

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2022-37-03>

УДК 550.3

**Л. Ф. ЧОРНОГОР**, д. ф.-м. наук, проф.

e-mail: [Leonid.F.Chernogor@gmail.com](mailto:Leonid.F.Chernogor@gmail.com)

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5777-2392>

**М. Ю. ГОЛУБ**, аспірантка

e-mail: [marya160588@gmail.com](mailto:marya160588@gmail.com)

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,  
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

## ВЕЛИКОМАСШТАБНІ ЗБУРЕННЯ ГЕОМАГНІТНОГО ПОЛЯ, ЩО СУПРОВОДЖУВАЛИ ПОТУЖНИЙ ВИБУХ ВУЛКАНУ ТОНГА 15 СІЧНЯ 2022 р.

**Актуальність.** Ряд авторів описали результати спостережень за варіаціями геомагнітного поля, що були викликані вибухом вулкану Тонга. При цьому головна увага приділялася аналізу квазіперіодичних процесів, збуренню системи нейтрального вітру, іоносферних струмів на висотах динамо-області атмосфери. Були описані часові варіації геомагнітного поля, що спостерігалися на низці віддалених від вулкану магнітних станцій із мережі Intermagnet. Актуальною задачею є більш детальний аналіз магнітного ефекту вулкану Тонга. **Мета** цієї роботи – аналіз великомасштабних збурень геомагнітного поля, викликаних потужним вибухом вулкану Тонга, що відбувся 15 січня 2022 р.

**Методи і методологія.** Для аналізу використано дані вимірювань на світовій мережі магнітних станцій Intermagnet. Ці станції знаходилися по різні сторони від джерела збурень. Аналізу підлягали X-, Y- та Z-компоненти геомагнітного поля. Часова роздільна здатність – 1 хв, похибка не перевищувала 1 нТл. Проаналізовано часові варіації рівня геомагнітного поля з 12 по 18 січня 2022 р. Найбільш магнітоспокійними були доби 13 та 17 січня 2022 р. Саме вони використовувалися в якості контрольних.

**Результати.** У результаті аналізу часових варіацій X-, Y- і Z-компонент геомагнітного поля, зареєстрованих на станціях, що віддалені на відстані ~2000–8000 км від епіцентру вибуху вулкану Тонга, встановлено, що геомагнітний ефект носив глобальний характер. Виявлено шість груп збурень компонент геомагнітного поля, які могли бути викликані вибухом вулкану. Швидкості, близькі до ~4 та 1.5 км/с, властиві МГД хвилям. Швидкість, близька до ~1 км/с, характерна для вибухової хвилі. Швидкість ~500 м/с мають атмосферні гравітаційні хвилі. Збурення, що мали швидкості ~315 і 200 м/с, мабуть, поширювалися за рахунок хвилі Лемба та цунамі. Оцінено амплітуду квазіперіодичних збурень геомагнітного поля, що складала 1–10 нТл. Такі значення добре узгоджуються з результатами спостережень. Оцінки величини аперіодичних збурень дали значення 30–60 нТл, що також погоджувалося з результатами вимірювань.

**Висновки.** Підтверджено, що потужний вибух вулкану призвів до збурення усіх підсистем у системі Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** вулкан Тонга, збурення геомагнітного поля, аперіодичне збурення, квазіперіодичне збурення, час запізнювання, удавана швидкість, типи хвиль

**Як цитувати:** Черногор ЛФ, Голуб МЮ. Великомасштабні збурення геомагнітного поля, що супроводжували потужний вибух вулкану Тонга 15 січня 2022 р. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2022; 37:31-46. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2022-37-03>

**In cites:** Chernogor LF, Holub MYu. 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». (In Ukrainian). 2022; 37:31-46. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2022-37-03>

### ВСТУП

Вулкан Тонга знаходиться в південній частині Тихого океану в Полінезії (географічні координати: 20.54° пд. ш., 175.38° зх. д.). Його активність різко зросла 15 січня 2022 р. У інтервалі часу 04:00–05:00 UT спостерігалося п'ять вибухів. Найбільш інтенсивним був вибух о 04:15 UT. Він викликав зареєстровані збурення у всіх підсистемах системи Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера [1–10]. Сейсмічним ефектам вулкану присвячено роботу [11]. Ефекти згенерованого вулканом цунамі описані авторами [12–19]. Атмосферні ефекти аналізуються авторами [8–10, 20–32]. В роботах [7, 33–40] описано іоносферні ефекти вулкану Тонга.

© Черногор Л. Ф., Голуб М. Ю., 2022

**Open access.** This article is licensed under a Creative Commons Attribution 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>

Роботи [1, 2, 6] присвячено комплексному аналізу основних фізичних процесів у системі Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера, викликаних вибухом вулкану Тонга.

Автори [41, 42] описали результати спостережень за варіаціями геомагнітного поля. При цьому головна увага приділялася аналізу квазіперіодичних процесів, збуренню системи нейтрального вітру, іоносферних струмів на висотах динамо-області атмосфери. Автори [43] описали часові варіації геомагнітного поля, що спостерігалися на низці віддалених від вулкану магнітних станцій із мережі Intermagnet.

Актуальною задачею є більш детальний аналіз магнітного ефекту вулкану Тонга.

Мета цієї роботи – аналіз великомасштабних збурень геомагнітного поля, викликаного потужним вибухом вулкану Тонга, що відбувся 15 січня 2022 р.

### ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ВУЛКАН ТОНГА

Вулкан Тонга знаходиться в океані на глибині близько 200 м. Виверження вулкану продовжувалося приблизно з 04:00 до 16:00 UT. За цей час в атмосферу було викинуто 2.9 Гт продуктів виверження. Їхній об'єм сягав  $1.9 \text{ км}^3$ . Продуктивність вулкану складала 67 кт/с або 44 тис.  $\text{м}^3/\text{с}$ . Максимальна висота викидів сягала 58 км, в чому полягає головна унікальність вулкану Тонга.

За оцінками [1, 2, 6], теплова енергія вулкану складала  $3.6 \cdot 10^{18}$  Дж, а потужність – 9 ПВт. За своєю енергією вулкан Тонга поступався лише вулканам Кракатау ( $5 \cdot 10^{19}$  Дж) та Пінатубо ( $2 \cdot 10^{19}$  Дж), проте висота викидів цих вулканів не перевищувала відповідно 37–43 та 40–47 км.

Для вулкану Тонга індекс вулканічної вибуховості  $VEI \approx 5.8$ , а для вулканів Кракатау та Пінатубо  $VEI \approx 6$  [1].

Оцінки енергії вибуху вулкану за даними різних авторів змінюються в широких межах: від 4–18 до  $478 \pm 191$  Мт ТНТ. За даними [1, 2, 6], ця енергія не перевищувала 16–18 Мт ТНТ.

### СТАН КОСМІЧНОЇ ПОГОДИ

За даними сайту [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>] 14 січня 2022 р. концентрація частинок  $n_{sw}$  у сонячному вітрі зросла від  $(3-4) \cdot 10^6$  до  $16.7 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$ . Значення  $n_{sw}$  немономонно зменшувалося до початкового рівня впродовж доби 15 січня 2022 р. Швидкість частинок у сонячному вітрі 12–14 січня 2022 р. була близькою до 350 км/с. Упродовж наступної доби вона виросла до 620 км/с і залишалася майже такою 16–18 січня 2022 р. 15 січня 2022 р. спостерігалось два сплеска температури частинок від  $(0.2-0.3) \cdot 10^5 \text{ К}$  до  $3 \cdot 10^5$  та  $4 \cdot 10^5 \text{ К}$ . 14 січня 2022 р.  $B_z$  компонента міжпланетного магнітного поля зменшилася від  $\sim 8$  до  $-13.8$  нТл. 14 січня  $K_p$ -індекс виріс від 0 до 5.7. Індекс  $D_{st}$  зменшився від  $\sim 14$  до  $-91$  нТл. Приблизно з 16:00 до 22:00 UT мала місце помірна магнітна буря. 15–18 січня спостерігалась відновлювальна фаза цієї бурі.

### ЗАСОБИ ТА МЕТОДИ

Для аналізу використано дані вимірювань на світовій мережі магнітних станцій Intermagnet [<https://www.intermagnet.org/>]. Перелік станцій наведено у Табл. 1. Положення станцій відносно вулкану показано на Рис. 1. Ці станції знаходилися по різні сторони від джерела збурень. Аналізу підлягали X-, Y- та Z-компоненти геомагнітного поля. Часова роздільна здатність – 1 хв, похибка не перевищувала 1 нТл.

Таблиця 1. Перелік станцій із мережі Intermagnet

Table 1. List of stations from the Intermagnet network

Станція	Широта	Довгота	Країна	Відстань від вулкану, км
PPT	17.57° пн. ш.	149.57° зх. д.	Французька Полінезія	2730
STA	20.09° пд. ш.	146.26° сх. д.	Австралія	3990
HON	21.32° пн. ш.	158.00° зх. д.	США	5024
KNY	31.42° пн. ш.	130.88° сх. д.	Японія	8135

Проаналізовано часові варіації рівня геомагнітного поля з 12 по 18 січня 2022 р. Найбільш магнітоспокійними були доби 13 та 17 січня 2022 р. Саме вони використовувалися в якості контрольних.

