

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2023.05.003>

УДК 550.3

Л. Ф. Черногор, М. Ю. Голуб

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

Бухтоподібні варіації геомагнітного поля, що супроводжували катастрофічний вибух вулкана Тонга 15 січня 2022 р.

Вулкан Тонга входить до п'ятірки найбільш потужних вулканів світу. Вибух вулкана Тонга 15 січня 2022 р. був унікальним. Він призвів до збурень у літосфері, Світовому океані, атмосфері, іоносфері, магнітосфері та всіх геофізичних полів. Збуренню магнітного поля Землі присвячено низку робіт. Досліджено перенос збурень магнітного поля атмосферними гравітаційними хвилями та цунами, збурення у магнітоспрямованих областях за рахунок акустичного резонансу, вплив на екваторіальний електрострумінь тощо. Цим далеко не закінчується різноманіття магнітних ефектів вулкана Тонга. Мета роботи — опис результатів аналізу глобальних бухтоподібних збурень геомагнітного поля, що спостерігалися після вибуху вулкана Тонга 15 січня 2022 р. За вихідні дані використано результати вимірювань часових варіацій рівня X-, Y- і Z-компонентів, виконаних світовою мережею станцій INTERMAGNET. Аналізу магнітних даних передував аналіз стану космічної погоди. Попередній аналіз часових варіацій рівня X-, Y- і Z-компонентів свідчить про те, що у контрольні дні ці варіації були більш плавними, ніж 15 січня 2022 р. Аналіз часових варіацій рівня X-, Y- і Z-компонентів геомагнітного поля та статистичний аналіз параметрів збурень показав таке. З часом запізнювання, який варіював залежно від відстані до вулкана від декількох десятків до 100...200 хв, спостерігалися бухтоподібні збурення усіх компонентів геомагнітного поля. Величина ефекту змінювалася приблизно від 10 до 60 нТл. Найбільші збурення мали місце для Y-компонента. Час

© Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, 2023

© Видавець ВД «Академперіодика» Національної академії наук України, 2023

запізнювання та тривалість збурень збільшувалися при збільшенні відстані від вулкана, а їхня амплітуда, навпаки, зменшувалася. Швидкість поширення бухтоподібних збурень була близькою до швидкості вибухової хвилі. Бухтоподібні збурення були слабкими або повністю були відсутніми на нічному боці планети. Обґрунтовано, що бухтоподібні збурення тісно пов'язані з виникненням під дією вибухової хвилі від вулкана іоносферної «діри». Результати оцінок бухтоподібного збурення добре узгоджуються з результатами спостережень.

Ключові слова: вулкан Тонга, бухтоподібне збурення геомагнітного поля, часові варіації, статистичний аналіз, час запізнювання, тривалість збурення, амплітуда збурення, швидкість поширення, іоносферна «діра», оцінка ефекту.

ВСТУП

Підводний вулкан Тонга, що має географічні координати $20^{\circ}54$ пд. ш., $175^{\circ}38$ зх. д., в інтервалі часу 04:00...05:00 UT 15 січня 2022 р. вибухав п'ять разів [10]. Найпотужніший вибух спостерігався о 04:15 UT [10]. Загальна маса викидів приблизно за 12 год сягала 2.9 Гт, їхній об'єм — 1.9 км^3 . Індекс VEI становив приблизно 5.8 (VEI — volcano explosion index). Теплова енергія вулкана оцінювалася в $3.9 \cdot 10^{18}$ Дж (близько 1 Гт тринітролуолу), а середня потужність — в 9.1 ТВт [1, 14]. За даними різних дослідників енергія вибуху варіювала в широких межах: від 4...18 до 478 ± 191 Мт ТНТ [9, 10, 14]. За нашими оцінками ця енергія не перевищувала 16...18 Мт ТНТ [1, 14].

Встановлено, що вулкан Тонга належить до п'ятірки найбільш потужних вулканів, серед яких вулкан Кракатау (1883 р.), Св. Олени (1980 р.), Ель-Чічон (1982 р.) та Пінатубо (1991 р.) [1, 7, 14].

Унікальність катастрофічного вибуху вулкана Тонга полягає у тому, що продукти його виверження піднялися на рекордну висоту 58 км [1, 9, 10].

Вибух вулкана викликав збурення всіх підсистем у системі Земля (літосфера, Світовий океан) — атмосфера — іоносфера — магнітосфера, в усіх геофізичних полях. При цьому був згенерований цілий спектр хвиль різної фізичної природи. Сейсмічні хвилі описані у роботах [28, 29, 31], хвилі у Світовому океані (цунамі двох типів) — в роботах [12, 22, 24, 32, 35, 36]. Атмосферні хвилі вивчалися у роботах [7, 11, 13, 20, 27—30, 38], а іоносферні хвилі та ефекти — у роботах [2, 5, 6, 8, 10, 13, 19, 27, 37, 39].

Збурення вибухом вулкана геомагнітного поля з періодом $T = 4$ хв та амплітудою порядку 3 нТл досліджувалося в роботі [34]. Важливо, що час запізнювання збурень не перевищував 10 хв.

У роботах [23, 38] також описано періодичні варіації геомагнітного поля з $T = 4.4$ хв (частота 3.8 мГц) як поблизу вулкана (станція API, відстань $r = 840$ км), так і поблизу магнітоспряженої області (станція

HON, $r = 5024$ км). Амплітуда збурень становила відповідно 2 та 0.2 нТл. Подібні практично синхронні варіації пояснюються генерацією акустичного резонансу у полі стоячої вибухової хвилі [23, 38].

У роботі [33] описано геомагнітні варіації з $T = 3 \dots 8$ хв і амплітудою порядку 1 нТл, яким відповідав час запізнювання близько 30 хв та позірна швидкість поширення приблизно 470 м/с. Коливання рівня геомагнітного поля з періодом 13...93 та 5...100 хв у роботі [33] пояснюються впливом як цунамі, так і атмосферно-іоносферних хвиль.

У роботі [21] досліджувався вплив вибуху вулкана Тонга на динамо-область атмосфери, нейтральний вітер у цій області та іоносферний струм.

Вплив на екваторіальний електрострум описано в роботі [26]. Виявлено поворот електроструменя на 180° . Причиною цього слугував інтенсивний зональний вітер.

У роботі [9] було встановлено, що вибух вулкана Тонга викликав глобальні збурення геомагнітного поля; виявлено дві групи збурень. Перша з них спостерігалася практично відразу після вибуху вулкана, а друга мала час запізнювання, що відповідав швидкості поширення атмосферних гравітаційних хвиль.

У роботі [3] автора описано глобальні варіації геомагнітного поля, які переносилися за допомогою МГД-хвиль, вибухової хвилі, атмосферної гравітаційної хвилі, хвилі Лемба та іоносферної хвилі, згенерованої під дією цунамі.

Автор теоретично дослідив основні фізичні ефекти у системі Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера, зокрема магнітний ефект землетрусу, цунамі, в атмосфері та іоносфері [1, 14—18]. Доведено, що величина ефекту, як правило, була достатньою для його реєстрації.

Актуальним є дослідження значного за амплітудою (десятки нанотесла) та тривалістю (1...3 год) аперіодичного збурення, що носить назву бухтоподібного.

Мета роботи — опис результатів аналізу глобальних бухтоподібних збурень геомагнітного поля, що спостерігалися після вибуху вулкана Тонга 15 січня 2022 р.

ВИХІДНІ ДАНІ

У роботі як вихідні дані використано результати вимірювань часових варіацій рівня X -, Y - і Z -компонентів, проведених світовою мережею станцій INTERMAGNET [<https://www.intermagnet.org/>]. Всього використано дані із 17 станцій (рис. 1, табл. 1). Проаналізовано дані за 12—18 січня 2022 р. Похибка вимірювань не перевищувала 1 нТл, а роздільна здатність дорівнювала 1 хв.

