

# ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ І ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ

---

## WAVE PROPAGATION AND REMOTE SENSING

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra31.01.011>  
УДК 550.3

**Л.Ф. Черногор**

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

### ЗБУРЕННЯ ГЕОМАГНІТНОГО ПОЛЯ У БЛИЖНІЙ ЗОНІ, ЗГЕНЕРОВАНІ УНІКАЛЬНИМ ВИБУХОМ ВУЛКАНУ ТОНГА 15 СІЧНЯ 2022 РОКУ

---

**Предмет і мета роботи.** Унікальний за потужністю вибух вулкану Тонга 15 січня 2022 р. призвів до значних збурень усіх підсистем системи «Земля (літосфера, Світовий океан)—атмосфера—іоносфера—магнітосфера» та геофізичних полів (баричного, електричного, магнітного). Актуальною задачею є детальне вивчення збурень у всіх підсистемах і полях, зокрема, подальше дослідження особливостей варіацій компонент геомагнітного поля та їхніх похідних, згенерованих у ближній зоні унікальним вибухом вулкану Тонга 15 січня 2022 р.

**Методи та методологія.** Для аналізу часових варіацій рівня геомагнітного поля використано дані реєстрації трьох компонент ( $X$ ,  $Y$  і  $Z$ ) та їхніх похідних ( $\dot{X}$ ,  $\dot{Y}$ , і  $\dot{Z}$ ), що були отримані геомагнітними обсерваторіями (станціями) мережі INTERMAGNET. Похибка вимірювань не перевищувала 0.1 нТл; роздільна здатність складала 1 хв. Як контрольні було обрано найбільш спокійні дні, а саме 13 та 17 січня 2022 р.

**Результати.** Виявлено особливості геомагнітного ефекту у ближній зоні, що супроводжував потужний вибух вулкану Тонга. Активність вулкану викликала генерацію аперіодичного бухтоподібного збурення та низки квазіперіодичних збурень. Бухтоподібні синхронні збурення в  $X$ -,  $Y$ - і  $Z$ -компонентах на станції API, пов'язані з утворенням під дією вибухової хвилі іоносферної «діри», склали відповідно 15, 28 і –13 нТл і тривали 120...146 хв. Час запізнювання бухтоподібних збурень був близький до 16 хв. Першими на станції API спостерігалися квазіперіодичні збурення, що мали час запізнювання 6 хв і були обумовлені акустичним резонансом з періодом 4.4 хв і амплітудою 2 нТл у полі сто-ячої хвилі. Час запізнювання інших груп квазіперіодичних коливань поступово збільшувався від 8.5 до 75 хв. Вдавані горизонтальні швидкості при цьому склали 4.0, 1.5, 1.0, 0.5, 0.31 і 0.2 км/с. Їм відповідають повільні магнітогідродинамічні хвилі, вибухова хвиля, атмосферна гравітаційна хвиля, хвиля Лемба та цунамі. Зі збільшенням відстані від вулкану спостерігалася тенденція до збільшення часу запізнювання збурень у кожній групі, що свідчило про вулканічне походження магнітних збурень.

**Висновки.** Збурення геомагнітного поля у ближній зоні (до 1 тис. км від вулкану) відрізнялися якісно та кількісно від збурень на більших відстанях (3...5 тис. км).

**Ключові слова:** вулкан Тонга, ближня зона, геомагнітне поле, бухтоподібне збурення, квазіперіодичне збурення, час запізнювання, удавана швидкість, механізм збурення.

### Вступ

Вибух підводного вулкану Тонга, що знаходиться в Тихому океані на глибині близько 150 м, о 04:15 UT 15 січня 2022 р. призвів до значних збу-

рень літосфери, Світового океану, атмосфери, іоносфери, магнітосфери та геофізичних полів (баричного, магнітного, електричного) [1–16].

Вулкан Тонга разом з вулканами Кракатау, Пі-натубо, Св. Олени і Ель-Чічон належить до п'я-

---

Ц и т у в а н н я: Черногор Л.Ф. Збурення геомагнітного поля у ближній зоні, згенеровані унікальним вибухом вулкану Тонга 15 січня 2022 року. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2026. Т. 31. № 1. С. 11–25. <https://doi.org/10.15407/rpra31.01.011>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2026



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>)

тірки найбільш потужних вулканів світу. Для вулкану Тонга індекс  $VEI \approx 5.8$ . За 12 год вулкан викинув у атмосферу близько  $2.9 \text{ Гт}$  продуктів об'ємом  $1.9 \text{ км}^3$  [6]. Унікальність вибуху вулкану полягає в тому, що продукти викиду піднялися на рекордну висоту в  $58 \text{ км}$  [1, 2, 6, 13, 15, 16]. Теплова енергія оцінена в  $3.9 \text{ ЕДж}$ , а потужність в  $9.1 \text{ ТВт}$  [6]. Енергія вибуху, за даними різних авторів, змінювалася у широких межах: від еквівалентної вибухам  $4 \dots 18 \text{ Мт ТНТ}$  [2] до  $478 \pm 191 \text{ Мт ТНТ}$  [1, 13]. Автор [6] — як і прийнято — оцінює її як еквівалентну вибуховій енергії певної кількості вибухівки:  $16 \dots 18 \text{ Мт ТНТ}$ .

Опису ефектів вибуху вулкану на поверхні Світового океану, в літосфері, атмосфері, іоносфері та магнітосфері присвячено більше 40 робіт. Автори [7] дослідили сейсмічний ефект від вибуху вулкану, що супроводжувався землетрусом з магнітудою  $M \approx 5.8$ . У роботах [4, 8–12] описано ефекти цунамі, викликані вибухом вулкану. Хвильовим процесам у атмосфері, згенерованим вибухом вулкану, присвячено роботи [3, 13–19]. Хвилі на висотах іоносфери вивчалися авторами [20–25].

Геоманітні ефекти вулкану Тонга досліджувалися у низці робіт [26–31]. Так, автори [28] описали коливання рівня  $Y$ -компоненти поля з періодом  $T \approx 4 \text{ хв}$  і амплітудою  $\sim 3 \text{ нТл}$ .

У роботах [26, 29] досліджувалися коливання з  $T \approx 4.4 \text{ хв}$  поблизу вулкану (відстань  $r \approx 840 \text{ км}$ ) і магнітоспряженої області. Амплітуда коливань складала відповідно  $\sim 2$  та  $\sim 0.2 \text{ нТл}$ .

Автори [27] вивчали коливання рівня геоманітного поля з періодами  $3 \dots 8$ ,  $13 \dots 93$  та  $5 \dots 100 \text{ хв}$ . Ці коливання вони пов'язують з поширенням хвиль у атмосфері й іоносфері та цунамі, згенерованих вибухом вулкану Тонга.

У роботі [1] стверджується, що мали місце дві групи збурень геоманітного поля. Перша із них реєструвалася безпосередньо після вибуху вулкану, а друга група збурень поширювалася зі швидкістю атмосферних гравітаційних хвиль (АГХ).

Автори [30, 31] виявили шість груп глобальних збурень магнітного поля, які могли бути пов'язані з вибухом вулкану Тонга. Перенесення збурень від станції Аріа (API, Західне Самоа) до магнітоспряженої станції Хонolulu (HON, США) відбувалося зі швидкістю  $\sim 1000 \text{ км/с}$  за допомогою магнітогідродинамічних (МГД) хвиль. Збу-

рення зі швидкостями  $4.0$  та  $1.5 \text{ км/с}$  поширювалися за допомогою повільних МГД-хвиль [32, 33]. Швидкості  $\sim 1 \text{ км/с}$ ,  $\sim 500$ ,  $\sim 310$  і  $\sim 200 \text{ м/с}$  мали вибухова хвиля, АГХ, хвиля Лемба та цунамі, відповідно.

У роботі автора [6] теоретично досліджено велику кількість фізичних ефектів вибуху вулкану Тонга у літосфері, Світовому океані, атмосфері, іоносфері та магнітосфері, а також у геофізичних полях. Результати моделювання порівнювалися з результатами спостережень.

Актуальним є подальше дослідження особливостей варіацій геоманітного поля та їхніх похідних, згенерованих у ближній зоні унікальним вибухом вулкану Тонга 15 січня 2022 р., та порівняння ефектів у ближній зоні з ефектами на більших відстанях.

## 1. Методи та засоби досліджень

Для аналізу часових варіацій рівня геоманітного поля використано дані реєстрації трьох компонент ( $X$ ,  $Y$  і  $Z$ ) та їхніх похідних ( $\dot{X}$ ,  $\dot{Y}$  і  $\dot{Z}$ ), отримані геоманітними обсерваторіями (станціями) мережі INTERMAGNET (International Real-time Magnetic Observatory Network, <https://www.intermagnet.org>). Похибка вимірювань не перевищувала  $0.1 \text{ нТл}$ ; роздільна здатність складала  $1 \text{ хв}$ . За первинними даними для кожної доби обчислювали ковзний тренд, знаходили різницю між вихідними часовими варіаціями та трендом і надалі аналізували саме цю різницю. Відомості про місце розташування геоманітних станцій наведені у табл. 1.

Найближча до вулкану станція Аріа (API) знаходиться на відстані  $r \approx 840 \text{ км}$ . Саме її дані використано для аналізу часових варіацій рівня геоманітного поля у ближній зоні. Найбільш віддаленою у магнітоспряженої області є станція Хонolulu (HON),  $r \approx 5024 \text{ км}$ . Для порівняння збурень у ближній зоні зі збуреннями на більш віддалених станціях розглядалися дані, отримані на станціях Раматаї/Пареєте (PPT,  $r \approx 2730 \text{ км}$ ), Ейрвелл (EYR,  $r \approx 2790 \text{ км}$ ) та Чартерс Тауерс (СТА,  $r \approx 3990 \text{ км}$ ). Перша з них знаходиться на схід, друга — на південь, а третя — на захід від вулкану. Станція HON розташована на північ від джерела збурень.

