

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2020.02.058>

УДК 550.385.37: 550.388

**Л. Ф. Черногор**

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

## **Геомагнітні варіації, викликані прольотом і вибухом Липецького метеороїда: результати вимірювань**

*Перші спостереження магнітного ефекту метеорів і теоретичне пояснення ефекту було зроблено ще в середині ХХ століття. Механізми магнітного ефекту великих космічних тіл (розміром 1...10 м і більших) принципово відрізняються від механізмів збурень геомагнітного поля метеорами на іоносферних висотах. Падіння та вибух великих метеороїдів супроводжується генерацією потужної ударної хвилі, утворенням плюму, що призводять до геомагнітного ефекту. До теперішнього часу немає єдиної думки про головний механізм геомагнітного ефекту великих метеороїдів. Дослідники мають в своєму розпорядженні виміри для Тунгуського та Челябінського метеороїдів. Для Челябінського метеороїда виявлено та пояснено варіації геомагнітного поля як при падінні, так і після вибуху цього космічного тіла. Становить значний теоретичний і практичний інтерес аналіз результатів спостережень падіння будь-якого досить великого космічного тіла. Мета цієї роботи — викладення результатів аналізу варіацій магнітного поля, що виникли при русі Липецького метеороїда у магнітосфері та атмосфері Землі, оцінка й обговорення магнітного ефекту та його механізмів. Частота падіння подібних метеороїдів становить  $0.68 \text{ рік}^{-1}$ . З використанням даних Магнітометричної обсерваторії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (Харків, Україна) проведено аналіз часових варіацій горизонтальних складових геомагнітного поля в день падіння Липецького метеороїда (21 червня 2018 р.) та в контрольні дні (20 та 22 червня 2018 р.). Метеороїд мав початкову швидкість 14.4 км/с, початкову масу 113 т і розмір приблизно 4 м. Відстань від місця вибухоподібного виділення енергії метеороїдом до обсерваторії дорівнює 360 км. Виявилось, що проліт у магнітосфері та атмосфері Липецького метеороїда супроводжувався знакозмінними варіаціями складових геомагнітного поля. Магнітний ефект магнітосфери спостерігався за*

54...56 хв до вибуху метеороїда, амплітуда збурень геомагнітного поля не перевищувала 0.5... 1 нТл, тривалість — 15...20 хв. Після вибуху метеороїда з часом запізнення приблизно 6 хв спостерігалися знакозмінні (спочатку позитивний, потім негативний) сплески рівня *H*-складової. Амплітуда сплеску дорівнювала 1.2...1.5 нТл. Тривалість магнітного ефекту іоносфери при цьому дорівнювала десятки хвилин. Запропоновано моделі спостережуваних магнітних ефектів і виконано теоретичні оцінки. Результати спостережень і оцінок добре узгоджуються між собою.

**Ключові слова:** Липецький метеороїд, геомагнітні варіації, магнітний ефект магнітосфери, магнітний ефект іоносфери, вибуховий процес, ударна хвиля, теоретичні моделі.

## ВСТУП

Перші спостереження магнітного ефекту метеорів описано в роботах [12, 13]. Теоретичне пояснення цей ефект отримав ще в середині ХХ ст. [1]. Механізми магнітного ефекту великих космічних тіл (розміром 1...10 м і більше) принципово відрізняються від механізмів збурень геомагнітного поля метеорами на іоносферних висотах. Це пов'язано з тим, що падіння і вибух великих метеороїдів і астероїдів супроводжується генерацією потужної ударної хвилі на атмосферних висотах. Крім того, падіння досить великих космічних тіл супроводжується викидом на іоносферні висоти високошвидкісного (1...10 км/с) високотемпературного (~1000 К) струменя плазми, що отримав назву плюму [14, 26, 39].

Тільки через півстоліття після падіння тунгуського космічного тіла був виявлений і описаний магнітний ефект, викликаний прольотом і вибухом цього тіла [6]. Величина збурення геомагнітного поля, зареєстрована в Іркутській обсерваторії на відстані приблизно 1000 км від місця вибуху, була аномально великою, вона сягала 67 нТл, а тривалість магнітного ефекту дорівнювала 3...4 год [6, 8, 9, 11, 14, 39].

Ряд дослідників запропонували фізичні механізми, які могли викликати магнітний ефект тунгуського тіла [2—5, 7—11, 16, 17, 20]. Деякі механізми виявилися неефективними [5, 11, 16, 17, 20]. Перерахуємо механізми аперіодичних збурень геомагнітного поля метеороїдами, які не втратили своєї актуальності. Це — збурення системи іоносферних струмів [5, 7, 9, 10], утворення дипольного моменту у витягнутому плазмовому сліді [3], діамагнітне збурення, викликане ударною хвилею [10, 20] і магнітогідродинамічний ефект плюму [14, 15, 39]. В цілому всі ці механізми можуть робити свій внесок у магнітний ефект метеороїдів. Кожен з перерахованих механізмів здатний призвести до певного збурення геомагнітного поля, але зі своїми просторово-часовими масштабами.

До теперішнього часу немає єдиної думки про головний механізм магнітного ефекту, що викликається метеороїдами. Це пов'язано насамперед з малою кількістю спостережень. До останнього часу дослід-

ники мали у своєму розпорядженні виміри геомагнітного ефекту тільки для тунгуського тіла. Подібні нього метеороїди, однак, вторгаються в земну атмосферу дуже рідко — один раз за 300...1000 років [38]. У той же час тіла діаметром 10...20 м стикаються з Землею один раз за 10...100 років відповідно [25, 28, 38].

Ситуація дещо покращилася у зв'язку з дослідженням Челябінського метеороїда. Магнітний ефект челябінського космічного тіла був описаний в роботах [26—29, 31, 36], де теоретично оцінено магнітний ефект, проведено аналіз часових варіацій складових геомагнітного поля, зареєстрованих в обсерваторіях Алма-Ата, Київ, Львів, Дніпро та Харків. Вперше виявлено квазіперіодичні варіації горизонтальної складової геомагнітного поля в діапазоні періодів 30... 40 хв, з амплітудою 0.5...2 нТл на відстанях  $r = 2.7...1.2$  Мм відповідно тривалістю 2...3 ч. Запропоновано модель таких варіацій.

У роботі [31] проаналізовано часові варіації горизонтальних складових геомагнітного поля, зареєстровані в обсерваторіях Алма-Ата, Арті, Борок, Київ, Львів, Дніпро, Харків і Якутськ, які супроводжували підліт челябінського космічного тіла. Вперше виявлено магнітосферний ефект метеороїда, який спостерігався у варіаціях магнітного поля за 33...47 хв до вибуху челябінського тіла. Тривалість ефекту становила 25...35 хв, а амплітуда аперіодичних збурень — 1...6 нТл. Запропоновано модель генерації аперіодичних, квазіперіодичних і шумоподібних варіацій геомагнітного поля, викликаних взаємодією метеороїда з магнітосферою під час підльоту.

Приклад геомагнітного ефекту метеороїда метрового розміру описано в роботах [24, 25]. Явище вітсимського боліда супроводжувалося квазіперіодичними варіаціями магнітного поля в діапазоні періодів 100...1000 с, що реєструвались на відстані  $r = 4.85$  Мм. Амплітуда коливань становила 1.5...2 нТл. Діаметр метеороїда був близьким до 3.2 м, а початкова кінетична енергія — приблизно  $10^{13}$  Дж  $\approx 2.4$  кт ТНТ. Частота падіння подібних тіл —  $1.6 \text{ рік}^{-1}$ .

Становить значний теоретичний і практичний інтерес аналіз результатів спостережень падіння будь-якого досить великого космічного тіла.

Мета роботи — виклад результатів аналізу варіацій магнітного поля, що виникли при русі Липецького метеороїда у магнітосфері та атмосфері Землі, оцінка та обговорення магнітного ефекту і його механізмів. Частота падіння подібних метеороїдів становить  $0.68 \text{ рік}^{-1}$  [35].

## ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЛИПЕЦЬКИЙ МЕТЕОРОЇД

21 червня 2018 р. о 01:16:20 UT (тут і далі — час всесвітній) в районі м. Липецьк (Російська Федерація) мало місце вторгнення в атмосферу Землі космічного тіла, яке природно іменувати Липецьким метеороїдом [33—35].

Прилади, встановлені на супутниках США, призначених для контролю космічного простору, вимірювали три координати швидкості ( $v_x = -8.9$  км/с,  $v_y = -4.3$  км/с,  $v_z = -10.5$  км/с), інтегральну енергію світіння  $E_r = 1.22 \cdot 10^{12}$  Дж  $\approx 0.29$  кт ТНТ, висоту спалаху  $z_r = 27$  км і його координати:  $52.8^\circ\text{N}$ ,  $38.1^\circ\text{E}$  [40]. Знайдені фрагменти вибуху метеороїда свідчили про те, що космічне тіло було кам'яним, точніше хондритом. Його щільність  $\rho = 3.3$  т/м<sup>3</sup>.

Значення трьох проекцій швидкості дозволили автору обчислити кут нахилу траєкторії до горизонту  $79^\circ$  і модуль швидкості

14.4 км/с, по емпіричній залежності для коефіцієнта світності  $\eta_r$  від  $E_r$ , наведеній у роботі [38], обчислити його значення  $\eta_r = 10.4$  % та початкову кінетичну енергію тіла  $E = 1.17 \cdot 10^{13}$  Дж  $\approx 2.8$  кт ТНТ. За відомими значеннями  $E$  і  $\rho$  неважко обчислити масу метеороїда  $m = 113$  т, а за масою і щільністю — об'єм  $V$  і діаметр  $d$  кулеподібного тіла. Виявилося, що  $V = 34.2$  м<sup>3</sup>,  $d = 4$  м.

