

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2023.01.003>

УДК 550.385.37:550.388

Y. Luo, L. F. Chernogor

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

Резонансний електромагнітний ефект Камчатського метеороїда

У районі Берингова моря між Камчаткою й Аляскою 18 грудня 2018 р. о 23:48:20 UT в атмосферу Землі вторгся та вибухнув на висоті близько 26 км (географічні координати: 56.9 N, 172.4 E) метеороїд, який отримав назву Камчатського. У літературі його також називають Берингоморським. Основні параметри метеороїда такі: початкова кінетична енергія — 173 кт ТНТ, інтегральна енергія світіння — $1.3 \cdot 10^{14}$ Дж, маса — 1.41 кт, швидкість — 32 км/с, розмір — 9.4 м, кут нахилу траєкторії до горизонту — 68.6°. Виявилося, що вторгнення Камчатського (Берингоморського) метеороїда супроводжувалося генерацією короточасного резонансного електромагнітного сигналу в діапазоні частот 25...35 МГц, що спостерігався поблизу місця вибуху метеороїда та у магнітоспрямованій області. Тривалість коливань становила 7 хв, амплітуда — 0.2...0.8 нТл. Метою даної роботи є аналіз результатів спостереження резонансного електромагнітного ефекту Камчатського метеороїда і обговорення механізму цього ефекту. Для аналізу резонансного ефекту в магнітному полі Землі залучалися результати спостережень на світовій мережі магнітних станцій, представлені у базі даних Intermagnet. Розрізнення по часу і амплітуді становить 1 с і 1 нТл відповідно. Відстань між місцем вибуху та станціями змінювалася від 1000 до 5000 км для станцій, дислокованих у Північній півкулі, а також від 9010 до 12425 км для станцій, розміщених у Південній півкулі. Встановлено, що єдино прийнятним є механізм, пов'язаний з ударним впливом і витісненням магнітного поля вибухоподібним вторгненням у магнітосферу космічного тіла. При цьому на генерування збурень магнітного поля витрачається лише дуже незначна частина енергії метеороїда. Можна вважати, що втрати енергії метеороїда подібні

© Y. LUO, L. F. CHORNOGOR, 2023

ISSN 0233-7665. Кінематика і фізика небес. тіл. 2023. Т. 39, № 1

3

реактивним, тобто втратам, які повертаються до системи. Після прольоту метеороїда коливання припинялись, і система поверталася у вихідний стан. Основні результати аналізу такі. Резонансні електромагнітні коливання виникали за 13 і 3 хв до вибуху Камчатського метеороїда. Тривалість кожного збурення була близькою до 7 хв. Параметри квазіперіодичного збурення нагадували параметри геомагнітних пульсацій типу Pс3, але спостерігалися в Y-, а не в X-компоненті магнітного поля. Їхній період був 33...36 с, а амплітуда — 0.4...0.9 нТл. Подібні резонансні коливання реєструвались і у магнітоспрямленій області. Запропоновано механізм генерації резонансних коливань. Він полягає в ударному впливі на магнітні силові лінії вибухоподібного вторгнення метеороїда у магнітосферу, що супроводжувалося деформацією магнітних силових ліній та їхнім коливанням на власних частотах. Розрахунковий період залежно від значення параметра Мак-Ілвейна становив 19...169 с. Зокрема, при $L = 3...3.2$ період дорівнював 28...34 с, що близько до спостережуваного періоду (30 с). На генерацію резонансних коливань витрачалося 10^4 кінетичної енергії метеороїда.

Ключові слова: Камчатський метеороїд, резонансний ефект, механізм електромагнітного ефекту, ударний вплив, коливання магнітної силових лінії.

ВСТУП

У районі Берингова моря між Камчаткою й Аляскою 18 грудня 2018 р. о 23:48:20 UT (тут і далі час всесвітній) в атмосферу Землі вторгся та вибухнув на висоті близько 26 км (географічні координати: 56.9 N, 172.4 E) метеороїд, який отримав назву Камчатського [9, 10, 12, 13, 18—22, 25]. У літературі його також називають Берингоморським [1, 2, 14, 24, 26, 31].

Основні параметри метеороїда: початкова кінетична енергія становила 173 кт ТНТ, інтегральна енергія світіння — $1.3 \cdot 10^{14}$ Дж, маса — 1.41 кт, швидкість — 32 км/с, розмір — 9.4 м, кут нахилу траєкторії до горизонту — 68.6 [9, 10, 12, 13, 16, 18—22, 25].

Незважаючи на значну енергетику метеороїда, йому присвячено лише декілька статей [1, 10—13, 19, 24, 25, 30]. Водночас про челябінське космічне тіло опубліковано понад 200 наукових праць (наприклад [3—7, 15, 28—30]).

