

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2022.01.035>

УДК 550.385.37: 550.388

## Л. Ф. Черногор

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

### Ефекти Камчатського метеороїда в геомагнітному полі

З використанням даних магнітних станцій Паратунка, Магадан, Якутськ і Хабаровськ (Російська Федерація), Metambetsu, Капоуа, Какіока (Японія), Cheongyang (Республіка Корея), Shumagin і College (США) проведено аналіз часових варіацій компонентів геомагнітного поля в день падіння Камчатського метеороїда (18 грудня 2018 р.) і в контрольні дні (17 і 19 грудня 2018 р.). Відстань  $r$  від місця вибухоподібного виділення енергії метеороїдом до обсерваторій змінювалася від 1.001 до 4.247 Мм. Виявилось, що проліт у магнітосфері та атмосфері Камчатського метеороїда супроводжувався варіаціями переважно  $H$ -компонента геомагнітного поля. Магнітний ефект магнітосфери спостерігався двічі: за 51 і 28 хв до вибуху метеороїда, амплітуда збурень геомагнітного поля не перевищувала 0.2...1 нТл, тривалість — близько 20 і 10 хв відповідно. Після вибуху метеороїда з часом запізнення від 8 до 13 хв для  $r$  від 1.004 до 4.247 Мм спостерігалися знакозмінні сплески рівня  $H$ -компонента. Амплітуда коливань змінювалася приблизно від 0.5 до 0.1 нТл при збільшенні  $r$ . Тривалість магнітного ефекту іоносфери при цьому варіювала для всіх відстаней у межах 16...25 хв. Видима швидкість поширення збурень у цій групі була близькою до 10 км/с. Збурення мали МГД-природу. Для другої групи збурень час запізнення збільшувався від 56 до 218 хв при збільшенні згаданої відстані. Тривалість збурення становила приблизно 30...65 хв, видима швидкість — близько 336 м/с, період — 5...10 хв. Дане збурення магнітного поля викликане атмосферною гравітаційною хвилею, яка поширюється від місця вибуху метеороїда. Представлено теоретичні моделі спостережуваних магнітних ефектів і виконано теоретичні оцінки. Результати спостережень і оцінок узгоджуються між собою.

**Ключові слова:** Камчатський метеороїд, геомагнітне поле, горизонтальний компонент, магнітний ефект магнітосфери, магнітний ефект іоносфери, МГД-збурення, атмосферна гравітаційна хвиля.

**ВСТУП**

Відомо, що механізми магнітного ефекту великих космічних тіл (з діаметром 1...10 м і більше) істотно відрізняються від механізмів збурень геомагнітного поля, викликаних слабкими метеорами на іоносферних висотах [1, 14, 15]. На відміну від дрібних тіл падіння та 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 K) струменя плазми, який отримав назву плюму [16, 17, 31, 41].

Через півстоліття після падіння Тунгуського космічного тіла у роботі [8] було виявлено й описано його магнітний ефект. Величина збурення геомагнітного поля, зареєстрована в Іркутській обсерваторії на відстані близько 1000 км від місця вибуху, досягала 67 нТл, а тривалість магнітного ефекту становила 3...4 год [8—12, 16].

У роботах [2—4, 7, 9—13, 18, 19, 21] були запропоновані фізичні механізми, які могли викликати магнітний ефект Тунгуського тіла. Низка сценаріїв виявилася неефективною [7, 13, 18, 19, 21]. До механізмів аперіодичних збурень геомагнітного поля великими космічними тілами, які не втратили своєї актуальності, належать такі: збурення системи іоносферних струмів [9—12], утворення дипольного моменту у витягнутому плазмовому сліді [3], діамагнітне збурення, викликане ударною хвилею [3, 21] та магнітогідродинамічний ефект плюму [16, 17, 31]. У принципі всі вони можуть давати свій внесок у магнітний ефект метеороїдів та призвести до збурення геомагнітного поля зі своїми просторово-часовими масштабами.

До теперішнього часу немає єдиної думки про головний механізм магнітного ефекту, який викликається великими космічними тілами. Це пов'язано насамперед із малою кількістю даних спостережень. У свій час було зареєстровано геомагнітний ефект Тунгуського тіла. Подібні цьому тілу метеороїди вторгаються до атмосфери дуже рідко — один раз за 300...1000 років [40]. Тіла діаметром 10...20 м зіштовхуються з Землею всього раз на 10...100 років відповідно [26, 40]. До них належить Челябінський метеороїд. Магнітний ефект Челябінського космічного тіла описано у роботах [27, 30]. У цих роботах теоретично оцінено магнітний ефект, проведено аналіз часових варіацій компонентів геомагнітного поля, зареєстрованих станціями Алма-Ата, Київ, Львів, Новосибірськ і Харків. Уперше виявлено квазіперіодичні варіації горизонтального компонента геомагнітного поля в діапазоні періодів 30...40 хв, амплітудою 0.5...2 нТл на відстанях  $r = 2.7...1.2$  Мм відповідно тривалістю 2...3 год.

У роботі [32] проаналізовані часові варіації горизонтальних компонентів геомагнітного поля, зареєстровані станціями Алма-Ата, Арті, Борок, Київ, Львів, Новосибірськ, Харків і Якутськ, які супроводжували підліт Челябінського космічного тіла. Вперше виявлено

магнітосферний ефект метеороїда, який спостерігався в варіаціях магнітного поля за 33...47 хв до вибуху Челябінського тіла. Тривалість магнітосферного ефекта становила 25...35 хв, а амплітуда аперіодичних збурень — 1...6 нТл. У цій же роботі запропоновано модель генерації аперіодичних, квазіперіодичних і шумоподібних варіацій геомагнітного поля, викликаних взаємодією підлітаючого метеороїда з магнітосферою.

Приклад геомагнітного ефекту метеороїда метрового розміру, який отримав назву Вітимського, описано в роботах [25, 26]. Падіння цього метеороїда супроводжувалось квазіперіодичними варіаціями магнітного поля в діапазоні періодів 100...1000 с, які зареєстровано на відстані  $r \approx 4.85$  Мм. Амплітуда коливань становила 1.5...2 нТл. Діаметр метеороїда дорівнював приблизно 3.2 м, а початкова кінетична енергія —  $10^{13}$  Дж  $\approx 2.4$  кт ТНТ. Частота падіння подібних тіл —  $1.6 \text{ рік}^{-1}$  [25, 26].

Другий приклад геомагнітного ефекту, викликаний падінням метеороїда метрового розміру, який отримав назву Липецького, описано автором [33]. При цьому виявлено, що за 54...56 хв до вибуху метеороїда мало місце двополярне (фаза стиснення та розрідження) збурення магнітного поля з амплітудою 0.5 нТл та середньою тривалістю 25 хв. Запропоновано модель магнітосферного ефекту метеороїда. В основі моделі лежить витіснення геомагнітного поля з області пролітаючого у магнітосфері (параметр Мак-Ілвейна  $L \approx 8...9$ ) метеороїда та генерація магнітного ефекту еквівалентним магнітним диполем. Результати модельних оцінок основних параметрів магнітного збурення добре відповідають результатам спостережень. Виявлено, що з часом запізнення, який змінюється від 7...8 до 13...14 хв при збільшенні відстані між місцем вибуху й обсерваторією від 0.584 до 4.324 Мм, виникало двополярне збурення геомагнітного поля, властиве вибуховим процесам, тривалістю 15...20 хв і амплітудою від 4 до 1 нТл для  $r$

0.584...4.324 Мм відповідно. Запропоновано модель іоносферного магнітного ефекту. В основі цієї моделі лежить збурення концентрації електронів і щільності іоносферного струму на висотах динамо-області ударною хвилею, яка виникла в результаті прольоту та вибуху метеороїда. Відповідність результатів моделювання результатам спостережень свідчить про адекватність моделі та метеороїдну природу магнітного ефекту. Встановлено, що метеороїди з кінетичною енергією порядку  $10^{13}$  Дж здатні викликати магнітний ефект у магнітосфері та іоносфері, який можуть зареєструвати наземні магнітометри.

У роботі [36] описано геомагнітний ефект Липецького метеороїда у флуктуаціях геомагнітного поля. Основні результати аналізу спостережень, виконаних з використанням високочутливого магнітометра-флюксметра, показали наступне. Відстань між епіцентром вибуху й обсерваторією становила 360 км. Виявлено магнітний ефект магнітосфери, який полягає у виникненні специфічних (властивих вибуховим процесам) варіацій рівня геомагнітного поля за 54...56 хв до

вибуху метеороїда в атмосфері Землі (висота близько 27 км). Амплітуда збурень становила 0.5...1 нТл, а тривалість — 15...20 хв. Підтверджено фізичний механізм магнітного ефекту магнітосфери, який полягав у генерації магнітного збурення еквівалентним магнітним диполем. Результати моделювання добре узгоджуються з результатами спостережень. Підтверджено магнітний ефект іоносфери. Він полягає у виникненні знакозмінних варіацій рівня геомагнітного поля приблизно через 6 хв після вибуху метеороїда. Амплітуда збурення становила біля 1.2...1.5 нТл, а тривалість — десятки хвилин. Запропоновано фізичний механізм магнітного ефекта, 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 та, як наслідок, концентрації електронів, щільності іоносферного струму та, насамкінець, спостережувані варіації рівня геомагнітного поля. Результати моделювання добре відповідають результатам спостережень. Продемонстровано, що космічні тіла з початковою кінетичною енергією порядку  $10^{13}$  Дж викликають збурення магнітного поля як при русі у магнітосфері, так і при їхньому вибуху в нижній атмосфері, які можна зареєструвати.

Падіння Камчатського метеороїда, як і падіння Челябінського метеороїда, належить до унікальних явищ. Розмір Камчатського метеороїда лише ненабагато поступався Челябінському метеороїду (9.4 м проти 18 м). Водночас швидкість першого суттєво перевищувала швидкість другого (32 км/с проти 19.5 км/с). Це визначило значну кінетичну енергію Камчатського метеороїда, яка була меншою всього у 2.5 рази від енергії Челябінського метеороїда.

Аналізу ефектів Челябінського метеороїда присвячені сотні наукових робіт [28, 29, 39, 52—54]. Цього не можна сказати про ефекти Камчатського метеороїда. Відомі лише одиничні роботи [5, 22, 34, 35, 37, 42, 43, 45, 46, 51, 55]. Робота [22] — науково-популярна. У роботах [35, 42, 43] теоретично досліджено основні фізичні процеси, які супроводжували падіння Камчатського метеороїда. У роботах [37, 51] розглядався інфразвуковий ефект, а у роботах [34, 46] — іоносферні ефекти Камчатського метеороїда.

У роботі [5] за даними інфразвукового сигналу, зареєстрованого станцією IS44 (півострів Камчатка) на відстані 1024 км, було оцінено енергію вибуху, точніше інфразвукової хвилі, в 0.4...8.2 кт ТНТ, що набагато менше від загальноприйнятого значення кінетичної енергії метеороїда (173 кт ТНТ).

У роботі [38] шляхом дослідження пилового шлейфу від метеороїда уточнено його доатмосферну траєкторію. Отримано, що азимут був близьким до  $130^\circ$ , а зенітний кут — до  $14^\circ$ . За даними NASA (урядових сенсорів США (USGS)) азимут становив  $169.4^\circ$ , а зенітний кут —  $21.4^\circ$ .

У дослідженні [47] було виявлено, що за 3...10 хв до вибуху метеороїда у магнітосфері виникли коливання з частотою 25...35 мГц (пе-

ріодом 40...29 с). Цей ефект було пояснено збудженням власних коливань магнітних силових ліній. Ефект спостерігався також у магнітоспряженій області. Було підтверджено наявність магнітосферного ефекту метеороїда, вперше описаного в роботах [32, 33]. Магнітний ефект після вибуху метеороїда виявити не вдалося, що, на думку авторів, видається дивним при такій значній кінетичній енергії метеороїда.

У роботі [50] описано іоносферний ефект метеороїда. За даними супутників GPS і вимірюваннями повного електронного вмісту виявлено два типи збурень. Перший із них виявлявся на відстанях, менших за 1400 км, мав середню горизонтальну швидкість 250 м/с, довжини хвиль 135...240 км і період 12 хв. Другий тип збурень мав швидкість 434 м/с. Амплітуда хвильових збурень на відстані 380...596 км від місця вибуху була близькою до 0.10...0.15 TECU. При значенні 10...15 TECU це відповідало відносній амплітуді близько 1 % або відносній амплітуді хвильових збурень концентрації електронів у декілька відсотків. Час поширення збурення до висоти максимуму шару F становив біля 8 хв.

Становить безсумнівний теоретичний і практичний інтерес аналіз результатів спостережень ефектів у системі Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера, викликаних падінням будь-якого достатньо великого космічного тіла.

Мета цієї роботи — виклад результатів аналізу варіацій магнітного поля, які виникли при русі Камчатського метеороїда у магнітосфері й атмосфері Землі, оцінка й обговорення магнітного ефекту та його механізмів.

Як показують наші оцінки за співвідношенням [40], частота падіння подібних метеороїдів становить  $0.033 \text{ рік}^{-1}$ , тобто одна подія в середньому за 30 років.

## ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО КАМЧАТСЬКИЙ МЕТЕОРОЇД

18 грудня 2018 р. о 23:48:20 UT (тут і далі UT — всесвітній час) в районі Берингового моря між Камчаткою й Аляскою мало місце вторгнення до атмосфери Землі космічного тіла, яке автором було названо Камчатським метеороїдом [35, 42, 43]. Інші дослідники [5, 38, 47, 50] його називають Берингоморським метеороїдом, метеороїдом Берингового моря.

Прилади, встановлені на супутниках США, призначених для контролю космічного простору, вимірювали три координати швидкості ( $v_x$  6.3 км/с,  $v_y$  -3 км/с,  $v_z$  -31.2 км/с), інтегральну енергію свічення  $E_p$   $1.3 \cdot 10^{14}$  Дж 31 кт ТНТ, висоту спалаху  $z_p$  26 км та його координати: 56.9 N, 172.4 E [41].

Знання трьох проекцій швидкості дозволили автору обчислити кут нахилу траєкторії до горизонту 68.6 та модуль швидкості

32 км/с, за емпіричною залежністю для коефіцієнта свічення  $\eta_r$  від  $E_r$ , наведеного в роботі [40], обчислити  $\eta_r = 18\%$  та початкову кінетичну енергію тіла  $E = 7.24 \cdot 10^{14}$  Дж  $\approx 173$  кт ТНТ. Знаючи  $E$  і  $\eta_r$ , легко можна обчислити масу метеороїда  $m = 1.41$  кт, а за масою та щільністю — об'єм  $V$  і діаметр  $d$  кулеподібного тіла. Виявилось, що при щільності  $3.3 \text{ т/м}^3$   $V = 428.5 \text{ м}^3$ ,  $d = 9.4$  м.