Аналізу магнітних даних передував аналіз стану космічної погоди, який досить детально описано в роботах [2, 3]. Тут лише підкрес-

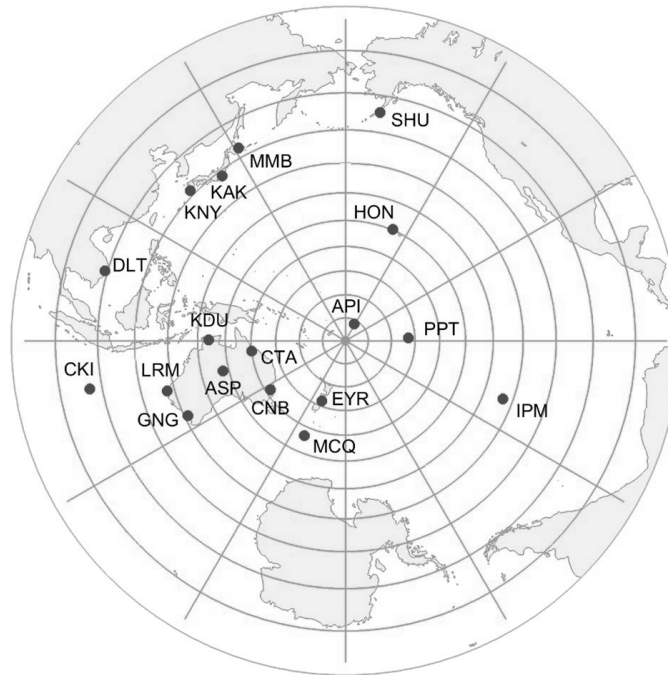


Рис. 1. Контурна мапа розподілу станцій спостереження по відношенню до вулкана, який розміщується у центрі мапи

Таблиця 1. Основні дані про геомагнітні станції

Назва станції	Широта	Довгота	Країна	Відстань до місця вибуху, км
Pamatai (Papeete) (PPT)	17.5670° S	149.5740° W	Французька Полінезія	2730
Eyrewell (EYR)	43.4740° S	172.3930° E	Нова Зеландія	2790
Canberra (CNB)	35.3200° S	149.3600° E	Австралія	3806
Charters Towers (CTA)	20.0900° S	146.2640° E	Австралія	3990
Macquarie Island (MCQ)	54.5000° S	158.9500° E	Австралія	4349
Honolulu (HON)	21.3200° N	158.0000° W	США	5024
Alice Springs (ASP)	23.7620° S	133.8830° E	Австралія	5210
Kakadu (KDU)	12.6900° S	132.4700° E	Австралія	5602
Isla de Pascua Mataveri (Easter Island) (IPM)	27.1713° S	109.4200° W	Чилі	6675
Gingin (GNG)	31.3560° S	115.7150° E	Австралія	6887
Learmonth (LRM)	22.2200° S	114.1000° E	Австралія	7233
Kakioka (KAK)	36.2320° N	140.1860° E	Японія	7852
KNY (Kanoya) Japan	31.4200° N	130.8800° E	Японія	8135
Memambetsu (MMB)	43.9100° N	144.1900° E	Японія	8265
Shumagin (SHU)	55.3500° N	160.4600° W	США	8557
Dalat (DLT)	11.9400° N	108.4800° E	В'єтнам	9068
Cocos (Keeling) Islands (CKI)	12.1875° S	96.8336° E	Австралія	9308

лимо, що в ніч з 14 на 15 січня мала місце магнітна буря. Дещо збуреними були і дні 12, 14, 16 і 18 січня 2022 р. Тому дні 13 та 17 січня 2022 р. було вибрано як контрольні.

РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ ЧАСОВИХ ВАРІАЦІЙ РІВНЯ ГЕОМАГНІТНОГО ПОЛЯ

Попередній аналіз часових варіацій рівня X -, Y - і Z -компонентів свідчить про те, що у контрольні дні ці варіації були більш плавними, ніж 15 січня 2022 р. Це означає, що вибух вулкана спричинив збурення геомагнітного поля, які суттєво відрізнялися характером, періодом, часом запізнювання, тривалістю, амплітудою тощо. Далі нас будуть цікавити лише аперіодичні значні за амплітудою (не менш ніж 10 нТл) та тривалі (1...7 год) збурення рівня геомагнітного поля. Як уже відмічалось, такі збурення називають бухтоподібними.

Розглянемо приклади бухтоподібних збурень для низки станцій, розміщених по різні боки від вулкана.

Станція PPT. Вона розташована на схід від вулкана на відстані $r = 2.730$ Мм (див. рис. 1).

У день вибуху вулкана рівень X -компонента з 04:00 до 10:00 UT змінювався приблизно від -20 до -10 нТл (рис. 2). Бухтоподібне збурення мало місце з 05:00 до 06:30 UT, значення X не перевищувало 10 нТл. З 06:00 до 07:15 UT, навпаки, спостерігався провал у залежності $X(t)$ приблизно на 10 нТл.

Рівень Y -компонента з 04:00 до 06:00 UT збільшувався від -10 до 10 нТл, а потім упродовж 10 год зменшувався від 10 до -20 нТл. Бухтоподібне збільшення тривало приблизно 7 год.

У свою чергу рівень Z -компонента з 04:00 до 05:00 UT збільшувався від -2 до 10 нТл, після чого він, флюктууючи, зменшувався від 10 до -10 ± 1 нТл. Бухтоподібне збільшення тривало не менше 3 год.

У контрольні дні 13 та 17 січня 2022 р. також часом мали місце бухтоподібні збурення, проте їхня величина зазвичай не перевищувала 3...5 нТл (рис. 2).

Станція СТА. Вона розміщена приблизно на захід від вулкана на відстані $r = 3.990$ Мм.

15 січня 2022 р., у день вибуху вулкана, з 05:30 до 06:30 UT мало місце зростання рівня X -компонента від -18 до -5 нТл (рис. 3). З 06:10 до 07:10 UT спостерігався провал у залежності $X(t)$ від -5 до -18 нТл. З 06:30 до 07:45 UT рівень зростав від -18 до -3 нТл. Далі мали місце більш-менш незначні флюктуації рівня X -компонента.

Рівень Y -компонента в інтервалі часу 05:50...08:30 UT зменшувався від 10 до -40 нТл, а потім збільшувався від -40 до 15 нТл.

Варіації рівня Z -компонента в інтервалі часу 03:00...07:00 UT не перевищували $\pm(5...7)$ нТл. З 07:15 до 07:45 UT рівень збільшувався від -15 до 22 нТл, далі він немонотонно зменшувався від 22 до

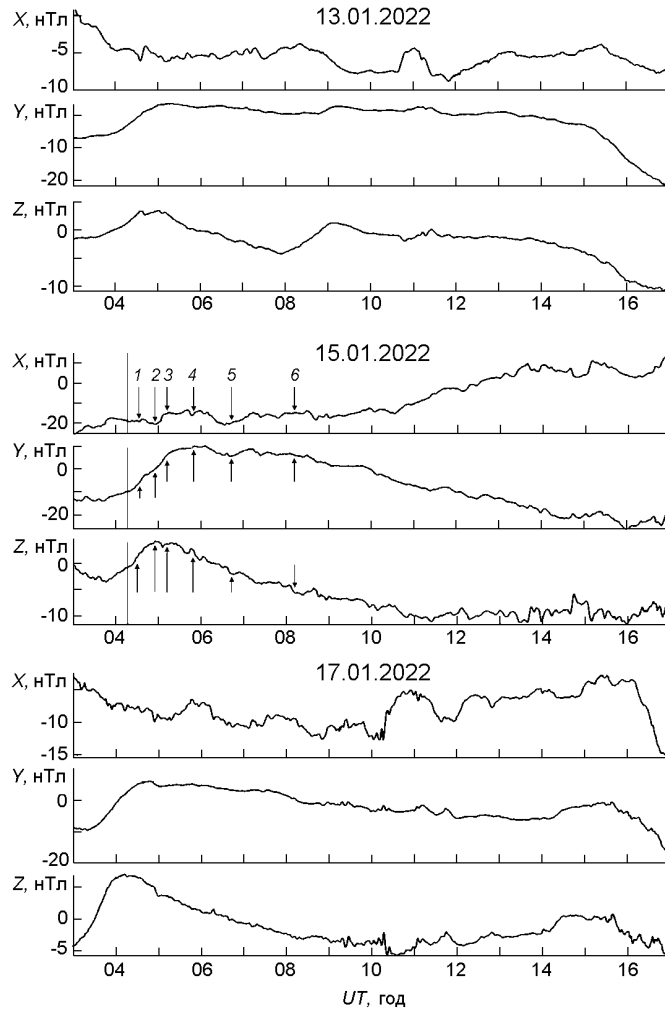


Рис. 2. Часові варіації компонентів геомагнітного поля на станції PPT. Стрілки вказують на моменти часу можливої реакції магнітного поля на вибух вулкана. Вертикальною лінією показано момент вибуху вулкана

–2...–3 нТл. Тривалість бухтоподібного збільшення рівня була не меншою за 3 год, а для Y -компонента вона була близькою до 2.5 год.

У контрольні дні бухтоподібні варіації не перевищували 5... 10 нТл (рис. 3).

Станція EYR. Ця станція розташована південніше від вулкана на відстані $r = 2.79$ Мм.

У день вибуху вулкана з 05:50 до 07:15 UT спостерігалось бухтоподібне зменшення рівня X -компонента приблизно від 10 до –30 нТл (рис. 4). В інтервалі часу 07:15...10:00 UT рівень був близьким до 0 нТл.