У роботах [10, 18, 19, 22] теоретично вивчено основні фізичні ефекти, які могли супроводжувати падіння Камчатського метеороїда. У роботах [1, 12, 21, 27] вивчався інфразвуковий ефект метеороїда, а у роботах [9, 20, 25, 26] — іоносферні ефекти.

Автором виявлено та описано геомагнітний ефект метеороїда при його підльоті та після вибуху [13]. Роботу автора з колегами [24] присвячено опису резонансного електромагнітного ефекту метеороїда.

Виявилося, що вторгнення Камчатського метеороїда супроводжувалося генерацією короткочасного резонансного електромагнітного сигналу в діапазоні частот 25...35 МГц, що спостерігався поблизу місця вибуху метеороїда та у магнітоспряженій області. Тривалість коливань становила 7...8 хв, амплітуда — 0.2...0.8 нТл.

У роботі [24] наведено декілька механізмів, що викликають геомагнітний ефект, які більш придатні для опису аперіодичних збурень геомагнітного поля [17, 23]. Питання про механізм генерування резонансного електромагнітного сигналу фактично залишилося відкритим.

Метою даної роботи є аналіз результатів спостереження резонансного електромагнітного ефекту Камчатського метеороїда і обговорення механізму цього ефекту.

ЗАСОБИ ТА МЕТОДИ

Для аналізу резонансного ефекту у магнітному полі Землі залучалися результати спостережень на світовій мережі магнітних станцій, представлені у базі даних Intermagnet [<https://www.intermagnet.org/>]. Розрізнення по часу та амплітуді становить 1 с і 1 нТл відповідно. Перелік станцій наведено в табл. 1. Видно, що відстань між місцем вибуху та станцією змінювалася від 1000 до 5000 км для станцій, дислокованих у Північній півкулі, а також від 9010 до 12425 км для станцій, розміщених у Південній півкулі.

Для вимірювання рівня геомагнітного поля використовувалися ферозондові магнітometri. Крім того, на станціях Магадан (MGD) і Паратунка (PET) використовувалися більш чутливі магнітometri з частотою дискретизації 64 Гц.

Розташування станцій та місце вибуху метеороїда показано на рис. 1. Усі станції перебували на освітленій Сонцем ділянці Землі.

Таблиця 1. Відомості про магнітні станції [23]

Код IAGA	Назва			R, км
ASP	Alice Springs	-23.77°	133.88°	9640
BRW	Barrow	71.32	203.38	2160
CKI	Cocos-Keeling Islands	-12.188	96.834	10275
CMO	College	64.87	212.14	2290
CNB	Canberra	-35.32	149.36	10450
EYR	Eyrewell	-43.474	172.39	10130
FCC	Fort Churchill	58.759	265.91	5096
MCQ	Macquarie Island	-54.5	159.9	12425
MGD	Magadan	60	150	1300
MMB	Memambetsu	43.91	144.19	2440
PET	Paratunka	52.97	158.25	1000
SIT	Sitka	57.06	224.67	3100
LZH	Lanzhou	36.1	103.84	5450

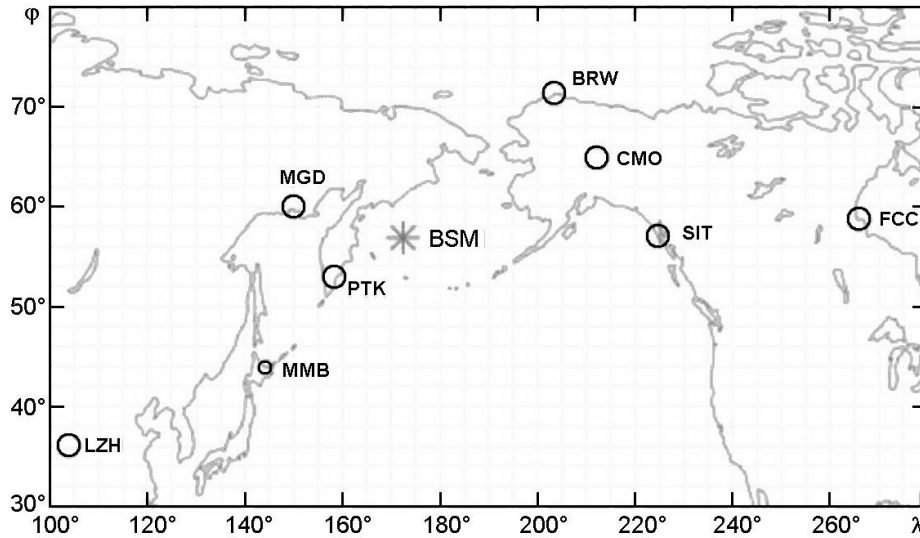


Рис. 1. Місце вибуху Камчатського метеороїда та найближчі геомагнітні станції в районі вибуху (— географічна широта, — географічна довгота) [24]

РЕЗУЛЬТАТИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Часові варіації геомагнітного поля, точніше його Y -компонента (Схід — Захід), для інтервалу часу 23:30...23:54 18 грудня 2018 г. показано на рис. 2. Посилення амплітуди до 0.4...0.9 нТл спостерігалося в інтервалі часу 23:35...23:42, тобто приблизно за t_1 13 хв до вибуху космічного тіла. Повторне збільшення амплітуди відзначалося з 23:45 до 23:52, тобто за t_2 3 хв до вибуху. При цьому тривалості процесів T_1 T_2 7 хв.

При швидкості метеороїда 32 км/с відстань до поверхні Землі дорівнює R_1 t_1 25 Мм $3.9R_E$ (L 4.9) і R_2 t_2 5.760 Мм $0.9R_E$ (L 1.9). Тут R_E 6.380 Мм — радіус Землі, L — параметр Мак-Ілвейна.

Виявлені збурення реєструвалися в Y -компоненті, тоді як традиційні пульсації Pc3 (період 10...45 с) спостерігаються в X -компоненті. Крім того, пульсації Pc3 тривають до 2...4 год, а обговорювані варіації тривали близько 7 хв.

Важливо, що ефект практично не спостерігався на станціях, віддалених від місця вибуху на відстань порядку 5 Мм і більше (станції ОТТ і LZH). Перша з них розташована західніше, а друга — східніше від Берингова моря.

Вимірювання на станціях PET і MGD за допомогою більш чутливих магнітометрів показали, що за 3.3 хв до вибуху метеороїда варіації похідних X - та Y -компонентів досягали 0.005 нТл/с, або 0.175 нТл (рис. 3). Період коливань був близьким до 36 с. Цікаво, що після ви-

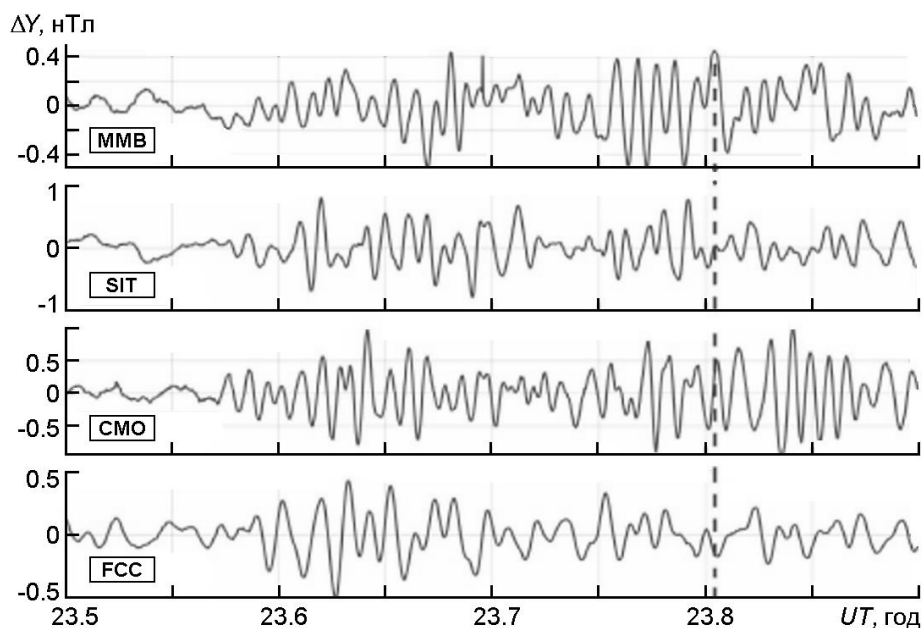


Рис. 2. Варіації Y -компонента магнітного поля за даними обсерваторій Memambetsu (MMB), Sitka (SIT), College (CMO) і Fort Churchill (FCC) 18 грудня 2018 р. Вертикальною пунктирною лінією показано момент вибуху [24]

буху із запізненням близько 27...45 с спостерігалися коливання з періодом $T = 27...36$ с. Це тривало приблизно 4 хв.