Зауважимо, що серед дослідників немає єдиної думки про величину кінетичної енергії метеороїда [5, 41]. Більшість вважає, що вона є близькою до 173 кт ТНТ [38, 47, 49—51].

### ЗАСОБИ ТА МЕТОДИ

Для аналізу часових варіацій компонентів геомагнітного поля залучались дані мережі «Intermagnet», отримані на станціях Паратунка, Магадан, Якутськ і Хабаровськ, які належать Російській Федерації, College та Shumagin (США), Memambetsu, Kakioka і Kanoya, дислоковані в Японії, та Cheongyang (Республіка Корея) (табл. 1, 2). Відстань  $r$  між місцем вибуху метеороїда та обсерваторією змінювалась у межах 1.001...4.247 Мм. Часове розрізнення — 1 хв, мінімальне значення рівня флуктуацій компонентів геомагнітного поля — близько 0.1 нТл. Аналізу піддавались реєстрації, отримані 17—20 грудня 2018 р. Аналізувались усі компоненти поля, а також похідні  $dB_x / dt$ ,  $dB_y / dt$ ,  $dB_z / dt$  і  $dB_F / dt$ . Найбільш чітко магнітний ефект виражений у рівні  $H$ -компонента та у похідних  $dB_x / dt$  і  $dB_y / dt$ . Часові залежності цих трьох параметрів магнітного поля для 18 грудня 2018 р. і контрольних днів 17, 19 і 20 грудня 2018 р. наводяться нижче.

В даних мережі «Intermagnet» для кожної доби флуктуації рівня компонентів відраховувалися від своїх рівнів. При обробці даних

**Таблиця 1. Основні дані про магнітні станції та магнітний ефект магнітосфери Камчатського метеороїда для першої (в дужках — для другої) групи збурень**

Станція	Координати	Амплітуда $H$ , нТл	Час упередження, хв	Тривалість збурення, хв
Паратунка	52.971 N, 158.248 E	0.3 (0.3)	51 (28)	18 (17)
Магадан	60.051 N, 150.728 E	0.5 (0.5)	51 (28)	21 (13)
Shumagin	55.35 N, 160.46 W	0.4 (0.4)	51 (28)	18 (10)
College	64.87 N, 147.86 W	1...1.5 (1...1.5)	51 (28)	18 (10)
Якутськ	61.96 N, 129.66 E	0.4...0.5 (0.2...0.3)	51 (28)	20 (10)
Memambetsu	43.91 N, 144.19 E	0.5 (0.3)	51 (28)	20 (10)
Хабаровськ	47.61 N, 134.69 E	0.4...0.5 (0.1...0.2)	51 (28)	20 (12)
Kakioka	36.23 N, 140.18 E	0.2...0.3 (0.2...0.3)	51 (28)	20 (10)
Cheongyang	36.37 N, 126.854 E	0.2...0.3 (0.2)	51 (28)	18 (10)
Kanoya	31.42 N, 130.88 E	0.2...0.3 (0.2)	51 (28)	18 (8)

**Таблиця 2. Основні відомості про магнітні станції та магнітний ефект іоносфери Камчатського метеороїда для першої (другої) групи збурень**

Станція	Відстань, Мм	$H$ , нТл	Час запізнення, хв	Швидкість, км/с	Тривалість збурення, хв
Паратунка	1.001	0.5 (0.3)	7.7 (56)	9.8 (0.334)	16 (28)
Магадан	1.3	0.2 (0.2)	8.2 (71)	9.8 (0.333)	20 (30)
Shumagin	1.679	0.4 (0.4)	8.8 (90)	10 (0.333)	35 (40)
College	2.276	1 (1...1.5)	9.8 (120)	10 (0.333)	18 (43)
Якутськ	2.432	0.3 (0.4)	10.1 (128)	9.9 (0.332)	16 (55)
Memambetsu	2.436	0.4 (0.6...0.9)	10.1 (128)	9.9 (0.333)	20 (30)
Хабаровськ	2.722	0.2 (0.5...0.6)	10.5 (142)	10.1 (0.334)	18 (65)
Kakioka	3.311	0.2...0.3 (0.2...0.3)	11.5 (172)	9.9 (0.332)	20 (45)
Cheongyang	4.049	0.1...0.2 (0.1...0.2)	12.8 (206)	9.9 (0.337)	20 (30)
Капоуа	4.247	0.2 (0.2)	13.1 (218)	10 (0.334)	20 (30)

результати вимірювань «зшивалися» при переході від однієї доби до іншої.

### СТАН КОСМІЧНОЇ ПОГОДИ

До 16 грудня 2018 р. стан космічної погоди був спокійним [49]. 17 грудня 2018 р. концентрація заряджених частинок у сонячному вітрі збільшилась у 3...6 разів. Протягом 17...20 грудня 2018 р. спостерігалось поступове збільшення швидкості сонячного вітру від 300...350 км/с до 600...650 км/с. При цьому температура частинок збільшувалась від  $(0.1...0.2) 10^5$  К до  $(2...3) 10^5$  К. Усе це супроводжувалось збільшенням динамічного тиску частинок у сонячному вітрі в 5...10 разів. Одночасно з цим збільшився рівень флуктуацій міжпланетного магнітного поля від 2...3 до 5...7 нТл. Відмічались сплески значень потужності, яка надходила до магнітосфери від сонячного вітру, до 8...12 ГДж/с. Значення індексів  $K_p$  і  $|D_{st}|$  епізодично збільшувались до 2...3 і 10...15 нТл відповідно.

Важливо, що 17 і 19 грудня 2018 р. з 22:00 до 24:00, а також 18 і 20 грудня 2018 р. з 00:00 до 04:00 магнітне поле було збуреним (індекс  $K_p$  становив 2.7...3). 18 грудня 2018 р. з 22:00 до 24:00 і 19 грудня 2018 р. з 00:00 до 04:00  $K_p = 1$ .

Незважаючи на незначні збурення, в цілому стан космічної погоди був сприятливим для спостереження реакції геомагнітного поля на проліт і вибух Камчатського метеороїда.

### РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ

Наведемо результати аналізу часових варіацій рівнів  $H$ -компонента та похідних  $B_x = dB_x / dt$  і  $B_y = dB_y / dt$ , які передували вибуху Камчатського метеороїда, а також після вибуху.

Опишемо окремо магнітний ефект при підльоті метеороїда, а також після його вибуху. Розглянемо спочатку інтервал часу 22:00...00:00, а потім інтервал часу 00:00...04:00 наступної доби. Магнітні станції представлено далі у порядку збільшення відстані.

**Станція Паратунка.** 17 грудня 2018 р. з 22:30 рівень  $H$ -компонента, незначно флюктууючи, зменшувався від 5 нТл до  $-10$  нТл о 24:00 (рис. 1а). Від 00:00 і до 01:00 18 грудня 2018 р. рівень флюктуував у межах  $-5...-11$  нТл. Після цього він поступово збільшувався до 9 нТл. Значення похідних  $dB_x / dt$  і  $dB_y / dt$  змінювались від 2 до 6 нТл/хв. Квазіперіод становив 5...10 хв.

18 грудня 2018 р., в день падіння Камчатського метеороїда, від 22:30 до 24:00 рівень  $H$ -компонента, флюктууючи з розмахом до 1...1.2 нТл, зменшувався від 0 до  $-2$  нТл (рис. 1б). Мали місце три групи збурень: від 22:57 до 23:15, від 23:20 до 23:30 та від 23:55 до 00:11 19 грудня 2018 р. Наступна група збурень спостерігалась від 00:44 до 01:12. В указаних інтервалах часу розмах похідних збільшувався у 6...8 разів для перших двох груп і в 1.5...2 рази для інших груп, досягаючи (0.3...0.4) нТл/хв. Істотно змінювалась і величина квазіперіоду  $T$ : для першої групи вона становила 6 хв. Друга група складалася з аперіодичного збурення — збільшення рівня (фаза стиснення), за яким відбувалося його зменшення (фаза розрідження). Похідні були при цьому трипелюстковими.

У контрольний день 19 грудня 2018 р. варіації рівня  $H$ -компонента були значними: розмах збільшувався від 1 до 2 нТл (рис. 1в). Величина похідних сягала 1 нТл/хв.

**Станція Магадан.** 17 грудня 2018 р. істотні (у межах 1 нТл) флюктуації рівня  $H$ -компонента мали місце з 22:30 до 23:30 (рис. 2а). При цьому похідні флюктуували у межах (0.3...0.5) нТл/хв. З 00:00 до 02:15 коливання рівня не перевищували (1...1.5) нТл. Похідні варіювали у межах (0.2...1) нТл/хв.

У день падіння космічного тіла 18 грудня 2018 р. у тих же інтервалах часу, що й для станції Паратунка, спостерігалися перші дві групи збурень (рис. 2б). Третя та четверта групи проявлялись дещо пізніше: від 23:56 18 грудня 2018 р. до 00:14 19 грудня 2018 р. та від 00:59 до 01:29 19 грудня 2018 р. Значення варіацій рівня  $H$ -компонента та похідних були близькими до тих же значень для станції Паратунка.

19 грудня 2018 р. значні варіації рівня  $H$ -компонента спостерігалися після 23:10 (рис. 2в). Від 00:00 до 04:00 20 грудня 2018 р. вони досягали 5 нТл. Значення похідних змінювались від 1 нТл/хв до 2 нТл/хв.

**Станція Shumagin.** 17 грудня 2018 р. від 22:00 до 24:00 мали місце помітні (до 1...2 нТл) варіації рівня  $H$ -компонента (рис. 3а). Значення похідних флюктуували в межах 0.5 нТл/хв. Приблизно такими ж були варіації рівня 18 грудня 2018 р. від 00:00 до 04:00. Значення похідних не перевищували (1...1.5) нТл/хв.



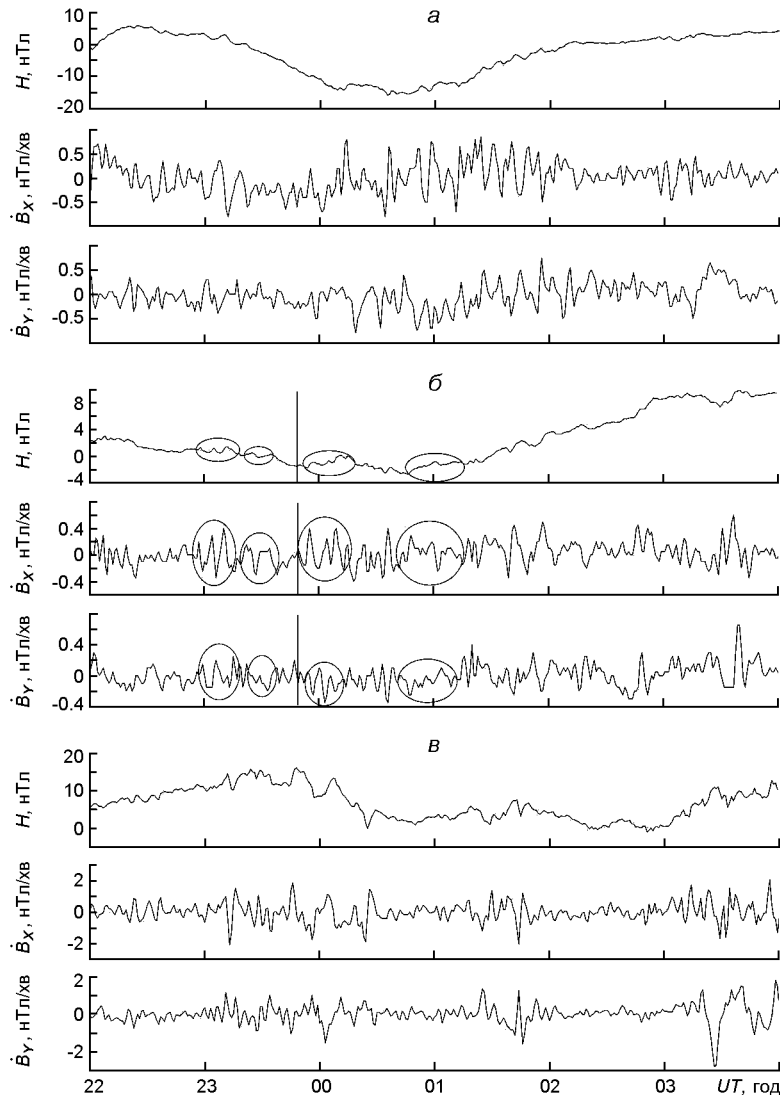


Рис. 1. Часові варіації  $H$ -компонента та похідних геомагнітного поля  $\dot{B}_x = dB_x / dt$  і  $\dot{B}_z = dB_z / dt$ , зареєстровані на станції Паратунка:  $a$  — 17/18 грудня 2018 р.;  $b$  — 18/19 грудня 2018 р.;  $в$  — 19/20 грудня 2018 р. Прямою лінією показано момент вибуху Камчатського метеороїда, еліпсами позначено можливі магнітосферний та іоносферний ефекти, згенеровані підльотом і вибухом космічного тіла. Відстань  $r = 1.001$  Мм

18 грудня 2018 р. з 22:57 і з 23:30 спостерігалися дві групи збурень, подібні до збурень на станціях Паратунка та Магадан (рис. 3б). Розмах варіацій був близьким до 1 нТл. Значення похідних досягали 0.3 нТл/хв. Після вибуху метеороїда спостерігалися третя та четверта групи збурень в інтервалах часу від 23:57 18 грудня 2018 р. до 00:27 19 грудня 2018 р. і 01:18...01:48 19 грудня 2018 р. Значення похідних варіювали у межах 0.3 нТл/хв.

