

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2023-38-04>

УДК 550.388

Л. Ф. ЧОРНОГОР, д. ф.-м. наук, проф.

e-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5777-2392>

Ю. Б. МИЛОВАНОВ, к. ф.-м. наук, с.н.с.

e-mail: hobit1957@gmail.com

В. Л. ДОРОХОВ, н.с.

e-mail: dorokhov@karazin.ua

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

ІОНОСФЕРНІ ЕФЕКТИ УДАРНОЇ ХВИЛІ, ЗГЕНЕРОВАНОЇ ВИБУХОМ ВУЛКАНУ ТОНГА 15 СІЧНЯ 2022 Р.

Актуальність. Вулкани належать до високоенергетичних джерел, здатних викликати значні збурення у всіх підсистемах системи Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера (ЗАІМ). Видатною подією стався вибух вулкану Хунга – Тонга – Хунга – Хаапай (далі коротко Тонга) 15 січня 2022 р. Вибух викликав: помірний землетрус із магнітудою 5.8, генерацію двох типів цунамі зі швидкостями ~ 200 та 315 м/с та висотою, що поступово зменшувалася від 90 м над кратером підводного вулкану до 2–3 дм на відстані ~ 20 Мм; спектр хвиль у атмосфері (вибухової, хвилі Лемба, атмосферної гравітаційної, інфразвуку, звуку); появу іоносферної «діри»; хвильові процеси у іоносфері зі швидкістю від ~ 250 м/с до ~ 1000 м/с; електризацію частинок у вулканічному струмені та плюмі; суттєве зростання об'ємної густини електричного заряду, його розділення, збільшення густини атмосферного струму, збурення глобального електричного кола; генерацію чисельних (до 20000 хв⁻¹) блискавок у плюмі, електромагнітне випромінювання яких збурило температуру та концентрацію електронів у нижній іоносфері, поширилося вздовж магнітних силових ліній до магнітосфери та радіаційного поясу, викликаючи висипання високоенергійних частинок із радіаційного поясу. Вибух вулкану Тонга викликав цілий комплекс фізичних процесів у системі ЗАІМ. Актуальним є дослідження варіацій повного електронного вмісту (ПЕВ) та параметрів рухомих іоносферних збурень, викликаних вибухом вулкану Тонга 15 січня 2022 р.

Метою цієї роботи є аналіз часових аперіодичних і квазіперіодичних варіацій ПЕВ, згенерованих потужним вибухом вулкану Тонга 15 січня 2022 р., та оцінка їхніх параметрів.

Методи і методологія. Для аналізу іоносферних збурень, викликаних вибухом вулкану Тонга, використано дані трансіоносферного зондування на основі GPS-технологій. За даними вимірювань псевдодальностей розраховувався ПЕВ в іоносфері у вертикальному стовпі. Сумарна похибка складала близько 0.1 TECU.

Результати. Аналіз часових варіацій ПЕВ для станцій, віддалених від епіцентру вибуху вулкану на відстань близько 500–4400 км, показав наступне. Спостерігалось три групи збурень у іоносфері, час запізнювання яких збільшувався при збільшенні відстані від епіцентру. Цим збуренням відповідали три групи горизонтальних удаваних швидкостей: ~ 1000 м/с та дещо більше, ~ 350–700 м/с та 270–330 м/с. Ці швидкості пов'язані з вибуховою хвилею, атмосферною гравітаційною хвилею та хвилею Лемба. Доведено, що дефіцит ПЕВ (іоносферна «діра»), викликаний саме вибухом вулкану, оскільки час запізнювання по відношенню до моменту вибуху та час існування «діри» зростали при збільшенні відстані від епіцентру вибуху. Величина виявлених ефектів суттєво залежала від місця дислокації станції, положення екваторіальної іонізаційної аномалії, часу доби, освітленості іоносфери тощо. Зменшення ПЕВ сягало 10–15 TECU, а відносне зменшення – 25–60%. Хвильові збурення зазвичай мали період 10–15 хв та амплітуду 0.5–1 TECU.