Для Y -компонента бухтоподібне зменшення рівня від 10 до 0 нТл, а потім його збільшення від 0 до 30 нТл мало місце в інтервалі часу 05:00...07:30 UT. З 07:30 до 12:00 UT рееструвалося поступове зменшення рівня від 30 до 0 нТл.

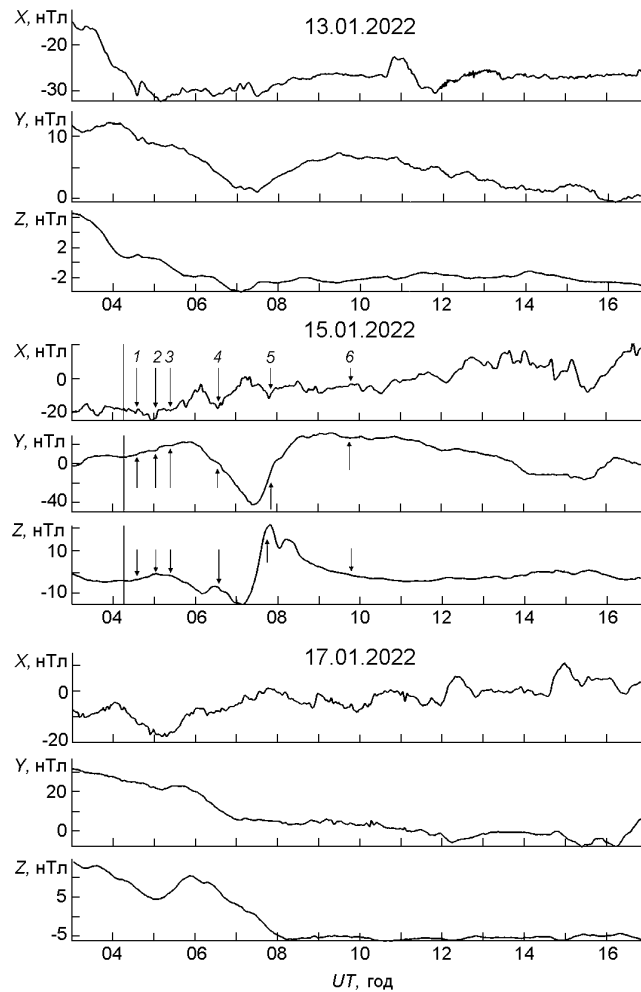


Рис. 3. Часові варіації компонентів геомагнітного поля на станції СТА. Стрілки вказують на моменти часу можливої реакції магнітного поля на вибух вулкана. Вертикальною лінією показано момент вибуху вулкана

Рівень Z-компонента з 04:00 до 06:00 UT зменшувався від 0 до -22 нТл, а потім збільшувався від -22 до 7 нТл о 07:10 UT. З 06:00 до 07:30 UT мало місце бухтоподібне збільшення рівня від -22 до 8 нТл, а потім — його зменшення від 8 до -8 нТл.

У контрольні дні бухтоподібні варіації рівня зазвичай не перевищували 5...10 нТл (рис. 4).

Станція KDU. Вона дислокована на півночі Австралії на відстані $r = 5.6$ Мм приблизно в західному напрямку від вулкана.

15 січня 2022 р., у день вибуху вулкана, варіації рівня X-компонента були незначними. Лише в інтервалі часу 06:15...07:15 UT рівень зменшувався від -10 до -20 нТл (рис. 5).

Варіації Y-компонента були значно більшими: від 10 до -12 нТл, а потім — від -12 до 30 нТл. Тривалість бухтоподібного зменшення дорівнювала близько 4 год. Збільшення рівня від -12 до 30 нТл, а

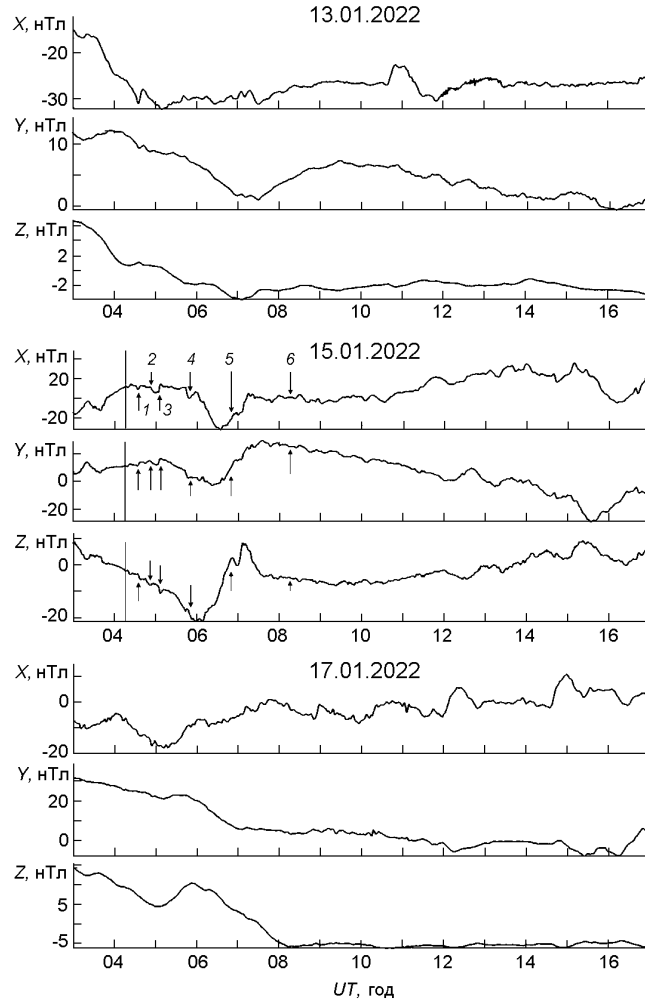


Рис. 4. Часові варіації компонентів геомагнітного поля на станції EYR. Стрілки вказують на моменти часу можливої реакції магнітного поля на вибух вулкану. Вертикальною лінією показано момент вибуху вулкану

потім його поступове зменшення від 30 до -10 нТл тривало з 08:30 до 15:30 UT.

Бухтоподібне збільшення рівня Z -компонента спостерігалось з 04:00 до 07:15 UT приблизно від 0 до 10 нТл. В інтервалі часу 06:30...09:15 UT рівень спочатку зменшувався від 10 до -7 нТл, а потім збільшувався від -7 до 8 нТл. Далі спостерігалось поступове зменшення від 8 до -3 нТл.

У контрольні дні також часом мали місце бухтоподібні збурення, але їхній рівень не перевищував 5...10 нТл (рис. 5).

Спостереження бухтоподібних варіацій на окремих магнітних станціях не дає повної впевненості, що саме ці збурення викликані вибухом вулкана. Таку впевненість може дати статистичний аналіз для багатьох станцій.

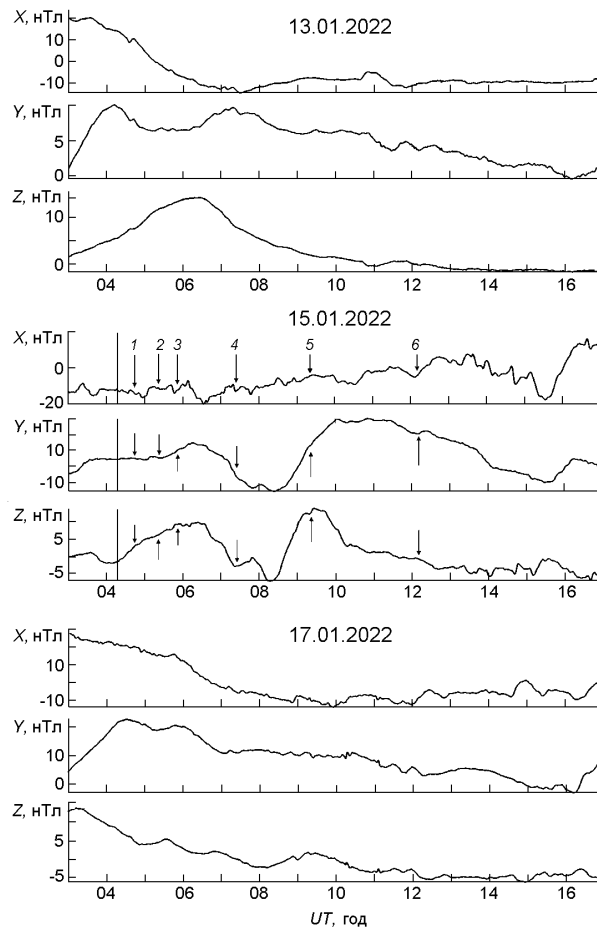


Рис. 5. Часові варіації компонентів геомагнітного поля на станції KDU. Стрілки вказують на моменти часу можливої реакції магнітного поля на вибух вулкана. Вертикальною лінією показано момент вибуху вулкана

РЕЗУЛЬТАТИ СТАТИСТИЧНОГО АНАЛІЗУ ПАРАМЕТРІВ БУХТОПОДІБНИХ ЗБУРЕНЬ ГЕОМАГНІТНОГО ПОЛЯ

Значення основних параметрів бухтоподібних збурень геомагнітного поля, а саме величин X , Y і Z , часу запізнювання та тривалості T збурень для X -, Y - і Z -компонентів для 17 станцій наведено в табл. 2. Видно, що частіше за все значення X , Y і Z були від'ємними. Винятком були додатні значення X і Y для станцій API та PPT, віддалених від вулкана на відстань $r = 0.840$ та 2.730 Мм. Час запізнювання для всіх компонентів мав тенденцію до збільшення зі збільшенням відстані від вулкана. Подібна тенденція спостерігалася і для тривалості збурень. Із табл. 2 також видно, що є тенденція до зменшення амплітуди збурення при збільшенні r .