19 грудня 2018 р. найбільші варіації (до 2...4 нТл) рівня  $H$ -компонента реєструвалися в інтервалах часу 23:05...23:35 і 23:45...23:50

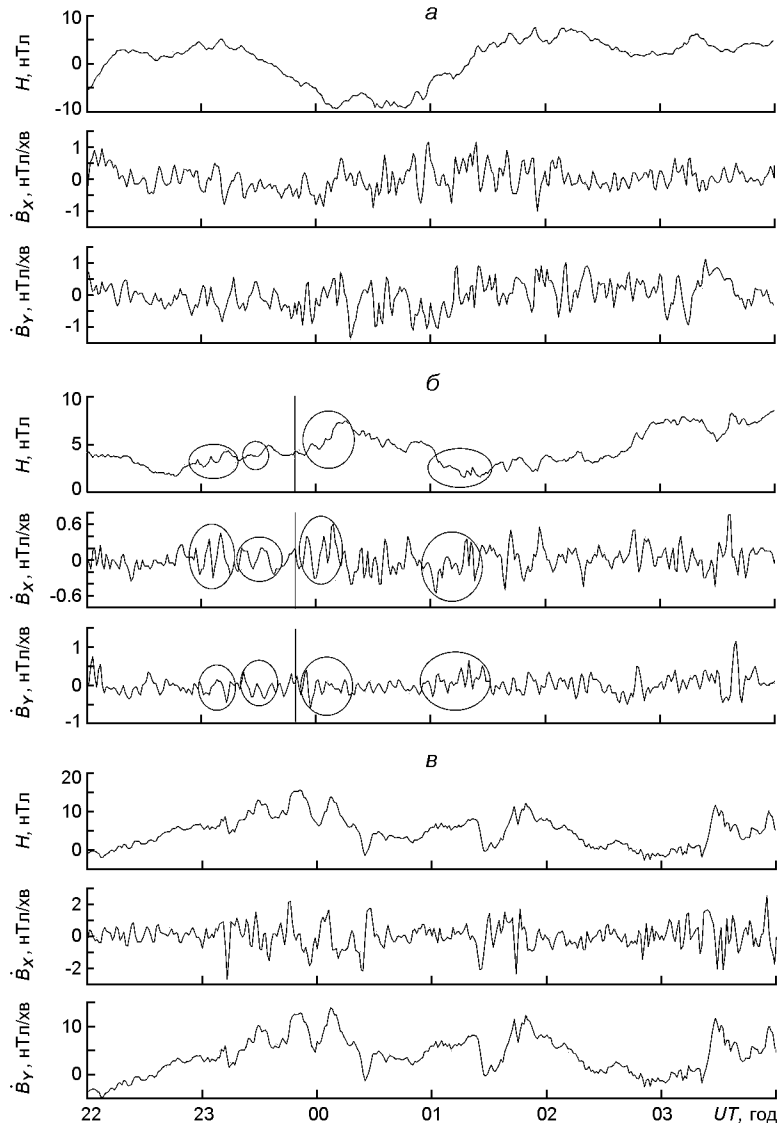


Рис. 2. Те ж, що й на рис. 1, для станції Магадан. Відстань  $r = 1.3$  Мм

(рис. 3в). При цьому значення похідних змінювались у межах (1...2) нТл/хв. Значні варіації рівня також відзначались 20 грудня 2018 р. в інтервалах часу 01:15...01:45 і 03:00...04:00. Значення похідних флюктуювали у межах (1...2) нТл/хв.

**Станція College.** 17 грудня 2018 р. сильні квазіперіодичні варіації рівня  $H$ -компонента спостерігалися в інтервалах часу 22:00...22:35 і 23:00...23:35 (рис. 4а). При цьому похідні варіювали у межах (3...4) нТл/хв. 18 грудня 2018 р. до 00:20 флюктуації рівня були відносно невеликими, від 00:20 і до 03:20 вони істотно збільшились. При цьому похідні змінювались у межах 10 нТл/хв для  $dB_x / dt$  та 5 нТл/хв для  $dB_y / dt$ .

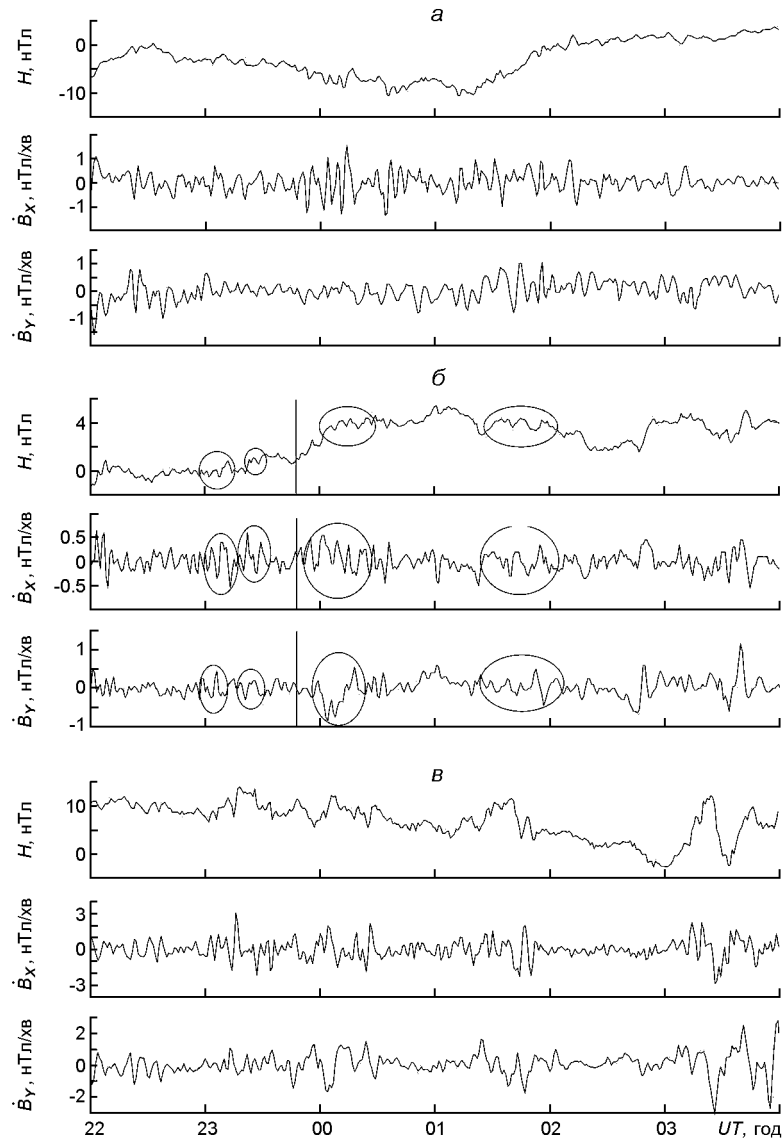


Рис. 3. Те ж, що й на рис. 1, для станції Shumagin. Відстань  $r = 1.679$  Мм

18 грудня 2018 р. від 22:57 до 23:15 та від 23:20 до 23:30 спостерігалися відповідні квазіперіодичні та аперіодичні варіації рівня  $H$ -компонента (рис. 4б). Значення похідних флюктували у межах (1...1.5) нТл/хв. Від 23:58 18 грудня 2018 р. до 00:39 19 грудня 2018 р. спостерігалися квазіперіодичні варіації рівня  $H$ -компонента з періодом, близьким до 4 хв, і амплітудою, близькою до 1 нТл. Від 01:48 до 02:29 коливання мало амплітуду, близьку до 2.5 нТл і  $T = 15$  хв. Похідні при цьому змінювались у межах 1.5 нТл/хв.

Варіації рівня  $H$ -компонента від 22:00 до 24:00 19 грудня 2018 р. та від 00:00 до 04:00 20 грудня 2018 р. змінювались від 10 до 20 нТл (рис. 4в). Значними (до (5...8) нТл/хв) були флюктуації похідних.

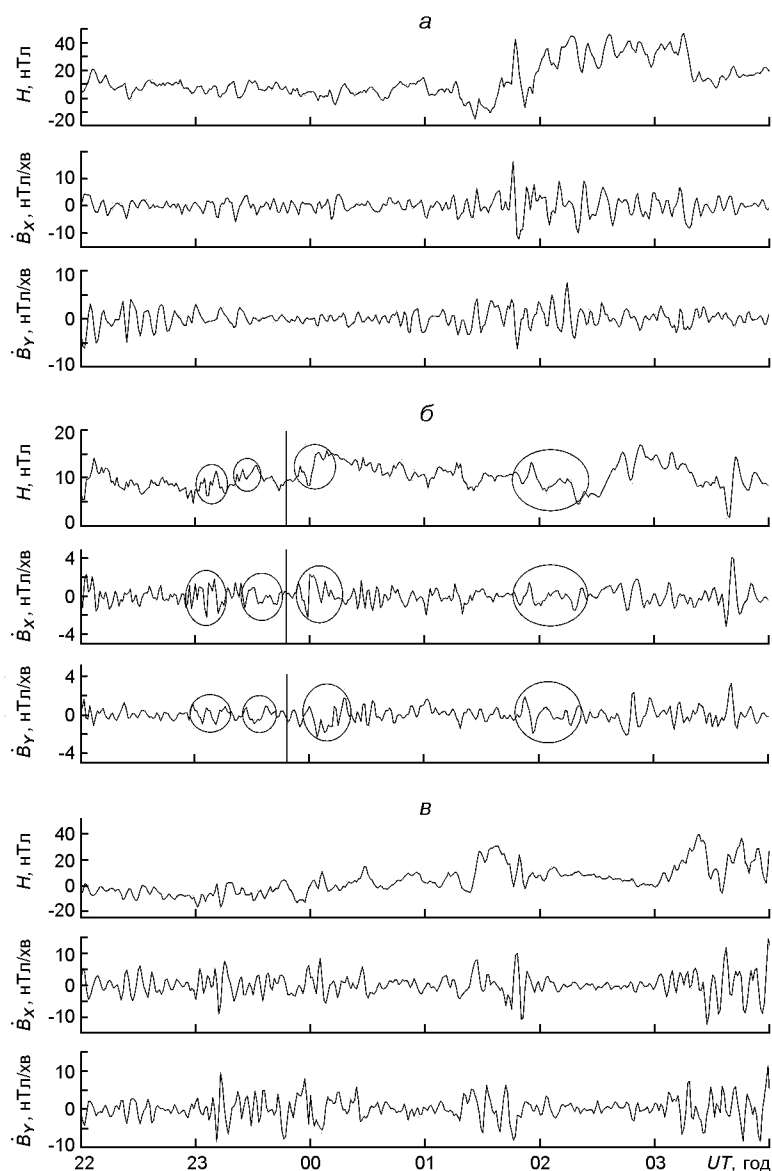


Рис. 4. Те ж, що й на рис. 1, для станції College. Відстань  $r = 2.276$  Мм

**Станція Якутськ.** 17 грудня 2018 р. рівень  $H$ -компонента флюктував у межах від  $-7$  до  $0$  нТл.

18 грудня 2018 р. від 00:00 до 04:00 рівень  $H$ -компонента, флюктуюючи, спочатку збільшувався від  $-5$  до  $10$  нТл, а потім зменшувався до  $0$  нТл (рис. 5а). Варіації похідних були відносно невеликими ( $0.5 \dots 1$ ) нТл/хв).

У день падіння космічного тіла 18 грудня 2018 р. в інтервалах часу 22:57...23:17 і 23:20...23:30 відзначались відповідно квазіперіодичні й аперіодичні варіації рівня  $H$ -компонента (рис. 5б). При цьому відзначались флюктуації похідних у межах  $(0.4 \dots 0.5)$  нТл/хв. Приблизно від

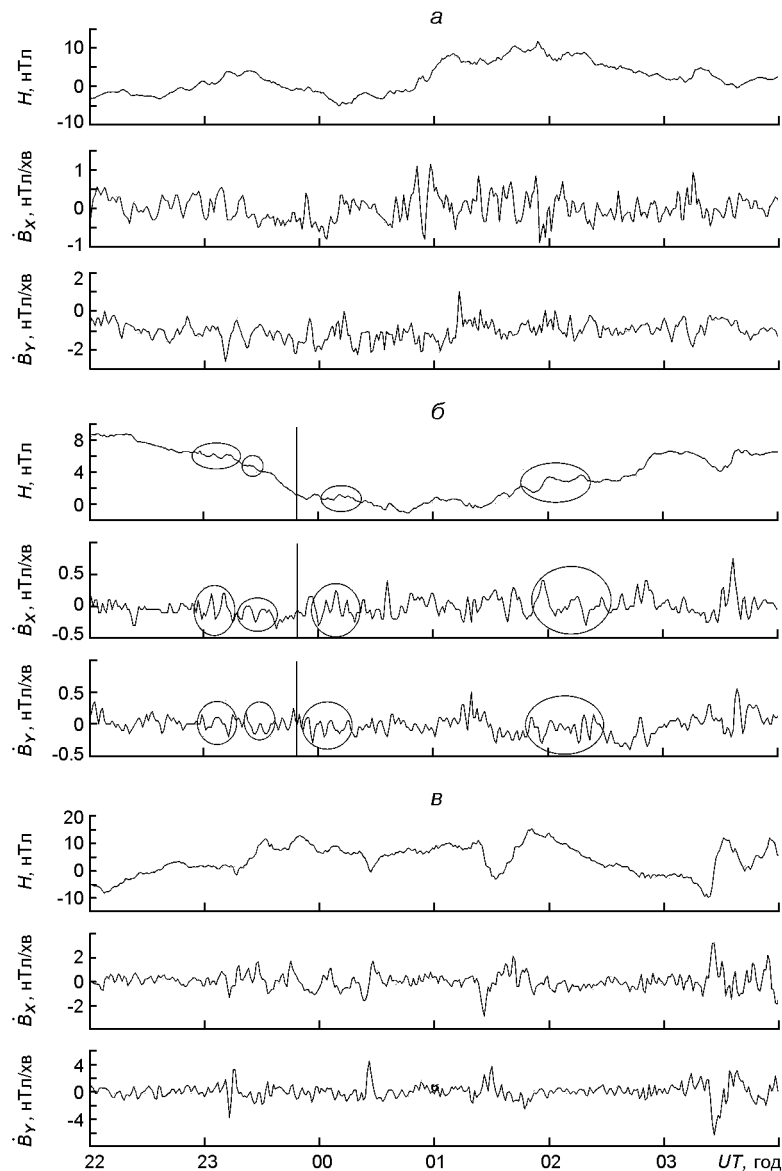


Рис. 5. Те ж, що й на рис. 1, для станції Якутськ (*а* — 18 грудня 2018 р.; *б* — 18/19 грудня 2018 р.; *в* — 19/20 грудня 2018 р.). Відстань  $r = 2.432$  Мм

23:58 до 00:18 19 грудня 2018 р. спостерігалось коливання з амплітудою 0.4 нТл та періодом близько 7...8 хв. Від 01:48 до 02:20 відмічалось квазіперіодичне збурення з амплітудою близько 0.4...0.5 нТл та квазіперіодом приблизно 15 хв. Варіації похідних при цьому збільшувались до (0.2...0.5) нТл/хв.

19 грудня 2018 р. від 22:00 до 24:00 в цілому спостерігалась тенденція до збільшення рівня  $H$ -компонента від  $-7...-10$  до  $+10...+12$  нТл (рис. 5в). При цьому похідні флюктували у межах (1...2) нТл/хв.

