IDG RAS.* Moscow: Geos. 4. 1—10.
17. Popova O. P., Shuvalov V. V., Rybnov Yu. S., Kharlamov V. A., Glazachev D. O., Emelianenko V. V., Kartashova A. P., Jenniskens P. (2014). Parameters of the Chelyabinsk meteoroid: data analysis. *Meteorite Chelyabinsk — a year on Earth: materials of the All-Russian scientific conference.* Ed. N. A. Antipina. Chelyabinsk: Stone Belt Publishing House. 364—376.
18. *A reference guide to celestial mechanics and astrodynamics.* (1976). Ed. Duboshina G. N., second edition. Moscow: Science. 862.
19. Stulov S. P., Mirsky V. N., Visly A. N. (1995). *Aerodynamics of bolides.* Moscow: Science. Fizmatlit. 240.
20. Chelyabinsk superbolide. (2016). Eds Gorkavyj N. N., Dudorov A. E. Chelyabinsk: Publishing House at the Chelyabinsk University. 223.
21. Chernogor L. F. (2013). Basic physical phenomena during the flight of the Chelyabinsk space body. *Materials of the international scientific-practical conference “Asteroids and comets. Chelyabinsk event and study of the meteorite fall into Lake Chebarkul” (Chebarkul, June 21—22, 2013)* Chelyabinsk: Land of Ra. 148—152.
22. Chernogor L. F. (2013). Plasma, electromagnetic and acoustic effects of a meteorite “Chelyabinsk”. *Engineering physics.* 8. 23—40.
23. Chernogor L. F. (2013). Large-scale disturbances of the Earth’s magnetic field, accompanying the fall of the Chelyabinsk meteoroid. *Radio physics and electronics.* 4(18). 3. 47—54.

24. Chernogor L. F. (2014). Effects of the Chelyabinsk meteoroid in the geomagnetic field. *Geomagnetism and aeronomy*. 54(5). 658—669. DOI: 10.7868/S0016794014050034
25. Chernogor L. F. (2014). The main effects of the meteorite fall Chelyabinsk: results of physical mathematical modeling. *Meteorite Chelyabinsk — year on Earth: materials of the All-Russian scientific conference*. Ed. N. A. Antipina. Chelyabinsk: Stone Belt Publishing House. 229—264.
26. Chernogor L. F. (2015). Effects of the Chelyabinsk meteoroid in the ionosphere. *Geomagnetism and aeronomy*. 55(3). 370—385. DOI: 10.7868/S0016794015030049
27. Chernogor L. F. (2017). Acoustic effects of the Chelyabinsk meteoroid. *Radio physics and radioastronomy*. 22(1). 3—66. DOI: 10.15407/rpra22.01.053
28. Chernogor L. F. (2017). Atmospheric-seismic effect of the Chelyabinsk meteoroid. *Radio physics and radio astronomy*. 22(2). 123—137. DOI: 10.15407/rpra22.02.123
29. Chernogor L. F., Barabash V. V. (2014). Ionospheric disturbances accompanying the passage Chelyabinsk body. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 30(3). 27—42.
30. Chernogor L. F., Garmash K. P. (2013). Perturbations in the geocosmos accompanying the fall meteorite «Chelyabinsk». *Radiophysics and radio astronomy*. 18(3). 231—243.
31. Chernogor L. F., Mylovanov Yu. B. (2018). Dynamics of the fall of the Chelyabinsk meteoroid: altitude-time dependences. *Radio physics and radio astronomy*. 23(2). 104—115. DOI: 10.15407/rpra23.02.104
32. Chernogor L. F., Mylovanov Yu. B. (2018). Dynamics of the fall of the Chelyabinsk meteoroid: material and energy balance. *Radio physics and radio astronomy*. 23(3). 176—188. DOI: 10.15407/rpra23.03.176.
33. Chernogor L. F., Mylovanov Yu. B., Fedorenko V. N., Tsymbal A. M. (2013). Satellite observations of ionospheric disturbances that followed the fall of the Chelyabinsk meteorite. *Space science and technology*. 19(6). 38—46. DOI: 10.15407/knit2013.06.038
34. Brown P., Spalding R. E., ReVelle D. O., Tagliaferri E., Worden S. P. (2002) The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth. *Nature*. 420(6913). 294—296. DOI: 10.1038/nature01238.
35. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. (2013). The physical effects associated with Chelyabinsk meteorite's passage. *Probl. Atom. Sci. Technol.* 2013. 86(4). 136—139.
36. Grigoryan S. S., Ibadov F. S., Ibadov S. I. (2013). Physical mechanism of Chelyabinsk superbolide explosion. *Sol. Syst. Res.* 47(4). 268—274. DOI: 10.1134/S0038094613040151
37. Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko 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., Harlamov V., Solovyov A., Rusakov Y. S., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A. V., Larionov M. Y., 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 Y., 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(6162). 1069—1073. DOI: 10.1126/science.1242642
38. Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko 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., Harlamov V., Solovyov A., Rusakov Y. S., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A. V., Larionov M. Y., 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 Y., 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 materials for Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization. *Science*. 342.
39. Svetsov V. V. (1995). Disintegration of large meteoroids in Earth's atmosphere: Theoretical models. *Icarus*. 116. 131—153.
URL: <http://dx.doi.org/10.1006/icar.1995.1116>
40. Weibull W. (1951). A statistical distribution function of wide applicability. *J. Appl. Mech.* 18. 293—297.

L. F. Chernogor, Yu. B. Mylovanov

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

DYNAMIC FALLING OF THE CHELYABINSK METEOROID: THE SIZES, RADIATION AND DESTRUCTION

The purpose of the paper is to obtain refined height-time dependences of radiation intensity and mass of the Chelyabinsk meteoroid during the fall, to determine the size of the bolide and to build a model of destruction with an estimate of the parameters of fragment distribution by mass. The study of the impact of large celestial bodies on the environment is an urgent task for forecasting environmental consequences. To calculate the radiation intensity, the time dependence of the bolides brightness and E. Epic's empirical formula were used. The Stefan-Boltzmann law and M. Planck's formula were used for the model of radiation of a perfect black body in a limited range of wavelengths. A method was found to determine the size of the bolide according to published observations from the video recorder. When constructing the model of continuous crushing, an adapted equation of motion of individual fragments was used. Three types of distribution of fragments by masses were tested: logarithmically normal, power and uniform. As a result of numerical simulation, the contribution of radiation energy is determined. It is shown that 21 % of the kinetic energy of a meteoroid is spent on radiation. The changes of mass, height-time dependences of the bolide size and values of parameters for different distributions of fragments by weight are calculated. The diameter of the bolide head reached 2 km, and the length of the tail was 3.5—4 km. It is established that at the initial stage of motion the results of fragmentation describes the power law distribution, and in denser layers of the atmosphere is lognormal. The characteristics of the swarm of stone fragments that may have been followed were estimated behind the meteoroid. The length of the swarm reached 30 km, the maximum mass of the swarm was estimated at 400 tons, and the radiation energy was 0.6 % relative to the initial kinetic energy of the meteoroid.

Key words: Chelyabinsk meteoroid, bolide, flash, perfect black body, Planck's formula, Stefan-Boltzmann's law, size of a bolide, fragments after mass, fragments cluster.

Стаття надійшла до редакції 01.04.2021

Після доопрацювання 01.04.2021

Прийнята до друку 24.06.2021