Наголосимо з самого початку, що варіації геомагнітного поля 15 січня 2022 р. та у контрольні дні суттєво відрізнялися. У контрольні дні ці варіації були більш-менш плавними, а у день вибуху вони стали немономонними. Спостерігалися як аперіодичні, так і квазіперіодичні варіації.

### АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

Для пошуку можливої реакції геомагнітного поля на вибух вулкану будемо відмічати будь-які суттєві зміни характеру варіацій рівня X-, Y- і Z-компонент.

*Станція PPT.* У контрольні дні 13 та 17 січня 2022 р. в інтервалі часу 03:00–17:00 значення рівня  $X$ -компоненти флюктували приблизно від  $-12$  до  $-5$  нТл (Рис. 2). Рівень  $Y$ -компоненти з 03:00 до 05:00 збільшувався від  $(-7)$ – $(-10)$  до  $3$ – $5$  нТл. Потім він флюктував у межах  $2$ – $3$  нТл, поступово зменшуючись від  $\sim 0$  до  $(-20)$ – $(-25)$  нТл.

У день вибуху вулкану немонотонність рівня компонент збільшилася, дещо зросли флюктуації їхнього рівня. Суттєво зменшився тренд усіх компонент. Рівень  $X$ -компоненти зріс від  $-20$  до  $10$  нТл,  $Y$ -компоненти зменшився від  $10$  до  $-25$  нТл, а  $Z$ -компоненти – від  $3$  до  $-10$  нТл. Крім того, спостерігалися шість груп збурень з 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 і  $\Delta t_6 \approx 235$  хв (див. Рис. 2). Найбільші (до  $10$  нТл) збурення мали місце після 14:00.

*Станція СТА.* У контрольні дні варіації рівня компонент були більш-менш невеликими (Рис. 3). Винятком були варіації  $X$ -компоненти 17 січня 2022 р. При цьому рівень флюктував у межах  $\pm 5$  нТл. У цей день тренд  $\bar{X}$  зростав від  $-10$  до  $0$  нТл, тренд  $\bar{Y}$ , навпаки, зменшувався від  $25$  до  $0$  нТл, а тренд  $\bar{Z}$  від  $12$  до  $-7$  нТл.

13 січня 2022 р. тренд  $\bar{X}$  з 03:00 до 04:00 різко зменшився від  $-18$  до  $-28$  нТл та й залишився на цьому рівні. Тренд  $\bar{Y}$  з 03:00 до 07:00 різко зменшився від  $10$  до  $2$  нТл, а потім зріс до  $5$  нТл. Далі він поступово зменшувався від  $5$  до  $0$  нТл. Тренд  $\bar{Z}$  з 03:00 до 07:00 різко зменшився від  $6$  до  $-4$  нТл, а далі він флюктував біля рівня  $-2$  нТл.

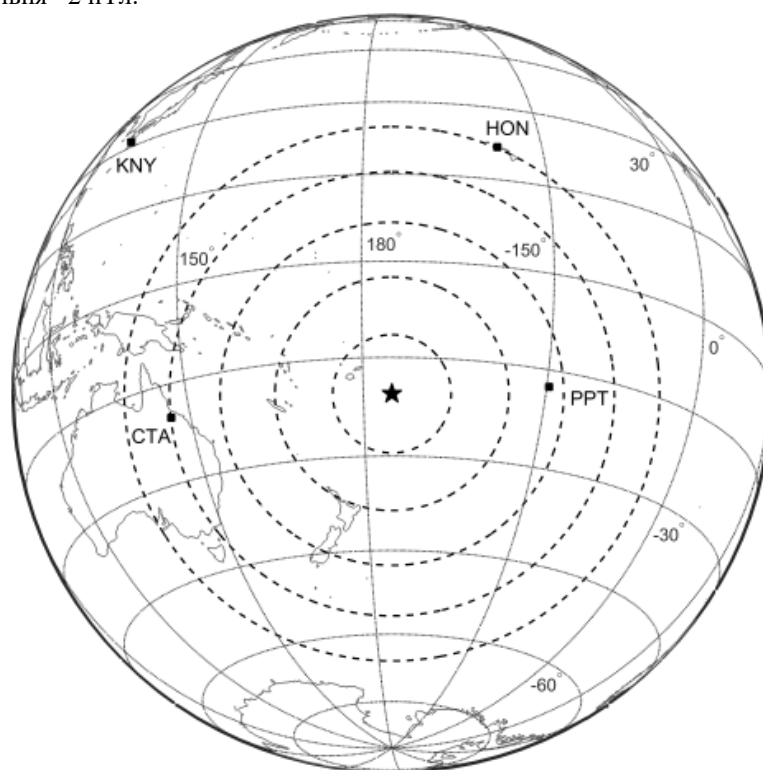


Рис. 1. Контурна мапа з зображенням магнітних станцій мережі Intermagnet. Місце знаходження вулкану вказано зірочкою

Fig. 1. Contour map showing magnetic stations of the Intermagnet network. The location of the volcano is indicated by an asterisk

15 січня 2022 р. флюктуації рівня всіх компонент значно зросли. Тренд  $\bar{X}$  зріс від  $-20$  до  $15$  нТл. Для  $Y$ -компоненти, крім флюктуацій, спостерігався глибокий провал від  $\sim 20$  до  $-40$  нТл, що мав місце з 05:45 до 08:30 (див. Рис. 3). Для  $Z$ -компоненти з 04:00 до 07:15 також спостерігався провал від  $\sim 0$  до  $-15$  нТл, на зміну якому прийшов сплеск від  $-15$  до  $\sim 22$  нТл. Крім цього, на всіх компонентах мали місце збурення з часом запізнювання  $22, 49, 71, 137, 217$  і  $338$  хв (див. Рис. 3).

*Станція HON.* 13 січня 2022 р. тренд  $\bar{X}$  зростав від  $-7$  до  $25$  нТл, а надалі спадав від  $25$  до  $-8$  нТл. Тренд  $\bar{Y}$ , навпаки, зменшувався від  $5$  до  $-20$  нТл (Рис. 4). Тренд  $\bar{Z}$  також зменшувався від  $4$  до  $0$  нТл. Рівень флюктуацій усіх компонент не перевищував  $\pm(1-2)$  нТл.

17 січня 2022 р. поведінка трендів була подібною, але рівень флюктуацій сягав  $\pm 5$  нТл.

15 січня 2022 р. тенденція в трендах в цілому зберіглася, проте приблизно з 05:55 до 07:35 спостерігався провал, який сягав  $-10$ ,  $-5$  та  $-2$  нТл відповідно для  $X$ -,  $Y$ - і  $Z$ -компонент. Крім того, мали місце збурення з часом запізнювання 26, 61, 89, 173, 272 та 424 хв (див. Рис. 4).

Станція KNY. 13 січня 2022 р. в трендах  $X$ ,  $Y$  і  $Z$  з 00:00 до 08:00 спостерігався глибокий провал (Рис. 5). З 08:00 до 17:00 мали місце незначні ( $\pm 1$  нТл) флуктуації рівня геомагнітного поля.

17 січня 2022 р. глибокий провал також мав місце для  $\bar{Y}$  і  $\bar{Z}$ . Рівень флуктуацій усіх компонент сягав  $\pm 5$  нТл.

У день вибуху вулкану глибокий провал спостерігався з 00:00–01:00 до 04:00–05:00. Частота та рівень флуктуацій збільшилися. Спостерігалось шість груп збурень з часом запізнювання 39, 95, 140, 270, 435 та 685 хв (див. Рис. 5). Амплітуда збурень сягала 4–5 нТл. У компоненті  $Y$  виділявся квазіперіодичний процес з періодом  $T \approx 70$  хв, амплітудою 4 нТл та часом запізнювання 435 хв.

### ОБГОВОРЕННЯ

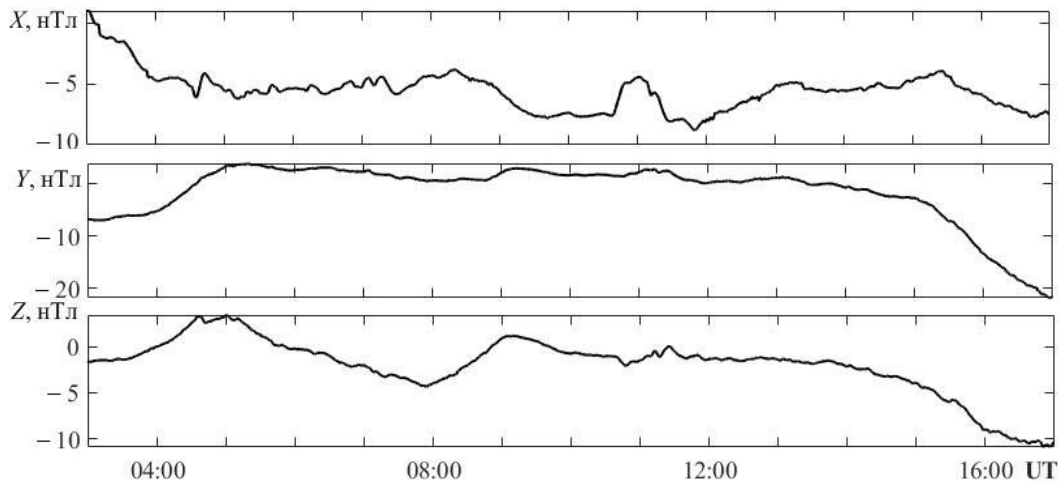
Час запізнювання та вдавану горизонтальну швидкість поширення збурень наведено у Табл. 2.