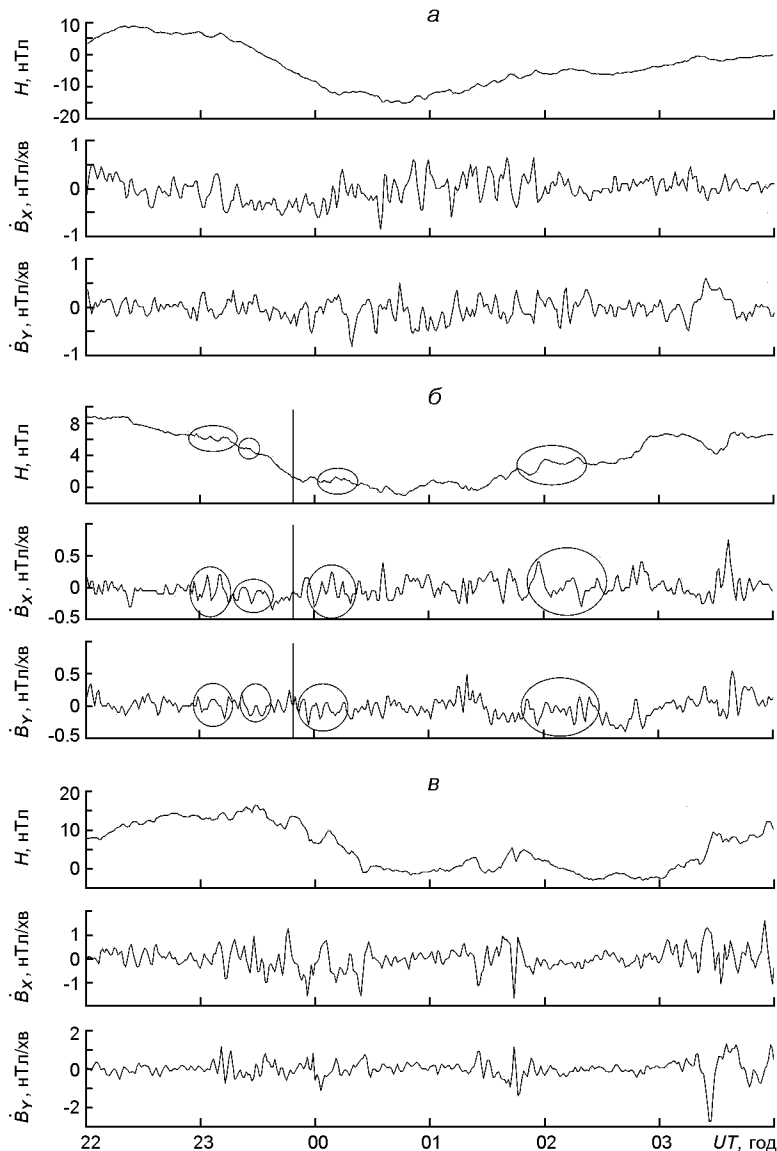


Рис. 6. Те ж, що й на рис. 1, для станції Мемамбетсу. Відстань  $r = 2.436$  Мм

20 грудня 2018 р. від 00:00 до 04:00, крім окремих флуктуацій, похідні змінювались незначно.

**Станція Мемамбетсу.** 17 грудня 2018 р. від 22:00 до 24:00 варіації рівня  $H$ -компонента були достатньо плавними (рис. 6а). Варіації похідних не перевищували  $0.4$  нТл/хв. 18 грудня 2018 р. від 00:00 до 04:00 рівень флуктуацій був у межах  $1$  нТл. При цьому величина похідних коливалась не більш ніж  $0.5$  нТл/хв.

У день падіння Камчатського метеороїда, 18 грудня 2018 р., помітні флуктуації відзначались в інтервалах часу 22:57...23:17 і 23:20...

23:30 (рис. 6б). Від 23:58 18 грудня 2018 р. до 00:18 19 грудня 2018 р. відзначались квазіперіодичні варіації рівня  $H$ -компонента з  $T \approx 5$  хв і амплітудою 0.2...0.3 нТл. Від 01:50 до 02:20 19 грудня 2018 р. спостерігалися квазіперіодичні коливання з періодом близько 15 хв і амплітудою 0.5 нТл. При цьому флуктуації похідних не перевищували (0.2...0.3) нТл/хв.

19 грудня 2018 р. від 22:00 до 24:00 рівень  $H$ -компонента змінювався на (1...2) нТл (рис. 6в). Квазіперіод  $T \approx 5$  хв. Рівень флуктуацій похідних досягав (0.5...0.6) нТл/хв. 20 грудня 2018 р. від 00:00 до 04:00 магнітне поле було збуреним, і його рівень змінювався від  $-5$  до 10 нТл. При цьому варіації похідних досягали 1 нТл/хв.

**Станція Хабаровськ.** 17 грудня 2018 р. від 22:00 до 24:00 варіації рівня  $H$ -компонента були відносно невеликими ( $\approx 1$  нТл) (рис. 7а). 18 грудня 2018 р. від 00:00 до 04:00 частота флуктуацій помітно збільшилась, а їхня амплітуда була не більшою за 1 нТл. Значення похідних в обох часових інтервалах флуктували в межах 0.5 нТл/хв. Квазіперіод змінювався від 5 до 10 хв.

18 грудня 2018 р., у день падіння космічного тіла, від 22:55 до 23:15 та від 23:22 до 23:34 мали місце помітні варіації рівня  $H$ -компонента (рис. 7б). При цьому флуктуації похідних варіювали у межах (0.15...0.25) нТл/хв. Приблизно від 23:57 18 грудня 2018 р. до 00:18 19 грудня 2018 р. спостерігалися слабкі (0.1...0.2 нТл) квазіперіодичні коливання з  $T \approx 5$  хв рівня  $H$ -компонента. Від 01:30 та до 02:35 амплітуда коливань збільшилась до 0.5...0.6 нТл, а  $T \approx 10...15$  хв. Амплітуда флуктуацій похідних становила відповідно 0.2 і 0.3 нТл/хв.

19 грудня 2018 р. з 23:10 до 24:00 рівень  $H$ -компонента змінювався на (1...2) нТл (рис. 7в). При цьому амплітуда флуктуацій досягала 1 нТл/хв. 20 грудня 2018 р. в інтервалі часу 00:00...04:00 рівень  $H$ -компонента варіював від  $-10$  до 10 нТл. Амплітуда флуктуацій похідних зазвичай не перевищувала 1 нТл/хв.

**Станція Какіока.** 17 грудня 2018 р. від 22:00 до 24:00 рівень  $H$ -компонента змінювався достатньо монотонно (рис. 8а). При цьому амплітуда флуктуацій похідних не перевищувала (0.2...0.3) нТл/хв. 18 грудня 2018 р. від 00:30 до 02:30 мали місце квазіперіодичні варіації рівня  $H$ -компонента з амплітудою близько 1 нТл. Рівень флуктуацій похідних варіював у межах 0.3 нТл/хв.

У день падіння Камчатського метеороїда дещо (на 0.5 нТл) змінювався рівень  $H$ -компонента в інтервалах часу 22:57...23:15 і 23:20...23:30. Їм відповідали варіації похідних (0.5...1) нТл/хв (рис. 8б). 19 грудня 2018 р. від 00:00 до 00:20 спостерігалися слабкі (амплітуда 0.2...0.3 нТл) квазіперіодичні варіації ( $T \approx 5$  хв) рівня  $H$ -компонента. В інтервалі часу 02:40...03:25 також відзначались варіації цього рівня. Флуктуації рівня похідних становили близько 0.15 і 0.20 нТл/хв.

19 грудня 2018 р. від 23:10 до 23:50 спостерігалися коливання рівня  $H$ -компонента у межах 1 нТл (рис. 8в). Їм відповідали флуктуації

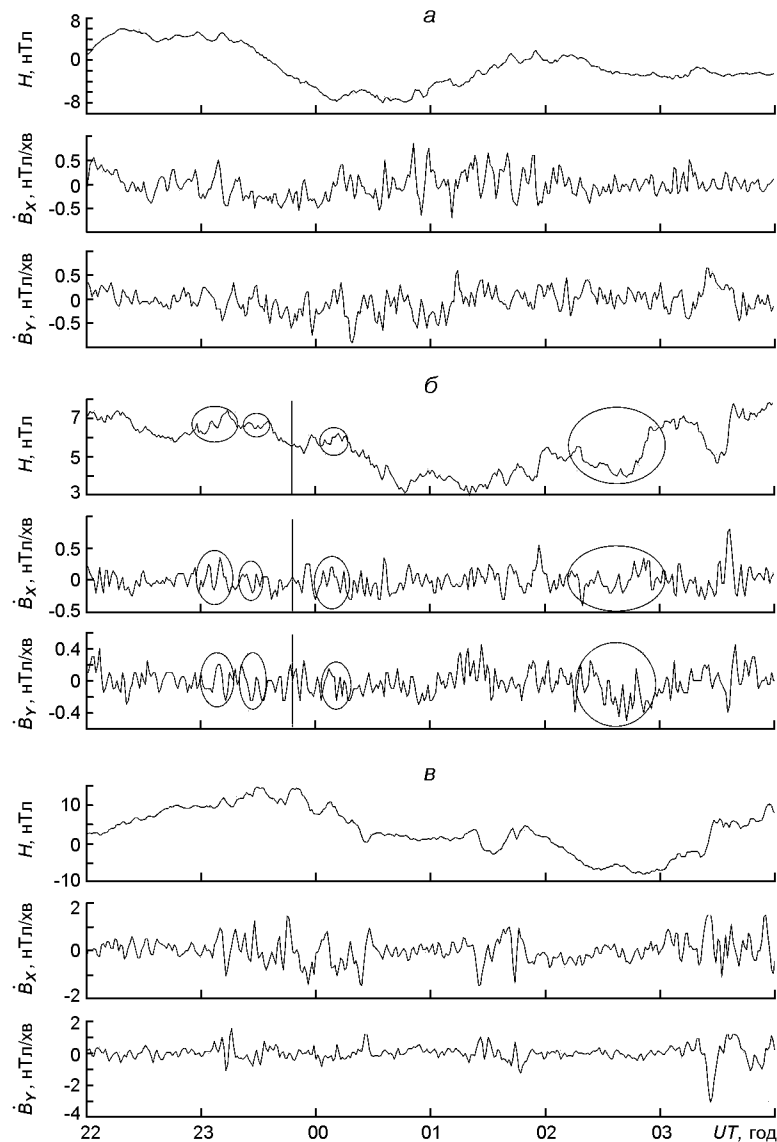


Рис. 7. Те ж, що й на рис. 1, для станції Хабаровск. Відстань  $r = 2.722$  Мм

рівня похідних близько  $0.5$  нТл/хв. 20 грудня 2018 р. рівень  $H$ -компонента змінювався від  $4 \dots 8$  нТл до  $-4$  нТл. Коливання рівня похідних не перевищували  $0.5$  нТл/хв.

**Станція Cheongyang.** 17 грудня 2018 р. помітні (до  $1$  нТл) варіації рівня  $H$ -компонента мали місце від  $22:35$  до  $23:20$  (рис. 9a). Квазіперіод був близьким до  $12$  хв. У цьому інтервалі часу варіації похідних досягали  $(0.3 \dots 0.4)$  нТл/хв. Від  $00:30$  до  $02:15$  18 грудня 2018 р. спостерігалися квазіперіодичні варіації рівня  $H$ -компонента  $T \approx 8$  хв і амплітудою близькою до  $1$  нТл. При цьому рівень флуктуацій похідних досягав  $0.4$  нТл/хв.



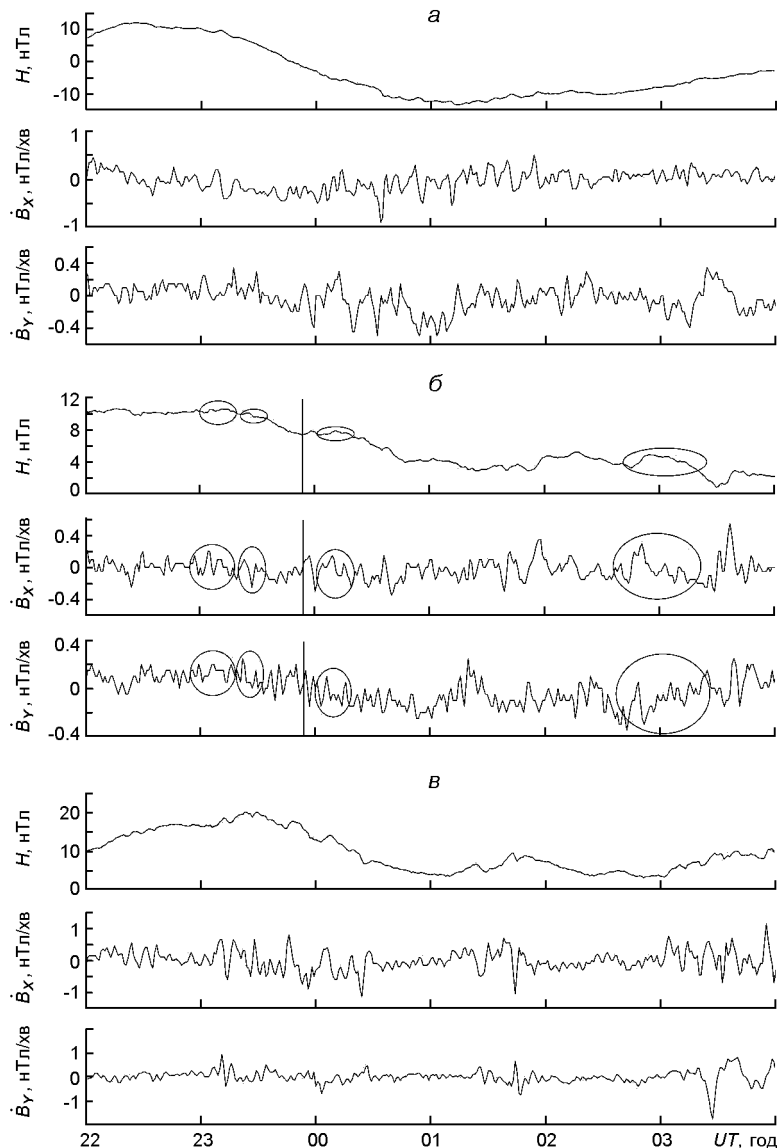


Рис. 8. Те ж, що й на рис. 1, для станції Kakioka. Відстань  $r = 3.311$  Мм

18 грудня 2018 р. в інтервалах часу 22:57...23:15 і 23:20...23:30 відзначались збурення рівня  $H$ -компонента (рис. 9б). Перше збурення було квазіперіодичним з  $T = 5$  хв і амплітудою близькою до 0.2...0.3 нТл, друге — аперіодичним з фазами стиснення та розрідження. При цьому амплітуда варіацій похідних становила відповідно 0.3 і 0.2 нТл/хв. 19 грудня 2018 р. приблизно від 00:01 до 00:24 спостерігалась перша група збурень. Друга група мала місце в інтервалі часу 03:14...03:44. При цьому рівень флуктуацій похідних лежав у межах 0.15 і (0.2...0.4) нТл/хв відповідно.