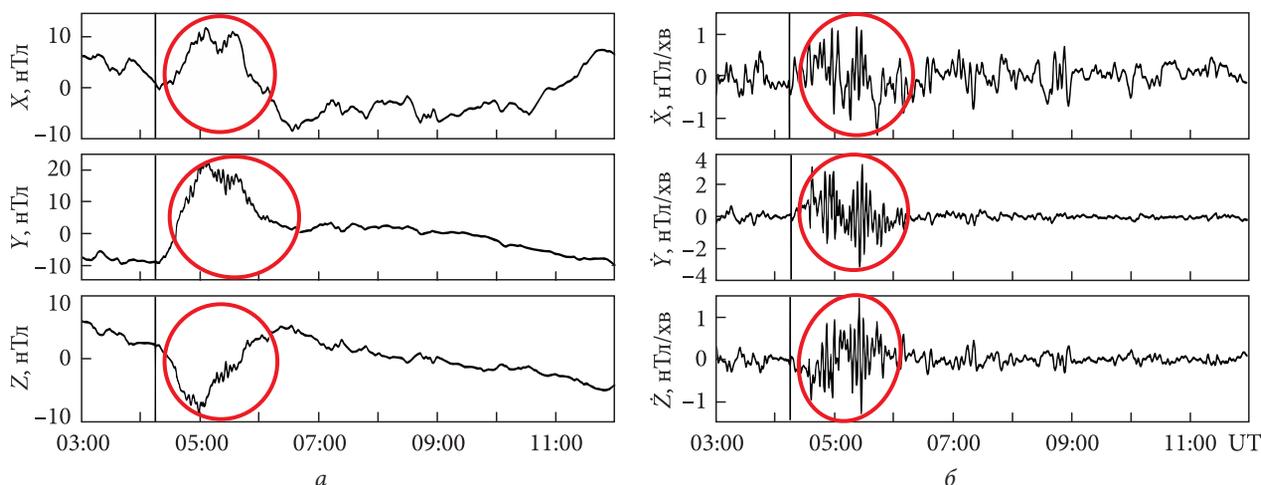


Рис. 1. Часові варіації рівня компонент геомагнітного поля (а) та їхніх похідних (б) у день вибуху вулкану Тонга 15 січня 2022 р. на станції API. Вертикальною лінією показано момент вибуху вулкану

Таблиця 1. Геомагнітні станції мережі INTERMAGNET, задіяні у дослідженні

Назва станції	Координати		Країна	Відстань до вулкану, км
	Широта	Довгота		
Aria (API)	13.8155° S	171.7812° W	Західне Самоа	840
Pamatai/Papeete (PPT)	17.5670° S	149.5740° W	Французька Полінезія	2730
Eyrewell (EYR)	43.4740° S	172.3930° E	Нова Зеландія	2790
Charters Towers (CTA)	20.0900° S	146.2640° E	Австралія	3990
Honolulu (HON)	21.3200° N	158.0000° W	Сполучені Штати Америки	5024

До аналізу часових варіацій компонент і їхніх похідних було вивчено стан космічної погоди [24, 25]. Важливо, що 14 січня 2022 р., тобто напередодні вибуху вулкану, реєструвалася помірна магнітна буря з  $K_p \approx 5.7$  і  $D_{stmin} \approx -91$  нТл (клас G2). День 15 січня був практично магнітоспокійним, що дозволило виявити ефекти вибуху вулкану Тонга.

Варіації компонент геомагнітного поля та їхніх похідних було проаналізовано для 12–18 січня 2022 р. Як контрольні було обрано найбільш спокійні дні, а саме 13 та 17 січня 2022 р.

## 2. Аналіз часових варіацій рівня компонент геомагнітного поля та їхніх похідних

Попередній аналіз часових варіацій  $X(t)$ ,  $Y(t)$ ,  $Z(t)$  та  $\dot{X}(t)$ ,  $\dot{Y}(t)$ ,  $\dot{Z}(t)$  показав, що характер варіацій 15 січня 2022 р. та у контрольні дні помітно відрізнявся. У контрольні дні варіації рівня бу-

ли більш плавними, а значення похідних помітно меншими.

*Станція API.* 15 січня 2022 р. із часом запізнювання  $\tau \approx 16$  хв майже синхронно спостерігалися бухтоподібні варіації усіх трьох компонент геомагнітного поля (рис. 1). Максимальні збурення сягали:  $\Delta X \approx 15$  нТл,  $\Delta Y \approx 28$  нТл, а  $\Delta Z \approx -13$  нТл. Їхня тривалість складала:  $\Delta T_X \approx 120$  хв,  $\Delta T_Y \approx 146$  хв і  $\Delta T_Z \approx 130$  хв. На ці, досить повільні, варіації наклалися більш швидкі флуктуації. Вони мали такі часи запізнювання:  $\Delta t_0 \approx 6$  хв,  $\Delta t_1 \approx 8.5$  хв,  $\Delta t_2 \approx 14$  хв,  $\Delta t_3 \approx 19$  хв,  $\Delta t_4 \approx 33$  хв,  $\Delta t_5 \approx 50$  хв,  $\Delta t_6 \approx 75$  хв (табл. 2). Приблизно з таким же часом запізнювання збільшувалися флуктуації похідних від  $\pm 0.5$  до  $\pm(1 \dots 3)$  нТл/хв.

У перший контрольний день 13 січня 2022 р. бухтоподібні збурення не спостерігалися (рис. 2). Флуктуації рівня не перевищували 1 нТл, а флуктуації похідних становили  $\pm(0.2 \dots 0.3)$  нТл/хв.

У другий контрольний день 17 січня 2022 р. синхронні бухтоподібні варіації компонент гео-

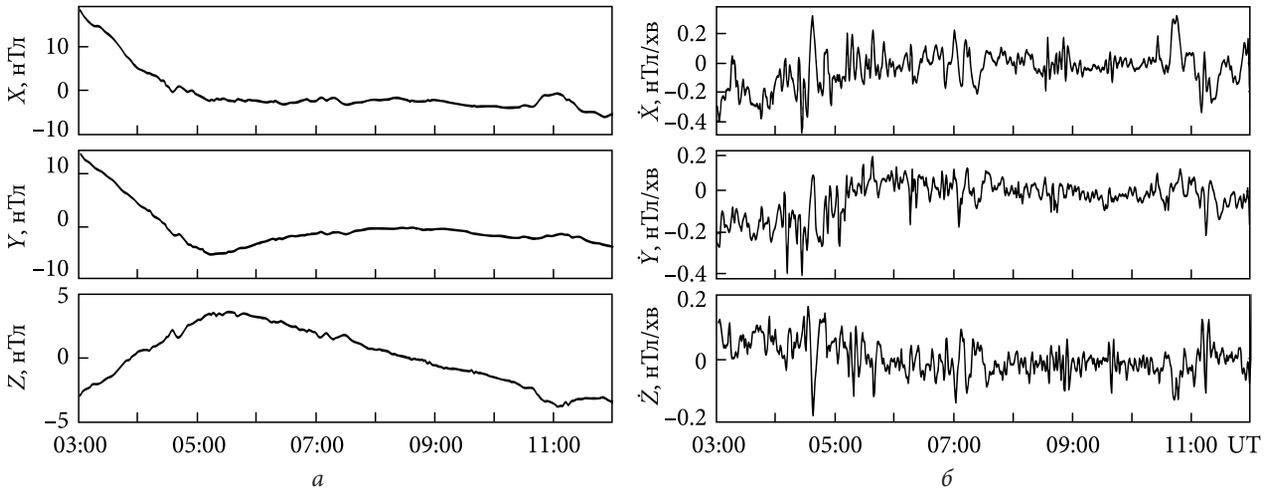


Рис. 2. Часові варіації рівня компонент геомагнітного поля (а) та їхніх похідних (б) у контрольний день 13 січня 2022 р. на станції API

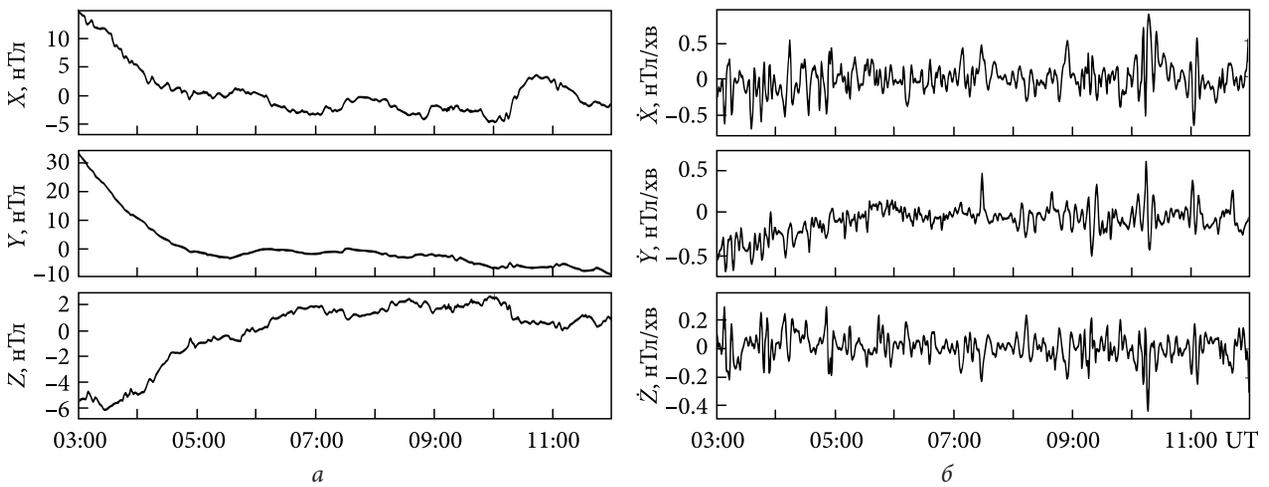


Рис. 3. Часові варіації рівня компонент геомагнітного поля (а) та їхніх похідних (б) у контрольний день 17 січня 2022 р. на станції API