Кореляційне поле «час запізнювання — відстань до вулкана» наведено на рис. 6. Лінійні апроксимації мають вигляд

Таблиця 2. Основні параметри бухтоподібного збурення геомагнітного поля

Станція	X , нТл	x , хв	T_x , хв	Y , нТл	y , хв	T_y , хв	Z , нТл	z , хв	T_z , хв
PPT	7	60	91	7	36	91	7	36	91
EYR	-40	86	86	-25	51	154	-25	51	120
CNB	-20	100	120	-60	90	178	-25	105	100
СТА	-18	117	80	-63	83	150	-30	65	150
MCQ	-80	120	130	-50	120	130	-30	120	130
HON	-10	100	100	-5	100	170	-2	100	100
ASP	-15	100	230	-58	102	240	-15	100	190
KDU	-10	110	240	-38	110	230	-20	110	180
IPM	-10	100	220	-8	110	220	-2	100	220
GNG	-13	100	280	-58	100	300	-30	100	360
LRM	-25	150	330	-45	150	265	-50	150	265
КАК	-10	175	300	-8	175	270	-8	190	300
KNY	-10	115	270		100		-5	115	270
MMB	-10	200	290	-8	200	210	-8	200	280
SHU	-23	115	330	-10	110	200	-20	130	200
DLT	-40	130	240	-8	130	150	-8	180	150
CKI	-15	170	280	-20	220	240	-17	120	280

$$x = 11.19r - 51.1, \quad 26.2 \text{ хв}, \quad R^2 = 0.48, \quad (1)$$

$$y = 16.68r + 13.4, \quad 31.6 \text{ хв}, \quad R^2 = 0.59, \quad (2)$$

$$z = 15.82r + 17.8, \quad 29.8 \text{ хв}, \quad R^2 = 0.59, \quad (3)$$

де відстань вимірюється в Мм, час запізнювання — у хвиликах.

Кореляційне поле «тривалість збурення — відстань до вулкана» показано на рис. 7. Відповідні лінійні апроксимації залежностей такі:

$$T_x = 36.29r - 12.4, \quad 45.7 \text{ хв}, \quad R^2 = 0.76, \quad (4)$$

$$T_y = 14.75r + 110.2, \quad 48.7 \text{ хв}, \quad R^2 = 0.32, \quad (5)$$

$$T_z = 31.15r + 9.2, \quad 46.5 \text{ хв}, \quad R^2 = 0.70. \quad (6)$$

Зі співвідношень (1)—(3) та (4)—(6) випливає, що зі збільшенням відстані від вулкана час запізнювання та тривалість збурення дійсно збільшувалися. Час становлення збурення близький до значення середнього квадратичного відхилення часу становлення, тобто до 30 хв.

Гістограми для величини збурень X , Y і Z показано на рис. 8. Видно, що найбільш ймовірні значення цих збурень такі: $X = -14.5 \pm 5.4$ нТл, $Y = -7.8 \pm 1.6$ і -53.1 ± 9.1 нТл, $Z = -26.1 \pm 10.0$ і -5.3 ± 3.0 нТл.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ АНАЛІЗУ

У день вибуху вулкана Тонга для всіх трьох компонентів зазвичай спостерігалися бухтоподібні збурення на 10...60 нТл за абсолютною

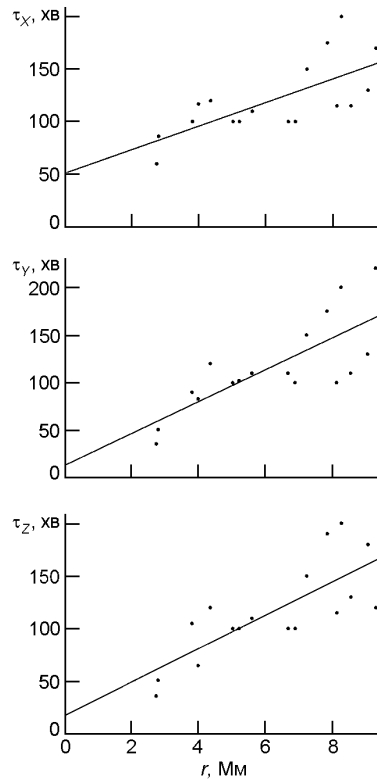


Рис. 6. Залежність часу запізнювання геомагнітних збурень від відстані до вулкана

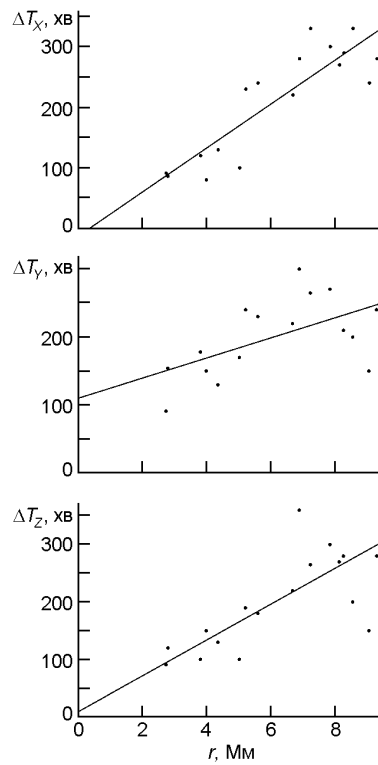


Рис. 7. Залежність тривалості геомагнітних збурень від відстані до вулкана

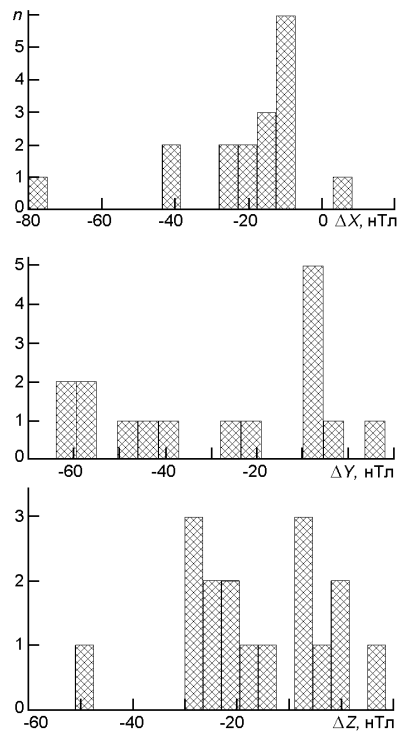


Рис. 8. Гістограми для максимальної величини геомагнітних збурень бухтоподібного типу

величиною. Частіше збурення мали від'ємне значення. Найбільше збурювався рівень Y -компонента, середнє значення сягало близько -53 нТл. Водночас для X - і Z -компонентів у середньому збурення рівня становило -15 нТл. Найменше збурення мало місце для станції РРТ: бухтоподібні збурення практично не спостерігалися, а точніше вони не перевищували $-2 \dots -8$ нТл, і для станції ІРМ, яка також лежить на схід від вулкана. Це пояснюється тим, що ці станції перебували на нічному боці півкулі, де щільність іоносферного струму та концентрація електронів зменшувалися приблизно на порядок у порівнянні з денними умовами.

Підкреслимо, що значення бухтоподібних варіацій рівня компонентів геомагнітного поля у контрольні дні не перевищували $5 \dots 10$ нТл. Цей факт може свідчити на користь того, що бухтоподібні збурення 15 січня 2022 р. викликані саме вибухом вулкана. Проте це необхідно, але не достатня умова вулканічного походження ефекту.

Достатньою умовою є тенденції до збільшення часу запізнювання та тривалості збурень при збільшенні відстані від вулкана та зменшенні при цьому амплітуди збурень (див. рис. 6 і 7).