Висновки. Ударна хвиля, згенерована вибухом вулкану Тонга, викликала в іоносфері аперіодичні та квазіперіодичні збурення.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: вулкан Тонга, ударна хвиля, іоносфера, повний електронний вміст, іоносферна «діра», квазіперіодичне збурення

Як цитувати: Черногор ЛФ, Милованов ЮБ, Дорохов ВЛ. Іоносферні ефекти ударної хвилі, згенерованої вибухом вулкану Тонга 15 січня 2022 р. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2023; 30-44. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2023-38-04>

In cites: Chernogor LF, Mylovanov YB, Dorokhov VL. Ionospheric effects of the shock wave generated by the explosion of the Tonga volcano on January 15, 2022. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series “Radiophysics and Electronics”. 2023; 30-44. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2023-38-04>

© Черногор Л.Ф., Милованов Ю.Б., Дорохов В.Л., 2023

Open access. This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ВСТУП

Вулкани належать до високоенергетичних джерел, здатних викликати значні збурення у всіх підсистемах системи Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера (ЗАІМ) [1–3, 4–10]. Потужні вулкани вибухають досить рідко, приблизно одна подія за 10–20 років [1, 11–22].

Видатною подією стався вибух вулкану Хунга – Тонга – Хунга – Хаапай (далі коротко Тонга) 15 січня 2022 р. Вибух викликав: помірний землетрус із магнітудою 5.8 [23, 24], генерацію двох типів цунамі зі швидкостями ~ 200 та 315 м/с та висотою, що поступово зменшувалася від 90 м над кратером підводного вулкану до 2–3 дм на відстані ~ 20 Мм [25–30]; спектр хвиль у атмосфері (вибухової, хвилі Лемба, атмосферної гравітаційної, інфразвуку, звуку); появу іоносферної «діри»; хвильові процеси у іоносфері зі швидкістю від ~ 250 м/с до ~ 1000 м/с [31–37]; електризацію частинок у вулканічному струмені та плюмі, суттєве зростання об'ємної густини електричного заряду, його розділення, збільшення густини атмосферного струму, збурення глобального електричного кола; генерацію чисельних (до 20000 хв⁻¹) блискавок у плюмі, електромагнітне випромінювання яких збурило температуру та концентрацію електронів у нижній іоносфері, поширилося вздовж магнітних силових ліній до магнітосфери та радіаційного поясу, викликаючи висипання високоенергійних частинок із радіаційного поясу [2, 4–8].

Таким чином, вибух вулкану Тонга викликав цілий комплекс фізичних процесів у системі ЗАІМ. Далі зупинимося дещо детальніше на процесах у іоносфері. Іоносферним ефектам вулкану Тонга присвячена низка робіт [33, 34, 38–41].

Автори [39] виявили ефект вибухової хвилі та іоносферну «діру». У роботі [42] досліджена локальна та глобальна реакція на вибух вулкану. Поблизу вулкану збурення повного електронного вмісту (ПЕВ) в іоносфері N_V сягало 5–10 TECU. Швидкість рухомих іоносферних збурень (РІЗ) складала від 180 до 1050 м/с. Окремо описана хвиля Лемба, що поширювалася в глобальних масштабах зі швидкістю ~ 315 м/с.

Авторами [38] виявлені в екваторіальній області плазмові «міхури» з дефіцитом концентрації електронів N у них на висотах 400–500 км, що сягав 2–3 порядків.

У роботах [33, 34, 40, 41] також досліджувалися збурення ПЕВ та РІЗ зі швидкостями від 200–400 до 555–950 м/с.

Актуальним є подальше дослідження варіацій ПЕВ та параметрів РІЗ, викликаних вибухом вулкану Тонга 15 січня 2022 р.

Метою роботи є аналіз часових аперіодичних і квазіперіодичних варіацій ПЕВ, згенерованих потужним вибухом вулкану Тонга 15 січня 2022 р., та оцінка їхніх параметрів.