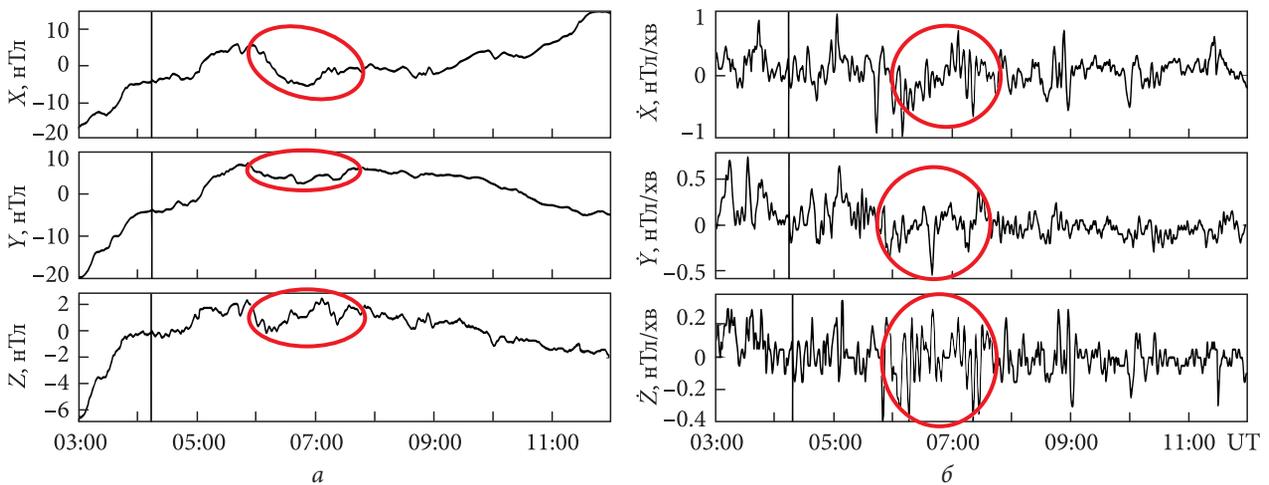


Рис. 4. Часові варіації рівня компонент геомагнітного поля (а) та їхніх похідних (б) у день вибуху вулкану Тонга 15 січня 2022 р. на станції HON. Вертикальною лінією показано момент вибуху вулкану

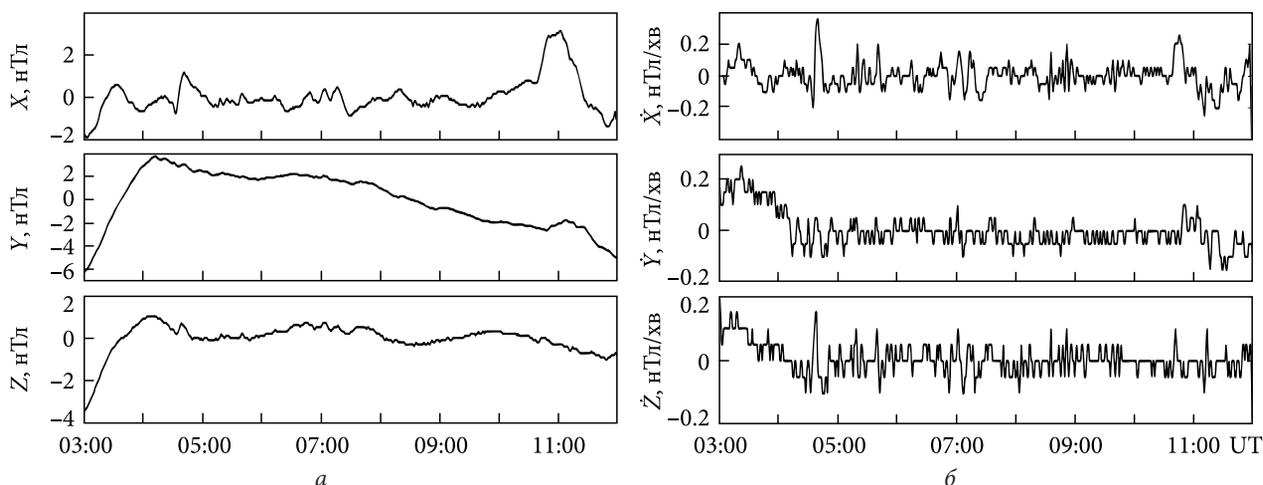


Рис. 5. Часові варіації рівня компонент геомагнітного поля (а) та їхніх похідних (б) у контрольний день 13 січня 2022 р. на станції HON

Таблиця 2. Параметри бухтоподібних збурень геомагнітного поля

Станція	$\Delta X$ , нТл	$\tau_X$ , хв	$\Delta T_X$ , хв	$\Delta Y$ , нТл	$\tau_Y$ , хв	$\Delta T_Y$ , хв	$\Delta Z$ , нТл	$\tau_Z$ , хв	$\Delta T_Z$ , хв
API	15	16	120	28	16	146	-13	16	130
PPT	7	36	91	7	36	91	7	36	91
EYR	-40	86	86	-25	51	154	-25	51	120
STA	-18	117	65	-63	83	167	-30	65	167
HON	-10	100	100	-5	100	100	-2	100	100

магнітного поля були відсутні (рис. 3). Флуктуації рівня всіх компонент були у межах  $\pm 1$  нТл, а для похідних — у межах  $\pm(0.3 \dots 0.5)$  нТл/хв.

**Станція HON.** У день вибуху вулкану перше помітне збурення квазіперіодичного типу ( $T \approx 4.4$  хв, амплітуда  $\sim 0.2 \dots 0.3$  нТл) спостерігалось з  $\Delta t_0 \approx 6$  хв (рис. 4). Інші збурення з амплітудою  $1 \dots 2$  нТл мали такий час запізнювання:  $\Delta t_1 \approx 26$  хв,  $\Delta t_2 \approx 61$  хв,  $\Delta t_3 \approx 89$  хв,  $\Delta t_4 \approx 173$  хв,  $\Delta t_5 \approx 272$  хв,  $\Delta t_6 \approx 424$  хв (див. табл. 2). Бухтоподібне збурення з  $\Delta X \approx -10$  нТл,  $\Delta Y \approx -5$  нТл та  $\Delta Z \approx -2$  нТл спостерігалось з 06:00 до 07:10–07:30. Значення похідних сягали  $\pm(0.5 \dots 1)$  нТл/хв.

У контрольні дні не спостерігалися синхронні бухтоподібні варіації (рис. 5 та 6). Флуктуації рівня були плавними і не перевищували  $\sim 1$  нТл. Флуктуації похідних перебували у межах  $\pm(0.2 \dots 0.3)$  нТл/хв.

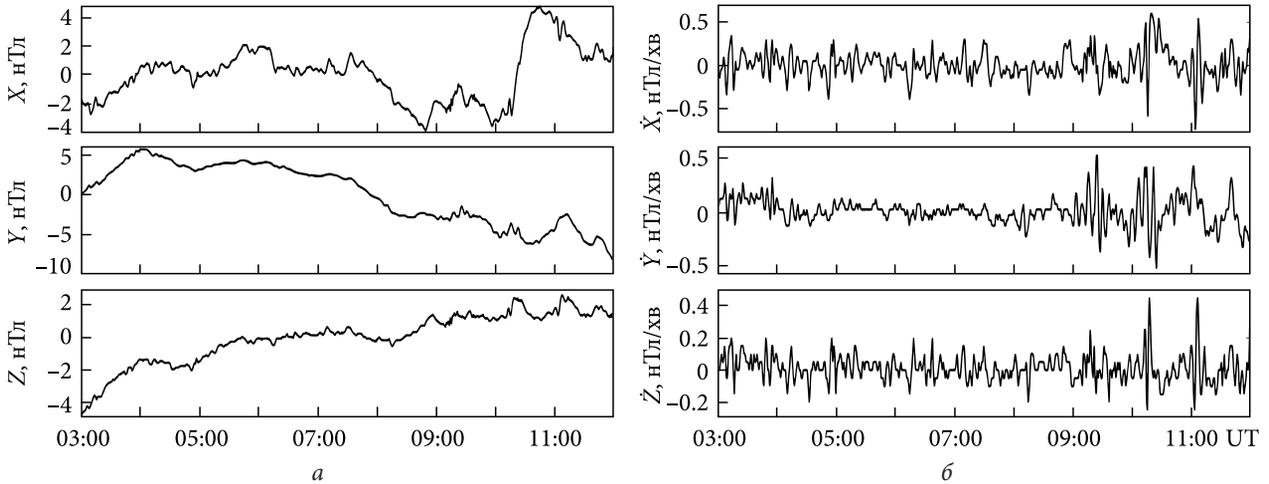
**Станція EYR.** 15 січня 2022 р. бухтоподібні майже синхронні зменшення  $\Delta X \approx -40$  нТл,  $\Delta Y \approx -25$  нТл та  $\Delta Z \approx -25$  нТл мали місце в інтервалі часу 05:00–07:15 (рис. 7). Крім того, на порівняно повільні варіації компонент геомагнітного

поля наклалися варіації з квазіперіодом  $5 \dots 15$  хв. Вони мали такий час запізнювання:  $\Delta t_1 \approx 15$  хв,  $\Delta t_2 \approx 38$  хв,  $\Delta t_3 \approx 50$  хв,  $\Delta t_4 \approx 97$  хв,  $\Delta t_5 \approx 155$  хв,  $\Delta t_6 \approx 240$  хв (див. табл. 2). Варіації похідних також були практично синхронними та перебували у межах  $\pm(1 \dots 2)$  нТл/хв.

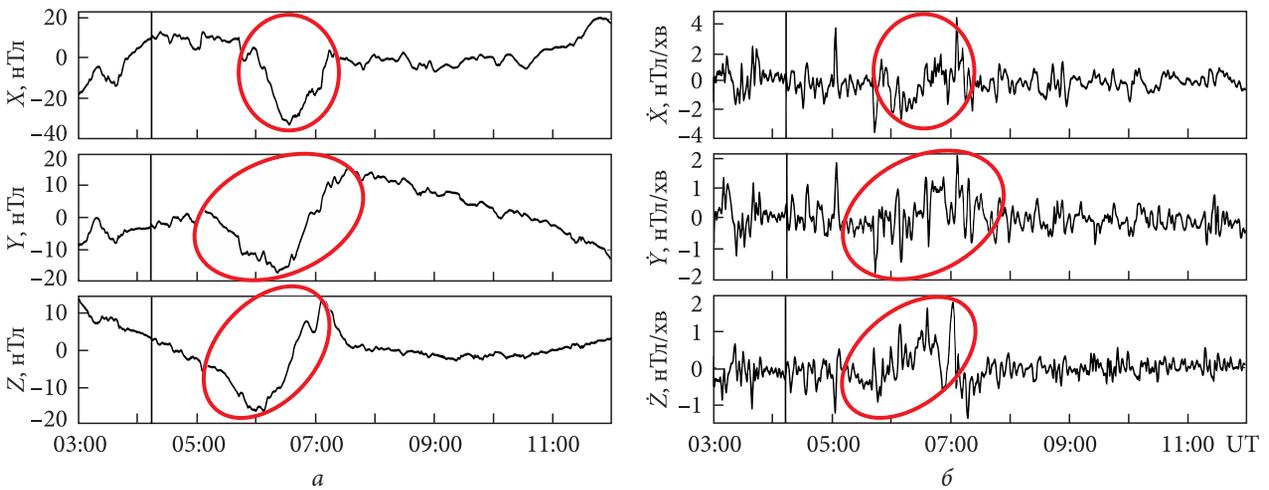
13 січня 2022 р. синхронні бухтоподібні збурення не спостерігалися, рівень більш швидких флуктуацій не перевищував 10 нТл (рис. 8). Доволі високочастотні флуктуації мали місце лише для X-компоненти. Рівень флуктуацій похідних рідко перевищував  $\pm(0.4 \dots 0.5)$  нТл/хв.