Основні фізичні ефекти Липецького метеороїда змодельовані і описані в роботах [33—35]. Геомагнітний ефект оцінено у роботі [35].

## ЗАСОБИ І МЕТОДИ

**Магнітометр-флюксометр.** Неперервні спостереження флуктуацій геомагнітного поля в діапазоні періодів 1...1000 с здійснювалися у Магнітометричній обсерваторії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна поблизу м. Харків, Україна (49° 39' пн. ш., 36° 54' сх. д.), віддаленій від епіцентру вибуху метеороїда на 360 км.

Основою магнітометричної системи є індуктивний магнітометр-флюксометр ИМ-II, виготовлений малою серією в ОКБ Інституту фізики Землі Російської академії наук наприкінці 1980-х рр. [37]. Він має високу чутливість (0.5...500 пТл у діапазоні періодів 1...1000 с відповідно) і смугу досліджуваних частот від 0.001 до 1 Гц. Чутливість обмежується рівнем внутрішніх шумів підсилювачів активних індуктивних датчиків і динамічним діапазоном використаного аналого-цифрового перетворювача.

Магнітометр ИМ-II підключений до спеціалізованого мікроконтролерного реєстратора (МКР), який здійснює оцифровку і попередню фільтрацію на інтервалах 0.5 с магнітометричних сигналів, а також збереження відфільтрованих відліків і часу їхнього отримання в незалежній USB-флеш-пам'яті. Додатково МКР виконує функції блоку безперебійного живлення — він здійснює контроль заряду акумуляторної батареї і наявності напруги в електромережі. При необхідності активізується зарядне електричне поле резервного акумулятора, перемикається живлення магнітометричної системи на акумулятор при зникненні напруги в електромережі, а також здійснюється вимкнення акумулятора при його глибокому розрядженні. МКР також отримує від приймача GPS-сигналів BR-304 стандартні NMEA-повідомлення з

інформацією про поточні дату і час, транслює їх далі на систему пасивного багаточастотного радіозондування, а також щодоби коригує по них покази власного енергонезалежного годинника. Потужність, що споживається системою, становить приблизно 6 Вт, що забезпечує приблизно 120 годин його автономної роботи від акумулятора.

Докладніший опис магнітометра наведено в нашій роботі [37].

**Методи аналізу магнітних даних.** Для спектрального аналізу використовувалися взаємно доповнювальні одне одного віконне перетворення Фур'є (ВПФ), адаптивне перетворення Фур'є (АПФ) та вейвлет-перетворення (ВП), описані в роботах [18, 22].

Для детального дослідження квазіперіодичних процесів використовувався системний спектральний аналіз часових варіацій рівня  $H$ - і  $D$ -складових геомагнітного поля [22]. Він заснований на одночасному застосуванні ВПФ, АПФ та ВП. В останньому використовувався материнський вейвлет у вигляді функції Морле [22]. Як відомо, АПФ має кращу роздільну здатність по частоті (періоду), ніж ВПФ. У свою чергу, ВПФ має краще розділення по часу, ніж АПФ. Важливо, що АПФ має незмінні відносні (нормовані на тривалість «вікна») розділення по часу і періоду при зміні значення відносного періоду. У той же час для ВПФ вони змінюються приблизно на порядок. ВП дозволяє «зрівняти шанси» складових з різними частотами (періодами). З цих причин спільне використання ВПФ, АПФ та ВП дозволяє детальніше дослідити частотно-часову (періодно-часову) структуру різних фізичних процесів.

Системний спектральний аналіз провадився в діапазоні періодів 1...10, 10...100 і 100...1000 с. Нижче наведено результати аналізу для періодів 100...1000 с.

## СТАН КОСМІЧНОЇ ПОГОДИ

При аналізі варіацій геомагнітного поля, викликаних яким-небудь джерелом збурень, для уникнення помилок необхідно ретельно вивчати стан космічної погоди. За даними ШСЗ АСЕ [43] 17—19 червня 2018 р. у сонячному вітрі спостерігалось збільшення приблизно утричі концентрації частинок, їхньої швидкості — у два рази і температури частинок — в 3...10 разів. В результаті 18 червня 2018 р. виникла досить помірна магнітна буря з  $K_{p \max} = 4$  і  $D_{st \min} = -35$  нТл. Доба 20 червня 2018 р. залишалася частково збуреною.

21 червня 2018 р. в день падіння Липецького метеороїда значення  $K_p$ -індексу не перевищували 1, а значення  $D_{st}$ -індексу були більшими від  $-3...-4$  нТл.

Доба 22 червня 2018 р. була магнітоспокійною і може вважатися контрольною.

Таким чином, магнітна ситуація в цілому була сприятливою для спостережень магнітного ефекту Липецького метеороїда.

## РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ

**Магнітний ефект при підльоті метеороїда.** Розглянемо інтервал часу 00:00...01:00.

20 червня 2018 р. спостерігалися хаотичні варіації рівня  $H$ - і  $D$ -складових геомагнітного поля з амплітудою, що не перевищує 0.5 нТл (рис. 1, 2).

22 червня 2018 р. поведінка обох складових була приблизно такою ж, але амплітуда флуктуацій становила 0.25 нТл (рис. 3, 4).

21 червня 2018 р. в інтервалі часу 00:14...00:49 характер варіацій  $H$ -складової змінився — з'явилися квазіперіодичні варіації з періодом  $T = 11$  хв і амплітудою приблизно 0.5 нТл. Цуг коливань починався з позитивного сплеску, за яким наступило різке зменшення амплітуди приблизно на 1 нТл (рис. 5). Така поведінка властива вибухоподібним процесам. Часові варіації рівня  $D$ -складової в цілому були подібними до варіацій  $H$ -складової (рис. 6), однак особливості, притаманні вибуховим процесам, були виражені нечітко.

**Магнітний ефект вибуху метеороїда.** Розглянемо тепер інтервал часу 01:00...02:00 03:00...04:00.

20 червня 2018 р. флуктуації рівня  $H$ - і  $D$ -складових були хаотичними, їхня амплітуда не перевищувала 0.4 та 0.3 нТл відповідно (рис. 1, 3). Приблизно з 03:00 до 04:00 їхній рівень збільшився до 0.7...1.0 і 1.5...2.5 нТл відповідно.

22 червня 2018 р. варіації рівня обох складових були неупорядкованими, амплітуда флуктуацій не перевищувала 0.3...0.4 та 0.4...0.5 нТл відповідно. В інтервалі часу 03:00...04:00 амплітуда варіацій обох складових збільшилася до 0.6...0.8 і 2...4 нТл відповідно (рис. 2, 4).

21 червня 2018 р. характер варіацій рівня  $H$ - і  $D$ -складових суттєво вирізнявся. В інтервалі часу 01:22...02:10 варіації стали більш впорядкованими (рис. 5, 6). Спочатку відбувалося невелике збільшення рівня обох складових, за ним було його різке зменшення приблизно на 1.5 і 1.2 нТл для  $H$ - і  $D$ -складових відповідно. Після цього відбулося 3-4 коливання з середнім періодом  $T = 15$  хв і поступово спадною амплітудою.

Додамо, що помітного збільшення рівня варіацій  $H$ -складової в інтервалі часу 03:00...04:00, подібного до збільшення у контрольні дні, не спостерігалось. У той же час варіації рівня  $D$ -складової були квазіперіодичними з періодом  $T = 7...10$  хв і амплітудою приблизно 0.6 нТл.

## МЕХАНІЗМИ МАГНІТНОГО ЕФЕКТУ

**Магнітний ефект магнітосфери.** Перший магнітний ефект почав спостерігатися за 54...56 хв до вибуху метеороїда і тривав приблизно 15...20 хв. Механізм цього ефекту запропоновано в роботі автора [31]. Його основні принципи такі.