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ВУЛКАН ТОНГА

Підводний вулкан Тонга знаходиться у південній частині Тихого океану на глибині близько 200 м. Його географічні координати: 20°54' пд. ш., 175°38' зх. д. За даними [39], вибухів у інтервалі часу 04:00–05:00 UT (UT – всесвітній час) було п'ять, найбільш потужний з них мав місце о 04:15 UT. Виверження вулкану спостерігалось впродовж 12 ± 2 год [43]. Всього в атмосферу викинуто близько 2.9 Гт продуктів виверження загальним об'ємом 1.9 км^3 . Початкова швидкість вулканічного струменя сягала декількох сотень метрів за секунду, а його початковий діаметр – десятків метрів. Максимальна висота струменя не перевищувала 2 км, в той час як висота конвективного підйому гарячих продуктів виверження наближалась до рекордного значення – 50–58 км. Магнітуда вулкану не перевищувала 5.5, індекс вулканічної вибуховості VEI – 5.8, а інтенсивність викидів – 10.8 [2, 4, 8].

СТАН КОСМІЧНОЇ ПОГОДИ

Для аналізу стану космічної погоди скористаємося даними сайтів [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>] та [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>]. Число сонячних плям W у інтервалі 12–15 січня 2022 р. не перевищувало ~ 100 (Рис. 1). Індекс $F_{10.7} \approx 100\text{--}120$ с.о.п. (1 с.о.п. = $10^{-22} \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{Гц}^{-1}$). Помітне (у рази) збурення параметрів сонячного вітру (концентрації, температури та швидкості) мало місце в ніч з 14 на 15 січня 2022 р. Рівень флуктуацій компоненти B_z міжпланетного магнітного поля від ± 4 нТл збільшився до -14 нТл. Індекс A_p при цьому виріс від ~ 5 до ~ 67 нТл, індекс K_p – від ~ 1 до 5.7, а індекс D_{st} зменшився від +10 до -91 нТл. Всі ці зміни свідчили про те, що в ніч з 14 на 15 січня 2022 р. мала місце помірна магнітна буря, що супроводжувалася помірною іоносферною бурею. 15 січня 2022 р. ефекти іоносферної бурі були незначними.

У якості контрольних днів вибрано найбільш спокійні дні 13 та 17 січня 2022 р.