Таблиця 2. Час запізнювання та вдавана горизонтальна швидкість поширення збурень

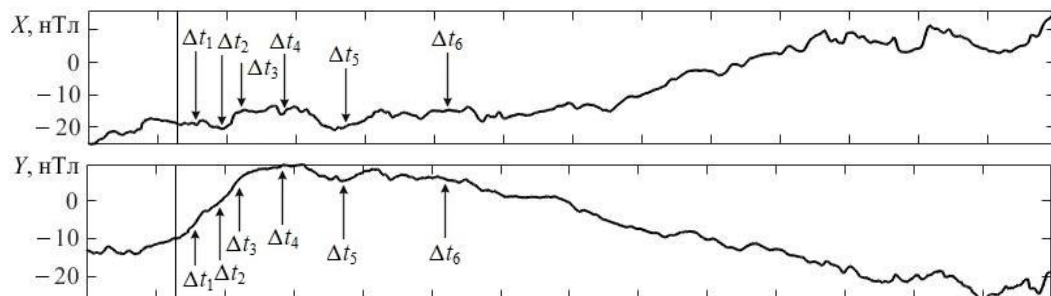
Table 2. Delay time and apparent horizontal propagation velocity of disturbances

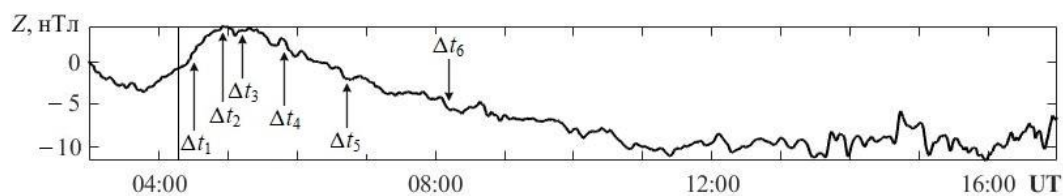
Станція	$\Delta t_1$ , хв	$v'_1$ , м/с	$\Delta t_2$ , хв	$v'_2$ , м/с	$\Delta t_3$ , хв	$v'_3$ , м/с	$\Delta t_4$ , хв	$v'_4$ , м/с	$\Delta t_5$ , хв	$v'_5$ , м/с	$\Delta t_6$ , хв	$v'_6$ , м/с
PPT	16	4100	37	1420	50	1011	96	500	150	314	235	198
СТА	22	3900	49	1510	71	1008	137	504	217	314	338	200
HON	26	4000	61	1490	89	1000	173	498	272	313	424	200
KNY	39	3988	95	1507	140	1004	270	512	435	315	685	199

13.01.2022

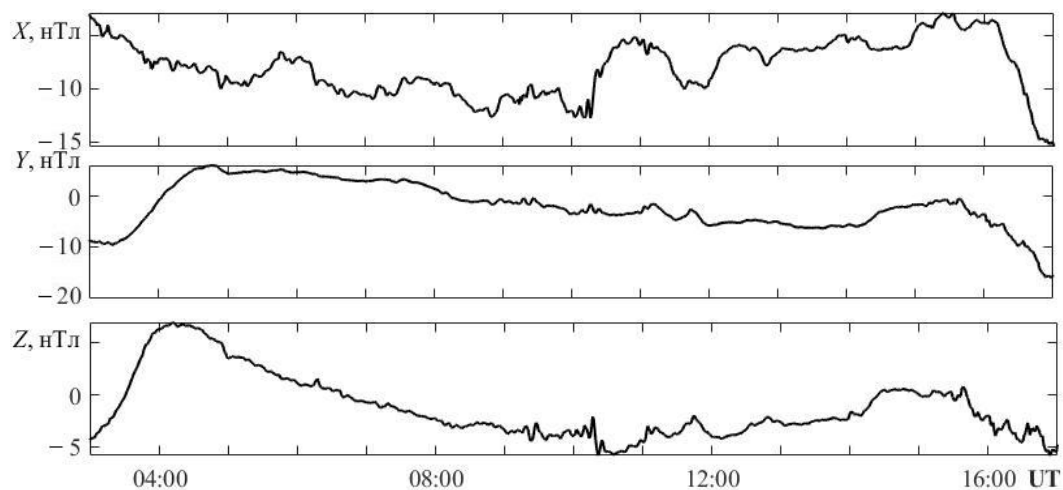


15.01.2022

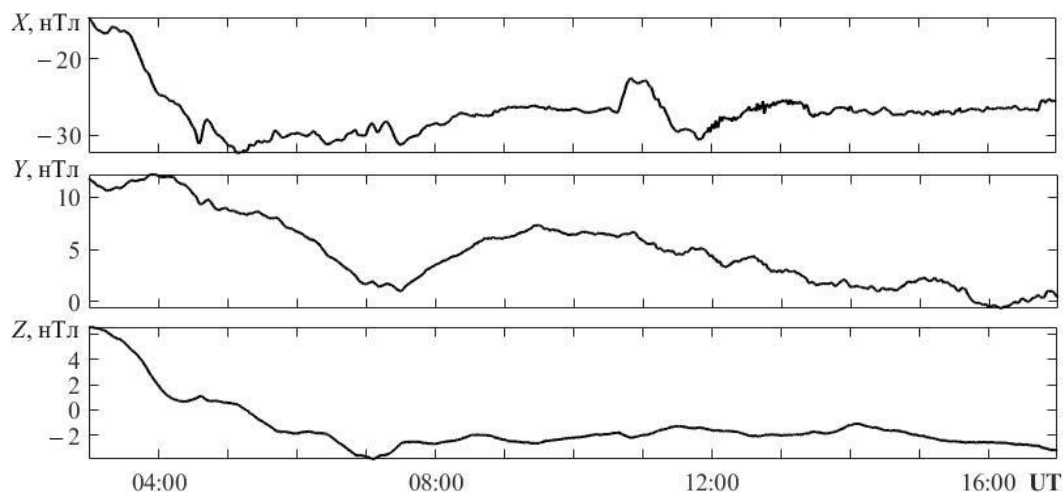




17.01.2022



13.01.2022



15.01.2022

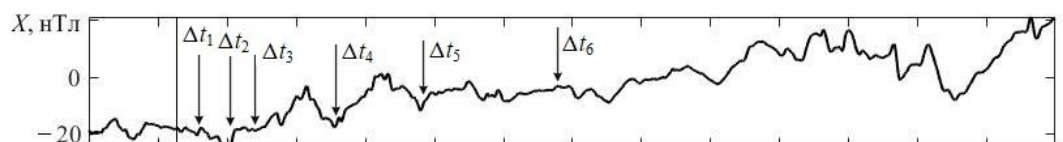
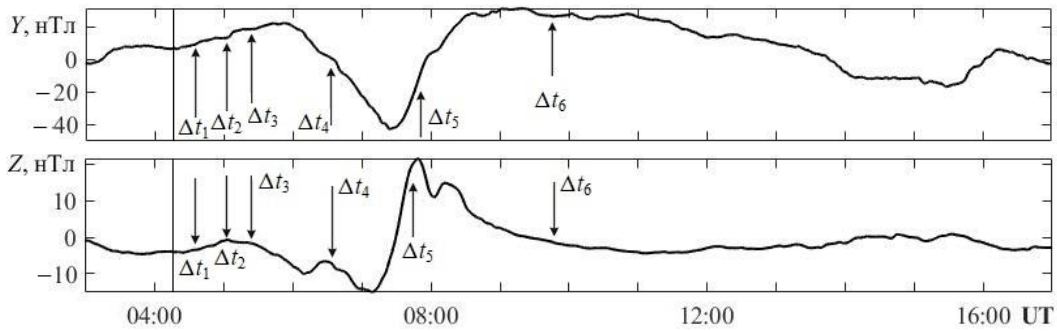
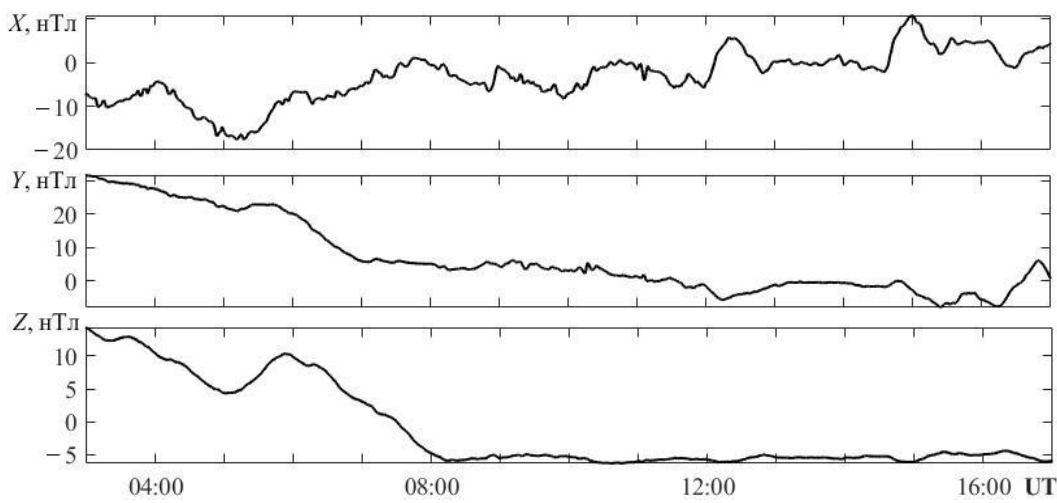