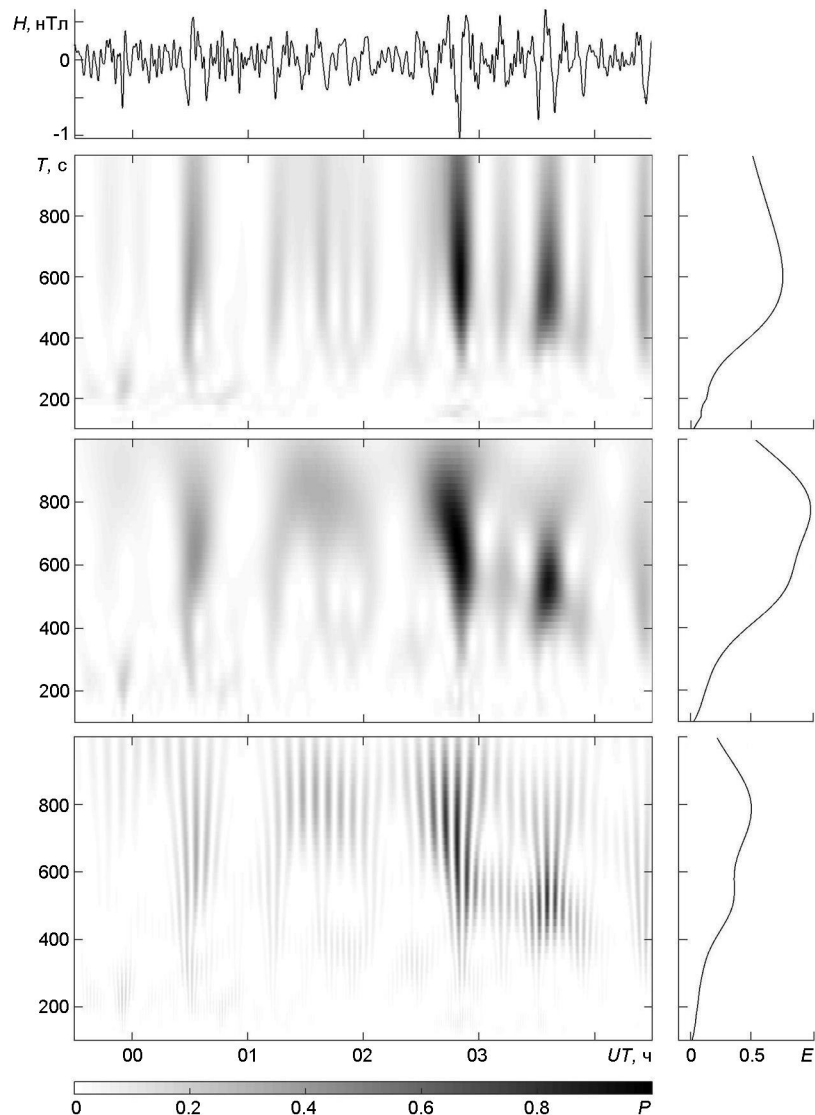
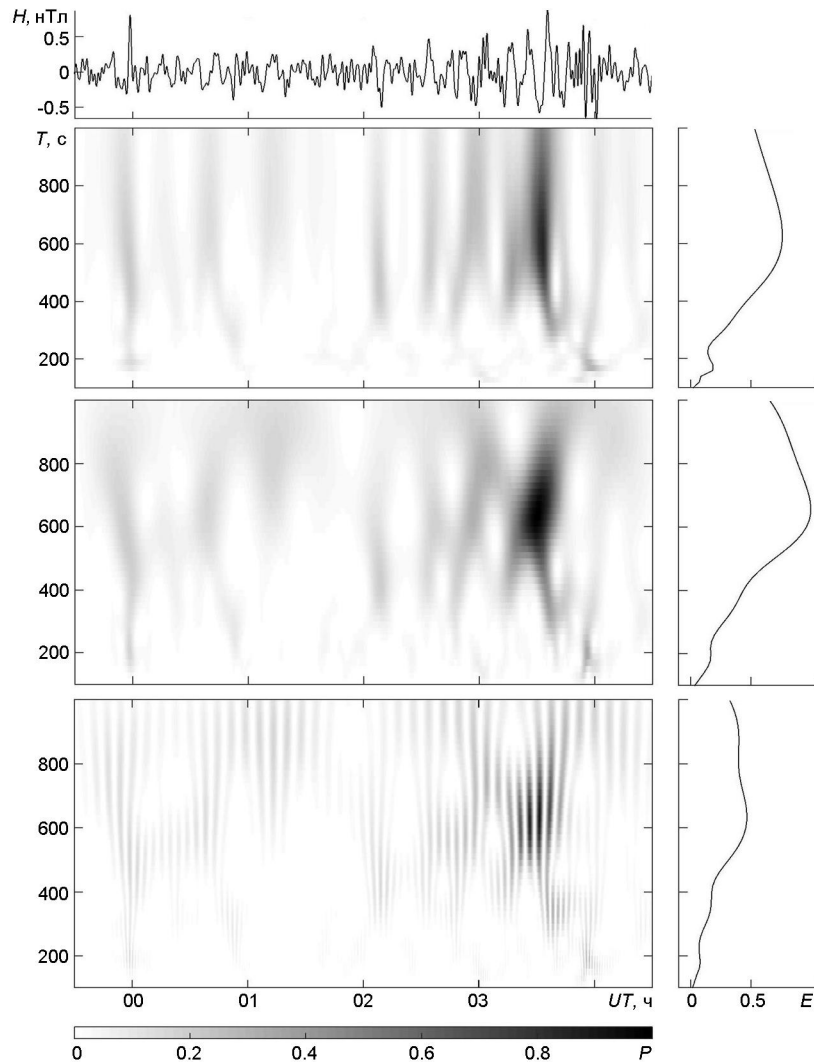


Рис. 1. Результати системного спектрального аналізу магнітометричних даних ( $H$ -складова) для 19—20 червня 2018 р. Панелі зверху вниз: вихідні дані, результати віконного перетворення Фур'є (ВПФ), адаптивного перетворення Фур'є (АПФ) та вейвлет-перетворення (ВП). Праворуч показано енергограми (розподіл енергії по періодах)

Вторгнення метеороїда, що має величезний запас кінетичної енергії (приблизно 2.8 кт ТНТ), справило вибухоподібний вплив на магнітосферу Землі. При русі космічного тіла з кінетичною енергією  $E$  вздовж траєкторії у безіткнювальній плазмі відбувається витіснення геомагнітного поля. Область збурення геомагнітного поля за формою близька до форми циліндра довжиною  $L_m$  і радіусом  $R_m$ . Тут  $L_m$  — характерний масштаб неоднорідності геомагнітного поля вздовж напрямку руху астероїда. Значення  $L_m$  можна оцінити з формули  $L_m = R_E L / 3$ , де  $R_E = 6.4$  Мм — радіус Землі. Якщо припустити, що в розширенні області збурення геомагнітного поля брала участь вся


 Рис. 2. Те ж для 21—22 червня 2018 р. ( $H$ -складова)

енергія тіла, то радіус цієї області дається виразом

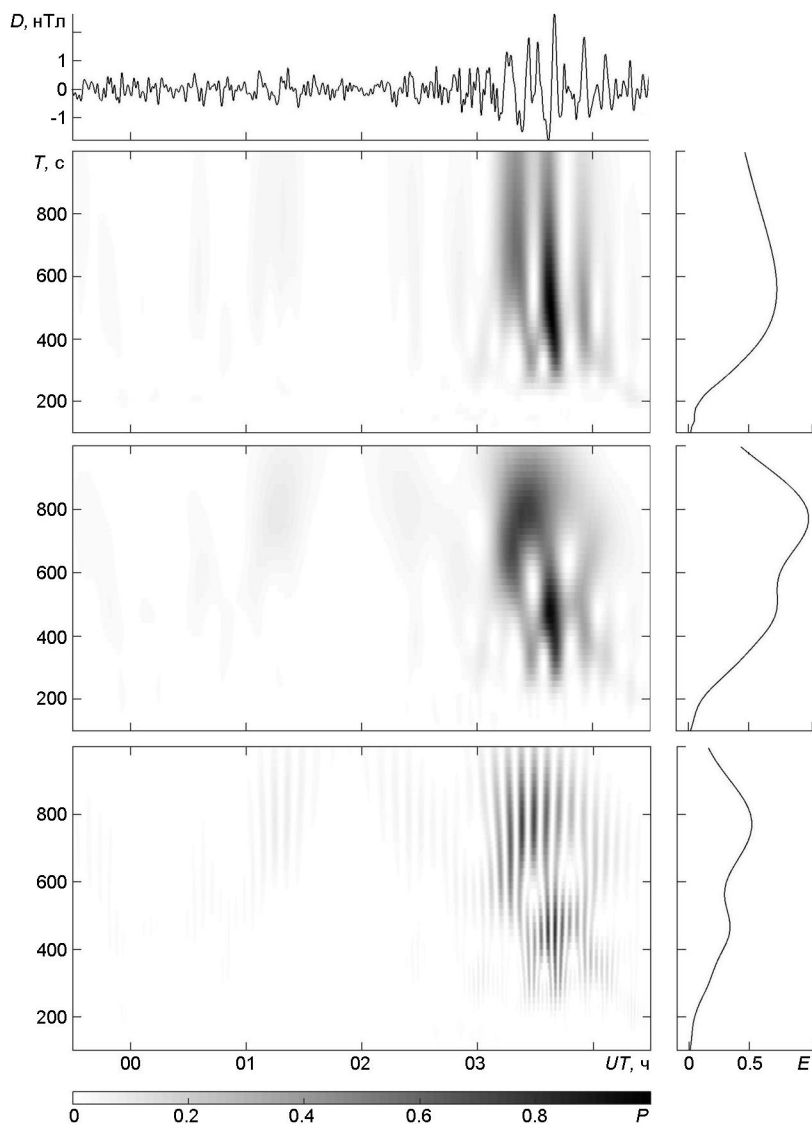
$$R_m = \sqrt{\frac{m}{m} \frac{1}{p_m L_m} \frac{E}{p_m L_m}}, \quad (1)$$

де  $m = 2$  — показник адіабати при радіальному розширенні магнітного поля,  $p_m$  — магнітний тиск. Для  $p_m$  справедливий вираз

$$p_m = \frac{B^2}{2 \mu_0},$$

де  $B$  — незбурене значення індукції геомагнітного поля на заданій відстані від поверхні Землі або при певному значенні параметра Мак-Ілвейна  $L$ ,  $\mu_0$  — магнітна стала.



Рис. 3. Те ж для 19—20 червня 2018 р. ( $D$ -складова)

Внаслідок пружності магнітних силових ліній виникають їхні коливання з періодом

$$T_A = \frac{2R_m}{\sqrt{\frac{B}{N m_i}}},$$

де  $v_A$  — альвенівська швидкість,  $N$  — концентрація іонів,  $m_i$  — їхня маса,  $N m_i$  — щільність плазми.