Результати порівняння часових варіацій геомагнітного поля на станціях BRW (Північна півкуля), а також CNB та EYR (Південна півкуля) наведено на рис. 4. Видно, що на станції BRW амплітуда коливань досягала 0.8...0.9 нТл, період — 30 с, а станціях Південної півкулі вона не перевищувала 0.2...0.3 нТл. Збурення з періодом близько 33 с виникло приблизно за 3.3 хв до вибуху і тривало з дещо більшим (49 с) періодом протягом приблизно 6...7 хв.

РЕЗУЛЬТАТИ ТЕОРЕТИЧНИХ РОЗРАХУНКІВ

Вибухоподібне вторгнення космічного тіла у магнітосферу призводить до витіснення магнітних силових ліній із порожнини радіусом R_m , що дається наступною формулою [7]:

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

де $m = 2$ — показник адиабати при радіальному розширенні магнітного поля, E — кінетична енергія метеороїда, $p_m = B^2 / 2 \mu_0$ — магнітний тиск, B — індукція магнітного поля, μ_0 — магнітна стала.

Процес витіснення малоінерційний, його характерний час $t_{exp} = 0.2...1.9$ с (див. далі). Це означає, що вплив космічного тіла на резо-

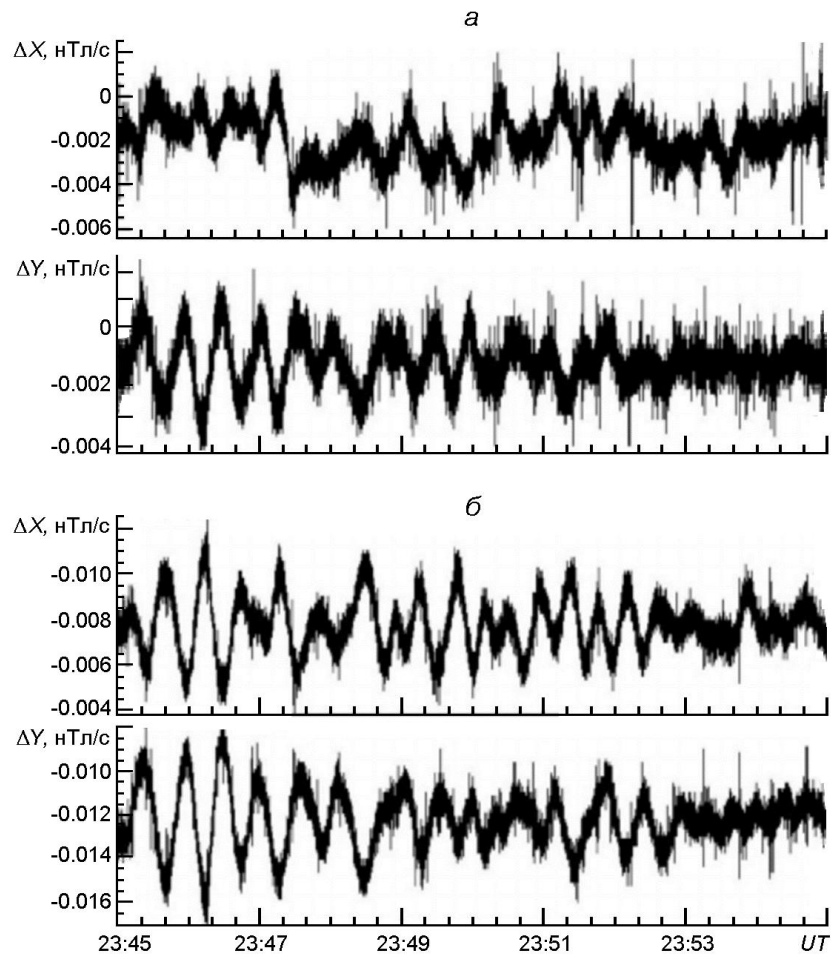


Рис. 3. Варіації похідних X - та Y -компонентів магнітного поля за даними обсерваторій: a — Паратунка (PET) та b — Магадан (MGD) 18 грудня 2018 р. [24]