Із співвідношень (1)–(3) випливає, що при $r = 0$ час запізнювання t_{\min} дорівнює близько 30 хв для X -, Y - і Z -компонентів. Такий час потрібен для поширення збурення від вулкана до динамо-області атмосфери (висота $z = 90 \dots 150$ км) і розвитку магнітного збурення.

Співвідношення (1)—(3) дають можливість оцінити середню швидкість поширення збурень:

$$\frac{d}{dr} \quad ^1$$

Тоді $v_x = 1490$ м/с, $v_y = 1000$ м/с та $v_z = 1050$ м/с. Ці значення швидкостей близькі до швидкості вибухової хвилі [2, 3].

Важливо, що отримані значення швидкостей близькі до швидкості поширення збурень концентрації електронів N і повного електронного вмісту [2, 5]. Це означає, що причиною бухтоподібних варіацій геомагнітного поля є виникнення іоносферної «діри» [2, 5].

Оцінимо величину бухтоподібного збурення геомагнітного поля. Будемо вважати, що в денний час середнє значення N у динамо-області становить $(2 \dots 3) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$, а швидкість атмосферного вітру $w = 100$ м/с. Тоді щільність іоносферного струму

$$j_0 = eNw = (3.2 \dots 4.8) \cdot 10^{-6} \text{ А/м}^2,$$

де e — заряд електрона. При відносному збуренні N у «дірі» порядку $5 \dots 20$ % маємо збурення щільності іоносферного струму $j = (1.6 \dots 9.6) \cdot 10^{-7} \text{ А/м}^2$. Із роторного рівняння Максвелла отримуємо оцінку збурення магнітного поля:

$$\Delta B = \mu_0 j_z, \quad (7)$$

де μ_0 — магнітна стала, $z = 50$ км — товщина динамо-області.

Зі співвідношення (7) маємо $B = 10 \dots 60$ нТл, що повністю відповідає результатам спостережень ($\sim 10 \dots 60$ нТл).

Таким чином, є всі підстави вважати, що бухтоподібне збурення компонентів геомагнітного поля пов'язане з генерацією іоносферної «діри» в результаті вибуху вулкана Тонга.

ГОЛОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Аналіз часових варіацій рівня X -, Y - і Z -компонентів геомагнітного поля, зареєстрованих мережею магнітних станцій INTERMAGNET, та статистичний аналіз параметрів збурень показав таке.

1. З часом запізнювання, який варіював залежно від відстані до вулкана від декількох десятків до $100 \dots 200$ хв, спостерігалися бухтоподібні збурення усіх компонентів геомагнітного поля. Величина ефекту змінювалася від 10 до 60 нТл. Найбільші збурення мали місце для Y -компонента.

2. Час запізнювання та тривалість збурень збільшувалися при збільшенні відстані від вулкана, а їхня амплітуда, навпаки, зменшувалася.

3. Швидкість поширення бухтоподібних збурень була близькою до швидкості вибухової хвилі (близько 1000 м/с).

4. Бухтоподібні збурення були слабо виражені або практично були відсутніми на нічному боці планети.

5. Обґрунтовано, що бухтоподібні збурення тісно пов'язані з викиненням під дією вибухової хвилі від вулкану іоносферної «діри».

6. Результати оцінок бухтоподібного збурення добре узгоджуються з результатами спостережень.

Дослідження Л. Ф. Черногора і М. Ю. Голуб проведено в рамках проєкту Національного фонду досліджень України (номер 2020.02/0015 «Теоретичні та експериментальні дослідження глобальних збурень природного і техногенного походження в системі Земля — атмосфера — іоносфера»). Робота виконувалась за часткової підтримки держбюджетних НДР, заданих МОН України (номери держреєстрації 0121U109881 та 0122U001476).

Автори вдячні Є. Жданку за допомогу при оформленні рукопису статті.

1. Черногор Л. Ф. Фізичні ефекти у системі Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера, викликані потужним вибухом вулкана Тонга 15 січня 2022 р. *Космічна наука і технологія*. 2023. 29, № 2. С. 54—77.
2. Черногор Л. Ф. Варіації повного електронного вмісту в іоносфері, викликані вибухом вулкана Тонга 15 січня 2022 р. *Космічна наука і технологія*. 2023. 29, № 3. С. 67—87.
3. Черногор Л. Ф. Глобальні варіації геомагнітного поля, викликані вибухом вулкана Тонга 15 січня 2022 р. *Космічна наука і технологія*. 2023. 29, № 4. С. 78—105.
4. Черногор Л. Ф., Голуб М. Ю. Великомасштабні збурення геомагнітного поля, що супроводжували потужний вибух вулкана Тонга 15 січня 2022 р. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка»*. 2023. № 37. С. 33—48.
5. Черногор Л. Ф., Милованов Ю. Б. Область зниженої концентрації електронів у іоносфері, утвореної вибухом вулкана Тонга 15 січня 2022 р. *Кінематика і фізика небес. тіл*. 2023. 39, № 4. С. 34—54.
6. Черногор Л. Ф., Милованов Ю. Б., Дорохов В. Л. Іоносферні ефекти ударної хвилі, згенерованої вибухом вулкана Тонга 15 січня 2022 р. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка»*. 2023. № 37.
7. Черногор Л. Ф., Шевелєв М. Б. Статистичні характеристики вибухових хвиль у атмосфері, згенерованих супервулканом Тонга 15 січня 2022 р. *Космічна наука і технологія*. 2023. 29, № 6.
8. Aa E., Zhang S.-R., Erickson P. J., Vierinen J., Coster A. J., Goncharenko L. P., Spicher A., Rideout W. Significant ionospheric hole and equatorial plasma bubbles after the 2022 Tonga volcano eruption. *Geophys. Res. Lett.* 2022.20, Is. 7. Paper № e2022SW003101. DOI: 10.1029/2022SW003101
9. Adushkin V. V., Rybnov Y. S., Spivak A. A. Wave-related, electrical, and magnetic effects due to the January 15, 2022 catastrophic eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano. *J. Volcanolog. Seismol.* 2022. 16, Is. 4, 251—263. DOI:10.1134/S0742046322040029
10. Astafyeva E., Maletckii B., Mikesell T. D., Munaibari E., Ravanelli M., Coisson P., Manta F., Rolland L. The 15 January 2022 Hunga Tonga eruption history as inferred

- from ionospheric observations. *Geophys. Res. Lett.* 2022. 49, Is. 10. Paper № e2022GL098827. DOI: 10.1029/2022GL098827
11. Burt S. Multiple airwaves crossing Britain and Ireland following the eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai on 15 January 2022. *Weather. Special Issue: The January 2022 eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai.* 2022. 77, Is. 3. P. 76—81. DOI: 10.1002/wea.4182
 12. Carvajal M., Sepúlveda I., Gubler A., Garreaud R. Worldwide signature of the 2022 Tonga volcanic tsunami. *Geophys. Res. Lett.* 2022. 49, Is. 6. Paper № e2022GL098153. DOI: 10.1029/2022GL098153
 13. Chen C.-H., Zhang X., Sun Y.-Y., Wang F., Liu T.-C., Lin C.-Y., Gao Y., Lyu J., Jin X., Zhao X., Cheng X., Zhang P., Chen Q., Zhang D., Mao Z., Liu J.-Y. Individual wave propagations in ionosphere and troposphere triggered by the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai underwater volcano eruption on 15 January 2022. *Remote Sensing.* 2022. 14, Is. 9. Paper № 2179. DOI: 10.3390/rs14092179
 14. Chernogor L. F. Effects of the Tonga volcano explosion on January 15, 2022. International Conference “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University” in part of the World Science Day for Peace and Development. October 18 —21, 2022. Kyiv, Ukraine. Book of Abstracts. P. 12—13.
 15. Chernogor L. F. Electrical effects of the Tonga volcano unique explosion on January 15, 2022. International Conference “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University” in part of the World Science Day for Peace and Development. October 18 —21, 2022. Kyiv, Ukraine. Book of Abstracts. P. 79—80.
 16. Chernogor L. F. Magnetospheric effects that accompanied the explosion of the Tonga Volcano on January 15, 2022. International Conference “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University” in part of the World Science Day for Peace and Development. October 18 —21, 2022. Kyiv, Ukraine. Book of Abstracts. P. 81—82.
 17. Chernogor L. F. Magnetic effects of the unique explosion of the Tonga volcano. International Conference “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University” in part of the World Science Day for Peace and Development. October 18 —21, 2022. Kyiv, Ukraine. Book of Abstracts. P. 89—90.
 18. Chernogor L. F. The Tonga super-volcano explosion as a subject of applied physics. International Scientific Conference “Electronics and Applied Physics”, APHYS 2022. 18—22 October, 2022. Kyiv, Ukraine. P. 130—131.
 19. Chernogor L. F., Mylovanov Y. B., Dorohov V. L. Ionospheric effects accompanying the January 15, 2022 Tonga volcano explosion. International Conference “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University” in part of the World Science Day for Peace and Development. October 18—21, 2022. Kyiv, Ukraine. Book of Abstracts. P. 83—84.
 20. Chernogor L. F., Shevelev M. B. Statistical characteristics of atmospheric waves, generated by the explosion of the Tonga volcano on January 15, 2022. International Conference “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University” in part of the World Science Day for Peace and Development. October 18 —21, 2022. Kyiv, Ukraine. Book of Abstracts. P. 85—86.
 21. Harding B. J., Wu Y.-J. J., Alken P., Yamazaki Y., Triplett C. C., Immel T. J., Gasque L. C., Mende S. B., Xiong C. Impacts of the January 2022 Tonga volcanic eruption on the ionospheric dynamo: ICON-MIGHTI and swarm observations of extreme neutral winds and currents. *Geophys. Res. Lett.* 2022. 49, Is. 9. Paper № e2022GL098577. DOI: 10.1029/2022GL098577
 22. Imamura F., Suppasri A., Arikawa T., Koshimura S., Satake K., Tanioka Y. Preliminary observations and impact in Japan of the tsunami caused by the Tonga volcanic eruption on January 15, 2022. *Pure and Appl. Geophys.* 2022. 179. P. 1549—1560. DOI: 10.1007/s00024-022-03058-0