17 січня 2022 р. спостерігалися деякі збурення (рис. 9). Варіації всіх компонент сягали  $\pm(4 \dots 6)$  нТл, проте вони були досить повільними (з характерним часом не менше  $10 \dots 20$  хв). Флуктуації похідних часом сягали  $\pm(1 \dots 1.5)$  нТл/хв для X-компоненти,  $\pm(1.0 \dots 1.5)$  нТл/хв для Y-компоненти та  $\pm(0.7 \dots 1)$  нТл/хв для Z-компоненти.

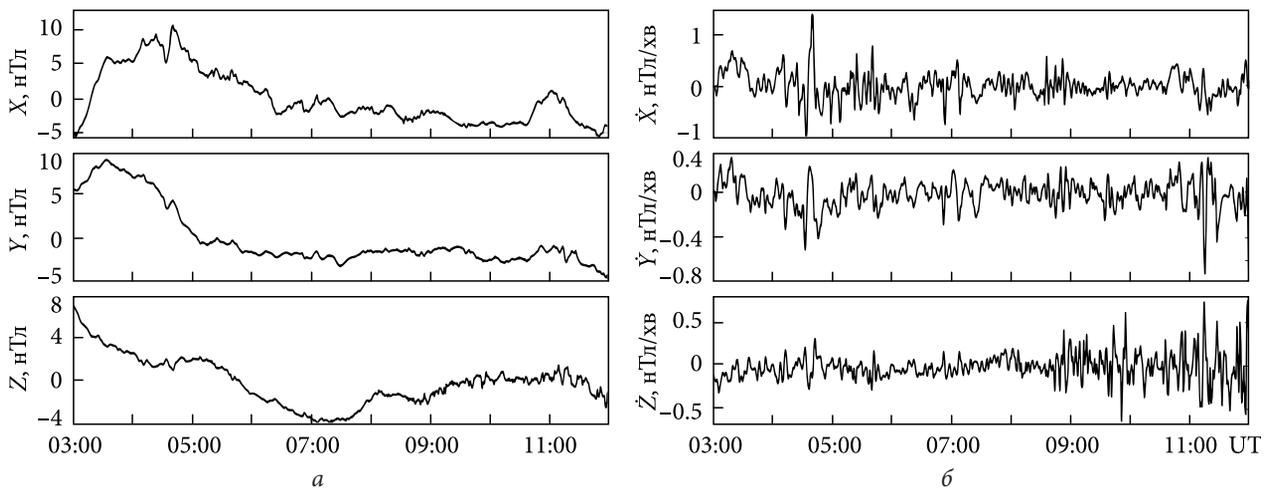
**Станція PPT.** У день вибуху вулкану бухтоподібні збурення були не зовсім синхронними та незначними ( $\Delta X \approx 7 \dots 8$  нТл,  $\Delta Y \approx 7 \dots 8$  нТл та  $\Delta Z \approx 5 \dots 7$  нТл, рис. 10). Крім цих повільних



**Рис. 6.** Часові варіації рівня компонент геомагнітного поля (а) та їхніх похідних (б) у контрольний день 17 січня 2022 р. на станції HON



**Рис. 7.** Часові варіації рівня компонент геомагнітного поля (а) та їхніх похідних (б) у день вибуху вулкану Тонга 15 січня 2022 р. на станції EYR. Вертикальною лінією показано момент вибуху вулкану



**Рис. 8.** Часові варіації рівня компонент геомагнітного поля (а) та їхніх похідних (б) у контрольний день 13 січня 2022 р. на станції EYR

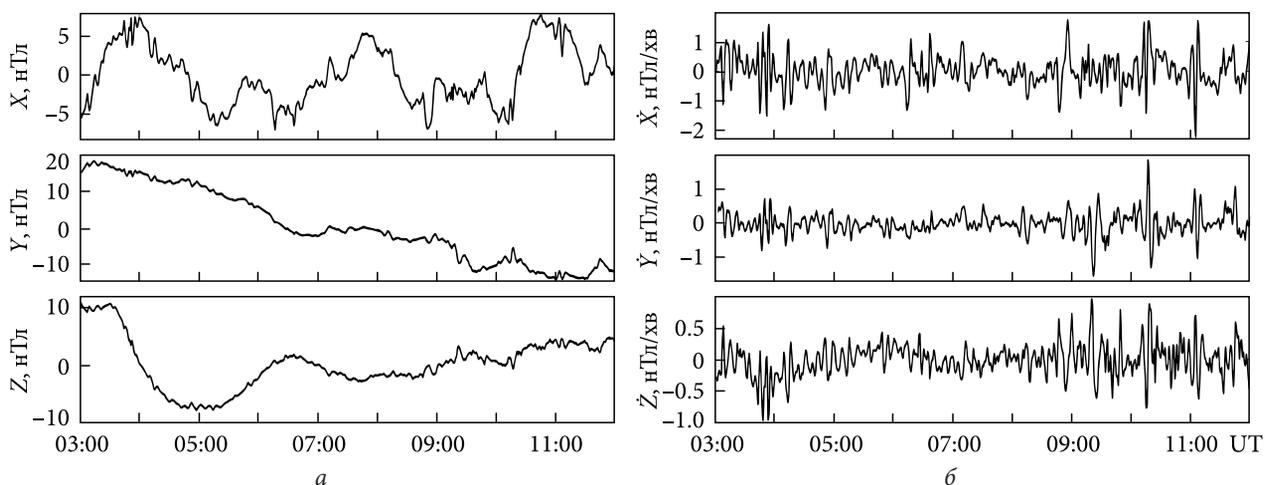


Рис. 9. Часові варіації рівня компонент геомагнітного поля (а) та їхніх похідних (б) у контрольний день 17 січня 2022 р. на станції EYR

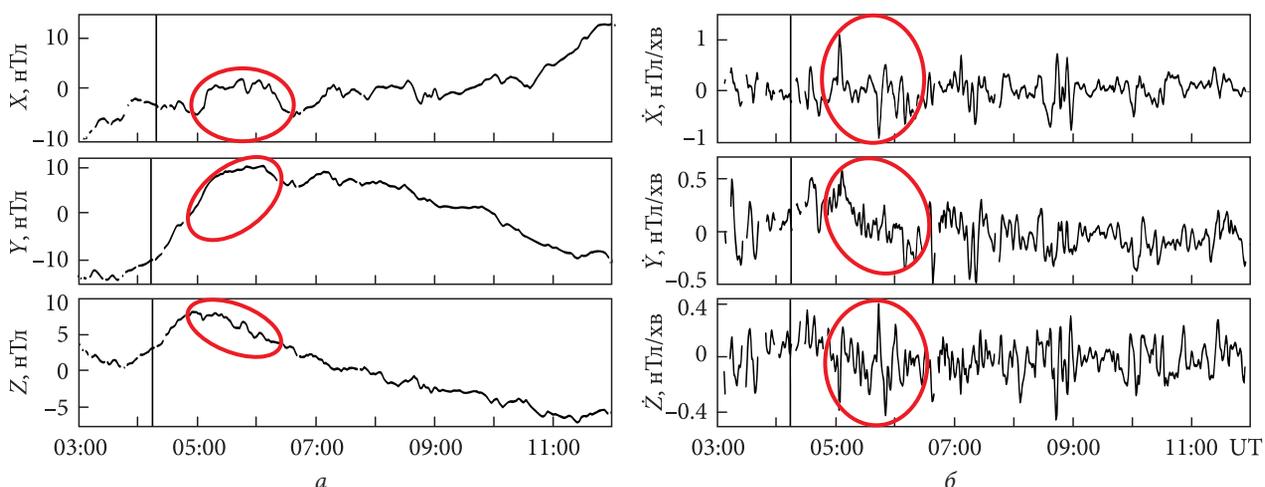


Рис. 10. Часові варіації рівня компонент геомагнітного поля (а) та їхніх похідних (б) у день вибуху вулкану Тонга 15 січня 2022 р. на станції PPT. Вертикальною лінією показано момент вибуху вулкану

(1...2 год) збурень, мали місце невеликі збурення з амплітудою  $\sim 1$  нТл та часом запізнювання  $\Delta t_1 \approx 16$  хв,  $\Delta t_2 \approx 37$  хв,  $\Delta t_3 \approx 50$  хв,  $\Delta t_4 \approx 96$  хв,  $\Delta t_5 \approx 150$  хв,  $\Delta t_6 \approx 235$  хв (див. табл. 2). Флуктуації похідної  $\dot{X}$  сягали  $\pm(0.5...1.0)$  нТл/хв, для  $\dot{Y}$  і  $\dot{Z}$  вони не перевищували  $\pm 0.5$  нТл/хв.

У контрольні дні бухтоподібні збурення не були синхронними, а величина флуктуацій не перевищувала  $5...10$  нТл (рис. 11 та 12). Часові варіації  $Y$ - і  $Z$ -компонент були досить плавними ( $\dot{Y} \approx \pm(0.1...0.2)$  нТл/хв,  $\dot{Z} \approx \pm(0.1...0.2)$  нТл/хв); водночас варіації  $\dot{X}$  сягали  $\pm(0.5...1.0)$  нТл/хв.