Характерний час радіального розширення магнітного поля для циліндричної моделі дається виразом

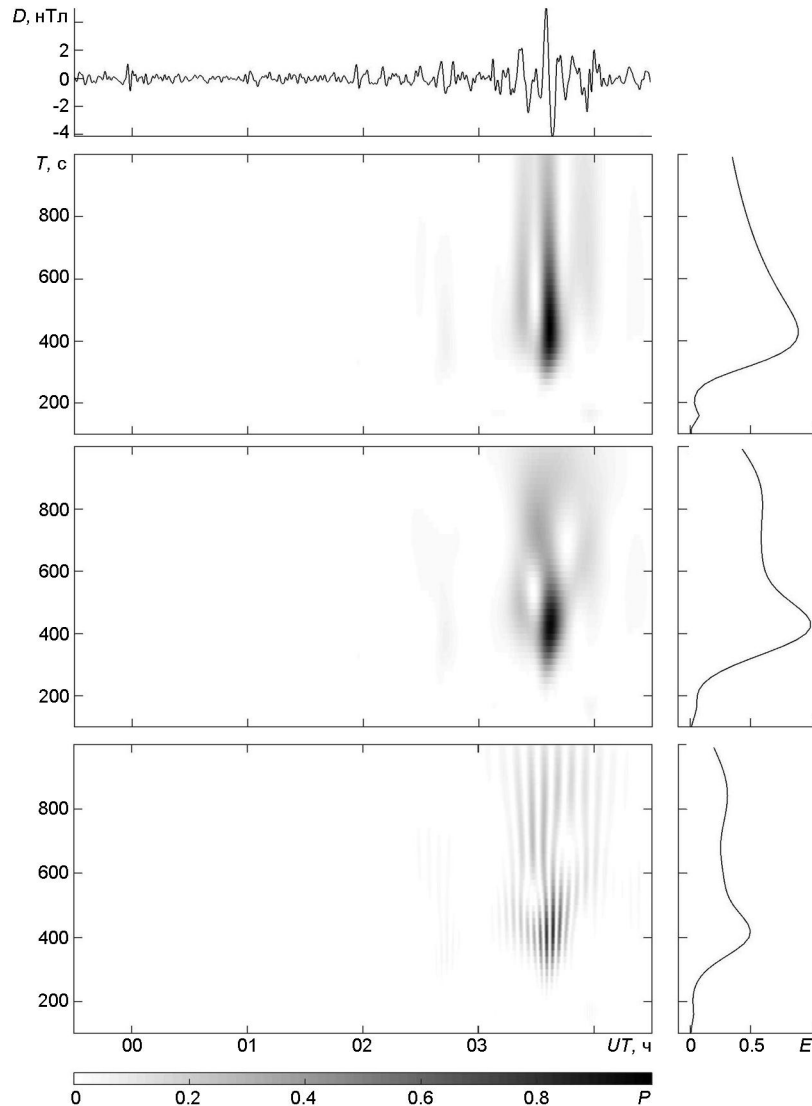


Рис. 4. Те ж для 21—22 червня 2018 р. (*D*-складова)

$$t_{exp} = R_m^2 \frac{i L_m^{1/2}}{E}.$$

Модельні значення концентрації і щільності іонів, індукція геомагнітного поля для широти  $50^\circ$ , запозичені з книги [19], наведено в табл. 1. В цій же таблиці наведено розрахункові значення  $A$ ,  $p_m$ ,  $R_m$ ,  $t_{exp}$  і  $T$  при різних  $L_m$  для  $L = 4 m_i = 1.7 \cdot 10^{-27}$  кг. Як показали розрахунки, швидкість  $A$  змінювалася від 9.1 до 1.6 Мм/с, тиск  $p_m$  — у межах 300...0.2 мкПа, а розмір  $R_m$  — у межах 0.3...1 Мм при  $L = 3...10$  відповідно.

Радіальне розширення магнітних силових ліній означає витіснення магнітного поля з порожнини довжиною  $L_m$  і діаметром  $2R_m$ . Це

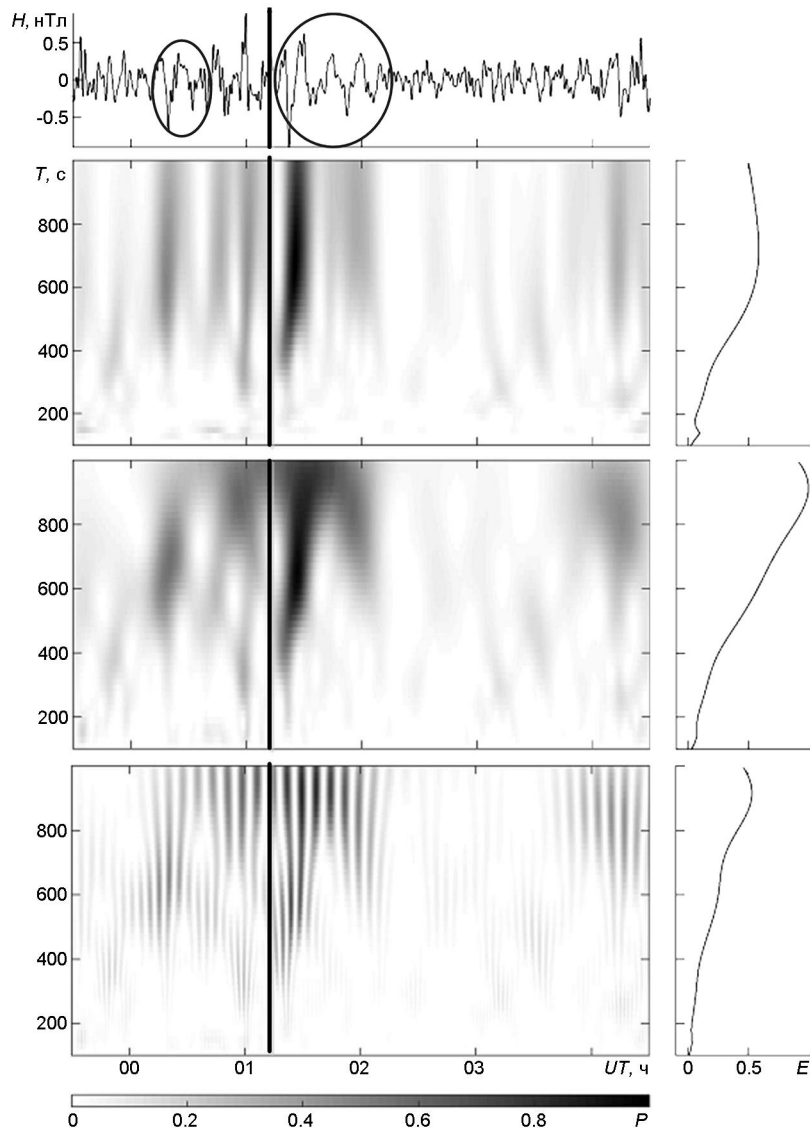


Рис. 5. Те ж для 20—21 червня 2018 р. ( $H$ -складова). Вертикальна лінія вказує на момент вибуху метеороїда. Еліпси відзначають передбачуваний ефект

еквівалентно появі магнітного диполя відповідного розміру з індукцією магнітного поля  $B$ . Диполь генерує складові змінного магнітного поля, пропорційні  $r^{-1}$ ,  $r^{-2}$  і  $r^{-3}$ . При даних параметрах диполя головним членом є член, для якого

$$B \propto B \frac{R_m^2}{r}.$$

Оскільки час випередження  $t = 54 \dots 56$  хв, при середньому значенні 55 хв отримаємо, що  $r = t \cdot 47.5$  Мм, чому відповідає  $L = 8.4$ . При цьому  $B = 1.2$  мкТл, а  $B = 0.34$  нТл. Вважалося, що  $R_m = 800$  км (див. табл. 1). Отримане значення  $B$  близьке до спостережуваного

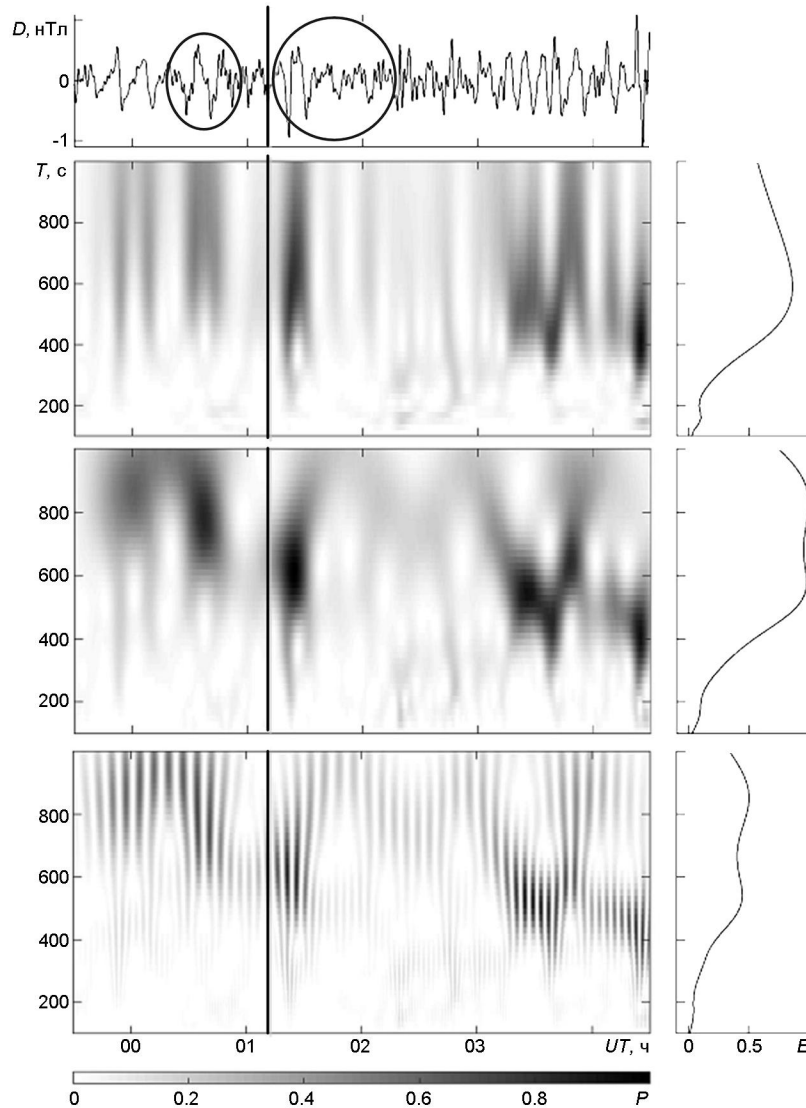


Рис. 6. Те ж для 20—21 червня 2018 р. ( $D$ -складова). Вертикальна лінія вказує на момент вибуху метеороїда. Еліпси відзначають передбачуваний ефект

(0.5 нТл). Різниця, мабуть, пов'язана з тим, що при  $L = 8...9$  магнітне поле вже помітно відрізняється від дипольного поля.