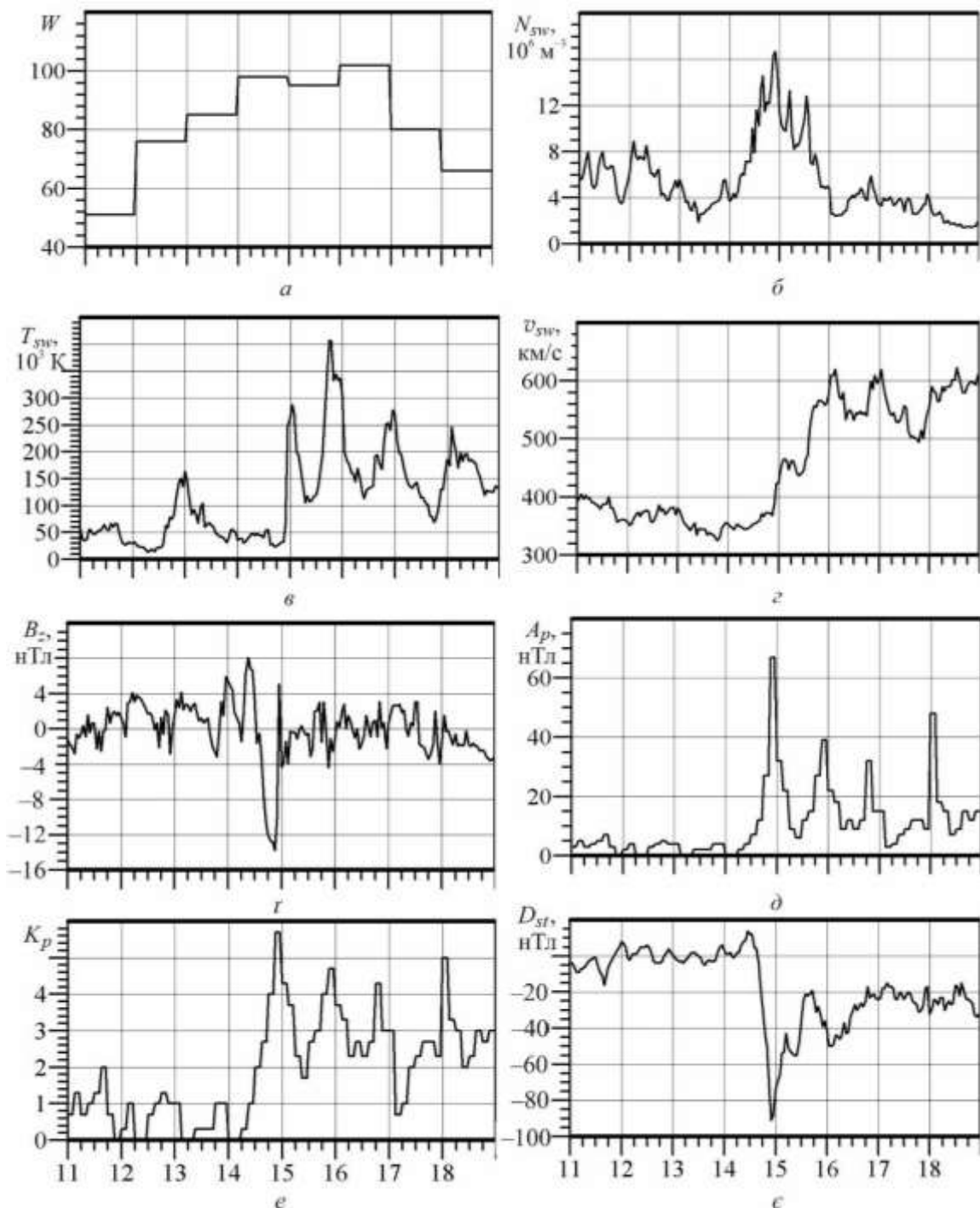


Рис. 1. Часова залежність параметрів космічної погоди щодня з 11 січня до 18 січня 2022 року
 Fig. 1. Time dependences of space weather parameters every day from January 11 to January 18, 2022

ЗАСОБИ ТА МЕТОДИ

Для аналізу іоносферних збурень, викликаних вибухом вулкану Тонга, використано дані трансіоносферного зондування на основі GPS-технологій [https://cddis.nasa.gov/Data_and_Derived_Products/GNSS]. За даними вимірювань псевдодальностей розраховувався ПЕВ в іоносфері у вертикальному стовпі. Сумарна похибка складала близько 0.1 TECU. Контурна мапа зі станціями показана на Рис. 2. Перелік використаних станцій наведено в Табл. 1.

РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ

Можливі збурення, що пов'язані з вибухом вулкану, будемо виявляти за зміною характеру варіацій ПЕВ. Ці варіації можуть бути як аперіодичними, так і квазіперіодичними.

Реакцію іоносфери на вибух, яку на станції FTNA (супутник G18) зареєстровано (відстань $r_{st} \approx 758$ км від епіцентру), показано на Рис. 3а. Можна бачити реакцію ПЕВ на всі вибухи (реакція на деякі вибухи могла злитися). Час запізнювання Δt_1 складав приблизно 14 хв, а тривалість складала 10–15 хв. Крім першої реакції, спостерігалось ще дві реакції з часами запізнювання $\Delta t_2 \approx 50$ хв і $\Delta t_3 \approx 75$ хв (Табл. 2). З часом запізнювання $\tau \approx 40$ хв реєструвалося зменшення ПЕВ ΔN_V приблизно на 10 TECU або на 26% тривалістю $\Delta T \approx 100$ хв. Період квазіперіодичних збурень $T \approx 10$ хв, а амплітуда $\Delta N_{Va} \approx 1$ TECU.

На станції SKIS (супутник G32) також відмічалася реакція на окремі найбільші потужні вибухи (Рис. 3б). При цьому $r_{st} \approx 1624$ км. Квазіперіодичні збурення мали часи запізнювання близько 17, 60 та 140 хв (див. Табл. 2). Крім таких збурень, спостерігалось аперіодичне збурення з $\tau \approx 65$ хв, $\Delta T \approx 140$ хв. При цьому дефіцит ПЕВ $\Delta N_V \approx -15$ TECU, або -60% , $T \approx 10$ хв, а $\Delta N_{Va} \approx 0.5-1$ TECU (див. Табл. 3).