Станція СТА. 15 січня 2022 р. приблизно з 06:00 до 08:00 мали місце майже синхронні бухтоподібні збурення з  $\Delta X \approx -(15...18)$  нТл,  $\Delta Y \approx -(40...50)$  нТл,  $\Delta Z \approx -(20...30)$  нТл (рис. 13). Ва-

ріації  $X(t)$  мали такий час запізнювання:  $\Delta t_1 \approx 22$  хв,  $\Delta t_2 \approx 49$  хв,  $\Delta t_3 \approx 71$  хв,  $\Delta t_4 \approx 137$  хв,  $\Delta t_5 \approx 217$  хв,  $\Delta t_6 \approx 338$  хв (див. табл. 2). Варіації  $\dot{X}$  сягали  $\pm(1...2)$  нТл/хв. Для  $\dot{Y}$  і  $\dot{Z}$  вони також не перевищували  $\pm 1$  нТл/хв.

У контрольні дні 13 та 17 січня 2022 р. синхронні бухтоподібні варіації не спостерігалися (рис. 14 та 15). Повільні варіації не перевищували  $5...10$  нТл. Флуктуації  $\dot{Y}$  і  $\dot{Z}$  були в межах  $\pm 0.5$  нТл/хв, а флуктуації  $\dot{X}$  сягали  $\pm(0.5...1.0)$  нТл/хв.

### 3. Обговорення

Параметри бухтоподібних збурень наведено у табл. 2. Згідно з даними цієї таблиці, найбільші синхронні збурення мали місце у ближній

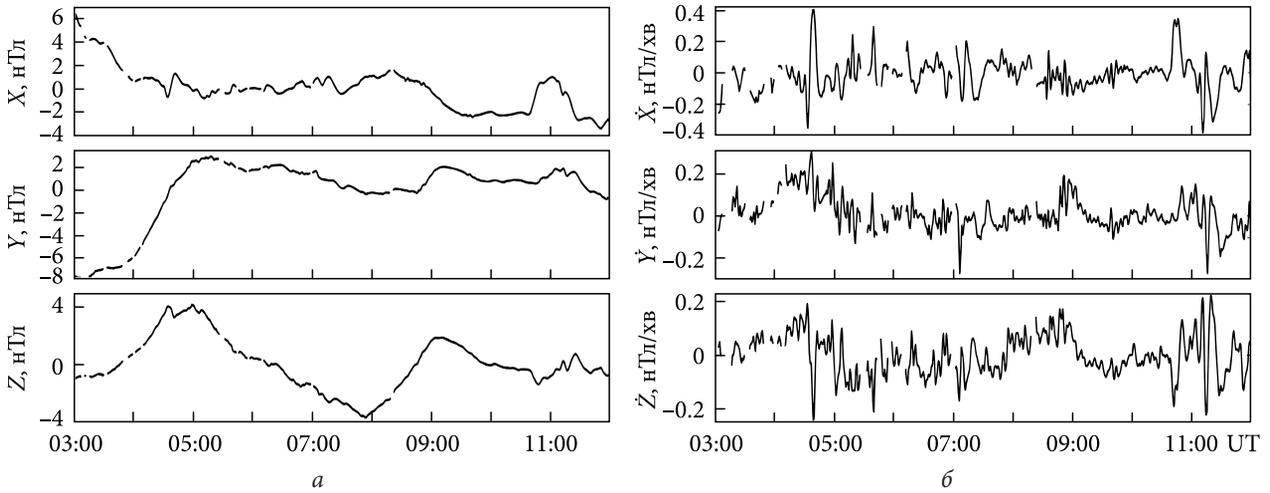


Рис. 11. Часові варіації рівня компонент геомагнітного поля (а) та їхніх похідних (б) у контрольний день 13 січня 2022 р. на станції PPT

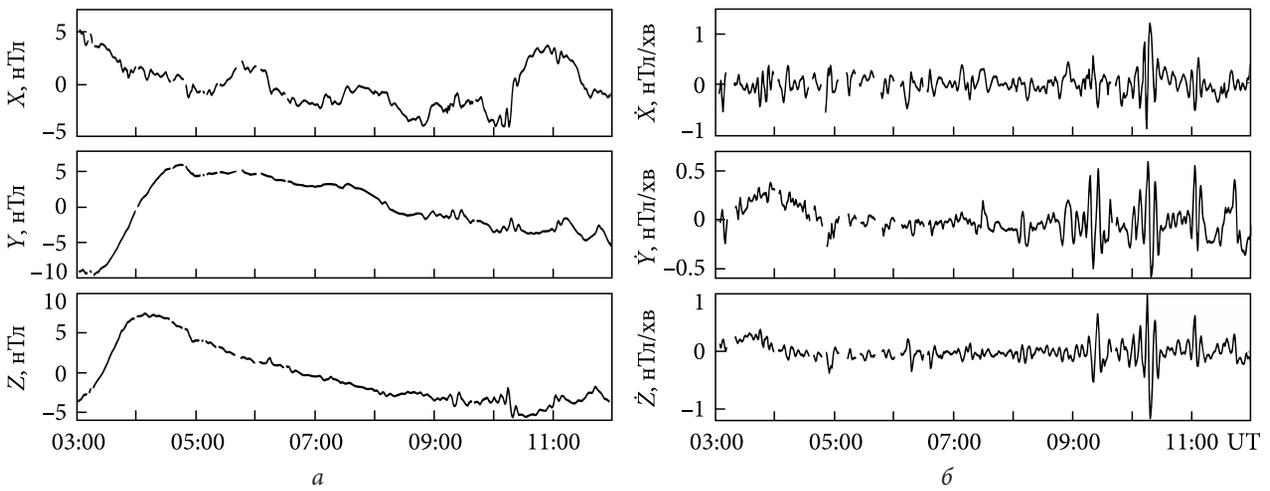


Рис. 12. Часові варіації рівня компонент геомагнітного поля (а) та їхніх похідних (б) у контрольний день 17 січня 2022 р. на станції PPT

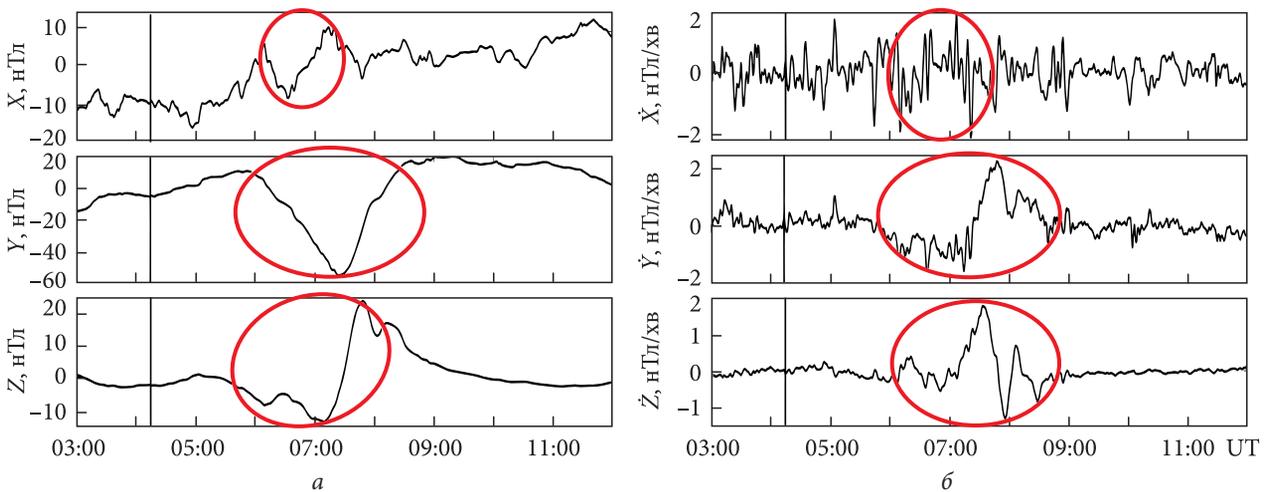


Рис. 13. Часові варіації рівня компонент геомагнітного поля (а) та їхніх похідних (б) у день вибуху вулкану Тонга 15 січня 2022 р. на станції СТА. Вертикальною лінією показано момент вибуху вулкану

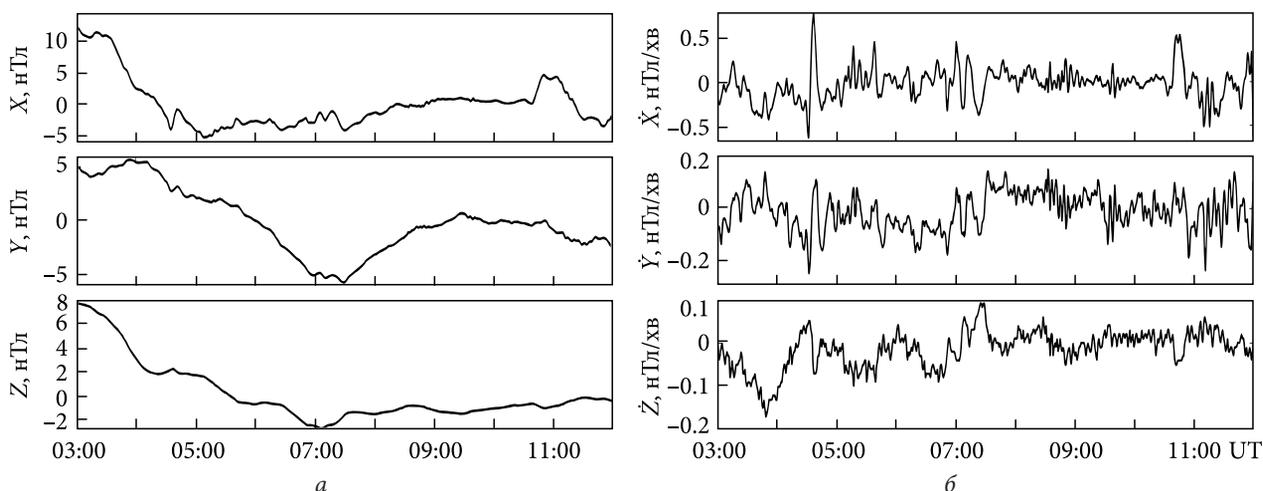


Рис. 14. Часові варіації рівня компонент геомагнітного поля (а) та їхніх похідних (б) у контрольний день 13 січня 2022 р. на станції СТА