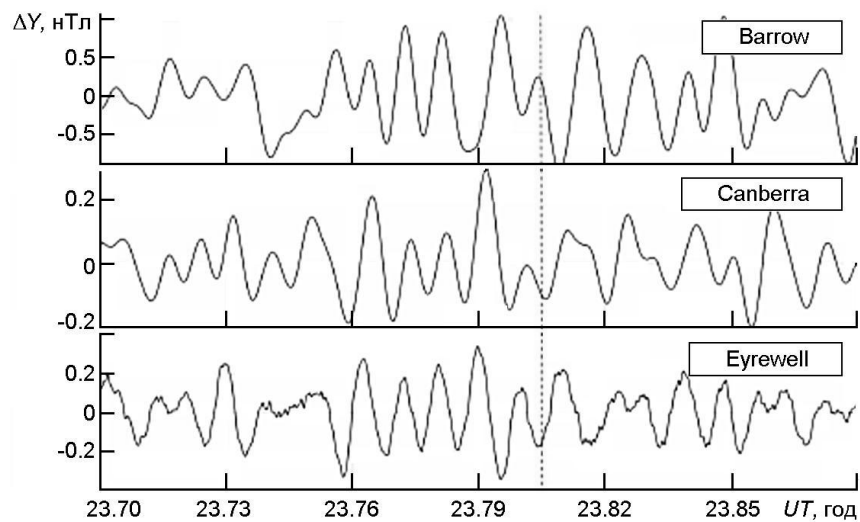


Рис. 4. Порівняння магнітних коливань станцій BRW, CNB та EYR у магнітоспряжених областях двох півкуль [24]

Таблиця 2. Залежність модельних значень магнітосфери та розрахованих параметрів області збурення геомагнітного поля від параметра Мак-Ілвейна

L	B , мкТл	N , 10^8 м^{-3}	i , 10^{-15} кг/м^3	A , Мм/с	p_m , мкПа	R_m , Мм	l_m , Мм	T_A , с	t_{exp} , с
2	40	480	1.1	1.08	640	0.51	21.5	19.9	0.23
3	27.6	44	0.34	1.34	304	0.65	37.6	28.1	0.23
4	16.4	13	0.20	1.03	108	0.92	54.3	52.3	0.43
5	6.4	8.5	0.17	0.44	16.4	1.73	74.3	169	1.91

нансну магнітосферну систему подібний до ударного. В результаті збуджуються коливання на власних частотах системи.

Результати розрахунку R_m для різних L -оболонки наведено у табл. 2.

Крім значень R_m , у табл. 2 наведено результати розрахунку альвенівської швидкості A , магнітного тиску p_m , довжини силової лінії l_m та періоду T_A власних коливань магнітної силової лінії. При цьому

$$A = \frac{B}{\sqrt{\rho_0 i}} = \frac{B}{\sqrt{\rho_0 N m_i}},$$

$$l_m = R_E \sqrt{(L-1)(4L-3)} \frac{L}{\sqrt{3}} \arctg \sqrt{\frac{3(L-1)}{L}},$$

$$T_A = \frac{l_m}{A}.$$

Як і слід було очікувати, $R_m \ll l_m$. Це виправдовує застосування формули (1).

Час розширення порожнини радіусом R_m дорівнює

$$t_{exp} = \frac{i R_m^5}{E}^{1/2}. \quad (2)$$

З (2) випливає, що $t_{exp} = 0.23 \dots 1.91$ с при $L = 2 \dots 5$.

Період коливань T_A змінюється приблизно від 20 до 169 с при збільшенні L від 2 до 5. Для точки падіння Камчатського метеороїда $L = 3$ і період коливань $T_A = 28$ с. За результатами спостережень $T_A = 30$ с.

Оцінимо характерну тривалість процесу

$$T_m = \frac{2R_m}{A}. \quad (3)$$

З (3) при $L = 2 \dots 5$ та $A = 32$ км/с маємо $T_m = 1 \dots 7.9$ с. Видно, що $T_m \ll T_1$, $T_2 = 7$ хв. Очевидно, що тривалість коливань визначалася добротністю системи

$$Q = \frac{T_{1,2}}{T_A}.$$

При $T_{1,2} = 7$ хв = 420 с і $T = 30...40$ с маємо $Q = 14...10.5$.

Метеороїд рухався приблизно з північного заходу на південний схід. Проекції швидкості у напрямках Північ — Південь та Захід — Схід становили відповідно 6.3 і –3 км/с. За час $T_1 + T_2 = 14$ хв у цих напрямках метеороїд подолав відстані $r_1 = 5.29$ Мм і $r_2 = 2.52$ Мм. Тоді площа магнітосфери, збурена космічним тілом, дорівнює $S_m = r_1 r_2$

13.33 Мм², а об'єм — $V_m = S_m R_E = 85.1$ Мм³. При максимальній амплітуді збурення геомагнітного поля, що дорівнює $B = 1$ нТл, щільність магнітної енергії

$$m = \frac{B_0 B}{0}, \quad (4)$$

де $B_0 = 3 \cdot 10^{-5}$ Тл — індукція геомагнітного поля на поверхні Землі. З (4) маємо $m = 2.4 \cdot 10^{-8}$ Дж/м³, а енергія $E_m = 2 \cdot 10^{11}$ Дж. Важливо, що $E_m \ll E$, тобто енергія збуреного магнітного поля становить $3 \cdot 10^{-4}$ від кінетичної енергії тіла.