Рис. 2. Часові варіації X-, Y- і Z-компонентів на станції PPT у день вибуху вулкану та у контрольні дні. Вертикальною лінією позначено момент найпотужнішого вибуху. Стрілки вказують на можливі моменти реакції магнітного поля

Fig. 2. Temporal variations of the X-, Y-, and Z-components at the PPT station on the day of the volcano explosion and on reference days. The vertical line marks the moment of the most powerful explosion. Arrows indicate possible moments of magnetic field reaction



17.01.2022



13.01.2022

Рис. 3. Часові варіації X-, Y- і Z-компонентів на станції СТА у день вибуху вулкану та у контрольні дні. Вертикальною лінією позначено момент найпотужнішого вибуху. Стрілки вказують на можливі моменти реакції магнітного поля

Fig. 3. Temporal variations of the X-, Y-, and Z-components at the CTA station on the day of the volcano explosion and on reference days. The vertical line marks the moment of the most powerful explosion. Arrows indicate possible moments of magnetic field reaction

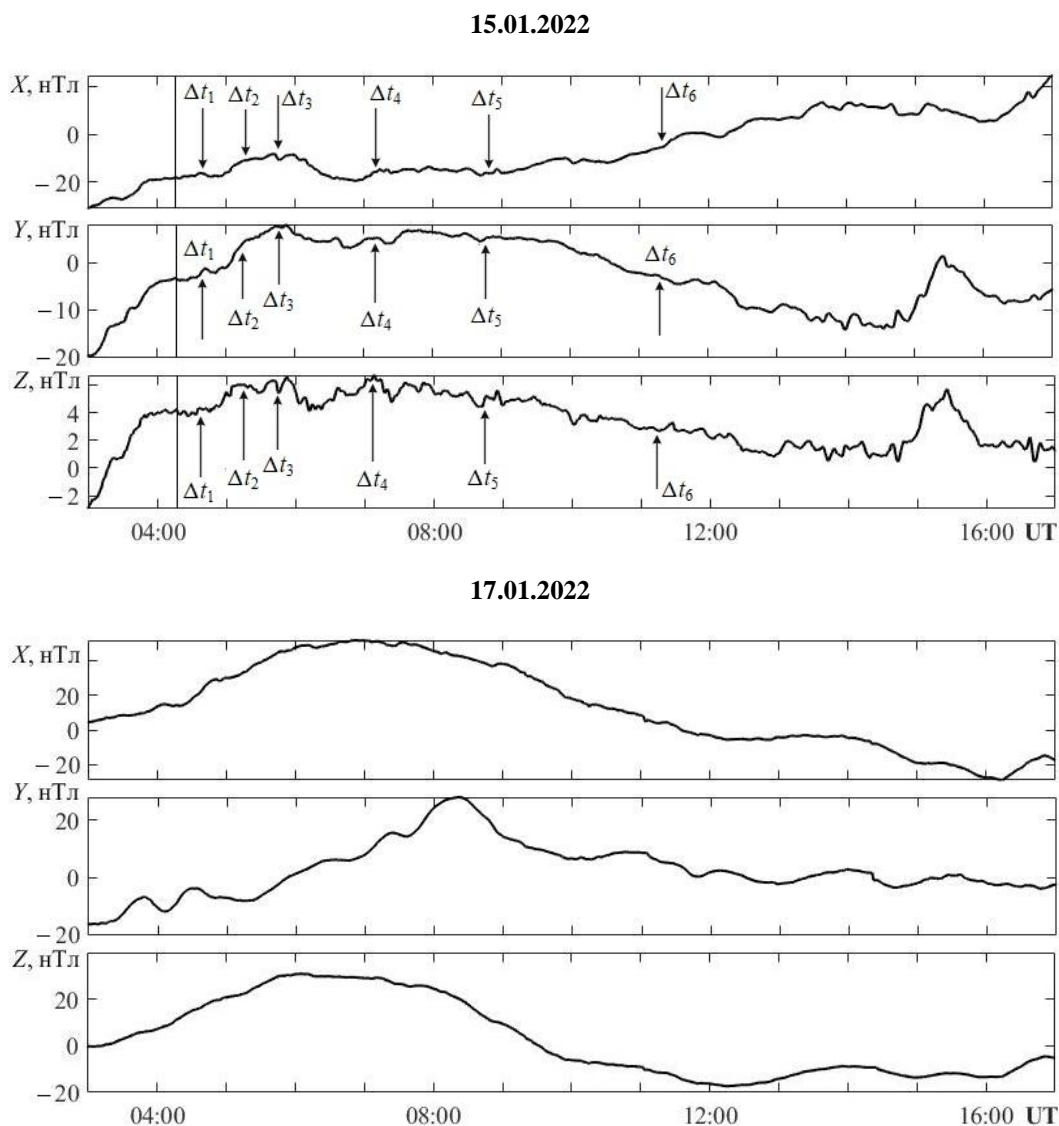
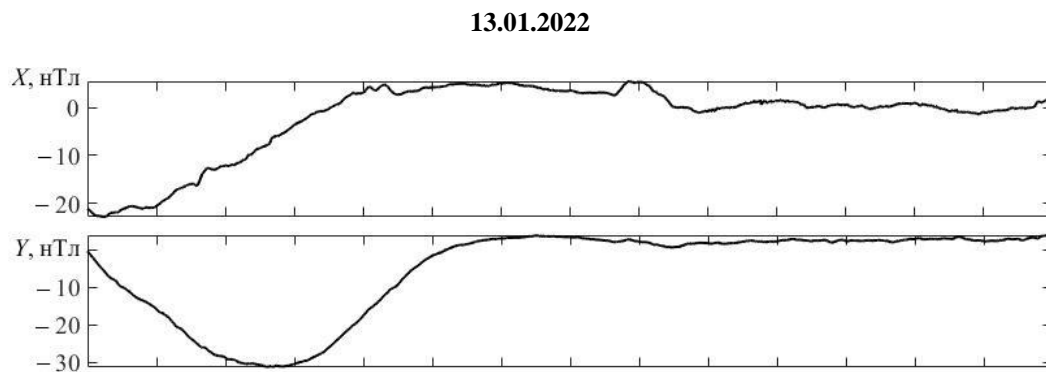


Рис. 4. Часові варіації  $X$ -,  $Y$ - і  $Z$ -компонентів на станції HON у день вибуху вулкану та у контрольні дні. Вертикальною лінією позначено момент найпотужнішого вибуху. Стрілки вказують на можливі моменти реакції магнітного поля

Fig. 4. Temporal variations of the  $X$ -,  $Y$ - and  $Z$ -components at the HON station on the day of the volcano explosion and on reference days. The vertical line marks the moment of the most powerful explosion. Arrows indicate possible moments of magnetic field reaction