19 грудня 2018 р. значні (до (2...3) нТл) варіації рівня  $H$ -компонента відзначались з 23:10 до 24:00 (рис. 9в). Флуктуації рівня

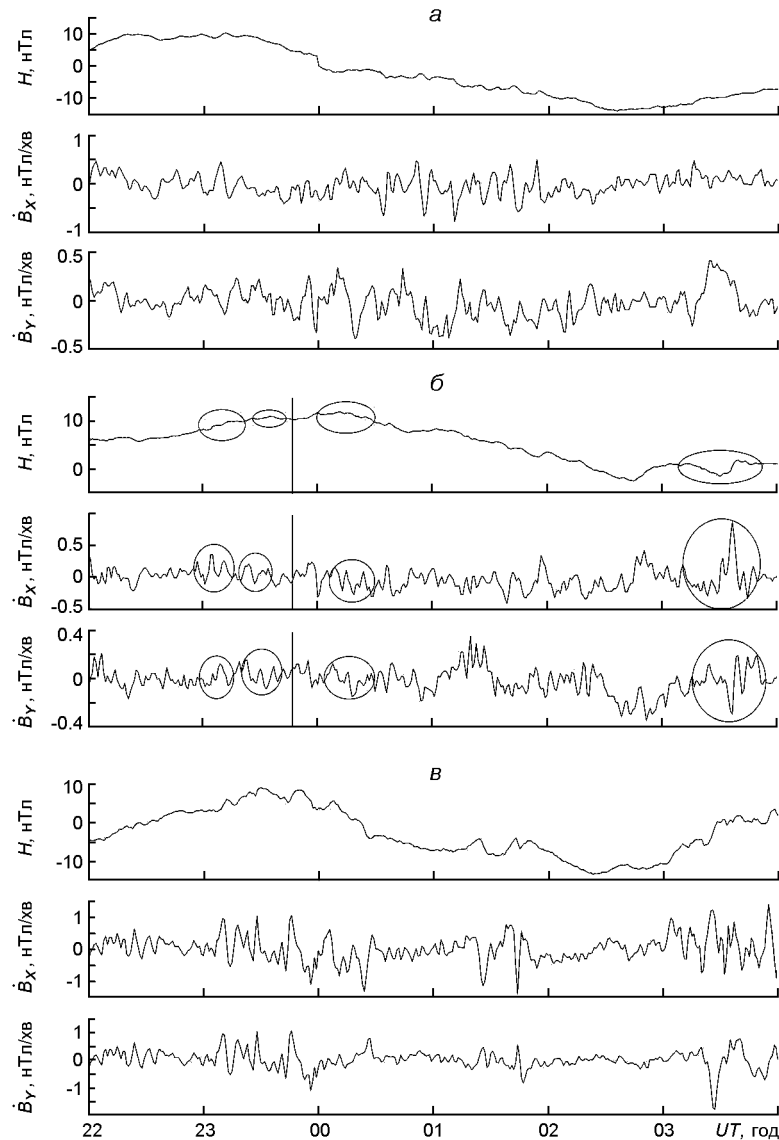


Рис. 9. Те ж, що й на рис. 1, для станції Cheongyang. Відстань  $r = 4.049$  Мм

похідних становили  $(0.3...0.4)$  нТл/хв. 20 грудня 2018 р. помітні (до  $(1.5...2)$  нТл) варіації рівня  $H$ -компонента мали місце в інтервалах часу  $01:15...01:50$  і  $03:10...04:00$ . При цьому флуктуації рівня похідних досягали  $(0.7...0.8)$  нТл/хв.

**Станція Капоуа.** 17 грудня 2018 р. від 22:30 до 23:20 (рис. 10а) варіації рівня  $H$ -компонента не перевищували 1 нТл. Рівень похідних при цьому флуктував в межах  $(0.2...0.3)$  нТл/хв. Після 00:00 18 грудня 2018 р. варіації рівня  $H$ -компонента також не перевищували 1 нТл, а рівня похідних — 0.3 нТл/хв.

У день падіння космічного тіла у варіаціях рівня  $H$ -компонента спостерігалось дві групи збурень: від 22:57 до 23:20 і від 23:28 до 23:36

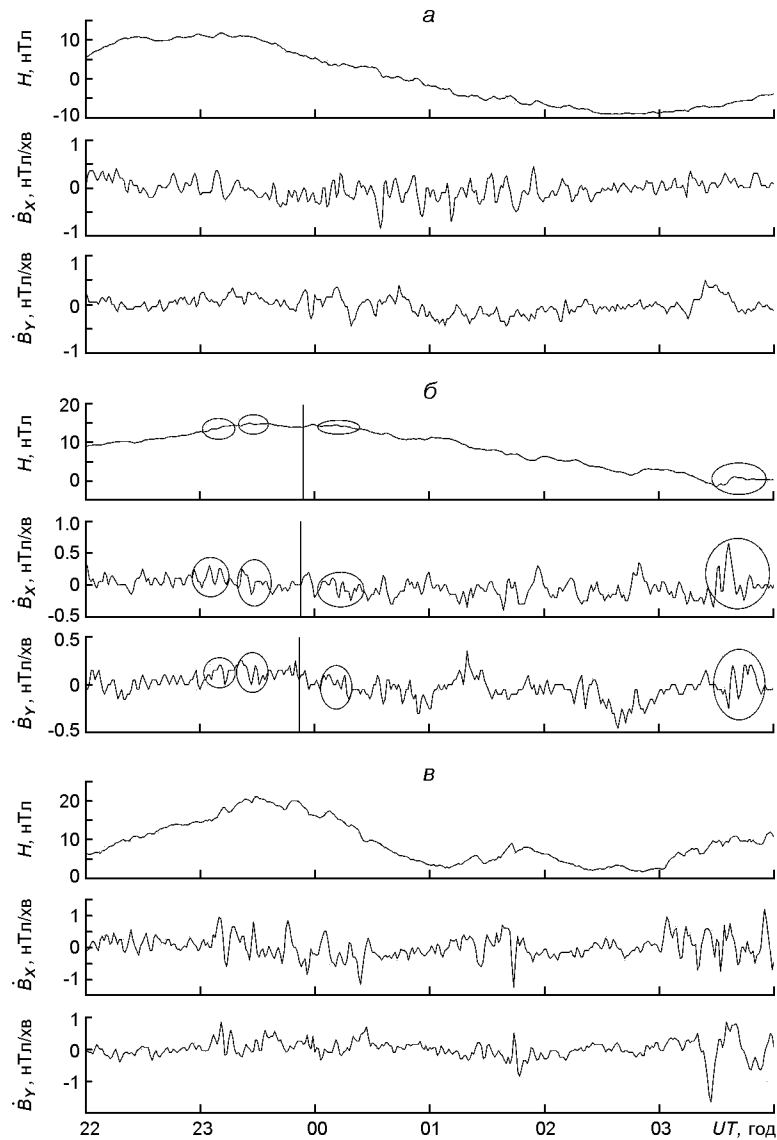


Рис. 10. Те ж, що й на рис. 1, для станції Капоуа. Відстань  $r = 4.247$  Мм

(рис. 10б). При цьому варіації рівня похідних досягали  $0.2$  нТл/хв. Наступні дві групи збурень відзначались у інтервалах часу  $00:01...00:26$  і  $03:20...03:50$  19 грудня 2018 р. Їм відповідали варіації рівня похідних  $0.15$  і  $(0.2...0.3)$  нТл/хв.

19 грудня 2018 р. найбільші варіації рівня  $H$ -компонента мали місце від  $23:10$  до  $24:00$  (рис. 10в). При цьому рівень флуктуацій похідних досягав  $(0.5...0.6)$  нТл/хв. Значними були варіації рівня  $H$ -компонента в інтервалі часу  $00:00...04:00$  20 грудня 2018 р., а флуктуації рівня похідних не перевищували  $0.5$  нТл/хв.

## РЕЗУЛЬТАТИ ТЕОРЕТИЧНИХ РОЗРАХУНКІВ

Розглянемо окремо магнітні ефекти, які спостерігалися при підльоті космічного тіла та після його вибуху.

**Магнітний ефект магнітосфери.** Перший магнітний ефект почав спостерігатися за 51 хв до вибуху метеороїда та тривав 18...20 хв. За ним відбулося двополярне (фази стиснення та розрідження) збурення геомагнітного поля, яке мало час упередження близько 28 хв і тривалість 8...17 хв. Механізм першого ефекту запропоновано в роботі автора [32]. Суть його така.

При швидкості метеороїда 32 км/с часу упередження 51 хв відповідає відстань  $R = 98$  Мм і параметр Мак-Ілвейна  $L = 15$ . Якщо час упередження дорівнює 28 хв, то  $R = 54$  Мм і  $L = 8.4$ .

Вторгнення метеороїда, який має великий запас кінетичної енергії ( $\approx 173$  кт ТНТ), призвело до вибухоподібного впливу на магнітосферу Землі. При русі космічного тіла з кінетичною енергією  $E$  вздовж його траєкторії відбувається витіснення геомагнітного поля. Форма області збурення геомагнітного поля в кожен момент часу близька до сферичної з радіусом  $R_m$ , оскільки він є більшим за характерний масштаб неоднорідності магнітного поля  $L_m = LR_E / 3$  (тут  $R_E$  — радіус Землі). Зауважимо, що при кінетичній енергії метеороїда порядку 1 кт ТНТ форма є близькою до циліндричної [33]. У цьому випадку радіус циліндра  $R_m \ll L_m$ .

Якщо припустити, що в розширенні області збурення геомагнітного поля брала участь вся енергія тіла, то радіус цієї області дається співвідношенням

$$R_m = \sqrt[3]{\frac{m}{m} \frac{1}{4} \frac{3E}{p_m}}, \quad (1)$$

де  $m = 2$  — показник адиабати при радіальному розширенні магнітного поля;  $p_m$  — магнітний тиск. Для  $p_m$  справедливе таке співвідношення:

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

де  $B$  — незбурені значення індукції геомагнітного поля на заданій відстані від поверхні Землі або при заданому значенні параметра Мак-Ілвейна,  $\mu_0$  — магнітна стала. Оскільки  $B \propto L^{-3}$ , то  $R_m \propto L^2$ .

Внаслідок пружності магнітних силових ліній виникають їхні коливання з періодом

$$T_A = \frac{2l_m}{A},$$

$$A = \frac{B}{\sqrt{\mu_0 N m_i}} = \frac{B}{\sqrt{\mu_0 i}},$$

де  $l_m$  — довжина силової лінії,  $v_A$  — альвенівська швидкість,  $N$ ,  $m_i$  — концентрація та маса іонів,  $\rho_i = Nm_i$ .

Характерний час радіального розширення магнітного поля для сферичної моделі дається виразом

$$t_{exp} = \frac{R_m^5}{E}^{1/2}$$

При  $L = 15$  маємо  $\rho_i = 3.4 \cdot 10^{-20}$  кг/м<sup>3</sup>,  $R_m = 16.9$  Мм і  $t_{exp} = 8.1$  с.

Модельні значення концентрації та щільності іонів, індукцію геомагнітного поля для широти  $50^\circ$ , запозичені з книги [20], наведено в табл. 3. У цій же таблиці наведено розрахункові значення  $v_A$ ,  $p_m$ ,  $R_m$  і  $t_{exp}$  при різних  $L$ . При оцінці маси іона враховувався іонний склад. При  $L = 4$  маса іона  $m_i = 1.7 \cdot 10^{-27}$  кг. Як показали розрахунки, швидкість  $v_A$  змінювалась від 3.6 до 1.06 Мм/с, тиск  $p_m$  — від 49 мкПа до 19 нПа, а розмір  $R_m$  — у межах 2.6...16.9 Мм при  $L = 6...15$  відповідно. Важливо, що  $R_m = 16.9$  Мм в 2.6 раза перевищує  $R_E$ . Це означає, що збурення геомагнітного поля простягається приблизно до  $L = 12$ .

Часу упередження 28 хв відповідає відстань  $R = 54$  Мм. При цьому  $L = 8.4$ ,  $B = 1.28$  мкТл,  $p_m = 0.66$  мкПа, а  $R_m = 5.1$  Мм.

Вторгнення метеороїда до магнітосфери подібне до вибуху, під час якого спостерігаються дві фази.

Радіальне розширення магнітних силових ліній означає витіснення магнітного поля з порожнини діаметром  $2R_m$ . Цей процес еквівалентний появі магнітного диполя відповідного розміру з індукцією магнітного поля  $B$ . Слід мати на увазі, що при  $L > 4$  магнітне поле вже сильно відрізняється від дипольного.

Тривалість магнітного імпульсу оцінюється з формули

$$T = \frac{2R_m}{v_A}$$

**Таблиця 3. Залежності модельних параметрів магнітосфери та розрахованих параметрів області збурення геомагнітного поля від параметра Мак-Ілвейна**

$L$	$B$ , мкТл	$N$ , $10^8$ м <sup>-3</sup>	$\rho_i$ , $10^{-19}$ кг/м <sup>3</sup>	$v_A$ , Мм/с	$p_m$ , мкПа	$R_m$ , Мм	$t_{exp}$ , с
6	3.5	4.5	7.7	3.6	4.9	2.6	0.36
7	2.2	3	5.1	2.8	1.9	3.6	0.65
8	1.48	2	3.4	2.3	0.88	4.6	0.98
9	1.04	1.5	2.6	1.9	0.43	5.9	1.6
10	0.76	1.0	1.7	1.7	0.23	7.2	2.1
11	0.55	0.9	1.5	1.3	0.12	9	3.5
12	0.44	0.7	1.2	1.1	0.077	10.4	4.5
13	0.35	0.5	0.85	1.08	0.049	12	5.4
14	0.27	0.3	0.51	1.07	0.029	14.4	6.6
15	0.22	0.2	0.34	1.06	0.019	16.9	8.1

При  $L = 8.4$  маємо  $R_m = 5.3$  Мм. Тоді  $T = 5.3$  хв. При  $L = 15$  радіус  $R_m = 16.9$  Мм, а  $T = 17.6$  хв. Це значення є близьким до значення, яке спостерігалось ( $T = 19.1 \pm 1.1$  хв) (див. табл. 1).

**Магнітний ефект іоносфери.** Політ і вибух метеороїда супроводжувався генерацією ударної хвилі у повітрі. Хвиля почала ефективно генеруватися на висотах  $z_m = 70$  км, а на висоті вибуху  $z_e = 25.6$  км процес генерації закінчився. Тоді тривалість ударної хвилі

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

де  $s = 0.3$  км/с — швидкість звуку. З (2) маємо, що  $t = 150$  с. Після проходження фази стиснення тривалістю  $t$  має місце фаза розрідження приблизно такої ж тривалості. Тоді загальна тривалість збурення у повітрі становить  $T_0 = 2t$ . За рахунок дисперсії тривалість збурення збільшується. Згідно з даними [48]

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

де  $R_e$  — поперечний розмір (радіус) циліндричної ударної хвилі;  $z = z_m - z_e$ . Для нього справедливе співвідношення

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

де  $E_L = E/L_e$  — погонна щільність енергії метеороїда;  $L_e = H/2$  — ефективна протяжність області вибуху;  $H = 7.5$  км — висота однорідної атмосфери;  $p(z_e) = 3.3$  кПа — тиск атмосфери на висоті вибуху. З виразу (4) випливає, що  $R_e = 4.3$  км.