ОБГОВОРЕННЯ

Автори роботи [24] описали декілька механізмів резонансних коливань, викликаних рухом метеороїда. Перший із них пов'язаний зі збільшенням провідності на висотах Е-області іоносфери. Цей механізм запропоновано у роботі [17]. Він не може бути задовільним, оскільки описує лише незначне аперіодичне збурення магнітного поля.

Суть другого механізму полягає в утворенні альвенівських «крил» при русі провідного тіла у магнітоактивній плазмі [23]. Автори роботи [24] визнають цей механізм неефективним.

У роботі [24] вважається неможливим механізм, запропонований автором даної роботи [7—9, 11]. Як альтернативу вони залучають тригерний механізм, проте жодних оцінок не наводять і його необхідність не обґрунтовують.

Автор знаходить єдиний прийнятний механізм, пов'язаний з ударним впливом і витісненням магнітного поля вибухоподібним вторгненням у магнітосферу космічного тіла. При цьому на генерацію збурень магнітного поля витрачається лише дуже незначна частина енергії метеороїда. Можна вважати, що втрати енергії метеороїда подібні реактивним, тобто втратам, які повертаються до системи. Після прольоту метеороїда коливання припинялись, і система поверталася у вихідний стан.

ГОЛОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

1. Вторгнення космічного тіла у внутрішню магнітосферу супроводжувалося генерацією резонансних електромагнітних коливань, виявлених за даними наземних магнітометрів.

2. Коливання виникали за 13 і 3 хв до вибуху Камчатського метеороїда. Тривалість кожного збурення була близькою до 7 хв.

3. Параметри квазіперіодичного збурення нагадували параметри геомагнітних пульсацій типу Pс3, але спостерігалися в Y -, а не в X -компоненті магнітного поля. Їхній період дорівнював 33...36 с, а амплітуда — 0.4...0.9 нТл.

4. Подібні резонансні коливання реєструвались і у магнітоспряженій області.

5. Запропоновано механізм генерації резонансних коливань. Він полягає в ударному впливі на магнітні силові лінії вибухоподібного вторгнення метеороїда у магнітосферу, що супроводжувалося деформацією магнітних силових ліній та їхнім коливанням на власних частотах. Розрахунковий період залежно від значення параметра Мак-Ілвейна становив 19...169 с. Зокрема, при $L = 3...3.2$ значення періоду становило 28...34 с, тобто близько до спостережуваного значення (30 с).

6. На генерування резонансних коливань витрачалося приблизно 10^{-4} кінетичної енергії метеороїда.

1. Гордеев Е. И., Куличков С. Н., Фирстов П. П., Попов О. Е., Чунчuzов И. П., Будилов Д. И., Чебров Д. В. Инфразвуковые волны и оценка энергии взрыва Беринговоморского метеороида 19 декабря 2018 г. *Доклады Академии наук*. 2019. 489, № 4. С. 409—413. DOI: 10.31857/S0869-56524894409-413
2. Скрипко К. А. Гигантский взрыв метеора над Беринговым морем. *Жизнь Земли*. 2019. 41, № 2.
3. Черногор Л. Ф. Крупномасштабные возмущения магнитного поля Земли, сопровождавшие падение Челябинского метеороида. *Радиофизика и электроника*. 2013. 4 (18), № 3. С. 47—54.
4. 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.
5. Черногор Л. Ф. Плазменные, электромагнитные и акустические эффекты метеорита «Челябинск». *Инженерная физика*. 2013. № 8. С. 23—40.
6. Черногор Л. Ф. Эффекты Челябинского метеороида в геомагнитном поле. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2014. 54, № 5. С. 658—669.
7. Черногор Л. Ф. Эффекты в магнитосфере при подлете Челябинского метеороида. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2018. 58, № 2. С. 267—280.
8. Черногор Л. Ф. Эффекты Липецкого метеороида в геомагнитном поле. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2020. 60, № 3. С. 375—392.
9. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П., Guo Q., Розуменко В. Т., Zheng Y. Ионосферные эффекты Камчатского метеороида: результаты многотрассового наклонного зондирования. *Материалы 13-ой международной школы-конференции «Про-*