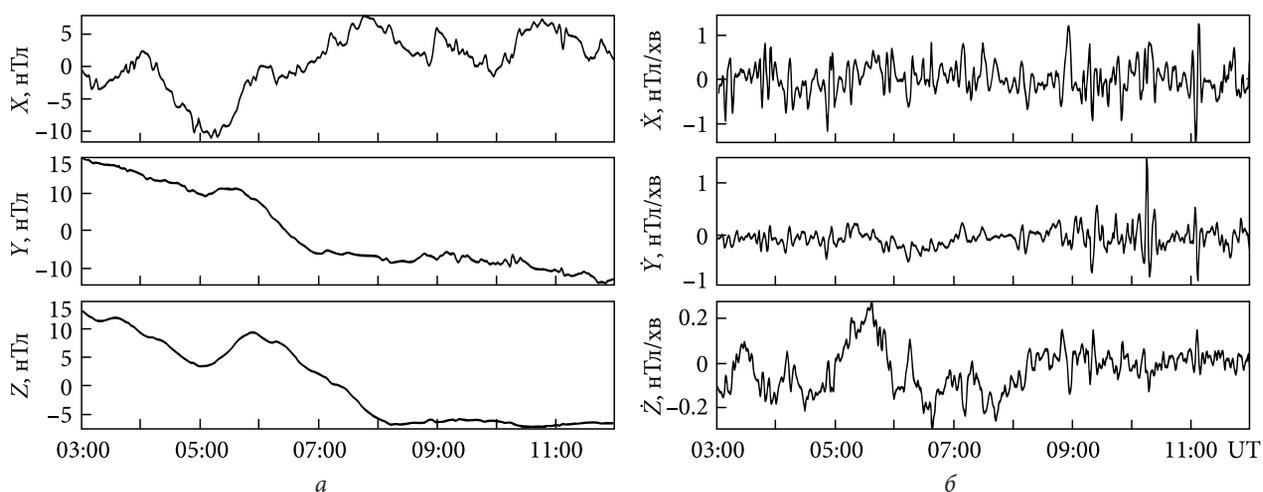


Рис. 15. Часові варіації рівня компонент геомагнітного поля (а) та їхніх похідних (б) у контрольний день 17 січня 2022 р. на станції СТА

зоні, тобто на станції АРІ. Значення  $\Delta Y$  сягали 28 нТл, а  $\Delta X$  і  $|\Delta Z|$  були вдвічі меншими. Тривалість бухтоподібних збурень варіювала у межах 120...146 хв.

На станціях EYR, СТА, HON значення збурень були від'ємними та меншими за абсолютною величиною. На станції PPT бухтоподібні збурення спостерігалися невпевнено. Швидше за все, вони були викликані не вибухом вулкану. Це пояснюється тим, що станція перебувала на нічному боці, де концентрація електронів і густина іоносферного струму на висотах динамо-області атмосфери були на порядок-півтора порядку менше, ніж на денному боці. Саме ця область відповідає за параметри магнітних збурень.

Інша особливість магнітного ефекту у ближній зоні полягає у тому, що перше збурення мало найменший час запізнювання (6 хв) і найменший період квазіперіодичних збурень ( $T \approx 4.4$  хв) та тривалість близько 30...35 хв. Це коливання обумовлене генерацією акустичного резонансу у полі стоячої хвилі, що виникла в результаті вибуху вулкану [26, 29]. Амплітуда магнітного коливання складала  $\sim 2$  нТл. Оскільки відбиття стоячої хвилі мало місце на висоті  $z_r \approx \bar{v}_s \Delta t_0 \approx 110...120$  км ( $\bar{v}_s \approx 300...330$  м/с — середня швидкість звуку), тобто в динамо-області атмосфери, збурення з альфвенівською швидкістю  $v_A \approx 1000$  км/с поширювалося в магнітоспряжену область уздовж магнітної силової трубки довжиною  $\sim 10$  тис. км.

Таблиця 3. Час запізнювання та вдавана швидкість збурень геомагнітного поля

Станція	$\Delta t_1$ , хв	$v'_1$ , м/с	$\Delta t_2$ , хв	$v'_2$ , м/с	$\Delta t_3$ , хв	$v'_3$ , м/с	$\Delta t_4$ , хв	$v'_4$ , м/с	$\Delta t_5$ , хв	$v'_5$ , м/с	$\Delta t_6$ , хв	$v'_6$ , м/с
API	8.5	4000	14	1560	19	1000	33	500	50	311	75	200
PPT	16	4100	37	1420	50	1011	96	500	150	314	235	198
EYR	17	3875	38	1410	50	1033	97	505	155	310	240	200
СТА	22	3900	49	1510	71	1008	137	504	217	314	338	200
HON	26	4000	61	1490	89	1000	173	498	272	313	424	200

Насправді, магнітне збурення з часом запізнювання  $\Delta t_0 \approx 6$  хв було зареєстроване на станції HON. Звичайно, його амплітуда була на порядок меншою, ніж на станції API.

Наступна особливість магнітного ефекту у ближній зоні полягає в тому, що найбільші флуктуації похідних  $\dot{X}$ ,  $\dot{Y}$  і  $\dot{Z}$  мали місце в інтервалі часу 04:21–05:40. Рівень флуктуацій похідних  $\dot{X}$  і  $\dot{Z}$  сягав  $\pm 2$  нТл/хв, а для  $\dot{Y}$  — навіть  $\pm (2.5 \dots 3)$  нТл/хв. На більш віддалених станціях ці флуктуації були помітно меншими.

Характер варіацій геомагнітного поля змінювався до шести разів після вибуху вулкану та в найближчі декілька годин. Це могло свідчити, що кожному часу запізнювання відповідала своя вдавана горизонтальна швидкість перенесення збурень, а отже, і свій тип хвиль. Установлено, що активність вулкану Тонга 15 січня 2022 р. супроводжувалася генерацією хвиль різної фізичної природи, а саме сейсмічної [7], цунамі [4, 8–12], вибухової [3, 15, 16], інфразвуку [1, 15, 16], звуку [15, 16], атмосферних гравітаційних хвиль [5, 23], хвилі Лемба [9, 14–18].

Крім того, мали місце перетворення і генерація нових хвиль. Так, хвиля цунамі породжувала атмосферні хвилі зі швидкістю цунамі ( $\sim 200$  м/с) [4, 8, 10–12] і, навпаки, атмосферні хвилі зі швидкістю  $\sim 350$  м/с породжували більш швидку хвилю цунамі [9]. Вибух вулкану генерував швидкі МГД-хвилі з  $v_A \sim 1000$  км/с та повільні МГД-хвилі зі швидкістю в одиниці кілометрів за секунду [32, 33].

Значення часу запізнювання та удаваної швидкості наведено в табл. 3. Аналіз даних цієї таблиці свідчить, що збурення могли мати швидкості 4.0, 1.5, 1.0 км/с та  $\sim 500$ ,  $\sim 310$ ,  $\sim 200$  м/с. Перші дві швидкості властиві повільним МГД-хвилям. Швидкість  $v \approx 1$  км/с має вибухова хвиля. Швидкість  $\sim 500$  м/с характерна для атмосферної гравітаційної хвилі. Швидкість  $\sim 310$  м/с має хвиля

Лемба, а  $v \approx 200$  м/с властива цунамі за середньої глибини океану  $\sim 4$  км.

Підтвердженням того, що бухтоподібні та інші групи збурень викликані вибухом вулкану, є збільшення часу запізнювання та тривалості збурень зі збільшенням відстані від вулкану.

Розглянемо механізми генерації збурень магнітного поля. Хвилі різної фізичної природи модулюють густину атмосфери на висотах динамо-області. Водночас з таким самим періодом модулюється концентрація електронів і масова швидкість частинок у полі хвилі, а також густина як іоносферного, так і стороннього струмів. Згідно з роторним рівнянням Максвелла

$$\text{rot } \vec{B} = \mu_0 \vec{j},$$

де  $\vec{B}$  — вектор індукції згенерованого поля;  $\mu_0$  — магнітна стала;  $\vec{j}$  — густина стороннього або збурення іоносферного струму, поява електричного струму призводить до виникнення магнітного ефекту. На відміну від квазіперіодичних збурень, бухтоподібне збурення пов'язане з генерацією іоносферної «діри», у результаті чого на висотах динамо-області атмосфери зменшувалися концентрація електронів і густина іоносферного струму, що і послужило причиною аперіодичного збурення геомагнітного поля [31].

Оцінки квазіперіодичного та аперіодичного ефектів наведено у роботах [30, 31].

## Висновки

Аналіз результатів дослідження геомагнітного ефекту в ближній зоні, який супроводжував потужний вибух вулкану Тонга, виявив такі його особливості:

1. Активність вулкану призвела до генерації аперіодичного бухтоподібного збурення та низки квазіперіодичних збурень, які спостерігалися впродовж не менше 2...3 год.

2. Бухтоподібні синхронні збурення в X-, Y- і Z-компонентах на станції API склали відповідно 15, 28 і –13 нТл і тривали 120...146 хв. Механізм їхньої генерації пов'язаний із утворенням під дією вибухової хвилі іоносферної «діри». Час запізнювання бухтоподібних збурень був близький до 16 хв.

3. Першими на станції API спостерігалися збурення, що мали час запізнювання 6 хв і були обумовлені акустичним резонансом з періодом 4.4 хв та амплітудою 2 нТл у полі стоячої хвилі. Радіус резонансно збуреної магнітної силової трубки перевищував 840 км. Резонансний магнітний ефект меншої інтенсивності спостерігався і в магнітоспряженій області на станції HON.

4. Крім резонансних, мали місце інші групи квазіперіодичних коливань, час запізнювання яких поступово збільшувався від 8.5 до 75 хв. Вдавані горизонтальні швидкості при цьому склали 4.0, 1.5, 1.0, 0.5, 0.31 і 0.2 км/с. Таким значенням швидкості відповідають повільні МГД-хвилі, вибухова хвиля, атмосферна гравітаційна хвиля, хвиля Лемба та цунамі.

5. Зі збільшенням відстані від вулкану спостерігалася тенденція до збільшення часу запізнювання збурень у кожній групі, що свідчить про вулканічне походження магнітних збурень.