Тривалість магнітного імпульсу оцінюється із формули

$$T = \frac{L_m}{v}.$$

При  $L = 8.4$  маємо  $L_m = 18$  Мм. Тоді  $T = 125 \cdot 10^3$  с = 21 хв. Це значення дуже близьке до спостережуваного значення (15...20 хв).

Зі співвідношення (1) для дипольної моделі геомагнітного поля впливає залежність масштабу  $R_m$  від відстані  $R$ :

**Таблиця 1.** Залежність модельних параметрів магнітосфери і розрахованих параметрів області збурення геомагнітного поля від параметра Мак-Ілвейна

$L$	$L_m$ , ММ	$B$ , мкТл	$z$ , ММ	$N$ , $10^8 \text{ м}^{-3}$	$i$ , $10^{-19} \text{ кг/м}^3$	$A$ , ММ/с	$p_m$ , мкПа	$R_m$ , км	$B$ , нТл
3	6.4	27.6	12.8	44	92	8.1	300	57	0.55
4	8.5	12.5	19.2	13.5	23	7.4	63	108	0.40
5	10.7	5.6	25.6	8.4	14	4.2	13	212	0.38
6	12.8	3.5	32.0	4.5	7.7	3.6	4.9	316	0.34
7	14.9	2.2	38.4	3	5.1	2.8	1.9	470	0.33
8	17.1	1.4	44.8	2	3.4	2.2	0.8	676	0.32
9	19.2	1.0	51.2	1.5	2.6	1.8	0.4	902	0.31
10	21.3	0.7	57.6	1	1.7	1.6	0.2	1211	0.31

$$R_m = \frac{1}{\sqrt{p_m L_m}} = \frac{1}{B \sqrt{L_m}} = \frac{r^3}{r^{1/2}} = r^{5/2}.$$

Тоді для збурень магнітного поля біля поверхні Землі маємо

$$B(R) = B(R) \frac{R_m^2}{r} = \frac{1}{r^3} r^3.$$

У такому наближенні  $B$  від  $r$  практично не залежить.

При збільшенні  $L$ , однак, дипольне наближення для незбуреного геомагнітного поля все менше відповідає дійсності, а при  $L = 9 \dots 10$  і зовсім стає несправедливим. При  $L > 6$  з підсонячного боку  $B = r$ , де за рахунок стиснення силових ліній  $\alpha < 3$ . Тоді  $R_m = r$ , а

$$B(R) = \frac{1}{r} = \frac{r}{r} = r^{-2}.$$

Видно, що при  $2 < \alpha < 3$  зростання  $B(R)$  сповільнюється зі збільшенням  $r$ . Це означає, що при  $L > 6$  залежність величини збурення магнітного поля  $B$  від відстані була спадною при збільшенні  $r$ . Отже, був оптимальний діапазон дальностей, де збурення  $B$  було максимальним. Цього діапазону відповідали значення  $L = 8 \dots 9$ .

**Магнітний ефект іоносфери.** Після вибуху метеороїда в атмосфері у збуреннях геомагнітного поля спостерігався знакозмінний процес, який розпочинався з двополярного (двофазного) імпульсу. Спочатку величина  $H$  збільшилася, а потім зменшилася порівняно з незбуреним значенням. Такі двополярні процеси властиві вибуховим явищам: спочатку спостерігається фаза стиснення, а потім — фаза розрідження. Оскільки коливальна система має певну добротність, за цими фазами зазвичай реєструються затухаючі коливання. З цього випливає, що магнітний ефект, спостережуваний після вибуху метеороїда, пов'язаний з ударною хвилею від вибуху в атмосфері.

Політ і вибух метеороїда супроводжувався генерацією ударної хвилі у повітрі. Хвиля почала ефективно генеруватися на висотах  $z_m$

65...70 км, на висоті вибуху  $z_e = 27$  км процес генерації закінчився. Тоді тривалість ударної хвилі дорівнює

$$\frac{z_m - z_e}{s}, \quad (2)$$

де  $s = 0.3$  км/с — швидкість звуку. З виразу (2) маємо  $127...143$  с. Після проходження фази стиснення тривалістю має місце фаза розрідження приблизно такої ж тривалості. Тоді загальна тривалість збурення в повітрі становить  $T_0 = 2$ . За рахунок дисперсії тривалість збурення збільшується. Згідно з [42]

$$T = T_0 \frac{z}{R_e}^{1/4}, \quad (3)$$

де  $R_e$  — поперечний розмір (радіус) ударної хвилі,  $z = z - z_e$ . Для нього справедливе співвідношення [32]

$$R_e = \sqrt{\frac{E_L}{p(z_e)}} = \sqrt{\frac{E}{p(z_e)L_e}}, \quad (4)$$

де  $E_L = E/L_e$  — погонна щільність енергії метеороїда,  $L_e = H/2$  — ефективна довжина області вибуху,  $H = 7.5$  км — висота однорідної атмосфери,  $p(z_e) = 2.7$  кПа — тиск атмосфери на висоті вибуху. З (4) випливає, що  $R_e = 0.6$  км.

Результати розрахунку  $T$  за співвідношенням (3) наведено в табл. 2. Видно, що на висотах динамо-області іоносфери, яка відповідала за генерацію спостережуваного магнітного ефекту,  $T$

14...17 хв. Це значення дуже близьке до значення  $T = 15...20$  хв, отриманого зі спостережень геомагнітного ефекту.

Розглянемо далі висотну залежність надлишкового тиску  $p$  ударної хвилі. Із співвідношення для відносного надлишкового тиску  $p/p$ , приведенного в роботі [42], при  $z = R_e$  отримаємо [32]

$$\frac{p}{p} = 0.3 \frac{R_e}{z}^{3/4} \exp \frac{z}{2H}.$$

Експоненціальний множник відображає той факт, що в атмосфері  $p = \exp(-z/H)$ , а  $p = \exp(-z/2H)$ . Результати розрахунку  $p/p$  і  $p$  наведено в табл. 2. З таблиці видно, що величина  $p/p$  при віддаленні від джерела спочатку зменшується, а потім внаслідок зменшення з висотою тиску  $p$  в атмосфері вона збільшується і досягає на висотах динамо-області іоносфери значень 0.6...1.6. Реально ці значення суттєво менші, бо не враховувалися нелінійні ефекти, що призводять до поступового загасання ударної хвилі при  $p/p > 0.1...0.2$ . З цієї причини на висотах  $z = 70...150$  км  $p/p$  реально не перевищує 0.10...0.15.

Ударна хвиля на висотах іоносфери призводила до збурення концентрації електронів  $N$ . При цьому грубо можна вважати, що  $N/N$

Таблиця 2. Висотна залежність надлишкового тиску ударної хвилі та її тривалість

$z$ , км	$p / p_0$	$p$ , Па	$p_0$ , Па	$T$ , хв
30	0.11	200	1800	6.3...7.2
40	0.07	34	480	9.1...10.3
50	0.09	11	130	10.5...11.9
60	0.13	4.4	33.5	11.5...13.0
70	0.21	1.86	8.8	12.3...13.9
80	0.36	0.84	2.3	13.0...14.4
90	0.61	0.37	0.6	13.5...15.3
100	1.06	0.17	0.16	14.0...15.8
110	1.33	0.13	0.10	14.5...16.4
120	1.62	0.11	0.07	14.9...16.8

$p / p_0$ . Тоді на висотах динамо-області  $N / N_0 = 0.6...1.6$ . Збурення концентрації електронів супроводжується збуренням щільності іоносферного струму в динамо-області іоносфери [23—25, 35]

$$j = j_0 \frac{N}{N_0}, \quad (5)$$

де  $j_0$  — незбурене значення щільності іоносферного струму. Поява імпульсу струму призводить до збурення індукції магнітного поля. Згідно з рівнянням Максвелла

$$\text{rot } \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} \quad (6)$$

де  $\mu_0$  — магнітна стала. З (6) з урахуванням (5) впливає оцінка магнітного ефекту:

$$B = \mu_0 j_0 z_j \frac{N}{N_0}, \quad (7)$$

де  $z_j$  — товщина динамо-області. Вважаючи в (7)  $j_0 = 3 \cdot 10^{-7} \text{ А/м}^2$  (ранковий час),  $z_j = 30 \text{ км}$ ,  $N / N_0 = 0.10...0.15$ , отримаємо, що  $B = 1.1...1.7 \text{ нТл}$ . Отримане значення  $B = 1.3 \text{ нТл}$  близьке до спостережуваного ( $1.2...1.5 \text{ нТл}$ ).