Зменшення ПЕВ на станції THTG (супутник G10, $r_{st} \approx 2734$ км) було відносно невеликим (-3 TECU або -12%), яке настало з часом запізнювання $\tau \approx 60$ хв і тривало близько 100 хв (Рис. 3в). Період коливань складав 10–15 хв, а $\Delta N_{Va} \approx 0.6$ TECU (див. Табл. 3). Квазіперіодичні збурення мали часи запізнювання близько 133 і 173 хв (див. Табл. 2).

Для станції PTVL (супутник G10) відстань $r_{st} \approx 1744$ км. Квазіперіодичні збурення мали часи запізнювання $\Delta t_2 \approx 70$ хв, $\Delta t_3 \approx 115$ хв (див. Табл. 2). Перше збурення з Δt_1 виділити не вдалося. За 70 хв після вибуху розпочалося зменшення ПЕВ до -7 TECU або на 32%, що тривало 180 хв (Рис. 3з). Період коливань $T \approx 15$ хв, а їхня амплітуда не перевищувала 1 TECU (див. Табл. 3).

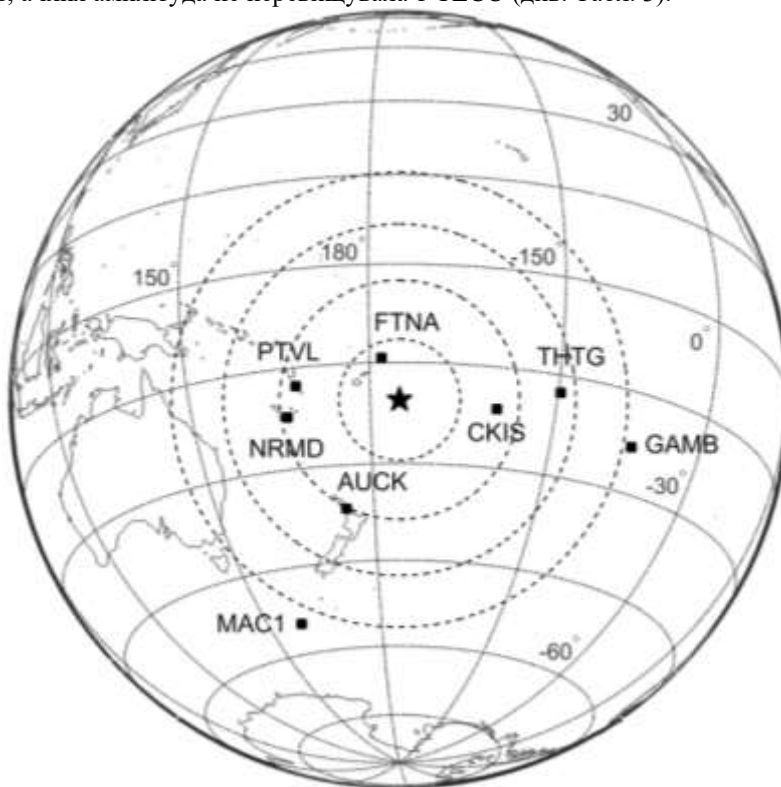


Рис. 2. Контурна мапа розподілу станцій спостереження
Fig. 2. Contour map of observation sites distribution

Таблиця 1. Список використаних супутників та станцій з координатами та країнами належності. Відстань r_{st} від вулкана до станції наведено в останній колонці

Table 1. List of used satellites and stations with coordinates and countries of affiliation. The r_{st} distance from the volcano to the station is given in the last column