Результати розрахунку  $T$  за співвідношенням (3) наведено в табл. 4. Видно, що на висотах динамо-області іоносфери, яка відповідала за генерацію спостережуваного магнітного ефекту,  $T = 10...$

**Таблиця 4. Висотна залежність надлишкового тиску в ударній хвилі та її тривалість**

$z$ , км	$p/p_0$	$p$ , Па	$p_0$ , Па	$T$ , хв
30	0.39	700	1800	5
40	0.34	160	480	6.7
50	0.48	62	130	7.6
60	0.62	20.1	33.5	8.3
70	1.1	9.7	8.8	8.8
80	1.8	4.1	2.3	9.3
90	3.1	1.9	0.6	9.7
100	5.5	0.9	0.16	10

12 хв. Ці значення близькі до значень  $T = 15...20$  хв, отриманих зі спостережень геомагнітного ефекту (див. табл. 1).

Розглянемо далі висотну залежність надлишкового тиску  $p$  в ударній хвилі. Зі співвідношення для відносного надлишкового тиску  $p/p_0$ , наведеного в роботі [48], при  $z \gg R_e$  отримаємо

$$\frac{p}{p_0} = 0.3 \frac{R_e^{3/4}}{z} \exp \frac{z}{2H}.$$

Результати розрахунку  $p/p_0$  і  $p$  наведено в табл. 4. Видно, що значення  $p/p_0$  при віддаленні від джерела спочатку зменшуються, а далі внаслідок зменшення тиску  $p$  з висотою в атмосфері вони збільшуються та досягають на висотах динамо-області іоносфери значень 0.6...1.6. Реально ці значення істотно менші, оскільки не враховувались нелінійні ефекти, які призводили до загасання ударної хвилі при  $p/p_0 > 0.1...0.2$ . З урахуванням нелінійного загасання максимальне значення  $p/p_0$  не перевищує 0.2...0.3 при  $z = 80...150$  км.

Ударна хвиля на висотах іоносфери призводила до збурення концентрації електронів  $N$ . При цьому грубо можна вважати, що  $N/N_0 \approx p/p_0$ . Тоді на висотах динамо-області  $N/N_0 = 0.2...0.3$ . Збурення концентрації електронів супроводжується збуренням щільності іоносферного струму в динамо-області іоносфери [24]:

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

$$j_0 = 0.5eN_0w,$$

де  $j_0$  — незбурене значення щільності іоносферного струму,  $e$  — заряд електрона,  $w$  — швидкість вітру. Поява імпульсу струму призводить до збурення індукції магнітного поля. Згідно з роботою [24]

$$B = 0.5 \mu_0 j z_j, \quad (6)$$

де  $\mu_0$  — магнітна стала,  $z_j$  — товщина динамо-області. З виразу (6) з урахуванням (5) впливає оцінка магнітного ефекту:

$$B = \frac{1}{4} \mu_0 j_0 z_j \frac{N}{N_0} = \frac{1}{4} \mu_0 e N_0 w H. \quad (7)$$

Покладаючи в (7)  $j_0 = 1$  мкА/м<sup>2</sup> (ранковий час),  $z_j = H = 20$  км,  $N/N_0 = 0.2...0.3$ ,  $N_0 = 10^{11}$  м<sup>-3</sup> отримаємо, що  $B = 1.3...1.9$  нТл. Таке значення  $B$  мало місце поблизу місця вибуху метеороїда.

## ОБГОВОРЕННЯ

Порівняння магнітних варіацій у день падіння Камчатського метеороїда і в сусідні дні показує, що в інтервалі часу 23:00...24:00 18 грудня 2018 р. і 00:00...04:00 19 грудня 2018 р. поблизу моменту часу падіння

ці варіації відрізнялись від варіацій в сусідні дні. Підкреслимо, що квазіперіодичне збурення, яке спостерігалось від 01:35 до 02:20 19 грудня 2018 р. на всіх станціях одночасно, не пов'язане з метеороїдом.

Помітимо, що магнітне поле в контрольні дні було збуреним. Тому сусідня доба не повністю підходить на роль контрольної.

Загальною для всіх станцій була наявність двох груп збурень  $H$ -компонента магнітного поля та похідних  $dB_x / dt$  і  $dB_y / dt$  в інтервалах часу 22:57...23:15 і 23:20...23:30 18 грудня 2018 р. Перше з них було квазіперіодичним з  $T \approx 5$  хв, а друге — аперіодичним. Вочевидь, вони відрізнялись своєю природою.

Розглянемо детальніше магнітний ефект магнітосфери. Вперше магнітний ефект магнітосфери великого метеороїда виявлено в роботах [32, 33]. У цих же роботах зроблено першу спробу пояснення фізики магнітосферного ефекту генерацією магнітного диполя. Механізм його генерації не тривіальний. Ясно, що далеко не вся кінетична енергія метеороїда переходить в енергію збурення магнітного поля, тобто мають місце незворотні її втрати. Не можна виключати, що генерація магнітних збурень швидким прольотом космічного тіла не призводить до їхніх незворотних втрат. Іншими словами, виникають не активні втрати, а так звані реактивні втрати. Подібні процеси, як відомо, спостерігаються в електричних і радіотехнічних колах. Після прольоту космічного тіла пружність магнітних силових ліній призводить до відновлення вихідного стану без помітних енергетичних втрат. Коливання силових ліній забезпечує спостереження квазіперіодичних варіацій геомагнітного поля.

Можливі й інші механізми магнітосферного ефекту метеороїда. Назвемо два з них.

За рахунок великої різниці теплових швидкостей електронів і іонів відбувається електризація космічного тіла та його сліду. Рух зарядженого тіла еквівалентний протіканню електричного струму, який здатен згенерувати великомасштабне електромагнітне збурення.

Космічне тіло при підльоті до магнітосфери можуть оточувати заряджені частинки пилу, які при взаємодії з магнітним полем викликають його великомасштабне збурення.

Отримаємо оцінку зверху енергії магнітного поля в сфері радіусом  $R_m$ . Цей радіус обчислимо у припущенні, що вся кінетична енергія метеороїда викликає збурення магнітного поля. Для об'ємної щільності магнітної енергії маємо вираз

$$E_m = \frac{B^2}{2\mu_0} V_m$$

При  $L = 15$  значення  $B = 2.2 \cdot 10^{-7}$  Тл, а  $B = 0.3 \dots 1$  нТл. Тоді  $E_m = (5.25 \dots 17.5) \cdot 10^{-11}$  Дж/м<sup>3</sup>. Об'єм  $V_m$  сфери при  $R_m = 16.9$  Мм становить  $2 \cdot 10^{22}$  м<sup>3</sup>. Тоді енергія магнітного поля

$$E_m = \frac{B^2}{2\mu_0} V_m = (1.05 \dots 3.5) \cdot 10^{12} \text{ Дж.}$$



При цьому  $E_m / E = (3.2...9.3) 10^{-3}$ , тобто навіть при  $R_m = 16.9$  Мм на збурення магнітного поля витрачається енергія метеороїда, не більша за 1 %.

Відомо, що швидкість і кінетична енергія Челябінського метеороїда становили 18.5 км/с і 440 кт ТНТ. Швидкість і кінетична енергія Липецького метеороїда були істотно меншими — 14.4 км/с і 2.8 кт ТНТ. З цієї причини ефект магнітного диполя (ефект витіснення магнітного поля) виникав за менших значень геомагнітного поля, тобто при більших значеннях  $L = 8...9$ . Для Челябінського метеороїда він спостерігався при  $L = 5...7$ . Більшим значенням  $L$  і меншим швидкостям відповідає більший час випередження

$$t = \frac{R_E(L-1)}{v}.$$

Сказане є справедливим при вторгненні космічного тіла в один і той же час доби, коли стан магнітосфери приблизно однаковий. Насправді ця умова не виконувалась. Падіння Челябінського метеороїда за місцевим часом спостерігалось рано вранці, Липецького метеороїда — вночі, а Камчатського метеороїда — приблизно опівдні. Стан магнітосфери в цих трьох подіях сильно відрізнявся, відрізнявся також час випередження магнітосферного ефекта у магнітосфері.

Першу групу збурень при підльоті до магнітосфери пояснимо коливанням магнітних силових ліній при вторгненні метеороїда. Покажемо це. Якщо грубо вважати, що навіть при  $L = 12...15$  довжина  $l_m$  магнітної силової лінії описується співвідношенням з роботи [20], то  $l_m$  можна подати у вигляді

$$l_m = R_E L (\sqrt{(L-1)(4L-3)} / L - 3^{1/2} \arctg \sqrt{3(L-1)/L}).$$

При  $R_E = 6400$  км і  $L = 12...15$  маємо  $l_m = 190...239$  Мм. При цьому  $v =$

$$1.10...1.06 \text{ Мм/с (див. табл. 3), а період коливань } T_A = 2l_m / v =$$

$$5.8...7.5 \text{ хв. Спостереження дали близький результат (близько 6 хв).}$$

Як уже відмічалось, витіснення магнітного поля еквівалентне появі магнітного диполя. Останній є джерелом магнітного збурення. Цим і пояснюється виникнення другої групи збурень.

Оцінена тривалість магнітного імпульсу дорівнювала 5.3 хв, що також узгоджується з результатами спостережень (5...10 хв, див. табл. 1).

Таким чином, відповідність результатів моделювання магнітосферного ефекта Камчатського метеороїда результатам спостережень свідчить про адекватність запропонованої моделі магнітосферного ефекта великих метеороїдів. У роботі [33] встановлено, що магнітний ефект магнітосфери впевнено спостерігається при енергії метеороїда порядку  $10^{13}$  Дж (2.8 кт ТНТ). В даному випадку енергія становила  $7.24 \cdot 10^{14}$  Дж (173 кт ТНТ), тобто у 62 рази більше.

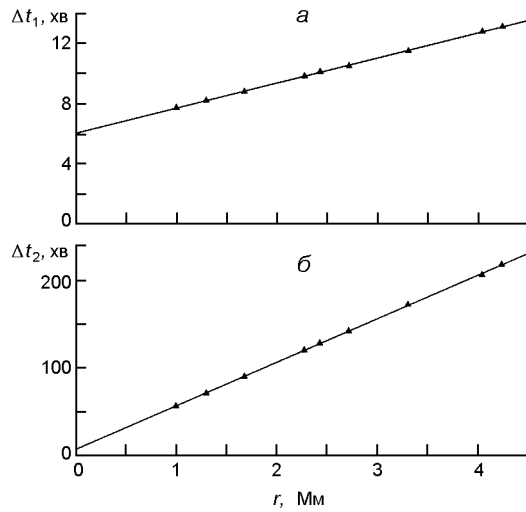


Рис. 11. Залежність часу запізнення збурень від відстані між джерелом збурення та місцем реєстрації: *a* — першої групи збурень; *б* — другої групи збурень (апроксимації (8) і (9) відповідно)

Розглянемо далі магнітний ефект іоносфери. Механізм магнітного ефекту, який спостерігався після вибуху метеороїда, такий. Ударна хвиля від вибуху, поширюючись угору, викликає дипольні варіації тиску (фаза стиснення та фаза розрідження) на висотах іоносфери. На висотах динамо-області ( $z = 90 \dots 150$  км) виникають варіації концентрації електронів, а значить і щільності іоносферного струму. Варіації останньої призводять до генерації варіацій магнітного поля, що і спостерігалось на всіх обсерваторіях.

Для доведення того факту, що магнітний ефект викликано Камчатським метеороїдом, були побудовані залежності часу запізнення магнітного ефекту від відстані між місцем вибуху метеороїда й обсерваторією (рис. 11). Видно, що значення  $t$  збільшуються при збільшенні  $r$ . Ця залежність описується рівняннями регресії

$$t = 1.666r + 6.020, R^2 = 0.9870, \sigma = 0.029 \text{ хв}, \quad (8)$$

$$t = 49.617r + 6.809, R^2 = 0.9998, \sigma = 0.728 \text{ хв}, \quad (9)$$

де  $t$  вимірюється у хвилинах, а  $r$  — у мегаметрах,  $R^2$  — коефіцієнт достовірності,  $\sigma$  — середнє квадратичне відхилення. Із (8) і (9) випливає, що при  $r = 0$  значення часу  $t_0 = 6.0 \dots 6.8$  хв. Інтервал часу  $t_0$  складається з часу  $t_{01}$  поширення ударної хвилі до динамо-області іоносфери та часу  $t_{02}$  становлення збурень  $N$ . Дійсно, за середніх значень  $z = z_H - z_e = 125$  км ( $z_H = 150$  км — висота, де холлівська провідність іонів є близькою до максимального значення) та  $s = 0.33$  км/с маємо  $t_{01} = 6.3$  хв. Час  $t_{02} = (2N)^{-1}$ , де  $2 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$  — коефіцієнт рекомбінації електронів із молекулярними іонами. У денний час  $N = 2 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ , а  $t_{02} = t_N = 0.4$  хв. При цьому  $t_0 = t_{01} + t_{02} = 6.7$  хв. Це значення досить близьке до  $t_0 = 6.0 \dots 6.8$  хв, отриманого з даних спостережень.

Зі співвідношень (8) і (9) випливає, що середня швидкість поширення магнітного збурення

$$v_m = \frac{d}{dt} r^1$$

становила для швидших збурень 10 км/с, а для повільніших — 336 м/с.

Поглинання ударної хвилі на висотах іоносфери призводить до генерації атмосферних гравітаційних хвиль і повільного магнітного звуку. Ці хвилі, поширюючись майже в горизонтальному напрямку на відстані 100...1000 км, призводять до спостережуваного магнітного ефекту. Із рівняння регресії (8) випливає, що швидкість поширення магнітних збурень становила 10 км/с. Такою була швидкість магнітного звуку, згенерованого ударною хвилею метеороїда. Зауважимо, що таку саму швидкість мають повільні магнітогідродинамічні хвилі, детально вивчені у книзі [23].

Перенесення збурень зі швидкостями 3...10 км/с ми неодноразово спостерігали після стартів ракет [24, 46].

З (9) випливає, що  $v_m = 336$  м/с. Швидкість 336 м/с та період  $T$

15 хв відповідають атмосферним гравітаційним хвилям [6].

Залежність часу запізнення магнітного ефекту від відстані однозначно свідчить про те, що ефект був викликаний метеороїдом.

Відповідність основних параметрів моделі магнітного ефекту (часу запізнення, тривалості й амплітуди) параметрам, визначеним із даних спостережень, свідчить про адекватність запропонованої моделі.

## ГОЛОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

З використанням даних десяти магнітних обсерваторій проаналізовано варіації геомагнітного поля, які передували вибуху Камчатського метеороїда, а також після вибуху, та встановлено таке.

1. За 51 і 28 хв до вибуху метеороїда мали місце дві групи збурень геомагнітного поля з амплітудою, близькою до 0.1...1 нТл, з середньою тривалістю близько 20 і 10 хв відповідно. Представлено модель цього магнітного ефекту. Квазіперіодичні коливання магнітного поля у першій групі могли бути спричинені коливанням магнітних силових ліній під дією космічного тіла, яке вторгається до магнітосфери. В основі моделі другої групи лежить витіснення геомагнітного поля з області прольоту метеороїда у магнітосфері ( $L = 8...9$ ) та генерація магнітного ефекту еквівалентним магнітним диполем. Результати модельних оцінок основних параметрів магнітного збурення в цілому відповідають результатам спостережень.