23. Iyemori T., Nishigioka M., Otsuka Y., et al. A confirmation of vertical acoustic resonance and field-aligned current generation just after the 2022 Hunga Tonga Hunga Ha'apai volcanic eruption. *Earth Planets Space*. 2022. 74. Paper № 103. DOI: 10.1186/s40623-022-01653-y
24. Kubota T., Saito T., Nishida K. Global fast-traveling tsunamis driven by atmospheric Lamb waves on the 2022 Tonga eruption. *Science*. 2022. 377, Is. 6601. P. 91—94. DOI: 10.1126/science.abo4364
25. Kulichkov S. N., Chunchuzov I. P., Popov O. E., Gorchakov G. I., Mishenin A. A., Perepelkin V. G., Bush G. A., Skorokhod A. I., Vinogradov Yu. A., Semutnikova E. G., Љеpic J., Medvedev I. P., Gushchin R. A., Kopeikin V. M., Belikov I. B., Gubanova D. P., Karpov A. V., Tikhonov A. V. Acoustic-gravity Lamb waves from the eruption of the Hunga-Tonga-Hunga-Hapai volcano, its energy release and impact on aerosol concentrations and tsunami. *Pure and Appl. Geophys.* 2022. 179. P. 1533—1548. DOI: 10.1007/s00024-022-03046-4
26. Le G., Liu G., Yizengaw E., Englert C. R. Intense equatorial electrojet and counter electrojet caused by the 15 January 2022 Tonga volcanic eruption: Space- and ground-based observations. *Geophys. Res. Lett.* 2022. 49, Is. 11. Paper № e2022GL099002. DOI: 10.1029/2022GL099002
27. Lin J.-T., Rajesh P. K., Lin C. C. H., Chou M.-Y., Liu J.-Y., Yue J., Hsiao T.-Y., Tsai H.-F., Chao H.-M., Kung M.-M. Rapid conjugate appearance of the giant ionospheric Lamb wave signatures in the Northern hemisphere After Hunga-Tonga volcano eruptions. *Geophys. Res. Lett.* 2022. 49, Is. 8. Paper № e2022GL098222. DOI: 10.1029/2022GL098222
28. Matoza R. S., Fee D., Assink J. D., Iezzi A. M., Green D. N., Kim K., Toney L., Lecocq T., Krishnamoorthy S., Lalonde J. M., Nishida K., Gee K. L., Haney M. M., Ortiz H. D., Brissaud Q., Martire L., Rolland L., Vergados P., Nippres A., Park J., Shani-Kadmiel S., Witsil A., Arrowsmith S., Caudron C., Watada S., Perttu A. B., Taisne B., Mialle P., Le Pichon A., Vergoz J., Hupe P., Blom P. S., Waxler R., De Angelis S., Snively J. B., Ringler A. T., Anthony R. E., Jolly A. D., Kilgour G., Averbuch G., Ripepe M., Ichihara M., Arciniega-Ceballos A., Astafyeva E., Ceranna L., Cevuard S., Che I.-Y., De Negri R., Ebeling C. W., Evers L. G., Franco-Marin L. E., Gabrielson T. B., Hafner K., Harrison R. G., Komjathy A., Lacanna G., Lyons J., Macpherson K. A., Marchetti E., McKee K. F., Mellors R. J., Mendo-Pérez G., Mikesell T. D., Munaibari E., Oyola-Merced M., Park I., Pilger C., Ramos C., Ruiz M. C., Sabatini R., Schwaiger H. F., Tailpied D., Talmadge C., Vidot J., Webster J., Wilson D. C. Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga. *Science*. 2022. 377, Is. 6601. P. 95—100. DOI: 10.1126/science.abo7063
29. Matoza R. S., Fee D., Assink J. D., Iezzi A. M., Green D. N., Kim K., Toney L., Lecocq T., Krishnamoorthy S., Lalonde J. M., Nishida K., Gee K. L., Haney M. M., Ortiz H. D., Brissaud Q., Martire L., Rolland L., Vergados P., Nippres A., Park J., Shani-Kadmiel S., Witsil A., Arrowsmith S., Caudron C., Watada S., Perttu A. B., Taisne B., Mialle P., Le Pichon A., Vergoz J., Hupe P., Blom P. S., Waxler R., De Angelis S., Snively J. B., Ringler A. T., Anthony R. E., Jolly A. D., Kilgour G., Averbuch G., Ripepe M., Ichihara M., Arciniega-Ceballos A., Astafyeva E., Ceranna L., Cevuard S., Che I.-Y., De Negri R., Ebeling C. W., Evers L. G., Franco-Marin L. E., Gabrielson T. B., Hafner K., Harrison R. G., Komjathy A., Lacanna G., Lyons J., Macpherson K. A., Marchetti E., McKee K. F., Mellors R. J., Mendo-Pérez G., Mikesell T. D., Munaibari E., Oyola-Merced M., Park I., Pilger C., Ramos C., Ruiz M. C., Sabatini R., Schwaiger H. F., Tailpied D., Talmadge C., Vidot J., Webster J., Wilson D. C. Supplementary materials for atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga. *Science*. 2022. 377, Is. 6601. DOI: 10.1126/science.abo7063

30. Otsuka S. Visualizing Lamb waves from a volcanic eruption using meteorological satellite Himawari-8. *Geophys. Res. Lett.* 2022. 49, Is. 8. Paper № e2022GL098324. DOI: 10.1029/2022GL098324
31. Poli P., Shapiro N. M. Rapid characterization of large volcanic eruptions: Measuring the impulse of the Hunga Tonga Ha’apai explosion from teleseismic waves. *Geophys. Res. Lett.* 2022. 49, Is. 8. Paper № e2022GL098123
32. Ramírez-Herrera M. T., Coca O., Vargas-Espinosa V. Tsunami effects on the coast of Mexico by the Hunga Tonga-Hunga Ha’apai volcano eruption, Tonga. *Pure and Appl. Geophys.* 2022. 179. P. 1117—1137. DOI: 10.1007/s00024-022-03017-9
33. Schnepf N. R., Minami T., Toh H., Nair M. C. Magnetic signatures of the 15 January 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha’apai volcanic eruption. *Geophys. Res. Lett.* 2022. 49, Is. 10. Paper № e2022GL098454
34. Soares G., Yamazaki Y., Matzka J. Localized geomagnetic disturbance due to ionospheric response to the Hunga Tonga eruption on January 15, 2022. *Geophys. Res. Lett.* 2022. DOI: 10.1002/essoar.10510482.1
35. Tanioka Y., Yamanaka Y., Nakagaki T. Characteristics of the deep sea tsunami excited offshore Japan due to the air wave from the 2022 Tonga eruption. *Earth, Planets and Space.* 2022. 74. Paper № 61. DOI: 10.1186/s40623-022-01614-5
36. Terry J. P., Goff J., Winspear N., Bongolan V. P., Fisher S. Tonga volcanic eruption and tsunami, January 2022: globally the most significant opportunity to observe an explosive and tsunamigenic submarine eruption since AD 1883 Krakatau. *Geosci. Lett.* 2022. 9. Paper № 24. DOI: 10.1186/s40562-022-00232-z
37. Themens D. R., Watson C., Žagar N., Vasylykevych S., Elvidge S., McCaffrey A., Prikryl P., Reid B., Wood A., Jayachandran P. T. Global propagation of ionospheric disturbances associated with the 2022 Tonga volcanic eruption. *Geophys. Res. Lett.* 2022. 49, Is. 7. Paper № e2022GL098158. DOI: 10.1029/2022GL098158
38. Yamazaki Y., Soares G., Matzka J. Geomagnetic detection of the atmospheric acoustic resonance at 3.8 mHz during the Hunga Tonga eruption event on 15 January 2022. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2022. 127, Is. 7. Paper № e2022JA030540. DOI: 10.1029/2022JA030540
39. Zhang S.-R., Vierinen J., Aa E., Goncharenko L. P., Erickson P. J., Rideout W., Coster A. J., Spicher A. 2022 Tonga volcanic eruption induced global propagation of ionospheric disturbances via Lamb waves. *Front. Astron. and Space Sci.* 2022. 9. Paper № 871275. DOI: 10.3389/fspas.2022.871275