Оцінимо швидкість  $v_m$  поширення магнітного збурення. Час запізнення збурення формується з трьох складових: часу  $t_1$  поширення ударної хвилі до динамо-області, часу  $t_2$  становлення збурень концентрації електронів і часу  $t_3$  поширення збурення області генерації до місця спостереження.

При середній висоті динамо-області  $z_d = 110 \text{ км}$ , висоті вибуху  $z_e = 27 \text{ км}$ , середній швидкості ударної хвилі  $v_s = 0.3 \text{ км/с}$  маємо

$$t_1 = \frac{z_d - z_e}{v_s} = 4.6 \text{ хв.}$$

Час становлення

$$t_2 = \frac{1}{2 N},$$

де  $2 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$  — коефіцієнт рекомбінації електронів з молекулярними іонами. При значенні  $N = 5 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$  маємо  $t_2 = 0.8 \text{ хв}$ . Тоді  $t_3 = t - t_1 = t_2 = 0.6 \text{ хв}$ .

При  $r = 360 \text{ км}$  і  $t_3 = 0.6 \text{ хв}$  отримаємо  $v_m = 10 \text{ км/с}$ . Таку швидкість має магнітний звук і повільні МГД-хвилі [21, 30, 41].

## ОБГОВОРЕННЯ

Звернемо увагу на те, що магнітометр-флюксометр реєструє похідні від рівня горизонтальних складових магнітного поля. Тому число пелюсток (півхвиль) у спостережуваних варіаціях подвоюється порівняно з кількістю пелюсток у вихідних варіаціях рівня геомагнітного поля.

Вибуховим процесам властиві такі варіації. Спочатку спостерігається позитивний сплеск, який відповідає за фазу стиснення. Потім відбувається різкий перехід до негативного сплеску, відповідального за фазу розрідження. При скінченному значенні добротності коливальної системи спостерігаються також півтора-два затухаючі коливання. Похідні від рівня складових при цьому будуть здійснювати 6-7 знакозмінних варіацій, що і спостерігалось в реєстраціях (рис. 5, 6).

Для оцінки основних параметрів магнітного ефекту магнітосфери залучено модель збурення магнітного поля, в основі якої лежить витіснення магнітних силових ліній при вибухоподібному впливі метеороїда на магнітосферу. Цей вплив еквівалентний появі магнітного диполя з поперечним розміром  $R_m$  і поздовжнім розміром  $L_m$ . При малих значеннях параметра Мак-Ілвейна  $L$ , тобто поблизу поверхні Землі, значення  $R_m$  занадто малі, і ефективність магнітного диполя незначна. При занадто великих  $L$  значення витісненого магнітного поля і ефективність диполя також малі. Тому для даної кінетичної енергії метеороїда є оптимальні значення  $L_{opt} = 8 \dots 9$  і  $r_{opt} = 51.2 \dots 57.6 \text{ Мм}$ . Вони ж і визначають час випередження магнітного ефекту магнітосфери. За оцінками  $t = R_E(L_{opt} - 1) / v_m = 52 \dots 59 \text{ хв}$ , що дуже близько до спостережуваного часу випередження ( $54 \dots 56 \text{ хв}$ ).

Тривалість магнітного ефекту магнітосфери  $T = L_m / v_m$ . При  $L_m = R_E L_{opt} / 3 = 17 \dots 19 \text{ Мм}$  і  $v_m = 14.4 \text{ км/с}$  маємо  $T = 20 \dots 22 \text{ хв}$ . За даними спостережень  $T = 15 \dots 20 \text{ хв}$ .

За оцінками  $B = 0.5 \text{ нТл}$ , що за порядком величини близько до спостережуваного значення  $B = 0.34 \text{ нТл}$ .

Для оцінки основних параметрів магнітного ефекту іоносфери використано модель, в основі якої лежить вплив ударної хвилі на параметри атмосфери та іоносфери на висотах динамо-області іоносфери ( $100 \dots 150 \text{ км}$ ). При цьому час запізнення магнітного ефекту визначався часом поширення ударної хвилі до динамо-області іоносфери, часом установаження концентрації електронів і часом поширення магнітного збурення. За розрахунками цей час дорівнював  $6 \text{ хв}$ , що практично збігається із спостережуваним часом запізнення.



Тривалість магнітного ефекту іоносфери визначалася тривалістю дії ударної хвилі, яка за розрахунками була не меншою від 15...20 хв, а за даними спостережень — кілька десятків хвилин.

Розрахунок модуляції ударною хвилею концентрації електронів у струмовому потоці дав значення амплітуди магнітного ефекту іоносфери 1.1...1.7 нТл, що дуже близько до спостережуваного значення 1.2...1.5 нТл.

Результати цієї роботи добре узгоджуються з теоретичними передбаченнями магнітного ефекту Липецького метеороїда [35].

Таким чином, адекватність використовуваних моделей для пояснення магнітних ефектів магнітосфери і іоносфери, відповідність результатів розрахунків та результатів спостережень свідчать про те, що виявлені та описані магнітні ефекти дійсно викликані підльотом і вибухом Липецького метеороїда.

Варіації рівня магнітних складових в інтервалі часу 03:00...04:00, найімовірніше, викликані генерацією атмосферних гравітаційних хвиль ранковим сонячним термінатором. Ці хвилі на висотах іоносфери модулюють за квазіперіодичним законом концентрацію електронів, а отже, і щільність електричного струму в динамо-області. Варіації останнього служать джерелом спостережуваних магнітних збурень. Суттєво, що в день падіння Липецького метеороїда збурень *H*-складової в інтервалі часу 03:00...04:00 не було.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

1. З використанням високочутливого магнітометра-флюксметра, розміщеного в Магнітометричній обсерваторії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (поблизу м. Харків, Україна), проведені спостереження варіацій горизонтальних складових геомагнітного поля в день падіння (21 червня 2018 р.) метеороїда чотириметрового розміру поблизу м. Липецьк (Російська Федерація) та у контрольні дні. Відстань між епіцентром вибуху і обсерваторією становила 360 км.

2. Виявлено магнітний ефект магнітосфери, який полягає у виникненні специфічних для вибухових процесів варіацій рівня геомагнітного поля за 54...56 хв до вибуху метеороїда в атмосфері Землі (висота приблизно 27 км). Амплітуда збурень становила 0.5...1 нТл, а тривалість — 15...20 хв.

3. Запропоновано фізичний механізм магнітного ефекту магнітосфери, що полягає в генерації магнітного збурення еквівалентним магнітним диполем. Диполь був утворений в результаті витіснення магнітного поля вибухоподібним вторгненням метеороїда у магнітосферу. Результати моделювання добре узгоджуються з результатами спостережень.

4. Виявлено магнітний ефект іоносфери. Він полягає у виникненні знакозмінних варіацій рівня геомагнітного поля приблизно через 6 хв

після вибуху метеороїда. Амплітуда збурення становила приблизно 1.2...1.5 нТл, а тривалість — десятки хвилин.

5. Запропоновано фізичний механізм магнітного ефекту, в основі якого лежить ударна хвиля від метеороїда. Досягнувши за 4-5 хв динамо-області іоносфери, ударна хвиля викликала знакозмінні (властиві вибуховим процесам) варіації атмосферного тиску і концентрації електронів, щільності іоносферного струму, і у кінцевому підсумку — спостережувані варіації рівня геомагнітного поля. Результати моделювання добре відповідають результатам спостережень.

6. Продемонстровано, що космічні тіла з початковою кінетичною енергією приблизно  $10^{13}$  Дж викликають реєстровані збурення магнітного поля як при русі у магнітосфері, так і при їхньому вибуху в нижній атмосфері.

## ФІНАНСУВАННЯ РОБОТИ

Робота фінансувалася в рамках держбюджетної НДР установ МОН України, номер держреєстрації 0119U002538.

1. Астапович И. С. *Метеорные явления в атмосфере Земли*. М.: Физматгиз, 1958. 634 с.
2. Бронштэн В. А. *Тунгусский метеорит: история исследования*. М.: А. Д. Сельянов (изд.), 2000. 322 с.
3. Бронштэн В. А. Магнитный эффект Тунгусского метеорита. *Геомагнетизм и астрономия*. 2002. 42. № 6. С. 854—856.
4. Гольдин В. Д. Об интерпретации некоторых геофизических явлений, сопровождавших падение Тунгусского метеорита. *Космическое вещество и Земля*. Новосибирск: Наука. Сиб. отд., 1986. С. 44—62.
5. Золотов А. В. *Проблема Тунгусской катастрофы 1908 г.* Минск: Наука и техника. 1969. 202 с.
6. Иванов К. Г. Геомагнитные явления, наблюдавшиеся на Иркутской магнитной обсерватории вслед за взрывом Тунгусского метеорита. *Метеоритика*. 1961. Вып. 21. С. 46—48.
7. Иванов К. Г. О причине последующих изменений поля в геомагнитном эффекте Тунгусского метеорита. *Геомагнетизм и астрономия*. 1961. 1. № 4. С. 616—618.
8. Иванов К. Г. Геомагнитные эффекты взрывов в нижней атмосфере. *Геомагнетизм и астрономия*. 1962. 2. № 1. С. 153—160.
9. Иванов К. Г. Геомагнитный эффект Тунгусского падения. *Метеоритика*. 1964. Вып. 24. С. 141—151.
10. Иванов К. Г. Еще раз о проблеме моделирования геомагнитного эффекта Тунгусского падения. *Геомагнетизм и астрономия*. 2002. 42. № 6. С. 857—858.
11. Идлис Г. М., Карягина З. В. О кометной природе Тунгусского метеорита. *Метеоритика*. 1961. Вып. 21. С. 32—43.
12. Калашников А. Г. О наблюдении магнитного эффекта метеоров индукционным методом. *ДАН СССР*. 1949.66. № 3. С. 373—376.
13. Калашников А. Г. *Магнитный эффект метеоров*. Изв. АН СССР, сер. Геофиз. 1952. Вып. 6. С. 7—20.