2. Після вибуху Камчатського метеороїда з часами запізнення, які змінювались у межах 7.7...13.1 хв і 56...218 хв під час збільшення відстані між місцем вибуху й обсерваторією від 1.001 до 4.247 Мм, вини-

кало збурення геомагнітного поля тривалістю 21...40 хв і амплітудою від 0.4...0.5 до 0.2 нТл. Представлено модель магнітного ефекту. В основі цієї моделі лежить збурення концентрації електронів і щільності іоносферного струму на висотах динамо-області ударною хвилею, яка виникла в результаті прольоту та вибуху метеороїда. Вказаним часам запізнення відповідали удавані швидкості близько 10 км/с і 336 м/с. Перенесення збурень від області, розміщеної під вибухом, відбувалося за допомогою МГД- і атмосферних гравітаційних хвиль. Відповідність результатів моделювання результатам спостережень свідчить про адекватність моделі та метеороїдну природу магнітного ефекту.

3. Підтверджено, що метеороїди з кінетичною енергією порядку  $10^{14}$  Дж здатні викликати магнітний ефект у магнітосфері та іоносфері, який можна зареєструвати наземними магнітометрами.

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». Роботу також частково підтримано в рамках держбюджетних НДР, заданих МОН України (номери держреєстрації 0119U002538, 0121U109881 і 0121U109882).

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 аэрономия*. 2002. 42, № 6. С. 854—856.
4. Гольдин В. Д. Об интерпретации некоторых геофизических явлений, сопровождавших падение Тунгусского метеорита. В кн.: *Космическое вещество и Земля*. Новосибирск: Наука. Сиб. отд., 1986. С. 44—62.
5. Гордеев Е. И., Куличков С. Н., Фирстов П. П., Попов О. Е., Чунчузов И. П., Будилов Д. И., Чебров Д. В. Инфразвуковые волны и оценка энергии взрыва Берингоморского метеороида 19 декабря 2018 г. *Доклады Академии наук*. 2019. 489, № 4. С. 409—413. DOI: 10.31857/S0869-56524894409-413
6. Госсард Э. Э., Хук У. Х. *Волны в атмосфере*. М.: Мир, 1978. 532 с.
7. Золотов А. В. *Проблема Тунгусской катастрофы 1908 г.* Минск: Наука и техника, 1969. 202 с.
8. Иванов К. Г. Геомагнитные явления, наблюдавшиеся на Иркутской магнитной обсерватории вслед за взрывом Тунгусского метеорита. *Метеоритика*. 1961. 21. С. 46—48.
9. Иванов К. Г. О причине последующих изменений поля в геомагнитном эффекте Тунгусского метеорита. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1961. 1, № 4. С. 616—618.
10. Иванов К. Г. Геомагнитные эффекты взрывов в нижней атмосфере. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1962. 2, № 1. С. 153—160.
11. Иванов К. Г. Геомагнитный эффект Тунгусского падения. *Метеоритика*. 1964. 24. С. 141—151.

12. Иванов К. Г. Еще раз о проблеме моделирования геомагнитного эффекта Тунгусского падения. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2002. 42, № 6. С. 857—858.
13. Идлис Г. М., Карягина З. В. О кометной природе Тунгусского метеорита. *Метеоритика*. 1961. 21. С. 32—43.
14. Калашников А. Г. О наблюдении магнитного эффекта метеоров индукционным методом. *ДАН СССР*. 1949. 66, № 3. С. 373—376.
15. Калашников А. Г. Магнитный эффект метеоров. *Изв. АН СССР, сер. Геофиз.* 1952. 6. С. 7—20.
16. *Катастрофические воздействия космических тел*. Под ред. В. В. Адушкина и И. В. Немчинова. М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. 310 с.
17. Ковалев А. Т., Немчинов И. В., Шувалов В. В. Ионосферные и магнитосферные возмущения в результате падения небольших комет и астероидов. *Астрон. вестник*. 2006. 40, № 1. С. 65—76.
18. Ковалевский А. Ф. К вопросу о механизме геомагнитных эффектов крупных взрывов. *Труды Сибирского физико-технического института при Томском университете*. 1962. 41. С. 87—91.
19. Ковалевский А. Ф. Магнитный эффект взрыва Тунгусского метеорита. В кн.: *Проблема Тунгусского метеорита*. Томск: ТГУ, 1963. С. 187—194.
20. Молчанов О. А. *Низкочастотные волны и индуцированные излучения в околоземной плазме*. М.: Наука, 1985. 224 с.
21. Обашев Г. О. О геомагнитном эффекте Тунгусского метеорита. *Метеоритика*. 1961. 21. С. 49—52.
22. Скрипко К. А. Гигантский взрыв метеора над Беринговым морем. *Жизнь Земли*. 2019. Т. 41, № 2.
23. Сорокин В. М., Федорович Г. В. *Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме*. М.: Энергоиздат, 1982. 136 с.
24. Черногор Л. Ф. *Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет: Монография*. Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2009. 386 с.
25. Черногор Л. Ф. Колебания геомагнитного поля, вызванные пролетом Витимского болида 24 сентября 2002 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2011. 51, № 1. С. 119—132.
26. Черногор Л. Ф. *Физика и экология катастроф*. Х.: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2012. 556 с.
27. Черногор Л. Ф. Крупномасштабные возмущения магнитного поля Земли, сопровождавшие падение Челябинского метеороида. *Радиофизика и электроника*. 2013. 4 (18), № 3. С. 47—54.
28. 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.
29. Черногор Л. Ф. Плазменные, электромагнитные и акустические эффекты метеорита «Челябинск». *Инженерная физика*. 2013. № 8. С. 23—40.
30. Черногор Л. Ф. Эффекты Челябинского метеороида в геомагнитном поле. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2014. 54, № 5. С. 658—669.
31. Черногор Л. Ф. Магнито-ионосферные эффекты метеороидного плюма. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2018. 58, № 1. С. 125—132.
32. Черногор Л. Ф. Эффекты у магнитосфере при подлете Челябинского метеороида. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2018. 58, № 2. С. 267—280.
33. Черногор Л. Ф. Эффекты Липецкого метеороида в геомагнитном поле. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2020. 60, № 3. С. 375—392.

34. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П., Guo Q., Розуменко В. Т., Zheng Y. Ионосферные эффекты Камчатского метеороида: результаты многотрассового наклонного зондирования. *Материалы 13-й международной школы-конференции «Проблемы геокосмоса»* (24–27 марта 2021 г., Санкт-Петербург, Россия). С. 380—388.
35. Черногор Л. Ф. Эффекты Камчатского метеороида в системе литосфера — атмосфера — ионосфера — магнитосфера. *Материалы 13-ой международной школы-конференции «Проблемы геокосмоса»* (24—27 марта 2021 г., Санкт-Петербург, Россия). С. 400—410.
36. Черногор Л. Ф. Геомагнітні варіації, викликані прольотом і вибухом Липецького метеороїда: результати вимірювань. *Кінематика і фізика небес. тіл.* 2020. 36, № 2. С. 58—81.
37. Черногор Л. Ф., Лящук О. І., Шевелев М. Б. Параметри інфразвукового сигналу, згенерованого Камчатським метеороїдом. *Кінематика і фізика небес. тіл.* 2020. 36, № 5. С. 31—54.
38. Borovička J., Setvák M., Roesli H., Kerkmann J. K. Satellite observation of the dust trail of a major bolide event over the Bering Sea on December 18, 2018. *Astron. and Astrophys.* 2020. 644, Article no. A58. DOI: 10.1051/0004-6361/202039393
39. Brown P. G., Assink J. D., Astiz L., Blaauw R., Boslough M. B., Borovička J., Brachet N., Brown D., Campbell-Brown M., Ceranna L., Cooke W., De Groot-Hedlin C., Drob D. P., Edwards W., Evers L. G., Garces M., Gill J., Hedlin M., Kingery A., Laske G., Le Pichon A., Mialle P., Moser D. E., Saffer A., Silber E., Smets P., Spalding R. E., Spurn imath P., Tagliaferri E., Uren D., Weryk R. J., Whitaker R. Krzeminski Z. 500-kilotone airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors. *Nature.* 2013. 503, is. 7475. P. 238—241. DOI: 10.1038/nature12741
40. 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. P. 294—296. DOI: 10.1038/nature01238
41. *Center for Near Earth Object Studies.* URL: <https://cneos.jpl.nasa.gov/fireballs/> Дата доступа: 11.07.2021.
42. Chernogor L. F. Physical effects of the Kamchatka meteoroid. *Astronomy and Space Physics in the Kyiv University. Book of Abstracts.* May 27—29, 2020. Kyiv, Ukraine. P. 70—71.
43. Chernogor L. F. Lithosphere — atmosphere — ionosphere — magnetosphere effects of the Kamchatka meteoroid. *13th International Conference and School «Problems of Geocosmos».* March 24—27, 2021. St. Petersburg, St. Petersburg University. Section STP. Solar-Terrestrial physics. STP004. <https://geo.phys.spbu.ru/geocosmos/2020/data/data/htmls/STP/STP004.html>
44. 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, 2013. 542 p.
45. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Rozumenko V., Zheng Yu. Ionospheric effects of the Kamchatka Meteoroid. *13th International Conference and School «Problems of Geocosmos».* March 24—27, 2021. St. Petersburg, St. Petersburg University. Section STP. Solar-Terrestrial physics. STP002. <https://geo.phys.spbu.ru/geocosmos/2020/data/data/htmls/STP/STP002.html>
46. Chernogor L. F., Liashchuk O. I., Shevelev M. B. Infrasonic effects of the Kamchatka meteoroid. *Astron. and Space Phys. in the Kyiv Univ. Book of Abstracts.* May 27—29, 2020. Kyiv, Ukraine. — P. 71—72.

47. Gavrilov B. G., Pilipenko V. A., Poklad Y. V., Ryakhovsky I. A. Geomagnetic effect of the Bering Sea meteoroid. *Russian J. Earth Sci.* 2020. 20, № 6. ES6009.  
DOI: 10.2205/2020ES000748
48. *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies* / A. Le Pichon, E. Blanc, A. Hauchecorne (Eds). Dordrecht Heidelberg London New York: Springer, 2019. XXVIII + 1167 p.
49. Luo Y., Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Rozumenko V. T., Shulga S. N., Zheng Y. Ionospheric effects of the Kamchatka meteoroid: Results from multipath oblique sounding. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 2020. 207. Paper No. 105336.  
DOI: 10.1016/j.jastp.2020.105336
50. Luo Y., Yao Y., Shan L. Analysis of ionospheric disturbances caused by the 2018 Bering Sea meteor explosion based on GPS observations. *Sensors.* 2020. 20, № 11. Paper no. 3201. DOI: 10.3390/s20113201
51. Pilger C., Gaebler P., Hupe P., Ott T., Drolshagen E. Global monitoring and characterization of infrasound signatures by large fireballs. *Atmosphere.* 2020. 11, № 1. Paper No. 83. DOI:10.3390/atmos11010083
52. Popova O. P. Chelyabinsk Meteorite. *Oxford research encyclopedia of planetary science.* 2021. DOI: 10.1093/acrefore/9780190647926.013.22
53. Popova O. P., Jenniskens P., Emel'yanenko V., Kartashova A., Biryukov E., Khaibrakhmanov S., Shuvalov V., Rybnov Y., Dudorov A., Grokhovsky V. I., Badyukov D. D., Yin Q.-Z., Gural P. S., Albers J., Granvik M., Evers L. G., Kuiper J., Kharlamov V., Solovyov A., Rusakov Yu. S., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A. V., Larionov M. Yu., Glazachev D., Mayer A. E., Gisler G., Gladkovsky S. V., Wimpenny J., Sanborn M. E., Yamakawa A., Verosub K. L., Rowland D. J., Roeske S., Botto N. W., Friedrich J. M., Zolensky M. E., Le L., Ross D., Ziegler K., Nakamura T., Ahn I., Lee J. I., Zhou Q., Li X.-H., Li Q.-L., Liu Yu, Tang G.-Q., Hiroi T., Sears D., Weinstein I. A., Vokhmintsev A. S., Ishchenko A. V., Schmitt-Kopplin P., Hertkorn N., Nagao K., Haba M. K., Komatsu M., Mikouchi T. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization. *Science.* 2013. 342. P. 1069—1073.
54. Popova O. P., Jenniskens P., Emel'yanenko V., Kartashova A., Biryukov E., Khaibrakhmanov S., Shuvalov V., Rybnov Y., Dudorov A., Grokhovsky V. I., Badyukov D. D., Yin Q.-Z., Gural P. S., Albers J., Granvik M., Evers L. G., Kuiper J., Kharlamov V., Solovyov A., Rusakov Yu. S., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A. V., Larionov M. Yu., Glazachev D., Mayer A. E., Gisler G., Gladkovsky S. V., Wimpenny J., Sanborn M. E., Yamakawa A., Verosub K. L., Rowland D. J., Roeske S., Botto N. W., Friedrich J. M., Zolensky M. E., Le L., Ross D., Ziegler K., Nakamura T., Ahn I., Lee J. I., Zhou Q., Li X.-H., Li Q.-L., Liu Yu, Tang G.-Q., Hiroi T., Sears D., Weinstein I. A., Vokhmintsev A. S., Ishchenko A. V., Schmitt-Kopplin P., Hertkorn N., Nagao K., Haba M. K., Komatsu M., Mikouchi T. Supplementary material for Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization. *Science.* 2013. 342. 146 p.
55. Redd N. T. Fireball over the Bering Sea. *Eos.* 2019. 100. DOI: 10.1029/2019EO119503
56. *Space Weather Prediction Center National Oceanic and Atmospheric Administration.*  
URL: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/ace2/>. Дата обращения: 18.02.2019.