- блемы геокосмоса» (24—27 марта 2021 г., Санкт-Петербург, Россия). С. 380—388.
10. 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.
 11. Черногор Л. Ф. Геомагнітні варіації, викликані прольотом і вибухом Липецького метеороїда: результати вимірювань. *Кінематика і фізика небес. тіл.* 2020. 36, № 2. С. 58—81.
 12. 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.
 13. Черногор Л. Ф. Ефекти Камчатського метеороїда в геомагнітному полі. *Кінематика і фізика небес. тіл.* 2022. 38, № 1. С. 37—72.
DOI: 10.15407/kfnt2022.01.037
 14. 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, no. A58. DOI: 10.1051/0004-6361/202039393
 15. 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., Spurný 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
 16. *Center for Near Earth Object Studies* URL: <https://cneos.jpl.nasa.gov/fireballs/> Last accessed: 11.07.2021.
 17. Chapman R., Ashour A. A. Meteor geomagnetic effects. *Smithsonian Contribut. Astrophys.* 1965. 8. 7. P. 181—197.
 18. 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.
 19. 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>
 20. 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>
 21. Chernogor L. F., Liashchuk O. I., Shevelev M. B. Infrasonic effects of the Kamchatka meteoroid. *Astronomy and Space Physics in the Kyiv University. Book of Abstracts.* May 27—29, 2020. Kyiv, Ukraine. P. 71—72.
 22. Chernogor L. F. Kamchatka Meteoroid effects in the lithosphere—atmosphere—ionosphere—magnetosphere system. In: Kosterov A., Bobrov N., Gordeev E., Kulakov E., Lyskova E., Mironova I. (eds). *Problems of Geocosmos-2020. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences.* Springer, Cham., 2022. P. 365—377.
DOI: 10.1007/978-3-030-91467-7_27
 23. Dobrowolny M., Veltri P. Structure of Alfvén wings associated with a conductor moving across a magnetoplasma. *Astron. and Astrophys.* 1986. 167. P. 179—185.

24. 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
25. 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-Ter. Phys.* 2020. 207. 105336. DOI: 10.1016/j.jastp.2020.105336
26. 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. 3201. DOI: 10.3390/s20113201
27. Pilger C., Gaebler P., Hupe P., Ott T., Drolshagen E. Global monitoring and characterization of infrasound signatures by large fireballs. *Atmosphere.* 2020. 11, № 1. 83. DOI: 10.3390/atmos11010083
28. Popova O. P. Chelyabinsk Meteorite. *Oxford Research Encyclopedia of Planetary Science.* 2021. DOI: 10.1093/acrefore/9780190647926.013.22
29. 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.
30. 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.
31. Redd N. T. Fireball over the Bering Sea. *Eos.* 2019. 100. DOI: 10.1029/2019EO119503

REFERENCES

1. 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 Sciences.* 489, part 2, 1436—1439. DOI: 10.1134/S1028334X19120043
2. Skripko K. A. (2019). Bering Sea meteor huge explosion. *Earth's Life.* 41 (2).
3. 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].
4. 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].
5. Chernogor L. F. (2013). Plasma, electromagnetic and acoustic effects of meteorite Chelyabinsk. *Inzhenernaja fizika*. 8, 23—40 [in Russian].
 6. Chernogor L. F. (2014) Geomagnetic field effects of the Chelyabinsk meteoroid. *Geomagnetism and Aeronomy*. 54 (5), 613—624. DOI:10.1134/S001679321405003X
 7. Chernogor L. F. (2018). Magnetospheric Effects during the approach of the Chelyabinsk Meteoroid. *Geomagnetism and Aeronomy*. 58 (2), 252—265. DOI: 10.1134/S0016793218020044
 8. Chernogor L. F. (2020). Effects of the Lipetsk meteoroid in the geomagnetic field. *Geomagnetism and Aeronomy*. 60 (3), 355—372. DOI: 10.1134/S0016793220030032
 9. 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].
 10. 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].
 11. 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
 12. 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
 13. Chernogor L. F. (2022). Kamchatka meteoroid effects in the geomagnetic field. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*. 38 (1), 25—48. DOI: 10.3103/S0884591322010032
 14. 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
 15. 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., Spurný 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). P. 238—241. DOI: 10.1038/nature12741
 16. *Center for Near Earth Object Studies* URL: <https://cneos.jpl.nasa.gov/fireballs/> (Last accessed: 11.07.2021).
 17. Chapman R., Ashour A. A. (1965). Meteor geomagnetic effects. *Smithsonian Contributions to Astrophys.* 8 (7). P. 181—197.
 18. Chernogor L. F. (2020). Physical effects of the Kamchatka meteoroid. *Astronomy and Space Physics in the Kyiv University. Book of Abstracts*. May 27—29, 2020. Kyiv, Ukraine. 70—71.
 19. Chernogor L. F. (2021). 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>
 20. 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. STP004.