REFERENCES

1. Chernogor L. F. (2023). Physical effects of the January 15, 2022, powerful Tonga volcano explosion in the Earth — atmosphere — ionosphere — magnetosphere system. *Space Sci. and Technol.* 29(2). 54—77. [In Ukrainian].
2. Chernogor L. F. (2023). Ionospheric total electron content variations caused by the Tonga volcano explosion of January 15, 2022. *Space Sci. and Technol.* 29(3). 67—87. [In Ukrainian].
3. Chernogor L. F. (2023). Global variations in the geomagnetic field caused by the explosion of the volcano Tonga on January 15, 2022. *Space Sci. and Technol.* 29(4).
4. Chernogor L. F., Holub M. Yu. (2023). Large-scale geomagnetic field disturbances accompanied by the powerful explosion of the Tonga volcano on January 15, 2022. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series «Radio Physics and Electronics».* 37. 33—48.
5. Chernogor L. F., Mylovanov Y. B. (2023). Reduction in the electron density produced by the Tonga volcano explosion on January 15, 2022. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies.* 39(4).

6. Chernogor L. F., Mylovanov Y. B., Dorohov V. L. (2023). Ionospheric effects of the shock wave generated by the explosion of the Tonga volcano on January 15, 2022. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series «Radio Physics and Electronics»*. 2023. 37.
7. Chernogor L. F., Shevelev M. B. (2023). A statistical study of the explosive waves launched by the Tonga super-volcano on January 15, 2022. *Space Sci. and Technol.* 29(6) [In Ukrainian].
8. Aa E., Zhang S.-R., Erickson P. J., Vierinen J., Coster A. J., Goncharenko L. P., Spicher A., Rideout W. (2022). Significant ionospheric hole and equatorial plasma bubbles after the 2022 Tonga volcano eruption. *Geophys. Res. Lett.* 20(7). e2022SW003101. DOI: 10.1029/2022SW003101
9. Adushkin V. V., Rybnov Y. S., Spivak A. A. (2022). Wave-related, electrical, and magnetic effects due to the January 15, 2022 catastrophic eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano. *J. Volcanolog. Seismol.* 16(4). 251—263. DOI:10.1134/S0742046322040029
10. Astafyeva E., Maletkii B., Mikesell T. D., Munaibari E., Ravanelli M., Coisson P., Manta F., Rolland L. (2022). The 15 January 2022 Hunga Tonga eruption history as inferred from ionospheric observations. *Geophys. Res. Lett.* 49(10). № e2022GL098827. DOI: 10.1029/2022GL098827
11. Burt S. (2022). Multiple airwaves crossing Britain and Ireland following the eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai on 15 January 2022. *Weather. Special Issue: The January 2022 eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai*. 77(3). 76—81. DOI: 10.1002/wea.4182
12. Carvajal M., Sepúlveda I., Gubler A., Garreaud R. (2022). Worldwide signature of the 2022 Tonga volcanic tsunami. *Geophys. Res. Lett.* 49(6). e2022GL098153. DOI: 10.1029/2022GL098153
13. Chen C.-H., Zhang X., Sun Y.-Y., Wang F., Liu T.-C., Lin C.-Y., Gao Y., Lyu J., Jin X., Zhao X., Cheng X., Zhang P., Chen Q., Zhang D., Mao Z., Liu J.-Y. (2022). Individual wave propagations in ionosphere and troposphere triggered by the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Underwater volcano eruption on 15 January 2022. *Remote Sensing*. 14(9). 2179. DOI: 10.3390/rs14092179
14. Chernogor L. F. (2022). Effects of the Tonga volcano explosion on January 15, 2022. International Conference “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University” in part of the World Science Day for Peace and Development. October 18 —21. Kyiv, Ukraine. Book of Abstracts. 12—13.
15. Chernogor L. F. (2022). Electrical effects of the Tonga volcano unique explosion on January 15, 2022. International Conference “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University” in part of the World Science Day for Peace and Development. October 18 — 21. Kyiv, Ukraine. Book of Abstracts. 79—80.
16. Chernogor L. F. (2022). Magnetospheric effects that accompanied the explosion of the Tonga volcano on January 15, 2022. International Conference “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University” in part of the World Science Day for Peace and Development. October 18 —21. Kyiv, Ukraine. Book of Abstracts. 81—82.
17. Chernogor L. F. (2022). Magnetic effects of the unique explosion of the Tonga Volcano. International Conference “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University” in part of the World Science Day for Peace and Development. October 18 —21. Kyiv, Ukraine. Book of Abstracts. 89—90.
18. Chernogor L. F. (2022). The Tonga super-volcano explosion as a subject of applied physics. International Scientific Conference “Electronics and Applied Physics”, APHYS 2022. 18— 22 October. Kyiv, Ukraine. 130—131.
19. Chernogor L. F., Mylovanov Y. B., Dorohov V. L. (2022). Ionospheric effects accompanying the January 15, 2022 Tonga volcano explosion. International Conference

- “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University” in part of the World Science Day for Peace and Development. October 18 — 21. Kyiv, Ukraine. Book of Abstracts. 83—84.
20. Chernogor L. F., Shevelev M. B. (2022). Statistical characteristics of atmospheric waves, generated by the explosion of the Tonga volcano on January 15, 2022. International Conference “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University” in part of the World Science Day for Peace and Development. October 18 — 21. Kyiv, Ukraine. Book of Abstracts. 85—86.
 21. Harding B. J., Wu Y.-J. J., Alken P., Yamazaki Y., Triplett C. C., Immel T. J., Gasque L. C., Mende S. B., Xiong C. (2022). Impacts of the January 2022 Tonga volcanic eruption on the ionospheric dynamo: ICON-MIGHTI and swarm observations of extreme neutral winds and currents. *Geophys. Res. Lett.* 49(9). e2022GL098577. DOI: 10.1029/2022GL098577
 22. Imamura F., Suppasri A., Arikawa T., Koshimura S., Satake K., Tanioka Y. (2022). Preliminary observations and impact in Japan of the tsunami caused by the Tonga volcanic eruption on January 15, 2022. *Pure and Appl. Geophys.* 179. 1549—1560. DOI: 10.1007/s00024-022-03058-0
 23. Iyemori T., Nishigioka M., Otsuka Y. et al. (2022). A confirmation of vertical acoustic resonance and field-aligned current generation just after the 2022 Hunga Tonga Hunga Ha’apai volcanic eruption. *Earth Planets Space.* 74. 103. DOI: 10.1186/s40623-022-01653-y
 24. Kubota T., Saito T., Nishida K. (2022). Global fast-traveling tsunamis driven by atmospheric Lamb waves on the 2022 Tonga eruption. *Science.* 377(6601). 91—94. DOI: 10.1126/science.abo4364
 25. Kulichkov S. N., Chunchuzov I. P., Popov O. E., Gorchakov G. I., Mishenin A. A., Perepelkin V. G., Bush G. A., Skorokhod A. I., Vinogradov Yu. A., Semutnikova E. G., Љepic J., Medvedev I. P., Gushchin R. A., Kopeikin V. M., Belikov I. B., Gubanova D. P., Karpov A. V., Tikhonov A. V. (2022). Acoustic-gravity Lamb waves from the eruption of the Hunga-Tonga-Hunga-Hapai volcano, its energy release and impact on aerosol concentrations and tsunamis. *Pure and Appl. Geophys.* 179. 1533—1548. DOI: 10.1007/s00024-022-03046-4
 26. Le G., Liu G., Yizengaw E., Englert C. R. (2022). Intense equatorial electrojet and counter electrojet caused by the 15 January 2022 Tonga volcanic eruption: Space- and ground-based observations. *Geophys. Res. Lett.* 49(11). e2022GL099002. DOI: 10.1029/2022GL099002
 27. Lin J.-T., Rajesh P. K., Lin C. C. H., Chou M.-Y., Liu J.-Y., Yue J., Hsiao T.-Y., Tsai H.-F., Chao H.-M., Kung M.-M. (2022). Rapid conjugate appearance of the giant ionospheric Lamb wave signatures in the northern hemisphere after Hunga-Tonga volcano eruptions. *Geophys. Res. Lett.* 49(8). e2022GL098222. DOI: 10.1029/2022GL098222
 28. Matoza R. S., Fee D., Assink J. D., Iezzi A. M., Green D. N., Kim K., Toney L., Lecocq T., Krishnamoorthy S., Lalande J. M., Nishida K., Gee K. L., Haney M. M., Ortiz H. D., Brissaud Q., Martire L., Rolland L., Vergados P., Nippres A., Park J., Shani-Kadmiel S., Witsil A., Arrowsmith S., Caudron C., Watada S., Perttu A. B., Taisne B., Mialle P., Le Pichon A., Vergoz J., Hupe P., Blom P. S., Waxler R., De Angelis S., Snively J. B., Ringler A. T., Anthony R. E., Jolly A. D., Kilgour G., Averbuch G., Ripepe M., Ichihara M., Arciniega-Ceballos A., Astafyeva E., Ceranna L., Cevuard S., Che I.-Y., De Negri R., Ebeling C. W., Evers L. G., Franco-Marin L. E., Gabrielson T. B., Hafner K., Harrison R. G., Komjathy A., Lacanna G., Lyons J., Macpherson K. A., Marchetti E., McKee K. F., Mellors R. J., Mendo-Pérez G., Mikesell T. D., Munaibari E., Oyola-Merced M., Park I., Pilger C., Ramos C., Ruiz M. C., Sabatini R., Schwaiger H. F., Tailpied D., Talmadge C., Vidot J., Webster J., Wilson D. C. (2022). Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of