## REFERENCES

1. Astapovich I. S. (1958). *Meteoritic Phenomena in the Earth's Atmosphere.* (Moscow: Fizmatgiz) [in Russian].

2. Bronshten V. A. (2000) *Tungusskii meteorit: istoriya issledovaniya (Tunguska Meteorite: A History of Research)*, Moscow: A.D. Sel'yanov. 322 p.
3. Bronshten V. A. (2002) Magnetic Effect of the Tungus Meteorite. *Geomagnetism and Aeronomy*. 42 (6), 816—818.
4. Gol'din V. D. (1986) Ob interpretacii nekotorykh geofizicheskikh yavlenij, soprovozhdavshikh padenie Tungusskogo meteorita (On the interpretation of some geophysical phenomena accompanying the fall of the Tunguska meteorite), [in book *Kosmicheskoe veshchestvo i Zemlya (Cosmic Matter and the Earth)*], Novosibirsk: Nauka, 44—62 [in Russian].
5. Gordeev E. I., Kulichkov S. N., Firstov P. P., Popov O. E., Chunchuzov I. P., Budilov D. I., Chebrov D. V. (2018). Infrasonic waves and assessment of the explosion energy of the Bering Sea Meteoroid on December 19, 2018. *Dokl. Earth Sci.* 489, part 2, 1436—1439. DOI: 10.1134/S1028334X19120043
6. Gossard E. E., Hooke Y. X. (1975) *Waves in the atmosphere: Atmospheric infrasound and gravity waves, their generation and propagation (Developments in Atmospheric Science)*. Elsevier Scientific Pub. Co., 472.
7. Zolotov A. V. (1969) *The problem of 1908 Tunguska catastrophe*. (Minsk, Belarus: Nauka i Tekhnika) [in Russian].
8. Ivanov K. G. (1961) Geomagnetic effects that were observed at the Irkutsk Magnetographic Observatory after the explosion of the Tunguska meteorite. *Meteoritika*. 21, 46—48 [in Russian].
9. 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.
10. Ivanov K. G. (1962) Geomagnetic effects of explosions in the lower atmosphere. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2 (1), 153—160 [in Russian].
11. Ivanov K. G. (1964) Geomagnetic effect of Tunguska event. *Meteoritika*. (24), 141—151 [in Russian].
12. Ivanov K. G. (2002). Revisiting the problem of simulation of the geomagnetic effect induced by the Tunguska impact. *Geomagnetism and Aeronomy*, 42 (6), 857—858 [in Russian].
13. Iddis G. M., Karyagina Z. V. (1961) On the cometary origin of the Tunguska meteorite. *Meteoritika*. (21), 32—43 [in Russian].
14. 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].
15. Kalashnikov A. G. (1952) Magnetic effect of meteors. *Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Geophys.* 6, 7—20 [in Russian].
16. Catastrophic Events Caused by Cosmic Objects. Eds V. Adushkin, I. Nemchinov. Comprehensive overview of the threat posed by the impact of an asteroid or comet on Earth, 2008. XI + 357. DOI: 10.1007/978-1-4020-6452-4
17. Kovalev A. T., Nemchinov I. V. Shuvalov V. V. (2006) Ionospheric and magnetospheric disturbances caused by impacts of small comets and asteroids. *Solar System Res.* 40 (1), 57—67.
18. Kovalevskii A. F. (1962) K voprosu o mekhanizme geomagnitnykh effektov krupnykh vzryvov (Revisiting the problem of geomagnetic effects of large explosions), *Tr. Sibir. Fiz.-Tekh. Inst. Tomsk. Univ.*, 41, 87—91 (in Russian).
19. Kovalevskii A. F. (1963) Magnitnyj effekt vzryva Tungusskogo meteorita (Magnetic effect of the Tunguska meteorite explosion), (in book *The Problem of Tunguska Meteorite*), Tomsk: Tomsk. Gos. Univ. 187—194 (in Russian).
20. Molchanov O. A. (1985) *Nizkochastotnye volny i induktsirovannye izlucheniya v okolozemnoi plazme (Low-frequency waves and induced radiation in the near-Earth plasma)*, Moscow: Nauka, 224 p. (in Russian).



21. Obashev G. O. (1961). On the geomagnetic effect of the Tunguska meteorite. *Meteoritika*. (21), 49—52 [in Russian].
22. Skripko K. A. (2019). Bering Sea Meteor Huge Explosion. *Earth's Life*. 41 (2)
23. Sorokin V. M., Fedorovich G. V. (1982). *Physics of slow MGD waves in the ionospheric plasma*. (Moscow, USSR: Energoizdat Publ.) [in Russian].
24. Chernogor L. F. (2009). *Radiophysical and geomagnetic effects of rocket engine burn: Monograph* (Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv Nat. Univ. Publ.) [in Russian].
25. 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. DOI: 10.1134/S0016793211010038
26. Chernogor L. F. (2012). *Physics and ecology of the catastrophes*. (Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ.) [in Russian].
27. 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].
28. 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].
29. Chernogor L. F. (2013). Plasma, electromagnetic and acoustic effects of meteorite Chelyabinsk. *Inzhenernaja fizika*. 8, 23—40 [in Russian].
30. Chernogor L. F. (2014) Geomagnetic field effects of the Chelyabinsk meteoroid. *Geomagnetism and Aeronomy*. 54 (5), 613—624. DOI:10.1134/S001679321405003X
31. Chernogor L. F. (2018) Magnetic and ionospheric effects of a meteoroid plume. *Geomagnetism and Aeronomy*. 58 (1), 119—126. DOI: 10.1134/S0016793218010048
32. Chernogor L. F. (2018). Magnetospheric effects during the approach of the Chelyabinsk meteoroid. *Geomagnetism and Aeronomy*. 58 (2), 252—265. DOI: 10.1134/S0016793218020044
33. Chernogor L. F. (2020). Effects of the Lipetsk meteoroid in the geomagnetic field. *Geomagnetism and Aeronomy*. 60 (3), 355—372. DOI: 10.1134/S0016793220030032
34. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Rozumenko V. T., Zheng Y. (2021). Ionospheric effects of the Kamchatka meteoroid: results of multiple-path oblique incidence. *13th International School-Conference «Problems of Geocosmos»*. Abstracts. (March 24—27, 2021, St. Petersburg, Russia), 380—388 [In Russian].
35. Chernogor L. F. (2021). Kamchatka meteoroid effects in the lithosphere — atmosphere — ionosphere — magnetosphere system. *13th International School-Conference «Problems of Geocosmos»*. Abstracts. (March 24—27, 2021, St. Petersburg, Russia), 400—410 [In Russian].
36. Chernogor L. F. (2020). Geomagnetic variations caused by the Lipetsk meteoroid's passage and explosion: Measurement results. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*. 36 (2), 79—93. DOI: 10.3103/S0884591320020038
37. Chernogor L. F., Liashchuk O. I., Shevelev M. B. (2020). Parameters of the infrasonic signal generated by the Kamchatka meteoroid. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*. 36 (5), 222—237. DOI: 10.3103/S0884591320050037
38. Borovička J., Setvák M., Roesli H., Kerkmann J. K. (2020). Satellite observation of the dust trail of a major bolide event over the Bering Sea on December 18, 2018. *Astron. and Astrophys.* 644, A58. DOI: 10.1051/0004-6361/202039393

39. Brown P. G., Assink J. D., Astiz L., Blaauw R., Boslough M. B., Borovička J., Brachet N., Brown D., Campbell-Brown M., Ceranna L., Cooke W., De Groot-Hedlin C., Drob D. P., Edwards W., Evers L. G., Garces M., Gill J., Hedlin M., Kingery A., Laske G., Le Pichon A., Mialle P., Moser D. E., Saffer A., Silber E., Smets P., Spalding R. E., Spurnimath P., Tagliaferri E., Uren D., Weryk R. J., Whitaker R., Krzeminski Z. (2013). 500-kilotone airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors. *Nature*. 503 (7475), 238—241.  
DOI: 10.1038/nature12741
40. 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, 294—296.  
DOI: 10.1038/nature01238
41. *Center for near Earth object studies*. URL: <https://cneos.jpl.nasa.gov/fireballs/> Access Date: 12.03.2019.
42. Chernogor L. F. (2021). Litosphere — atmosphere — ionosphere — magnetosphere effects of the Kamchatka meteoroid. *13th International Conference and School «Problems of Geocosmos»*. March 24—27, 2021. St. Petersburg, St. Petersburg University. Section STP. Solar-Terrestrial physics, STP004. <https://geo.phys.spbu.ru/geocosmos/2020/data/data/htmls/STP/STP004.html>
43. Chernogor L. F. (2020). Physical effects of the Kamchatka meteoroid. *Astron. and Space Phys. in the Kyiv Univ. Book of Abstracts*. May 27—29, 2020. Kyiv, Ukraine, 70—71.
44. Chernogor L. F., Blaunstein N. (2013) *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.
45. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Rozumenko V., Zheng Yu. (2021). Ionospheric effects of the Kamchatka Meteoroid. *13th International Conference and School «Problems of Geocosmos»*. March 24—27, 2021. St. Petersburg, St. Petersburg University. Section STP. Solar-Terrestrial physics, STP002. <https://geo.phys.spbu.ru/geocosmos/2020/data/data/htmls/STP/STP002.html>
46. Chernogor L. F., Liashchuk O. I., Shevelev M. B. (2020). Infrasonic effects of the Kamchatka meteoroid. *Astron. and Space Phys. in the Kyiv Univ. Book of Abstracts*. May 27—29, 2020. Kyiv, Ukraine, 71—72.
47. Gavrilov B. G., Pilipenko V. A., Poklad Y. V., Ryakhovsky I. A. (2020). Geomagnetic effect of the Bering Sea meteoroid. *Russian J. Earth Sci.* 20 (6), ES6009.  
DOI: 10.2205/2020ES000748
48. *Infrasound monitoring for atmospheric studies*. Eds A. Le Pichon, E. Blanc, A. Hauchecorne. Dordrecht Heidelberg London New York: Springer, 2019. XXVIII + 1167. DOI: 10.1007/978-3-319-75140-5
49. Luo Y., Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Rozumenko V. T., Shulga S. N., Zheng Y. (2020). Ionospheric effects of the Kamchatka meteoroid: Results from multipath oblique sounding. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 207, 105336.  
DOI: 10.1016/j.jastp.2020.105336
50. Luo Y., Yao Y., Shan L. (2020). Analysis of ionospheric disturbances caused by the 2018 Bering Sea meteor explosion based on GPS observations. *Sensors*. 20 (11), 3201. DOI: 10.3390/s20113201
51. Pilger C., Gaebler P., Hupe P., Ott T., Drolshagen E. (2020). Global monitoring and characterization of infrasound signatures by large fireballs. *Atmosphere*. 11 (1), 83.  
DOI: 10.3390/atmos11010083
52. Popova O. P. (2021) Chelyabinsk Meteorite. *Oxford Research Encyclopedia of Planetary Science*. DOI: 10.1093/acrefore/9780190647926.013.22

53. Popova O. P., Jenniskens P., Emel'yanenko V., Kartashova A., Biryukov E., Khaibrakhmanov S., Shuvalov V., Rybnov Y., Dudorov A., Grokhovsky V. I., Badyukov D. D., Yin Q.-Z., Gural P. S., Albers J., Granvik M., Evers L. G., Kuiper J., Kharlamov V., Solovyov A., Rusakov Yu. S., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A. V., Larionov M. Yu., Glazachev D., Mayer A. E., Gisler G., Gladkovsky S. V., Wimpenny J., Sanborn M. E., Yamakawa A., Verosub K. L., Rowland D. J., Roeske S., Botto N. W., Friedrich J. M., Zolensky M. E., Le L., Ross D., Ziegler K., Nakamura T., Ahn I., Lee J. I., Zhou Q., Li X.-H., Li Q.-L., Liu Yu, Tang G.-Q., Hiroi T., Sears D., Weinstein I. A., Vokhmintsev A. S., Ishchenko A. V., Schmitt-Kopplin P., Hertkorn N., Nagao K., Haba M. K., Komatsu M., Mikouchi T. (2013) Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization. *Science*. 342. 1069—1073.
54. Popova O. P., Jenniskens P., Emel'yanenko V., Kartashova A., Biryukov E., Khaibrakhmanov S., Shuvalov V., Rybnov Y., Dudorov A., Grokhovsky V. I., Badyukov D. D., Yin Q.-Z., Gural P. S., Albers J., Granvik M., Evers L. G., Kuiper J., Kharlamov V., Solovyov A., Rusakov Yu. S., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A. V., Larionov M. Yu., Glazachev D., Mayer A. E., Gisler G., Gladkovsky S. V., Wimpenny J., Sanborn M. E., Yamakawa A., Verosub K. L., Rowland D. J., Roeske S., Botto N. W., Friedrich J. M., Zolensky M. E., Le L., Ross D., Ziegler K., Nakamura T., Ahn I., Lee J. I., Zhou Q., Li X.-H., Li Q.-L., Liu Yu, Tang G.-Q., Hiroi T., Sears D., Weinstein I. A., Vokhmintsev A. S., Ishchenko A. V., Schmitt-Kopplin P., Hertkorn N., Nagao K., Haba M. K., Komatsu M., Mikouchi T. (2013) Supplementary material for Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization. *Science*. 342. 146.
55. Redd N. T. (2019). Fireball over the Bering Sea, *Eos*. 100. DOI: 10.1029/2019EO119503
56. *Space Weather Prediction Center National Oceanic and Atmospheric Administration* URL: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/ace2/>. Access Date: 18.02.2019.

*L. F. Chernogor*

V. N. Karazin Kharkiv National University  
Kharkiv, Ukraine

#### KAMCHATKA METEOROID EFFECTS IN GEOMAGNETIC FIELD

The data acquired at 10 geomagnetic observatories (Paratunka, Magadan, Yakutsk, and Khabarovsk (Russian Federation), Memambetsu, Kanoya, and Kakioka (Japan), Cheongyang (Republic of Korea), Shumagin, College (United States of America)) during the Kamchatka meteoroid event of 18 December 2018 and on the reference days of 17 and 19 December 2018 have been used to analyze temporal variations in the geomagnetic field components. The distance  $r$  from the observatories to the site of explosive energy release by the meteorite varied from 1.001 to 4.247 Mm. The passage of the Kamchatka meteoroid through the magnetosphere and atmosphere was accompanied by variations mainly in the  $H$  geomagnetic field component. The magnetic effect from the magnetosphere was observed to occur twice, 51 min and 28 min prior to the meteorite explosion, the amplitude of the disturbances in the geomagnetic field did not exceed 0.2...1 nT, and the durations were observed to be approximately 20 min and 10 min, respectively. Changing in sign peaks in the level of the  $H$  component were observed to lag behind the meteoroid explosion by 8 to 13 min for  $r$  from 1.004 to 4.247 Mm. The amplitude of the oscillations varied with increasing  $r$  from 0.5 to 0.1 nT, while the duration of the magnetic effect from the ionosphere varied in the 16...25-min range for all distances. The apparent speed of

propagation in this group of disturbances that were of MHD nature was observed to be about 10 km/s. In the second group of disturbances, the time lag was increasing with increasing distance within the distance range mentioned above from 56 to 218 min. The duration of the disturbance was observed to be about 30...65 min, the apparent speed to be 336 m/s, and the period to be 5...10 min. This disturbance in the magnetic field was caused by an atmospheric gravity wave propagating from the meteoroid explosion. The theoretical models for the magnetic effects observed are presented and theoretical estimates are performed. The observations are in agreement with the estimates.

**Keywords:** Kamchatka meteoroid, geomagnetic field, horizontal component, magnetic effect from the magnetosphere, magnetic effect from the ionosphere, MHD disturbance, atmospheric gravity wave

Стаття надійшла до редакції 11.08.2021

Після доопрацювання 27.08.2021

Прийнята до друку 13.10.2021