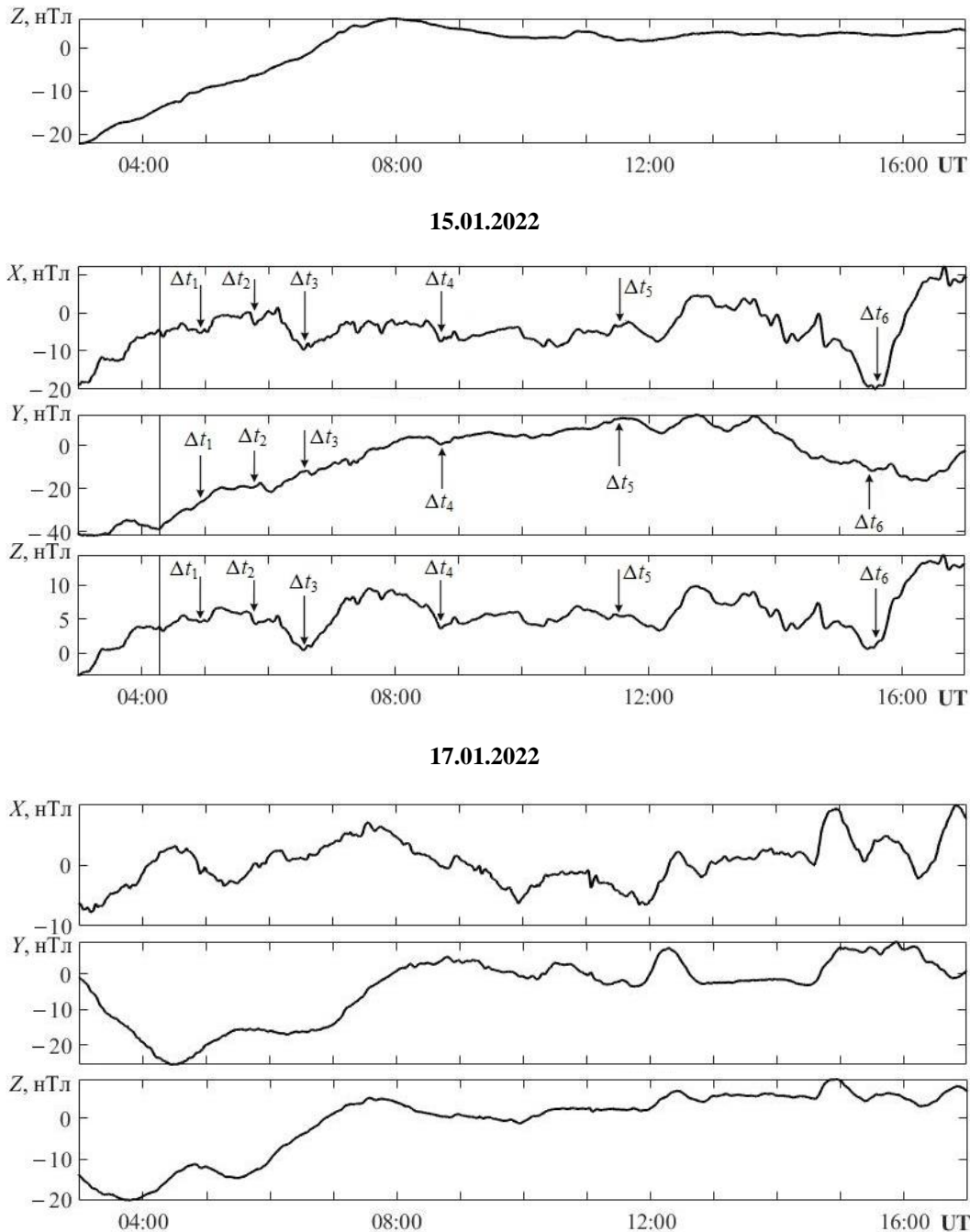


Рис. 5. Часові варіації X-, Y- і Z-компонентів на станції KNY у день вибуху вулкану та у контрольні дні. Вертикальною лінією позначено момент найпотужнішого вибуху. Стрілки вказують на можливі моменти реакції магнітного поля

Fig. 5. Temporal variations of the X-, Y-, and Z-components at the KNY station on the day of the volcano explosion and on reference days. The vertical line marks the moment of the most powerful explosion. Arrows indicate possible moments of magnetic field reaction

При обчисленні вдаваної швидкості вважалося, що збурення від вулкану у вигляді вибухової хвилі спочатку вертикально поширювалося за час  $\Delta t_0$  до іоносфери, а потім воно поширювалося вздовж іоносфери, викликаючи варіації геомагнітного поля. Такий механізм міг реалізуватися при збудженні у іоносфері МГД хвиль або атмосферних гравітаційних хвиль. Хвилі Лемба та цунамі, навпаки, поширювалися вздовж поверхні Землі, викликаючи збурення у іоносфері та магнітному полі над місцем їх знаходження. У цьому випадку час поширення до іоносфери також складав  $\Delta t_0$ . Тоді скоригована вдавана горизонтальна швидкість дається наступним співвідношенням:

$$v' = \frac{r}{\Delta t - \Delta t_0},$$



де  $r$  – відстань від епіцентру вибуху до станції, де  $\Delta t$  – час запізнювання збурення магнітного поля.

Із Табл. 2 видно, що зі збільшенням відстані від епіцентру вулкану всі значення часу запізнювання поступово збільшувалися. Якщо всі групи збурень викликані вибухом вулкану, необхідно встановити природу хвиль, що переносили збурення. У першій групі швидкість  $v_1' \approx 4$  км/с, а другій –  $v_2' \approx 1.5$  км/с. Такі швидкості властиві повільним МГД хвилям [44]. Саме такі швидкості поширення збурень ми неодноразово спостерігали після пусків потужних ракет [45–47].

Швидкість  $v_3'$  близька до 1 км/с. Швидше за все це швидкість вибухової хвилі. Подібні швидкості після вибуху вулкану Тонга відмічали також автори [22, 25, 34]. Швидкість  $\sim 1$  км/с також спостерігали після пусків ракет [45–47], потужних землетрусів тощо.

Швидкість  $v_4' \approx 500$  м/с властива атмосферним гравітаційним хвилям [34, 44–46, 49].

Швидкість  $v_5' \approx 313$ – $315$  м/с мають хвилі Лемба [48]. Ці хвилі генеруються тільки під час потужних (не менше 10 Мт ТНТ) вибухів. Важливо, що вони поширюються практично без загасання та дисперсії вздовж поверхні Землі по декілька разів огинаючи планету. Прояви хвилі Лемба після вибуху вулкану Тонга також виявили автори [9, 10, 15, 24–26, 31].

Найменшу швидкість  $v_6' \approx 200$  м/с мають хвилі на поверхні Світового океану – цунамі, які здатні згенерувати атмосферні хвилі. Останні викликають квазіперіодичні збурення в іоносфері. Прояви хвиль цунамі також спостерігали автори робіт [12–19].

Отримані результати свідчать про те, що потужний вибух вулкану згенерував цілий спектр хвиль різної фізичної природи. Про це також згадується у роботах [9, 10].

Механізм генерації збурень геомагнітного поля наступний. Атмосферні хвилі густини на висотах іоносфери генерують або МГД хвилі, або сторонній електричний струм з густиною

$$j = eNv,$$

де  $e$  – заряд електрона,  $N$  – концентрація електронів у іоносфері,  $v$  – швидкість частинок у полі атмосферної хвилі. За  $v = 1$ – $10$  м/с,  $N \approx 10^{11}$  м<sup>-3</sup> маємо  $j \approx 1.6 \cdot 10^{-8}$ – $1.6 \cdot 10^{-7}$  А/м<sup>2</sup>. З роторного рівняння Максвелла витікає, що збурення геомагнітного поля

$$\Delta B \approx \mu_0 j \Delta z,$$

де  $\mu_0$  – магнітна стала,  $\Delta z$  – товщина шару іоносфери, що дає внесок у збурення. За  $j \approx 1.6 \cdot 10^{-8}$ – $1.6 \cdot 10^{-7}$  А/м<sup>2</sup> та  $\Delta z \approx 50$  км маємо  $\Delta B \approx 1$ – $10$  нТл. Для хвилі Лемба амплітуда збурення  $Y$ -компоненти складала  $\sim 4$  нТл (див. Рис. 5).

Значне (десятки нанотесла) аперіодичне зменшення компонент, швидше за все, викликане генерацією під дією вулкану іоносферної «діри» зі зменшенням повного електронного вмісту  $\Delta N_V$  від 3 до 10 TECU [34]. На висотах динамо-області це зменшення не перевищувало  $\Delta N_V \approx 0.3$ – $0.6$  TECU. Саме для динамо-області

$$\Delta B \approx \mu_0 e w \Delta N_V,$$

де  $w$  – швидкість вітру у динамо-області. За  $w \approx 50$  м/с маємо  $\Delta B \approx 30$ – $60$  нТл, що добре погоджується з результатами спостережень (див. Рис. 3).

Таким чином, вибух вулкану призвів до збурень у всій системі Земля (літосфера, океан) – атмосфера – іоносфера – магнітосфера (геомагнітне поле), до перебудови взаємодії між підсистемами (океан – атмосфера – іоносфера – геомагнітне поле).

## ГОЛОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

1. У результаті аналізу часових варіацій  $X$ -,  $Y$ - і  $Z$ -компонент геомагнітного поля, зареєстрованих на станціях, що віддалені на відстані  $\sim 2000$ – $8000$  км від епіцентру вибуху вулкану Тонга, встановлено, що геомагнітний ефект носив глобальний характер.

2. Виявлено шість груп збурень компонент геомагнітного поля, які могли бути викликані вибухом вулкану. Швидкості, близькі до  $\sim 4$  та  $1.5$  км/с, властиві МГД хвилям. Швидкість близька до  $\sim 1$  км/с, характерна для вибухової хвилі. Швидкість  $\sim 500$  м/с мають атмосферні гравітаційні хвилі. Збурення, що мали швидкості  $\sim 315$  і  $200$  м/с, мабуть, поширювалися за рахунок хвилі Лемба та цунамі.

3. Оцінено амплітуду квазіперіодичних збурень геомагнітного поля, що складала  $1$ – $10$  нТл. Такі значення добре узгоджуються з результатами спостережень.

4. Оцінки величини аперіодичних збурень дали значення  $30$ – $60$  нТл, що також погоджувалося з результатами вимірювань.

5. Підтверджено, що потужний вибух вулкану призвів до збурення усіх підсистем у системі Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера.

## ФІНАНСУВАННЯ РОБОТИ

Робота виконувалась за часткової підтримки держбюджетних НДР, заданих МОН України (номери держреєстрації 0121U109881, 0121U109882 та 0122U001476).

### КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Черногор ЛФ. Фізичні ефекти у системі Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера, викликані потужним вибухом вулкану Тонга 15 січня 2022 р. *Космічна наука і технологія*. (У друці).
2. Chernogor LF. 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.
3. Chernogor LF. 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.
4. Chernogor LF. 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.
5. Chernogor LF. 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.
6. Chernogor LF. 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.
7. Chernogor LF, Mylovanov YB, Dorohov VL. 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.
8. Chernogor LF, Shevelev MB. 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.
9. Matoza RS, Fee D, Assink JD, Iezzi AM, Green DN, Kim K, Toney L, Lecocq T, Krishnamoorthy S, Lalande JM, Nishida K, Gee KL, Haney MM, Ortiz HD, Brissaud Q, Martire L, Rolland L, Vergados P, Nippres A, Park J, Shani-Kadmiel S, Witsil A, Arrowsmith S, Caudron C, Watada S, Perttu AB, Taisne B, Mialle P, Le Pichon A, Vergoz J, Hupe P, Blom PS, Waxler R, De Angelis S, Snively JB, Ringler AT, Anthony RE, Jolly AD, Kilgour G, Averbuch G, Ripepe M, Ichihara M, Arciniega-Ceballos A, Astafyeva E, Ceranna L, Cevuard S, Che I-Y, De Negri R, Ebeling CW, Evers LG, Franco-Marin LE, Gabrielson TB, Hafner K, Harrison RG, Komjathy A, Lacanna G, Lyons J, Macpherson KA, Marchetti E, McKee KF, Mellors RJ, Mendo-Pérez G, Mikesell TD, Munaibari E, Oyola-Merced M, Park I, Pilger C, Ramos C, Ruiz MC, Sabatini R, Schwaiger HF, Tailpied D, Talmadge C, Vidot J, Webster J, Wilson DC. Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga. *Science*. 2022;377(6601):95-100. <https://doi.org/10.1126/science.abo7063>
10. Matoza RS, Fee D, Assink JD, Iezzi AM, Green DN, Kim K, Toney L, Lecocq T, Krishnamoorthy S, Lalande JM, Nishida K, Gee KL, Haney MM, Ortiz HD, Brissaud Q, Martire L, Rolland L, Vergados P, Nippres A, Park J, Shani-Kadmiel S, Witsil A, Arrowsmith S, Caudron C, Watada S, Perttu AB, Taisne B, Mialle P, Le Pichon A, Vergoz J, Hupe P, Blom PS, Waxler R, De Angelis S, Snively JB, Ringler AT, Anthony RE, Jolly AD, Kilgour G, Averbuch G, Ripepe M, Ichihara M, Arciniega-Ceballos A, Astafyeva E, Ceranna L, Cevuard S, Che I-Y, De Negri R, Ebeling CW, Evers LG, Franco-Marin LE, Gabrielson TB, Hafner K, Harrison RG, Komjathy A, Lacanna G, Lyons J, Macpherson KA, Marchetti E, McKee KF, Mellors RJ, Mendo-Pérez G, Mikesell TD, Munaibari E, Oyola-Merced M, Park I, Pilger C, Ramos C, Ruiz MC, Sabatini R, Schwaiger HF, Tailpied D, Talmadge C, Vidot J, Webster J, Wilson DC. Supplementary Materials for Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga. *Science*. 2022;377(6601). <https://doi.org/10.1126/science.abo7063>
11. Poli P, Shapiro NM. Rapid Characterization of Large Volcanic Eruptions: Measuring the Impulse of the Hunga Tonga Ha’apai Explosion From Teleseismic Waves. *Geophysical Research Letters*. 2022;49(8):e2022GL098123.
12. Carvajal M, Sepúlveda I, Gubler A, Garreaud R. Worldwide signature of the 2022 Tonga volcanic tsunami. *Geophysical Research Letters*. 2022;49(6):e2022GL098153. <https://doi.org/10.1029/2022GL098153>

13. Heidarzadeh M, Gusman AR, Ishibe T, Sabeti R, Šepić J. Estimating the eruption-induced water displacement source of the 15 January 2022 Tonga volcanic tsunami from tsunami spectra and numerical modelling. *Ocean Engineering*. 2022;261:112165. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112165>
14. 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 Applied Geophysics*. 2022;179:1549-1560. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03058-0>
15. Kubota T, Saito T, Nishida K. Global fast-traveling tsunamis driven by atmospheric Lamb waves on the 2022 Tonga eruption. *Science*. 2022;377(6601):91-94. <https://doi.org/10.1126/science.abo4364>
16. Lynett P. The Tsunamis Generated by the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Volcano on January 15, 2022. 16 March 2022, PREPRINT (Version 1) available at Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1377508/v1>
17. Ramírez-Herrera MT, Coca O, Vargas-Espinosa V. Tsunami Effects on the Coast of Mexico by the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Volcano Eruption, Tonga. *Pure and Applied Geophysics*. 2022;179:1117-1137. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03017-9>
18. 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;74:61. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01614-5>
19. Terry JP, Goff J, Winspear N, Bongolan VP, 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. *Geoscience Letters*. 2022;9:24. <https://doi.org/10.1186/s40562-022-00232-z>
20. Черногор Л. Ф., Шевелев М. Б. Статистичні характеристики вибухових хвиль у атмосфері, згенерованих супервулканом Тонга 15 січня 2022 р. *Космічна наука і технологія*. 2022. (У друці).
21. Carr JL, Horváth A, Wu DL, Friberg MD. Stereo plume height and motion retrievals for the record-setting Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption of 15 January 2022. *Geophysical Research Letters*. 2022;49:e2022GL098131. <https://doi.org/10.1029/2022GL098131>
22. 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(9):2179. <https://doi.org/10.3390/rs14092179>
23. Ern M, Hoffmann L, Rhode S, Preusse P. The mesoscale gravity wave response to the 2022 Tonga volcanic eruption: AIRS and MLS satellite observations and source backtracing. *Geophysical Research Letters*. 2022;49(10):e2022GL098626. <https://doi.org/10.1029/2022GL098626>
24. Kulichkov SN, Chunchuzov IP, Popov OE, Gorchakov GI, Mishenin AA, Perepelkin VG, Bush GA, Skorokhod AI, Vinogradov YuA, Semutnikova EG, Šepić J, Medvedev IP, Gushchin RA, Kopeikin VM, Belikov IB, Gubanova DP, Karpov AV, Tikhonov AV. 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 Applied Geophysics*. 2022;179:1533-1548. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03046-4>
25. Lin J-T, Rajesh PK, Lin CCH, 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. *Geophysical Research Letters*. 2022;49(8):e2022GL098222. <https://doi.org/10.1029/2022GL098222>
26. Otsuka S. Visualizing Lamb waves from a volcanic eruption using meteorological satellite Himawari-8. *Geophysical Research Letters*. 2022;49(8):e2022GL098324. <https://doi.org/10.1029/2022GL098324>
27. Vergoz J, Hupe P, Listowski C, Le Pichon A, Garcés MA, Marchetti E, Labazuy P, Ceranna L, Pilger C, Gaebler P, Näsholm SP, Brissaud Q, Poli P, Shapiro N, De Negri R, Mialle P. IMS observations of infrasound and acoustic-gravity waves produced by the January 2022 volcanic eruption of Hunga, Tonga: A global analysis. *Earth and Planetary Science Letters*. 2022;591:117639. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117639>
28. Witze A. Why the Tongan volcanic eruption was so shocking. *Nature*. 2022;602:376-378. <https://media.nature.com/original/magazine-assets/d41586-022-00394-y/d41586-022-00394-y.pdf>
29. Wright CJ, Hindley NP, Alexander MJ, Barlow M, Hoffmann L, Mitchell CN, Prata F, Bouillon M, Carstens J, Clerbaux C, Osprey SM, Powell N, Randall CE, Yue J. Surface-to-space atmospheric waves from Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption. *Nature*. 2022. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05012-5>
30. Yuen DA, Scruggs MA, Spera FJ, Zheng Y, Hu H, McNutt SR, Thompson G, Mandli K, Keller BR, Wei SS, Peng Z, Zhou Z, Mulargia F, Tanioka Y. Under the surface: Pressure-induced planetary-scale waves, volcanic lightning, and gaseous clouds caused by the submarine eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano. *Earthquake Research Advances*. 2022;2(3):100134. <https://doi.org/10.1016/j.eqrea.2022.100134>
31. Zhang S-R, Vierinen J, Aa E, Goncharenko LP, Erickson PJ, Rideout W, Coster AJ, Spicher A. 2022 Tonga Volcanic Eruption Induced Global Propagation of Ionospheric Disturbances via Lamb Waves. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. 2022;9:871275. <https://doi.org/10.3389/fspas.2022.871275>