- the January 2022 Hunga eruption, Tonga. *Science*. 377(6601). 95—100. DOI: 10.1126/science.abo7063
29. Matoza R. S., Fee D., Assink J. D., Iezzi A. M., Green D. N., Kim K., Toney L., Lecocq T., Krishnamoorthy S., Lalonde J. M., Nishida K., Gee K. L., Haney M. M., Ortiz H. D., Brissaud Q., Martire L., Rolland L., Vergados P., Nippres A., Park J., Shani-Kadmiel S., Witsil A., Arrowsmith S., Caudron C., Watada S., Perttu A. B., Taisne B., Mialle P., Le Pichon A., Vergoz J., Hupe P., Blom P. S., Waxler R., De Angelis S., Snively J. B., Ringler A. T., Anthony R. E., Jolly A. D., Kilgour G., Averbuch G., Ripepe M., Ichihara M., Arciniega-Ceballos A., Astafyeva E., Ceranna L., Cevuard S., Che I.-Y., De Negri R., Ebeling C. W., Evers L. G., Franco-Marin L. E., Gabrielson T. B., Hafner K., Harrison R. G., Komjathy A., Lacanna G., Lyons J., Macpherson K. A., Marchetti E., McKee K. F., Mellors R. J., Mendo-Pérez G., Mikesell T. D., Munaibari E., Oyola-Merced M., Park I., Pilger C., Ramos C., Ruiz M. C., Sabatini R., Schwaiger H. F., Tailpied D., Talmadge C., Vidot J., Webster J., Wilson D. C. (2022). Supplementary Materials for Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga. *Science*. 377(6601). DOI: 10.1126/science.abo7063
30. Otsuka S. (2022). Visualizing Lamb waves from a volcanic eruption using meteorological satellite Himawari-8. *Geophys. Res. Lett.* 49(8). e2022GL098324. DOI: 10.1029/2022GL098324
31. Poli P., Shapiro N. M. (2022). Rapid characterization of large volcanic eruptions: Measuring the impulse of the Hunga Tonga Ha'apai explosion from teleseismic waves. *Geophys. Res. Lett.* 49(8). e2022GL098123
32. Ramírez-Herrera M. T., Coca O., Vargas-Espinosa V. (2022). Tsunami effects on the coast of Mexico by the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano eruption, Tonga. *Pure and Appl. Geophys.* 179. 1117—1137. DOI: 10.1007/s00024-022-03017-9
33. Schnepf N. R., Minami T., Toh H., Nair M. C. (2022). Magnetic signatures of the 15 January 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcanic eruption. *Geophys. Res. Lett.* 49(10). e2022GL098454
34. Soares G., Yamazaki Y., Matzka J. (2022). Localized geomagnetic disturbance due to ionospheric response to the Hunga Tonga eruption on January 15, 2022. *Geophys. Res. Lett.* DOI: 10.1002/essoar.10510482.1
35. Tanioka Y., Yamanaka Y., Nakagaki T. (2022). Characteristics of the deep sea tsunami excited offshore Japan due to the air wave from the 2022 Tonga eruption. *Earth, Planets and Space*. 74. 61. DOI: 10.1186/s40623-022-01614-5
36. Terry J. P., Goff J., Winspear N., Bongolan V. P., Fisher S. (2022). Tonga volcanic eruption and tsunami, January 2022: globally the most significant opportunity to observe an explosive and tsunamigenic submarine eruption since AD 1883 Krakatau. *Geosci. Lett.* 9. 24. DOI: 10.1186/s40562-022-00232-z
37. Themens D. R., Watson C., Žagar N., Vasylykevych S., Elvidge S., McCaffrey A., Prikryl P., Reid B., Wood A., Jayachandran P. T. (2022). Global propagation of ionospheric disturbances associated with the 2022 Tonga volcanic eruption. *Geophys. Res. Lett.* 49(7). e2022GL098158. DOI: 10.1029/2022GL098158
38. Yamazaki Y., Soares G., Matzka J. (2022). Geomagnetic detection of the atmospheric acoustic resonance at 3.8 mHz during the Hunga Tonga Eruption event on 15 January 2022. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 127(7). e2022JA030540. DOI: 10.1029/2022JA030540
39. Zhang S.-R., Vierinen J., Aa E., Goncharenko L. P., Erickson P. J., Rideout W., Coster A. J., Spicher A. (2022). 2022 Tonga volcanic eruption induced global propagation of ionospheric disturbances via Lamb waves. *Front. Astron. and Space Sci.* 9.871275. DOI: 10.3389/fspas.2022.871275

L. F. Chernogor, M. Yu. Holub

V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svoboda Square, Kharkiv, 61022, Ukraine
E-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com

BAY-SHAPED VARIATIONS IN THE GEOMAGNETIC FIELD
THAT ACCOMPANIED THE CATASTROPHIC EXPLOSION
OF THE TONGA VOLCANO ON JANUARY 15, 2022

Tonga volcano is one of the five most powerful volcanoes in the world. The explosion of the Tonga volcano on January 15, 2022 was unique. It led to disturbances in the lithosphere, World Ocean, atmosphere, ionosphere, magnetosphere and all geophysical fields. A number of works have been devoted to the disturbance of the Earth's magnetic field. The transport of magnetic field disturbances by atmospheric gravity waves and tsunamis, disturbances in magnetically conjugated regions due to acoustic resonance, the effect on the equatorial electrojet, etc., have been studied. The list of the variety of magnetic effects of the Tonga volcano does not end there. The purpose of this work is to describe the results of the analysis of global bay-disturbances in the geomagnetic field observed after the Tonga volcano explosion on January 15, 2022. The results of measurements of temporal variations in the level of the X-, Y-, and Z-components carried out by the INTERMAGNET world network of stations were used as initial data. The analysis of magnetic data was preceded by an analysis of the state of space weather. A preliminary analysis of temporal variations in the level of the X-, Y-, and Z-components indicates that on the reference days these variations were smoother than on January 15, 2022. An analysis of time variations in the level of the X-, Y-, and Z-components of the geomagnetic field and a statistical analysis of the disturbance parameters showed the following. With the time delay, which varied depending on the distance to the volcano from several tens to 100...200 min, bay-disturbances of all components of the geomagnetic field were observed. The magnitude of the effect varied from ~10 to ~60 nT. The greatest disturbances occurred in the Y component. The delay time and duration of disturbances increased with increasing distance from the volcano, while their amplitude, on the contrary, decreased. The propagation speed of bay-disturbances was close to the speed of the blast wave. Bay-disturbances were weakly expressed or completely absent on the night side of the planet. It is substantiated that bay-disturbances are closely related to the occurrence of an ionospheric «hole» under the action of a blast wave from the volcano. The results of estimates of the bay-disturbance are in good agreement with the observation results.

Key words: Tonga volcano, geomagnetic field bay-disturbance, time variations, statistical analysis, time delay, disturbance duration, disturbance amplitude, propagation speed, ionospheric «hole», effect assessment.

Стаття надійшла до редакції 13.01.2022

Після доопрацювання 13.01.2022

Прийнята до друку 12.12.2022