14. *Катастрофические воздействия космических тел*. Под ред. В. В. Адушкина и И. В. Немчинова. М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. 310 с.
15. Ковалев А. Т., Немчинов И. В., Шувалов В. В. Ионосферные и магнитосферные возмущения в результате падения небольших комет и астероидов. *Астрон. вестн.* 2006. 40. № 1. С. 65—76.
16. Ковалевский А. Ф. К вопросу о механизме геомагнитных эффектов крупных взрывов. *Труды Сибирского физико-технического института при Томском университете*. 1962. Вып. 41. С. 87—91.
17. Ковалевский А. Ф. *Магнитный эффект взрыва Тунгусского метеорита. Проблема Тунгусского метеорита*. Томск: ТГУ. 1963. С. 187—194.
18. Лазоренко О. В., Черногор Л. Ф. *Сверхширокополосные сигналы и процессы: Монография*. Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2009. 576 с.
19. Молчанов О. А. *Низкочастотные волны и индуцированные излучения в околоземной плазме*. М.: Наука. 1985. 224 с.
20. Обашев Г. О. О геомагнитном эффекте Тунгусского метеорита. *Метеоритика*. 1961. Вып. 21. С. 49—52.
21. Сорокин В. М., Федорович Г. В. *Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме*. М.: Энергоиздат, 1982. 136 с.
22. Черногор Л. Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2008. 48, № 5. С. 681—702.
23. Черногор Л. Ф. *Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет: Монография*. Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина. 2009. 386 с.
24. Черногор Л. Ф. Колебания геомагнитного поля, вызванные пролетом Витимского болида 24 сентября 2002 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2011. 51. № 1. С. 119—132.
25. Черногор Л. Ф. *Физика и экология катастроф*. Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина. 2012. 556 с.
26. Черногор Л. Ф. Крупномасштабные возмущения магнитного поля Земли, сопровождавшие падение Челябинского метеороида. *Радиофизика и электроника*. 2013. 4(18), № 3. С. 47—54.
27. Черногор Л. Ф. Основные физические явления при полете Челябинского космического тела. *Материалы конференции «Астероиды и кометы. Челябинское событие и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль»*. Международная научно-практическая конференция (Чебаркуль, 21—22 июня 2013 г.). 2013. С. 148—152.
28. Черногор Л. Ф. Плазменные, электромагнитные и акустические эффекты метеорита «Челябинск». *Инженерная физика*. 2013. № 8. С. 23—40.
29. Черногор Л. Ф. Эффекты Челябинского метеороида в геомагнитном поле. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2014. 54, № 5. С. 658—669.
30. Черногор Л. Ф. Магнито-ионосферные эффекты метеороидного плюма. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2018. 58, № 1. С. 125—132.
31. Черногор Л. Ф. Эффекты в магнитосфере при подлете Челябинского метеороида. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2018. 58, № 2. С. 267—280.
32. Черногор Л. Ф. Параметры акустических сигналов, сгенерированных атмосферным взрывом метеороида над Румынией 7 января 2015 г. *Астрон. вестн.* 2018. Вып. 52, № 3. С. 201—212.
33. Черногор Л. Ф. Физические эффекты Липецкого метеороида. 1. *Кинематика и физика небес тел*. 2019. 35, № 4. С. 35—56.
34. Черногор Л. Ф. Физические эффекты Липецкого метеороида. 2. *Кинематика и физика небес тел*. 2019. 35, № 5. С. 25—47.

35. Черногор Л. Ф. Физические эффекты Липецкого метеороида. 3. *Кинематика и физика небес тел.* 2019. 35, № 6. С. 34—61.
36. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П. Возмущения в геокосмосе, сопровождавшие падение метеорита «Челябинск». *Радиофизика и радиоастрономия.* 2013. 18, № 3. С. 231—243.
37. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П., Поднос В. А., Тырнов О. Ф. Радиофизическая обсерватория Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина — средство для мониторинга ионосферы в космических экспериментах. *Космический проект «Ионосат-Микро».* К.: Академперіодика, 2013. С. 160 — 182.
38. Brown P., Spalding R. E., Re Velle D. O., Tagliaferri E. The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth. *Nature.* 2002. 420. P. 294—296.
39. *Catastrophic events caused by cosmic objects.* V. Adushkin, I. Nemchinov (Eds). Comprehensive overview of the threat posed by the impact of an asteroid or comet on Earth, 2008. XI + 357 p. doi: 10.1007/978-1-4020-6452-4.
40. *Center for Near Earth Object Studies.* URL: <https://cneos.jpl.nasa.gov/fireballs/>. Last accessed: 12.03.2019.
41. Chernogor L. F., Blaunstein N. *Radiophysical and geomagnetic effects of rocket burn and launch in the near-the-Earth environment.* — Boca Raton, London, New York: CRC Press. Taylor & Francis Group, 2017. 542 p.
42. *Infrasound monitoring for atmospheric studies* / A. Le Pichon, A. Hauchecorne, E. Blanc (Eds). Dordrecht Heidelberg London New York: Springer, 2010. 734 p.
43. *Space weather prediction Center National Oceanic and Atmospheric Administration:* URL: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/ace2/>. Last accessed: 18.02.2019.

## REFERENCES

1. Astapovich I. S. (1958) Meteor Phenomena in the Earth's Atmosphere. Moscow: Fizmatgiz, 634. (in Russian).
2. Bronshten V. A. (2000) *Tunguska Meteorite: A History of Research*, Moscow: A.D. Sel'yanov. 322. (in Russian).
3. Bronshten V. A. (2002) Magnetic Effect of the Tungus Meteorite. *Geomagnetism and Aeronomy.* 42 (6). 816—818. (in Russian).
4. Gol'din V. D. (1986) On the interpretation of some geophysical phenomena accompanying the fall of the Tunguska meteorite. *Kosmicheskoe veshchestvo i Zemlya (Cosmic Matter and the Earth)*, Novosibirsk: Nauka. 44—62 (in Russian).
5. Zolotov A. V. (1969) The Problem of 1908 Tunguska Catastrophe, Minsk: Nauka i Tekhnika, 202. (in Russian).
6. Ivanov K. G. (1961) The geomagnetic phenomena, which were being observed on the Irkutsk magnetic observatory, following the explosion of the Tunguska meteorite. *Meteoritika.* (21). 46—49 (in Russian).
7. Ivanov K. G. (1961) On the causes of the subsequent field changes in the geomagnetic effect of the Tunguska meteorite. *Geomagnetism and Aeronomy.* 1(4). 616—618.
8. Ivanov K. G. (1962) Geomagnitnyye efekty vzryvov v nizhnej atmosfere (Geomagnetic effects of explosions in the lower atmosphere), *Geomagnetism and Aeronomy.* 2(1), 153—160 (in Russian).
9. Ivanov K. G. (1964) Geomagnetic effect of Tunguska event. *Meteoritika.* (24), 141—151 (in Russian).
10. Ivanov K. G. (2002) Once again on the problem of modeling the geomagnetic effect of the Tungus impac. *Geomagnetism and Aeronomy,* 42(6), 819—820.

11. Iddis G. M., Karyagina Z. V. (1961) On the cometary origin of the Tunguska meteorite. *Meteoritika*. 21. 32—43 (in Russian).
12. Kalashnikov A. G. (1949) Observation of the magnetic effect of meteors by the induction method, *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 66 (3), 373—376 (in Russian).
13. Kalashnikov A. G. (1952) Magnetic effect of meteors. *Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Geofiz.* 6. 7—20 (in Russian).
14. Adushkin V. V., Nemchinov I. V. (eds). (2005) *Catastrophic Impacts of Cosmic Bodies*. Moscow, Russia: ECC Akademkniga Publ. 310 p. (in Russian).
15. Kovalev A. T., Nemchinov I. V. Shuvalov V. V. (2006) Ionospheric and magnetospheric disturbances caused by impacts of small comets and asteroids. *Solar System Research*. 40(1). 57—67.
16. Kovalevskii A. F. (1962) Revisiting the problem of geomagnetic effects of large explosions. *Tr. Sibir. Fiz.-Tekh. Inst. Tomsk. Univ.* 41. 87—91 (in Russian).
17. Kovalevskii A. F. (1963) Magnetic effect of the Tunguska meteorite explosion, *The Problem of Tunguska Meteorite*. Tomsk: Tomsk. Gos. Univ. 187—194 (in Russian).
18. Lazorenko O. V., Chernogor L. F. (2009) *Ultra-wideband signals and processes: Monograph*, V. N. Karazin Kharkiv National University Publ. 576. (in Russian).
19. Molchanov O. A. (1985) *Low-frequency waves and induced radiation in the near-Earth plasma*, Moscow: Nauka. 224 p. (in Russian).
20. Obashev G. O. (1961) On the geomagnetic effect of the Tunguska meteorite. *Meteoritika*. (21). 49—52 (in Russian).
21. Sorokin V. M., Fedorovich G. V. (1982). *Physics of Slow MGD Waves in the Ionospheric Plasma*. Moscow: Energoizdat Publ. 136 p. (in Russian).
22. Chernogor L. F. (2008) Advanced methods of spectral analysis of quasiperiodic wave-like processes in the ionosphere: specific features and experimental results. *Geomagnetism and Aeronomy*. 48(5). 652—673.
23. Chernogor L. F. (2009) *Radiophysical and geomagnetic effects of rocket engine burn*. Kharkiv V. N. Karazin National University Publ. 386 p. (in Russian).
24. 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.
25. Chernogor L. F. (2012). *Physics and ecology of the catastrophes*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv Nat. Univ. 556 (in Russian).
26. Chernogor L. F. (2013). Large-scale disturbances in the Earth's magnetic field associated with the Chelyabinsk meteorite. *Radiofizika i elektronika*. 4 (18) (3), 47—54 (in Russian).
27. Chernogor L. F. (2013). The main physical effects associated with the Chelyabinsk bolide passage. In: *Asteroids and comets. Chelyabinsk event and study of the meteorite falling into the lake Chebarkul: Proceedings of the international scientific-practical conference*. Chelyabinsk, Russia: Krai Ra Publ., June 21—22, 2013. 148—152 (in Russian).
28. Chernogor L. F. (2013). Plasma, electromagnetic and acoustic effects of meteorite Chelyabinsk. *Inzhenernaya fizika*. 8. 23—40. (in Russian).
29. Chernogor L. F. (2014) Geomagnetic field effects of the Chelyabinsk meteoroid. *Geomagnetism and Aeronomy*. 54(5). 613—624.
30. Chernogor L. F. (2018) Magnetic and ionospheric effects of a meteoroid plume. *Geomagnetism and Aeronomy*. 58(1). 119—126.
31. Chernogor L. F. (2018) Magnetospheric effects during the approach of the Chelyabinsk meteoroid. *Geomagnetism and Aeronomy*. 58(2). 252—265.