32. 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(3):76-81. <https://doi.org/10.1002/wea.4182>
33. Aa E, Zhang S-R, Erickson PJ, Vierinen J, Coster AJ, Goncharenko LP, Spicher A, Rideout W. Significant Ionospheric Hole and Equatorial Plasma Bubbles After the 2022 Tonga Volcano Eruption. *Geophysical Research Letters*. 2022;20(7):e2022SW003101. <https://doi.org/10.1029/2022SW003101>
34. Astafyeva E, Maletkii B, Mikesell TD, Munaibari E, Ravanelli M, Coisson P, Manta F, Rolland L. The 15 January 2022 Hunga Tonga eruption history as inferred from ionospheric observations. *Geophysical Research Letters*. 2022;49(10):e2022GL098827. <https://doi.org/10.1029/2022GL098827>
35. Harding BJ, Wu Y-JJ, Alken P, Yamazaki Y, Triplett CC, Immel TJ, Gasque LC, Mende SB, 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. *Geophysical Research Letters*. 2022;49(9):e2022GL098577. <https://doi.org/10.1029/2022GL098577>
36. Le G, Liu G, Yizengaw E, Englert CR. Intense equatorial electrojet and counter electrojet caused by the 15 January 2022 Tonga volcanic eruption: Space- and ground-based observations. *Geophysical Research Letters*. 2022;49(11):e2022GL099002. <https://doi.org/10.1029/2022GL099002>
37. Rajesh PK, Lin CCH, Lin JT, Lin CY, Liu JY, Matsuo T, et al. Extreme poleward expanding super plasma bubbles over Asia-Pacific region triggered by Tonga volcano eruption during the recovery-phase of geomagnetic storm. *Geophysical Research Letters*. 2022;49:e2022GL099798. <https://doi.org/10.1029/2022GL099798>
38. Saito S. Ionospheric disturbances observed over Japan following the eruption of Hunga Tonga–Hunga Ha’apai on 15 January 2022. *Earth, Planets and Space*. 2022;74:57. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01619-0>
39. Shinbori A, Otsuka Y, Sori T, Nishioka M, Perwitasari S, Tsuda T, Nishitani N. Electromagnetic conjugacy of ionospheric disturbances after the 2022 Hunga Tonga–Hunga Ha’apai volcanic eruption as seen in GNSS-TEC and SuperDARN Hokkaido pair of radars observations. *Earth Planets Space*. 2022;74(106). <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01665-8>
40. Themens DR, Watson C, Žagar N, Vasylykevych S, Elvidge S, McCaffrey A, Prikryl P, Reid B, Wood A, Jayachandran PT. Global propagation of ionospheric disturbances associated with the 2022 Tonga volcanic eruption. *Geophysical Research Letters*. 2022;49(7):e2022GL098158. <https://doi.org/10.1029/2022GL098158>
41. Schnepf NR, Minami T, Toh H, Nair MC. Magnetic Signatures of the 15 January 2022 Hunga Tonga–Hunga Ha’apai Volcanic Eruption. *Geophysical Research Letters*. 2022;49(10):e2022GL098454.
42. 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. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2022;127(7):e2022JA030540. <https://doi.org/10.1029/2022JA030540>
43. Adushkin VV, Rybnov YS, Spivak AA. 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(4):251-263. <https://doi.org/10.1134/S0742046322040029>
44. Chernogor LF. Radiophysical and geomagnetic effects of rocket launches: Monograph. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ, 2009. 386.
45. Chernogor LF, 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.
46. Luo Y, Черногор ЛФ, Жданко ЄГ. Геокосмічні збурення, що супроводжували старти ракет з космодрому Байконур. *Кінематика і фізика небесних тіл*. 2022;38(6):3-24. <https://doi.org/10.15407/kfnt2022.06.003>
47. Heki K. Explosion energy of the 2004 eruption of the Asama Volcano, central Japan, inferred from ionospheric disturbances. *Geophys. Res. Lett.* 2006;33:L14303. <https://doi.org/10.1029/2006GL026249>
48. Gossard EE, Hooke YX. *Waves in the Atmosphere: Atmospheric Infrasound and Gravity Waves, Their Generation and Propagation (Developments in Atmospheric Science)*. Elsevier Scientific Pub. Co., 1975. 472 p.
49. Chernogor LF. *Physics and Ecology of Disasters: Monograph*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ, 2012. 556.

#### REFERENCES

1. Chernogor LF. Physical effects of the January 15, 2022, powerful Tonga volcano explosion in the Earth – atmosphere – ionosphere – magnetosphere system. *Space science and technology*. 2022. (In Ukrainian). (In press).
2. Chernogor LF. 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.

3. Chernogor LF. 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.
4. Chernogor LF. 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.
5. Chernogor LF. 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.
6. Chernogor LF. 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.
7. Chernogor LF, Mylovanov YB, Dorohov VL. 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.
8. Chernogor LF, Shevelev MB. 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.
9. Matoza RS, Fee D, Assink JD, Iezzi AM, Green DN, Kim K, Toney L, Lecocq T, Krishnamoorthy S, Lalande JM, Nishida K, Gee KL, Haney MM, Ortiz HD, Brissaud Q, Martire L, Rolland L, Vergados P, Nippres A, Park J, Shani-Kadmiel S, Witsil A, Arrowsmith S, Caudron C, Watada S, Perttu AB, Taisne B, Mialle P, Le Pichon A, Vergoz J, Hupe P, Blom PS, Waxler R, De Angelis S, Snively JB, Ringler AT, Anthony RE, Jolly AD, Kilgour G, Averbuch G, Ripepe M, Ichihara M, Arciniega-Ceballos A, Astafyeva E, Ceranna L, Cevuard S, Che I-Y, De Negri R, Ebeling CW, Evers LG, Franco-Marin LE, Gabrielson TB, Hafner K, Harrison RG, Komjathy A, Lacanna G, Lyons J, Macpherson KA, Marchetti E, McKee KF, Mellors RJ, Mendo-Pérez G, Mikesell TD, Munaibari E, Oyola-Merced M, Park I, Pilger C, Ramos C, Ruiz MC, Sabatini R, Schwaiger HF, Tailpied D, Talmadge C, Vidot J, Webster J, Wilson DC. Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga. *Science*. 2022;377(6601):95-100. <https://doi.org/10.1126/science.abo7063>
10. Matoza RS, Fee D, Assink JD, Iezzi AM, Green DN, Kim K, Toney L, Lecocq T, Krishnamoorthy S, Lalande JM, Nishida K, Gee KL, Haney MM, Ortiz HD, Brissaud Q, Martire L, Rolland L, Vergados P, Nippres A, Park J, Shani-Kadmiel S, Witsil A, Arrowsmith S, Caudron C, Watada S, Perttu AB, Taisne B, Mialle P, Le Pichon A, Vergoz J, Hupe P, Blom PS, Waxler R, De Angelis S, Snively JB, Ringler AT, Anthony RE, Jolly AD, Kilgour G, Averbuch G, Ripepe M, Ichihara M, Arciniega-Ceballos A, Astafyeva E, Ceranna L, Cevuard S, Che I-Y, De Negri R, Ebeling CW, Evers LG, Franco-Marin LE, Gabrielson TB, Hafner K, Harrison RG, Komjathy A, Lacanna G, Lyons J, Macpherson KA, Marchetti E, McKee KF, Mellors RJ, Mendo-Pérez G, Mikesell TD, Munaibari E, Oyola-Merced M, Park I, Pilger C, Ramos C, Ruiz MC, Sabatini R, Schwaiger HF, Tailpied D, Talmadge C, Vidot J, Webster J, Wilson DC. Supplementary Materials for Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga. *Science*. 2022;377(6601). <https://doi.org/10.1126/science.abo7063>
11. Poli P, Shapiro NM. Rapid Characterization of Large Volcanic Eruptions: Measuring the Impulse of the Hunga Tonga Ha’apai Explosion From Teleseismic Waves. *Geophysical Research Letters*. 2022;49(8):e2022GL098123.
12. Carvajal M, Sepúlveda I, Gubler A, Garreaud R. Worldwide signature of the 2022 Tonga volcanic tsunami. *Geophysical Research Letters*. 2022;49(6):e2022GL098153. <https://doi.org/10.1029/2022GL098153>
13. Heidarzadeh M, Gusman AR, Ishibe T, Sabeti R, Šepić J. Estimating the eruption-induced water displacement source of the 15 January 2022 Tonga volcanic tsunami from tsunami spectra and numerical modelling. *Ocean Engineering*. 2022;261:112165. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112165>
14. 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 Applied Geophysics*. 2022;179:1549-1560. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03058-0>
15. Kubota T, Saito T, Nishida K. Global fast-traveling tsunamis driven by atmospheric Lamb waves on the 2022 Tonga eruption. *Science*. 2022;377(6601):91-94. <https://doi.org/10.1126/science.abo4364>
16. Lynett P. The Tsunamis Generated by the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Volcano on January 15, 2022. 16 March 2022, PREPRINT (Version 1) available at Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1377508/v1>