6. Бухтоподібні збурення всіх компонент на станціях EYR, STA та HON мали від'ємне значення, в той час як у ближній зоні на станції API збурення горизонтальних компонент були додатними.

**Підтримка та подяки.** Автор вдячний аспірантці Марії Голуб за допомогу в обробці даних спостережень, а науковому співробітнику, доктору філософії Євгену Жданку — за допомогу в оформленні рукопису.

Дослідження автора були проведені в рамках проекту Національного фонду досліджень України (2025.07/0402 «Варіації атмосферно-космічної погоди, стимульовані потужними природними та техногенними джерелами»). Робота виконувалась за часткової підтримки держбюджетної НДР, заданої МОН України (номер держреєстрації 0124U000478).

#### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Adushkin V.V., Rybnov Y.S., and Spivak A.A. Wave-Related, Electrical, and Magnetic Effects Due to the January 15, 2022 Catastrophic Eruption of Hunga Tonga–Hunga Haʻapai Volcano. *J. Volcanolog. Seismol.* 2022. Vol. 16, Iss. 4. P. 251–263. DOI: 10.1134/S0742046322040029
2. Astafyeva E., Maletkii B., Mikesell T.D., Munaibari E., Ravanelli M., Coisson P., Manta F., and Rolland L. The 15 January 2022 Hunga Tonga eruption history as inferred from ionospheric observations. *Geophys. Res. Lett.* 2022. Vol. 49, Iss. 10, id. e2022GL098827.
3. Burt S. Multiple airwaves crossing Britain and Ireland following the eruption of Hunga Tonga–Hunga Haʻapai on 15 January 2022. *Weather. Special Issue: The January 2022 eruption of Hunga Tonga–Hunga Haʻapai.* 2022. Vol. 77, Iss. 3. P. 76–81. DOI: 10.1002/wea.4182
4. Carvajal M., Sepúlveda I., Gubler A., and Garreaud R. Worldwide signature of the 2022 Tonga volcanic tsunami. *Geophys. Res. Lett.* 2022. Vol. 49, Iss. 6, id. e2022GL098153. DOI: 10.1029/2022GL098153
5. 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., and Liu J.-Y. Individual Wave Propagations in Ionosphere and Troposphere Triggered by the Hunga Tonga–Hunga Haʻapai Underwater Volcano Eruption on 15 January 2022. *Remote Sens.* 2022. Vol. 14, Iss. 9, id. 2179.
6. Chernogor L.F. Physical effects from the powerful Tonga volcanic eruption of January 15, 2022, in the Earth–atmosphere–ionosphere–magnetosphere system. *J. Atmos. Terr. Phys.* 2023. Vol. 253, id:106157. DOI: 10.1016/j.jastp.2023.106157
7. Poli P., and Shapiro N.M. Rapid Characterization of Large Volcanic Eruptions: Measuring the Impulse of the Hunga Tonga Haʻapai Explosion from Teleseismic Waves. *Geophys. Res. Lett.* 2022. Vol. 49, Iss. 8, id. e2022GL098123.
8. Imamura F., Suppasri A., Arikawa T., Koshimura S., Satake K., and Tanioka Y. Preliminary Observations and Impact in Japan of the Tsunami Caused by the Tonga Volcanic Eruption on January 15, 2022. *Pure Appl. Geophys.* 2022. Vol. 179. P. 1549–1560. DOI: 10.1007/s00024-022-03058-0
9. Kubota T., Saito T., and Nishida K. Global fast-traveling tsunamis driven by atmospheric Lamb waves on the 2022 Tonga eruption. *Science.* 2022. Vol. 377, Iss. 6601. P. 91–94. DOI: 10.1126/science.abo4364
10. Ramírez-Herrera M.T., Coca O., and Vargas-Espinosa V. Tsunami Effects on the Coast of Mexico by the Hunga Tonga–Hunga Haʻapai Volcano Eruption, Tonga. *Pure Appl. Geophys.* 2022. Vol. 179. P. 1117–1137. DOI: 10.1007/s00024-022-03017-9

11. Tanioka Y., Yamanaka Y., and Nakagaki T. Characteristics of the deep sea tsunami excited offshore Japan due to the air wave from the 2022 Tonga eruption. *Earth Planets Space*. 2022. Vol. 74, id. 61. DOI: 10.1186/s40623-022-01614-5
12. Terry J.P., Goff J., Winspear N., Bongolan V.P., and 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. Vol. 9, id. 24. DOI: 10.1186/s40562-022-00232-z
13. 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., Šepić J., Medvedev I.P., Gushchin R.A., Kopeikin V.M., Belikov I.B., Gubanova D.P., Karpov A.V. and 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 Appl. Geophys.* 2022. Vol. 179. P. 1533–1548. DOI: 10.1007/s00024-022-03046-4
14. 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. and 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. Vol. 49, Iss. 8, id. e2022GL098222.
15. 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., Astafeyeva 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., and Wilson D.C. Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga. *Science*. 2022. Vol. 377, Iss. 6601. P. 95–100. DOI: 10.1126/science.abo7063
16. 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 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., Astafeyeva 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., and Wilson D.C. Supplementary Materials for Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga. *Science*. 2022. Vol. 377, Iss. 6601. DOI: 10.1126/science.abo7063
17. Otsuka S. Visualizing Lamb waves from a volcanic eruption using meteorological satellite Himawari-8. *Geophys. Res. Lett.* 2022. Vol. 49, Iss. 8, id. e2022GL098324. DOI: 10.1029/2022GL098324
18. Zhang S.-R., Vierinen J., Aa E., Goncharenko L.P., Erickson P.J., Rideout W., Coster A.J. and Spicher A. 2022 Tonga Volcanic Eruption Induced Global Propagation of Ionospheric Disturbances via Lamb Waves. *Front. Astron. Space Sci.* 2022. Vol. 9, id. 871275.
19. Черногор Л.Ф., Шевелев М.Б. Статистичні характеристики вибухових хвиль у атмосфері, згенерованих супервулканом Тонга 15 січня 2022 р. *Космічна наука і технологія*. 2024. Т. 30, № 1(146). С. 66–79. DOI: 10.15407/knit2024.01.066
20. Aa E., Zhang S.-R., Erickson P.J., Vierinen J., Coster A.J., Goncharenko L.P., Spicher A., and Rideout W. Significant Ionospheric Hole and Equatorial Plasma Bubbles After the 2022 Tonga Volcano Eruption. *Space Weather*. 2022. Vol. 20, Iss. 7, id. e2022SW003101. DOI: 10.1029/2022SW003101
21. Harding B.J., Wu Y.-J.J., Alken P., Yamazaki Y., Triplett C.C., Immel T.J., Gasque L.C., Mende S.B., and 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. Vol. 49, Iss. 9, id. e2022GL098577. DOI: 10.1029/2022GL098577
22. Le G., Liu G., Yizengaw E., and 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. Vol. 49, Iss. 11, id. e2022GL099002. DOI: 10.1029/2022GL099002
23. Themens D.R., Watson C., Žagar N., Vasylykevych S., Elvidge S., McCaffrey A., Prikryl P., Reid B., Wood A., and Jayachandran P.T. Global propagation of ionospheric disturbances associated with the 2022 Tonga volcanic eruption. *Geophys. Res. Lett.* 2022. Vol. 49, Iss. 7, id. e2022GL098158. DOI: 10.1029/2022GL098158
24. Черногор Л.Ф. Вariaції повного електронного вмісту в іоносфері, викликані вибухом вулкану Тонга 15 січня 2022 р. *Космічна наука і технологія*. 2023. Т. 29, № 3(142). С. 67–87. DOI: 10.15407/knit2023.03.067
25. Черногор Л.Ф., Милованов Ю.Б. Область зниженої концентрації електронів у іоносфері, утвореної вибухом вулкану Тонга 15 січня 2022 р. *Кінематика і фізика небесних тіл*. 2023. Т. 39, № 4. С. 34–54.

26. Iyemori T., Nishioka M., Otsuka Y., and Shinbori A. A confirmation of vertical acoustic resonance and field-aligned current generation just after the 2022 Hunga Tonga Hunga Haʻapai volcanic eruption. *Earth Planets Space*. 2022. Vol. 74, id. 103. DOI: 10.1186/s40623-022-01653-y
27. Schnepf N.R., Minami T., Toh H., and Nair M.C. Magnetic Signatures of the 15 January 2022 Hunga Tonga–Hunga Haʻapai Volcanic Eruption. *Geophys. Res. Lett.* 2022. Vol. 49, Iss. 10, id. e2022GL098454.
28. Soares G., Yamazaki Y., and 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
29. Yamazaki Y., Soares G., and 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. Vol. 127, Iss. 7, id. e2022JA030540. DOI: 10.1029/2022JA030540
30. Чорногор Л.Ф. Глобальні варіації геомагнітного поля, викликані вибухом вулкану Тонга 15 січня 2022 р. *Космічна наука і технологія*. 2023. Т. 29, № 4(143). С. 78–105. DOI: 10.15407/knit2023.04.006
31. Чорногор Л.Ф., Голуб М.Ю. Бухтоподібні варіації геомагнітного поля, що супроводжували катастрофічний вибух вулкану Тонга 15 січня 2022 р. *Кінематика і фізика небесних тіл*. 2023. Т. 39, № 5. С. 3–23. DOI: 10.15407/kfnt2023.05.003
32. Sorokin V.M., and Fedorovich G.V., *The physics of slow MHD waves in the ionospheric plasma*. Moscow: Energoatomizdat, 1982. 135 p.
33. Chernogor L.F., and 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.