32. Chernogor L. F. (2018) Parameters of acoustic signals generated by the atmospheric meteoroid explosion over Romania on January 7, 2015. *Solar System Research*. 52(3). 206—222.
33. Chernogor L. F. (2019) The physical effects of Lipetsk meteoroid. 1. *Kinematics Phys. Celestial Bodies*. 35(4). 174—188.
34. Chernogor L. F. (2019) The physical effects of Lipetsk meteoroid. 2. *Kinematics Phys. Celestial Bodies*. 35(5). 217—230.
35. Chernogor L. F. (2019) The physical effects of Lipetsk meteoroid. 3. *Kinematics Phys. Celestial Bodies*. 35(6). 271—285.
36. 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).
37. Chernogor L. F., Garmash K. P., Podnos V. A., Tyrnov O. F. (2013). The V. N. Karazin Kharkiv National University Radio Physical Observatory — the tool for ionosphere monitoring in space experiments. In: S. A. Zasukha, O. P. Fedorov (eds). *Space Project «Ionosat-Micro»*, Akadempriodika Publ., Kyiv. 160—182 (in Russian).
38. Brown P., Spalding R. E., Re Velle D. O., Tagliaferri E. (2002) The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth. *Nature*. 420. 294—296.
39. *Catastrophic Events Caused by Cosmic Objects* (2008). V. Adushkin, I. Nemchinov (Eds.). Comprehensive overview of the threat posed by the impact of an asteroid or comet on Earth, XI + 357 p. doi: 10.1007/978-1-4020-6452-4.
40. *Center for Near Earth Object Studies* (2019) URL: <https://cneos.jpl.nasa.gov/fireballs/>. Last accessed: 12.03.2019.
41. Chernogor L. F., Blaunstein N. (2017) *Radiophysical and geomagnetic effects of rocket burn and launch in the near-the-Earth environment*. Boca Raton, London, New York: CRC Press. Taylor & Francis Group. 542.
42. *Infrasound monitoring for atmospheric studies* (2010) A. Le Pichon, A. Hauchecorne, E. Blanc (Eds). Dordrecht Heidelberg London New York: Springer. 734.
43. *Space weather prediction Center National Oceanic and Atmospheric Administration* (2019) URL: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/ace2/>. Last accessed: 18.02.2019.

Л. Ф. Черногор

Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина  
г. Харьков, Украина

#### ГЕОМАГНИТНЫЕ ВАРИАЦИИ, ВЫЗВАННЫЕ ПОЛЕТОМ И ВЗРЫВОМ ЛИПЕЦКОГО МЕТЕОРОИДА: РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Первые наблюдения магнитного эффекта метеоров и теоретическое объяснение эффекта было сделано еще в середине XX века. Механизмы магнитного эффекта крупных космических тел (размером 1...10 м и более) принципиально отличаются от механизмов возмущений геомагнитного поля метеорами на ионосферных высотах. Падение и взрыв крупных метеороидов сопровождается генерацией мощной ударной волны, образованием плюма, приводящих к геомагнитному эффекту. До настоящего времени нет единого мнения о главном механизме геомагнитного эффекта крупных метеороидов. Исследователи располагают измерениями для Тунгусского и Челябинского метеороидов. Для Челябинского метеороида обнаружены и объяснены вариации геомагнитного поля как при подлете, так и после взрыва этого космического тела. Представляет значительный теоретический и практический интерес анализ результатов наблюдений падения любого достаточно крупного космического тела.

Цель настоящей работы — изложение результатов анализа вариаций магнитного поля, возникших при движении Липецкого метеороида в магнитосфере и атмосфере Земли, оценка и обсуждение магнитного эффекта и его механизмов. Частота падения подобных метеороидов составляет  $0.68 \text{ год}^{-1}$ . С использованием данных Магнитометрической обсерватории Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина (Харьков, Украина) проведен анализ временных вариаций горизонтальных составляющих геомагнитного поля в день падения Липецкого метеороида (21 июня 2018 г.) и в контрольные дни (20 и 22 июня 2018 г.). Метеороид имел начальную скорость, равную 14.4 км/с, начальную массу 113 т и размер около 4 м. Расстояние от места взрывоподобного выделения энергии метеороидом до обсерваторий составляло 360 км. Оказалось, что пролет в магнитосфере и атмосфере Липецкого метеороида сопровождался знакопеременными вариациями составляющих геомагнитного поля. Магнитный эффект магнитосферы наблюдался за 54...56 мин до взрыва метеороида, амплитуда возмущений геомагнитного поля не превышала 0.5...1 нТл, длительность — 15...20 мин. После взрыва метеороида со временем запаздывания около 6 мин наблюдались знакопеременные (сначала положительный, затем отрицательный) всплески уровня  $H$ -составляющей. Амплитуда всплеска равнялась 1.2...1.5 нТл. Продолжительность магнитного эффекта ионосферы при этом составляла десятки минут. Предложены модели наблюдаемых магнитных эффектов и выполнены теоретические оценки. Результаты наблюдений и оценок хорошо согласуются между собой.

**Ключевые слова:** Липецкий метеороид, геомагнитные вариации, магнитный эффект магнитосферы, магнитный эффект ионосферы, взрывной процесс, ударная волна, теоретические модели.

*L. F. Chernogor*

Kharkiv V. N. Karazin National University  
Kharkiv, Ukraine

#### GEOMAGNETIC VARIATIONS CAUSED BY LIPETSK METEOROID PASSAGE AND EXPLOSION: MEASUREMENT RESULTS

The first observations of the magnetic effect and its theoretical explanation were made back in the middle of the 20th century. The mechanisms for the magnetic effect of large celestial bodies (of 1...10 m) fundamentally differ from the mechanisms for disturbances in the geomagnetic field with meteors at ionospheric heights. The large meteoroid passage through the atmosphere and its explosion is accompanied by the generation of a powerful shock wave, the formation of a plume, which result in the geomagnetic effect. To the present day, researchers are divided on the main geomagnetic effect of large meteoroids. The Tungus and Chelyabinsk meteoroid measurements are available for researchers. In the case of the Chelyabinsk meteoroid, the variations in the geomagnetic field are detected and explained both prior to and after the explosion of this celestial body. The analysis of observations of the passage of any large enough celestial body is of considerable theoretical and practical interest. The purpose of work is the presentation of analysis of magnetic field variations that arise as a result of Lipetsk meteoroid passage through the Earth's magnetosphere and the atmosphere, the estimate and discussion of the magnetic effect and its mechanisms. The rate of passage of such meteoroids events is equal to  $0.68 \text{ yr}^{-1}$ . Using the data provided by the Kharkiv V. N. Karazin National University Magnetic Observatory (Kharkiv, Ukraine), the temporal variations in the horizontal components of the geomagnetic field on June 21, 2018, the day of the Lipetsk meteoroid passage, and on June 20 and 22, 2018, the reference days, have been analyzed. The meteoroid initial speed was equal to 14.4 km/s, the initial mass equal to 113 t, and the initial size equal to approximately 4 m. The distance from the site where the meteoroid explosion-like release of energy occurred

to the observatories is equal to 360 km. The passage of the Lipetsk meteoroid in the magnetosphere and the atmosphere has been shown to be accompanied by alternating-sign variations in the geomagnetic field components. The magnetic effect of the magnetosphere was observed 54...56 min before the meteoroid explosion, the amplitude of the disturbance in the geomagnetic field did not exceed 0.5...1 nT, and the duration 15...20-min. After the meteoroid explosion, with an ~6-min delay, alternating-sign spikes (first positive, then negative) in the *H*-component level were observed. The spike amplitude was equal to ~1.2...1.5 nT, while the duration of the magnetic effect from the ionosphere was equal tens of minutes. The models for the magnetic effects observed are suggested and theoretical estimates performed. The observations and the estimates are in good agreement.

**Keywords:** Lipetsk meteoroid, geomagnetic variations, magnetic effect of the magnetosphere, magnetic effect of the ionosphere, explosive process, shock wave, theoretical models.

Стаття надійшла до редакції 24.09.2019

Після доопрацювання 24.09.2019

Прийнята до друку 01.11.2019