- lems 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>*
21. Chernogor L. F., Liashchuk O. I., Shevelev M. B. (2020). Infrasonic effects of the Kamchatka meteoroid. *Astronomy and Space Physics in the Kyiv University. Book of Abstracts*. May 27—29, 2020. Kyiv, Ukraine. P. 71—72.
 22. Chernogor L. F. (2022). Kamchatka meteoroid effects in the lithosphere — atmosphere — ionosphere — magnetosphere system. In: Kosterov A., Bobrov N., Gordeev E., Kulakov E., Lyskova E., Mironova I. (eds). *Problems of Geocosmos-2020. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*. Springer, Cham. P. 365—377. DOI: 10.1007/978-3-030-91467-7_27
 23. Dobrowolny M., Veltri P. (1986). Structure of Alfvén wings associated with a conductor moving across a magnetoplasma. *Astron. and Astrophys.* 167. P. 179—185.
 24. 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), no. ES6009. DOI: 10.2205/2020ES000748
 25. 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
 26. 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
 27. 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
 28. Popova O. P. (2021). Chelyabinsk meteorite. *Oxford Research Encyclopedia of Planetary Science*. DOI: 10.1093/acrefore/9780190647926.013.22
 29. 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.
 30. 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.
 31. Redd N. T. (2019). Fireball over the Bering Sea. *Eos*. 100. DOI: 10.1029/2019EO119503

RESONANCE ELECTROMAGNETIC EFFECT
OF THE KAMCHATKA METEOROID

A large meteoroid entered the terrestrial atmosphere and exploded at 26-km altitude (geographic coordinates 56.9 N, 172.4 E) between the Kamchatka Peninsula and Alaska over the Bering Sea at 23:48:20 UT on December 18, 2018. The meteoroid has been termed the Kamchatka or Bering Sea meteoroid. Its basic parameters are as follows: calculated total impact energy 173 kt of TNT, total optical radiated energy $1.3 \cdot 10^{14}$ J, mass 1.4 kt, speed 32 km/s, size 9.4 m, and the trajectory directed at an angle of 68.6° with respect to the horizon. The Kamchatka (Bering Sea) meteoroid entering the atmosphere turned down to be accompanied by the generation of a transient resonance electromagnetic signal in the 25...35 mHz band observable in the vicinity of the meteoroid explosion and in the magnetically conjugate region. The 0.2...0.8-nT amplitude oscillations were observed to occur over a 7 min interval. The purpose of present work is to analyze the observations of the resonance electromagnetic effect from the Kamchatka meteoroid and to discuss a mechanism for this effect. The analysis of the resonance effect in the Earth's magnetic field is based on the database data with 1-s temporal resolution and 1-nT amplitude resolution collected by the Intermagnet magnetometer network of magnetic observatories. The distance range between the site of the meteoroid explosion and the magnetic observatories varied from 1,000 to 5,000 km in the northern hemisphere and from 9,010 to 12,425 km in the southern hemisphere. The only acceptable mechanism has been established to be associated with the magnetic field displacement in the magnetosphere by the explosive impact of the celestial body, whereas only negligibly small part of the meteoroid energy is spent on the generation of magnetic field perturbations. The meteoroid energy losses are similar to the losses in the reactive elements in the radio frequency circuits, i.e., they return into the system. After the meteoroid passes, the oscillations cease, and the system returns into the initial state. The main results are summarized as follows. The resonance electromagnetic oscillations arose 13 and 3 min prior to the Kamchatka meteoroid explosion. The duration of each perturbation was observed to be close to 7 min. The parameters of the quasi-periodic perturbations were similar to the parameters of magnetic Pc3 pulsations; however, they were observed to occur in the X component of the magnetic field, but not in the Y component of the magnetic field. Their periods were observed to be in the 33...36-s range, and the amplitudes in the 0.4...0.9 nT range. Similar resonance oscillations were recorded and in the magnetically conjugate region. A mechanism for generating the resonance oscillations has been put forward. The essence of the mechanism is that the meteoroid explosively impacts the magnetosphere and deforms the magnetic field lines that begin to oscillate at their eigenfrequencies. Depending on the McIlwain L -shell, the period has been calculated to be 19...169 s. For instance, setting $L = 3...3.2$ yields 28...34 s, which is close to the observed period of 30 s. The generation of the resonance oscillations consumes $\sim 10^{-4}$ part of the meteoroid kinetic energy.

Keywords: Kamchatka meteoroid, resonance effect, electromagnetic effect mechanism, explosive impact, magnetic field line oscillation.

Стаття надійшла до редакції 21.02.2022

Після доопрацювання 21.02.2022

Прийнята до друку 12.10.2022