Стаття надійшла 26.01.2023

#### REFERENCES

1. Adushkin, V.V., Rybnov, Y.S., and Spivak, A.A., 2022. Wave-Related, Electrical, and Magnetic Effects Due to the January 15, 2022 Catastrophic Eruption of Hunga Tonga–Hunga Haʻapai Volcano. *J. Volcanolog. Seismol.*, **16**(4), pp. 251–263. DOI: 10.1134/S0742046322040029
2. Astafyeva, E., Maletckii, B., Mikesell, T.D., Munaibari, E., Ravanelli, M., Coisson, P., Manta, F., and Rolland, L., 2022. The 15 January 2022 Hunga Tonga eruption history as inferred from ionospheric observations. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(10), id. e2022GL098827.
3. Burt, S., 2022. Multiple airwaves crossing Britain and Ireland following the eruption of Hunga Tonga–Hunga Haʻapai on 15 January 2022. *Weather. Special Issue: The January 2022 eruption of Hunga Tonga–Hunga Haʻapai*, **77**(3), pp. 76–81. DOI: 10.1002/wea.4182
4. Carvajal, M., Sepúlveda, I., Gubler, A., and Garreaud, R., 2022. Worldwide signature of the 2022 Tonga volcanic tsunami. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(6), id. e2022GL098153. DOI: 10.1029/2022GL098153
5. 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., and Liu, J.-Y., 2022. Individual Wave Propagations in Ionosphere and Troposphere Triggered by the Hunga Tonga–Hunga Haʻapai Underwater Volcano Eruption on 15 January 2022. *Remote Sens.*, **14**(9), id. 2179.
6. Chernogor, L. F., 2023. Physical effects from the powerful Tonga volcanic eruption of January 15, 2022, in the Earth — atmosphere — ionosphere — magnetosphere system. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **253**, id.106157. DOI: 10.1016/j.jastp.2023.106157
7. Poli, P., and Shapiro, N.M., 2022. Rapid Characterization of Large Volcanic Eruptions: Measuring the Impulse of the Hunga Tonga Haʻapai Explosion From Teleseismic Waves. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(8), id. e2022GL098123.
8. Imamura, F., Suppasri, A., Arikawa, T., Koshimura, S., Satake, K., and Tanioka, Y., 2022. Preliminary Observations and Impact in Japan of the Tsunami Caused by the Tonga Volcanic Eruption on January 15, 2022. *Pure Appl. Geophys.*, **179**, pp. 1549–1560. DOI: 10.1007/s00024-022-03058-0
9. Kubota, T., Saito, T., and Nishida, K., 2022. Global fast-traveling tsunamis driven by atmospheric Lamb waves on the 2022 Tonga eruption. *Science*, **377**(6601), pp. 91–94. DOI: 10.1126/science.abo4364
10. Ramírez-Herrera, M.T., Coca, O., and Vargas-Espinosa, V., 2022. Tsunami Effects on the Coast of Mexico by the Hunga Tonga–Hunga Haʻapai Volcano Eruption, Tonga. *Pure Appl. Geophys.*, **179**, pp. 1117–1137. DOI: 10.1007/s00024-022-03017-9
11. Tanioka, Y., Yamanaka, Y., and Nakagaki, T., 2022. Characteristics of the deep sea tsunami excited offshore Japan due to the air wave from the 2022 Tonga eruption. *Earth Planets Space*, **74**, id. 61. DOI: 10.1186/s40623-022-01614-5
12. Terry, J.P., Goff, J., Winspear, N., Bongolan, V. P., and 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**, id. 24. DOI: 10.1186/s40562-022-00232-z
13. 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., Šepić, J., Medvedev, I.P., Gushchin, R.A., Kopeikin, V.M., Belikov, I.B., Gubanova, D.P., Karpov, A.V., and Tikhonov, A., 2022. 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 Appl. Geophys.*, **179**, pp. 1533–1548. DOI: 10.1007/s00024-022-03046-4

14. 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., and 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), id. e2022GL098222. DOI: 10.1029/2022GL098222
15. 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., and Wilson, D.C., 2022. Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga. *Science*, **377**(6601), pp. 95–100. DOI: 10.1126/science.abo7063
16. 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., and 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
17. Otsuka, S., 2022. Visualizing Lamb waves from a volcanic eruption using meteorological satellite Himawari-8. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(8), id. e2022GL098324. DOI: 10.1029/2022GL098324
18. Zhang, S.-R., Vierinen, J., Aa, E., Goncharenko, L.P., Erickson, P.J., Rideout, W., Coster, A.J., and Spicher, A., 2022. 2022 Tonga Volcanic Eruption Induced Global Propagation of Ionospheric Disturbances via Lamb Waves. *Front. Astron. Space Sci.*, **9**, id. 871275. DOI: 10.3389/fspas.2022.871275
19. Chernogor, L.F., and Shevelev, M.B., 2024. A statistical study of the explosive waves launched by the Tonga super-volcano on January 15, 2022. *Space Sci. & Technol.*, **30**(1), pp. 66–79 (in Ukrainian). DOI: 10.15407/knit2024.01.066
20. Aa, E., Zhang, S.-R., Erickson, P.J., Vierinen, J., Coster, A.J., Goncharenko, L.P., Spicher, A., and Rideout, W., 2022. Significant Ionospheric Hole and Equatorial Plasma Bubbles After the 2022 Tonga Volcano Eruption. *Geophys. Res. Lett.*, **20**(7), id. e2022SW003101. DOI: 10.1029/2022SW003101
21. Harding, B.J., Wu, Y.-J.J., Alken, P., Yamazaki, Y., Triplett, C.C., Immel, T.J., Gasque, L.C., Mende, S.B., and 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), id. e2022GL098577. DOI: 10.1029/2022GL098577
22. Le, G., Liu, G., Yizengaw, E., and 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), id. e2022GL099002. DOI: 10.1029/2022GL099002
23. 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), id. e2022GL098158. DOI: 10.1029/2022GL098158
24. Chernogor, L.F., 2023. Ionospheric total electron content variations caused by the Tonga volcano explosion of January 15, 2022. *Space Sci. & Technol.*, **29**(3), pp. 67–87 (in Ukrainian). DOI: 10.15407/knit2023.03.067
25. Chernogor, L.F., and Mylovanov, Y.B., 2023. Electron Density Reduction Caused by the Tonga Volcano Eruption on January 15, 2022. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, **39**(4), pp. 204–216 (in Ukrainian). DOI: 10.3103/S0884591323040037.
26. Iyemori, T., Nishioka, M., Otsuka, Y., and Shinbori, A., 2022. A confirmation of vertical acoustic resonance and field-aligned current generation just after the 2022 Hunga Tonga Hunga Haʻapai volcanic eruption. *Earth Planets Space*, **74**, id. 103. DOI: 10.1186/s40623-022-01653-y.
27. Schnepf, N.R., Minami, T., Toh, H., and Nair, M.C., 2022. Magnetic Signatures of the 15 January 2022 Hunga Tonga–Hunga Haʻapai Volcanic Eruption. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(10), id. e2022GL098454
28. Soares, G., Yamazaki, Y., and 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
29. Yamazaki, Y., Soares, G., and 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), id. e2022JA030540. DOI: 10.1029/2022JA030540
30. Chernogor, L.F., 2023. Global variations in the geomagnetic field caused by the explosion of the volcano Tonga on January 15, 2022. *Space Sci. & Technol.*, **29**(4), pp. 78–105 (in Ukrainian). DOI: 10.15407/knit2023.04.006

31. Chernogor, L.F., and Holub, M. Yu., 2023. Bay-shaped variations in the geomagnetic field that accompanied the catastrophic explosion of the Tonga volcano on January 15, 2022. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, **39**(5), pp. 247–260. DOI: 10.3103/S0884591323050033
32. Sorokin, V.M., and Fedorovich, G.V., 1982. *The physics of slow MHD waves in the ionospheric plasma*. Moscow: Energoatomizdat.
33. 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.

Received 26.01.2023

L.F. Chernogor

V.N. Karazin Kharkiv National University  
4, Svobody Sq., 61022, Kharkiv, Ukraine

GEOMAGNETIC NEAR FIELD DISTURBANCES  
AS GENERATED BY THE JANUARY 15, 2022 UNIQUE  
EXPLOSION OF THE TONGA VOLCANO

**Subject and Purpose.** The January 15, 2022 explosion of the Tonga volcano, unique in its power, led to significant disturbances of the Earth's subsystems, including the lithosphere and the World Ocean — atmosphere — ionosphere — magnetosphere system, plus the geophysical fields like the baric, the electric and the magnetic. A task of great importance is a detailed study of disturbances in all the subsystems and of the fields involved, in particular, a further study of geomagnetic field component variations (and such of their derivatives) that appear to be generated in the near-field zone by the unique explosion of January 15, 2022.

**Methods and Methodology.** To analyze temporal variations of the geomagnetic field, data records of its three spatial components have been used, specifically of the  $X$ ,  $Y$ , and  $Z$ , and of their time derivatives  $\dot{X}$ ,  $\dot{Y}$ , and  $\dot{Z}$ , as recorded at geomagnetic observatories (stations) of the INTERMAGNET network during the explosion. The measurement error never exceeded 0.1 nT. The time resolution was 1 min. The records obtained on the quieter days of January 13, 2022 and January 17, 2022 have been chosen as reference data.

**Results.** Some specific features have been identified of the near-field geomagnetic effects that accompanied the powerful explosion of the Tonga volcano. The activity led to generation of an aperiodic "bay-shaped" disturbance and a number of quasi-periodic magnetic disturbances. The "bay-shaped" synchronous disturbances in the field components  $X$ -,  $Y$ - and  $Z$ -measured at the West Samoa API station as 15 nT, 28 nT, and -13 nT, respectively, and lasted for 120 to 146 min. Their generation mechanism is associated with the formation of an ionospheric "hole" under the action of a blast wave. The time delay of the "bay-shaped" disturbances was close to 16 min. Among the quasi-periodic disturbances, the earlier ones observed at the API station demonstrated a 6 min delay time, being caused by an acoustic resonance of a 4.4 min period and a 2 nT amplitude in the field of a standing wave. In addition to the resonant oscillations, other groups of quasi-periodic disturbances were also observed, whose delay times increased gradually from 8.5 to 75 min. The apparent horizontal velocities in their case were 4.0, 1.5, 1.0, 0.5, 0.31, and 0.2 km/s. Such velocities corresponded to slow magnetohydrodynamic waves, blast waves, atmospheric gravity waves, Lamb's wave or a tsunami. At greater separations from the volcano, the time delays of disturbances in each of those groups demonstrated a trend toward increasing, which suggests a volcanic origin of the magnetic disturbances under discussion.

**Conclusions.** The geomagnetic field disturbances observed in the near-field zone (up to 103 km from the volcano) differed qualitatively and quantitatively from the disturbances at larger separations (3 to 5) · 103 km.

**Keywords:** *Tonga volcano, near-field zone, geomagnetic field, bay-like disturbance, quasi-stationary disturbance, time delay, apparent velocity, disturbance mechanism.*