17. Ramírez-Herrera MT, Coca O, Vargas-Espinosa V. Tsunami Effects on the Coast of Mexico by the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Volcano Eruption, Tonga. *Pure and Applied Geophysics*. 2022;179:1117-1137. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03017-9>
18. 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;74:61. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01614-5>
19. Terry JP, Goff J, Winspear N, Bongolan VP, 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. *Geoscience Letters*. 2022;9:24. <https://doi.org/10.1186/s40562-022-00232-z>
20. Chernogor LF, Shevelev MB. A statistical study of the explosive waves launched by the Tonga super-volcano on January 15, 2022. *Space science and technology*. 2022. (In press).
21. Carr JL, Horváth Á, Wu DL, Friberg MD. Stereo plume height and motion retrievals for the record-setting Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption of 15 January 2022. *Geophysical Research Letters*. 2022;49:e2022GL098131. <https://doi.org/10.1029/2022GL098131>
22. 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(9):2179. <https://doi.org/10.3390/rs14092179>
23. Ern M, Hoffmann L, Rhode S, Preusse P. The mesoscale gravity wave response to the 2022 Tonga volcanic eruption: AIRS and MLS satellite observations and source backtracing. *Geophysical Research Letters*. 2022;49(10):e2022GL098626. <https://doi.org/10.1029/2022GL098626>
24. Kulichkov SN, Chunchuzov IP, Popov OE, Gorchakov GI, Mishenin AA, Perepelkin VG, Bush GA, Skorokhod AI, Vinogradov YuA, Semutnikova EG, Šepić J, Medvedev IP, Gushchin RA, Kopeikin VM, Belikov IB, Gubanova DP, Karpov AV, Tikhonov AV. 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 Applied Geophysics*. 2022;179:1533-1548. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03046-4>
25. Lin J-T, Rajesh PK, Lin CCH, 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. *Geophysical Research Letters*. 2022;49(8):e2022GL098222. <https://doi.org/10.1029/2022GL098222>
26. Otsuka S. Visualizing Lamb waves from a volcanic eruption using meteorological satellite Himawari-8. *Geophysical Research Letters*. 2022;49(8):e2022GL098324. <https://doi.org/10.1029/2022GL098324>
27. Vergoz J, Hupe P, Listowski C, Le Pichon A, Garcés MA, Marchetti E, Labazuy P, Ceranna L, Pilger C, Gaebler P, Näsholm SP, Brissaud Q, Poli P, Shapiro N, De Negri R, Mialle P. IMS observations of infrasound and acoustic-gravity waves produced by the January 2022 volcanic eruption of Hunga, Tonga: A global analysis. *Earth and Planetary Science Letters*. 2022;591:117639. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117639>
28. Witze A. Why the Tongan volcanic eruption was so shocking. *Nature*. 2022;602:376-378. <https://media.nature.com/original/magazine-assets/d41586-022-00394-y/d41586-022-00394-y.pdf>
29. Wright CJ, Hindley NP, Alexander MJ, Barlow M, Hoffmann L, Mitchell CN, Prata F, Bouillon M, Carstens J, Clerbaux C, Osprey SM, Powell N, Randall CE, Yue J. Surface-to-space atmospheric waves from Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption. *Nature*. 2022. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05012-5>
30. Yuen DA, Scruggs MA, Spera FJ, Zheng Y, Hu H, McNutt SR, Thompson G, Mandli K, Keller BR, Wei SS, Peng Z, Zhou Z, Mulargia F, Tanioka Y. Under the surface: Pressure-induced planetary-scale waves, volcanic lightning, and gaseous clouds caused by the submarine eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano. *Earthquake Research Advances*. 2022;2(3):100134. <https://doi.org/10.1016/j.eqrea.2022.100134>
31. Zhang S-R, Vierinen J, Aa E, Goncharenko LP, Erickson PJ, Rideout W, Coster AJ, Spicher A. 2022 Tonga Volcanic Eruption Induced Global Propagation of Ionospheric Disturbances via Lamb Waves. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. 2022;9:871275. <https://doi.org/10.3389/fspas.2022.871275>
32. 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(3):76-81. <https://doi.org/10.1002/wea.4182>
33. Aa E, Zhang S-R, Erickson PJ, Vierinen J, Coster AJ, Goncharenko LP, Spicher A, Rideout W. Significant Ionospheric Hole and Equatorial Plasma Bubbles After the 2022 Tonga Volcano Eruption. *Geophysical Research Letters*. 2022;20(7):e2022SW003101. <https://doi.org/10.1029/2022SW003101>
34. Astafyeva E, Maletckii B, Mikesell TD, Munaibari E, Ravanelli M, Coisson P, Manta F, Rolland L. The 15 January 2022 Hunga Tonga eruption history as inferred from ionospheric observations. *Geophysical Research Letters*. 2022;49(10):e2022GL098827. <https://doi.org/10.1029/2022GL098827>
35. Harding BJ, Wu Y-JJ, Alken P, Yamazaki Y, Triplett CC, Immel TJ, Gasque LC, Mende SB, 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. *Geophysical Research Letters*. 2022;49(9):e2022GL098577. <https://doi.org/10.1029/2022GL098577>
36. Le G, Liu G, Yizengaw E, Englert CR. Intense equatorial electrojet and counter electrojet caused by the 15 January 2022 Tonga volcanic eruption: Space- and ground-based observations. *Geophysical Research Letters*. 2022;49(11):e2022GL099002. <https://doi.org/10.1029/2022GL099002>
  37. Rajesh PK, Lin CCH, Lin JT, Lin CY, Liu JY, Matsuo T, et al. Extreme poleward expanding super plasma bubbles over Asia-Pacific region triggered by Tonga volcano eruption during the recovery-phase of geomagnetic storm. *Geophysical Research Letters*. 2022;49:e2022GL099798. <https://doi.org/10.1029/2022GL099798>
  38. Saito S. Ionospheric disturbances observed over Japan following the eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai on 15 January 2022. *Earth, Planets and Space*. 2022;74:57. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01619-0>
  39. Shinbori A, Otsuka Y, Sori T, Nishioka M, Perwitasari S, Tsuda T, Nishitani N. Electromagnetic conjugacy of ionospheric disturbances after the 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcanic eruption as seen in GNSS-TEC and SuperDARN Hokkaido pair of radars observations. *Earth Planets Space*. 2022;74(106). <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01665-8>
  40. Themens DR, Watson C, Žagar N, Vasylykevych S, Elvidge S, McCaffrey A, Prikryl P, Reid B, Wood A, Jayachandran PT. Global propagation of ionospheric disturbances associated with the 2022 Tonga volcanic eruption. *Geophysical Research Letters*. 2022;49(7):e2022GL098158. <https://doi.org/10.1029/2022GL098158>
  41. Schnepf NR, Minami T, Toh H, Nair MC. Magnetic Signatures of the 15 January 2022 Hunga Tonga–Hunga Ha'apai Volcanic Eruption. *Geophysical Research Letters*. 2022;49(10):e2022GL098454.
  42. 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. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2022;127(7):e2022JA030540. <https://doi.org/10.1029/2022JA030540>
  43. Adushkin VV, Rybnov YS, Spivak AA. 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(4):251–263. <https://doi.org/10.1134/S0742046322040029>
  44. Chernogor LF. Radiophysical and geomagnetic effects of rocket launches: Monograph. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ, 2009. 386.
  45. Chernogor LF, 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.
  46. Luo Y, Chernogor LF, Zhdanko YH. Geospace perturbations that accompanied rocket launches from the Baikonur cosmodrome. *Kinematics and physics of celestial bodies*. 2022;38(6):287–299. <https://doi.org/10.3103/S0884591322060046>
  47. Heki K. Explosion energy of the 2004 eruption of the Asama Volcano, central Japan, inferred from ionospheric disturbances. *Geophys. Res. Lett*. 2006;33:L14303. <https://doi.org/10.1029/2006GL026249>
  48. Gossard EE, Hooke YX. *Waves in the Atmosphere: Atmospheric Infrasound and Gravity Waves, Their Generation and Propagation (Developments in Atmospheric Science)*. Elsevier Scientific Pub. Co., 1975. 472 p.
  49. Chernogor LF. *Physics and Ecology of Disasters: Monograph*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ, 2012. 556.

Стаття надійшла до редакції: 16 вересня 2022 р.

Рекомендовано до друку: 27 жовтня 2022 р.

## LARGE-SCALE GEOMAGNETIC FIELD DISTURBANCES ACCOMPANIED BY THE POWERFUL EXPLOSION OF THE TONGA VOLCANO ON JANUARY 15, 2022

L. F. Chernogor, M. Yu. Holub

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

**Background.** A number of authors have described the results of observations of variations in the geomagnetic field caused by the Tonga volcano explosion. The main attention was paid to the analysis of quasi-periodic processes, disturbance of the neutral wind system, ionospheric currents at the heights of the dynamo region of the atmosphere. Temporal variations of the geomagnetic field observed at a number of the Intermagnet network magnetic stations remote from the volcano were described. A more detailed analysis of the magnetic effect of the Tonga volcano is an urgent task.

**The purpose** of this paper is to analyze the large-scale disturbances of the geomagnetic field caused by the powerful explosion of the Tonga volcano, which took place on January 15, 2022.

**Techniques and Methodology.** The data of measurements on the global network of Intermagnet magnetic stations were used for the analysis. These stations were located on different sides of the disturbance source. The  $X$ -,  $Y$ -, and  $Z$ -components of the geomagnetic field were subjected to analysis. The time resolution was 1 min, the error did not exceed 1 nT. Temporal variations

of the geomagnetic field level from January 12 to January 18, 2022, were analyzed. The most magnetically quiet days were January 13 and January 17, 2022. They were used as reference days.

**Results.** As a result of the time variations analysis of the  $X$ -,  $Y$ -, and  $Z$ -components of the geomagnetic field registered at stations located at a distance from  $\sim 2000$  to  $8000$  km from the epicenter of the Tonga volcano explosion, it was established that the geomagnetic effect was of a global nature. Six groups of geomagnetic field component disturbances that could have been caused by a volcanic explosion were identified. Speeds close to  $\sim 4$  and  $1.5$  km/s are characteristic of MHD waves. A speed close to  $\sim 1$  km/s is typical for a blast wave. A speed of  $\sim 500$  m/s have atmospheric gravity waves. Disturbances with speeds of  $\sim 315$  and  $200$  m/s apparently propagated by Lamb waves and tsunamis. The amplitude of quasi-periodic disturbances of the geomagnetic field was estimated to be  $1\text{--}10$  nT. These values are in good agreement with the observation results. Estimates of the magnitude of aperiodic disturbances gave a value of  $30\text{--}60$  nT, which also agreed with the measurement results.

**Conclusions.** It was confirmed that the powerful explosion of the volcano led to the disturbance of all subsystems in the Earth – atmosphere – ionosphere – magnetosphere system.

**KEY WORDS:** *Tonga volcano, geomagnetic field disturbance, aperiodic disturbance, quasi-periodic disturbance, time delay, apparent speed, types of waves*

The article was received by the editors: 16 September 2022

The article is recommended for printing: 27 October 2022