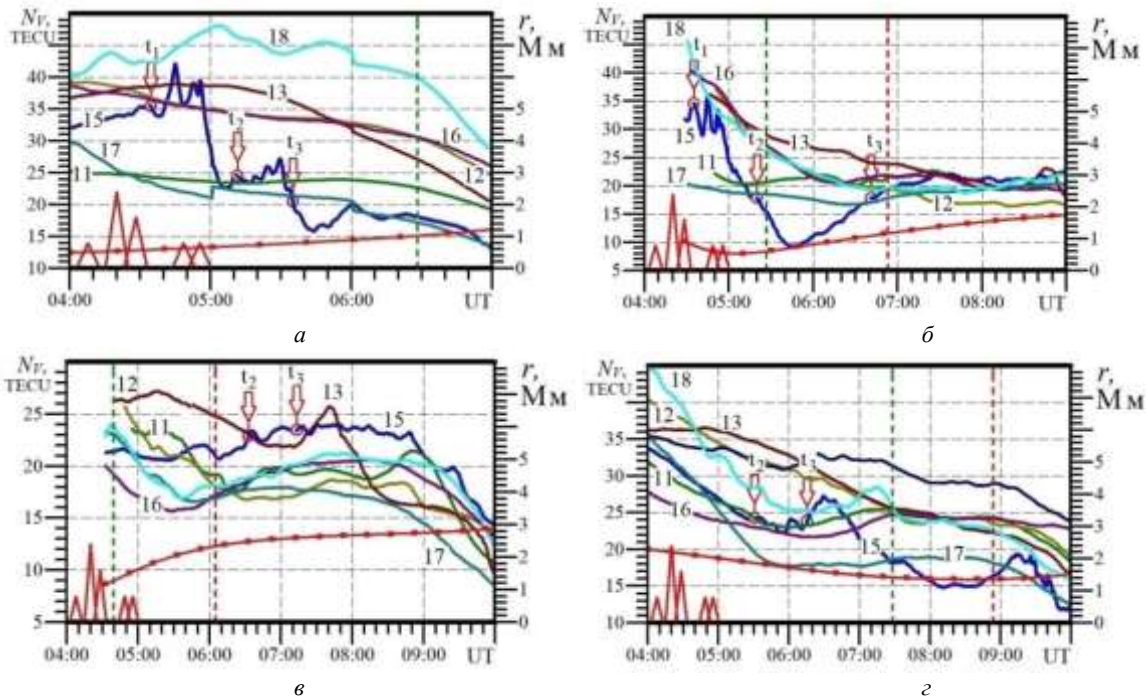
Супутник	Станція	Широта	Довгота	Місцезнаходження	r_{st} , км
G18	FTNA	-14°13'	-178°07'	France	758
G32	CKIS	-21°04'	-159°48'	Cook Islands, New Zealand	1624
G10	PTVL	-17°38'	+168°19'	Republic of Vanuatu	1744
G27	NRMD	-22°05'	+166°29'	Nouvelle-Calédonie, France	1888
G32	AUCK	-36°42'	+174°83'	Auckland, New Zealand	2004
G10	THTG	-17°28'	-149°36'	Papeete, Tahiti, France	2734
G12	GAMB	-23°00'	-135°00'	Gambier, France	4180
G32	MAC1	-54°30'	+158°56'	Macquarie, Australia	4353

Таблиця 2. Основні параметри збурень

Table 2. Main parameters of disturbances

Станція	Супутник	r_1 , км	Δt_1 , хв	v_1' , м/с	r_2 , км	Δt_2 , хв	v_2' , м/с	r_3 , км	Δt_3 , хв	v_3' , м/с
FTNA	G18	578	14	1070	692	50	256	784	75	187
CKIS	G32	796	17	1105	561	60	170	1081	140	133
PTVL	G10				1860	70	477	1646	115	249
NRMD	G27	2571	53	893	2554	105	426	2618	135	336
AUCK	G32	1974	43	866	2075	95	384	2114	120	306
THTG	G10				2472	133	321	2592	173	338
GAMB	G12	4431	95	821	4429	160	476	4461	236	322
MAC1	G32	4094	78	935	4218	176	411	4248	245	295

Для станції AUCK (супутник G32) $r_{st} \approx 2004$ км. Квазіперіодичним збуренням відповідали часи запізнювання 43, 95 і 120 хв (див. Табл. 2). Падіння ПЕВ на 4 TECU розпочалося з $\tau \approx 45$ хв і тривало 120 хв (Рис. 3г). Період $T \approx 15$ хв, а $\Delta N_{Va} \approx 0.5-0.7$ TECU (див. Табл. 3).



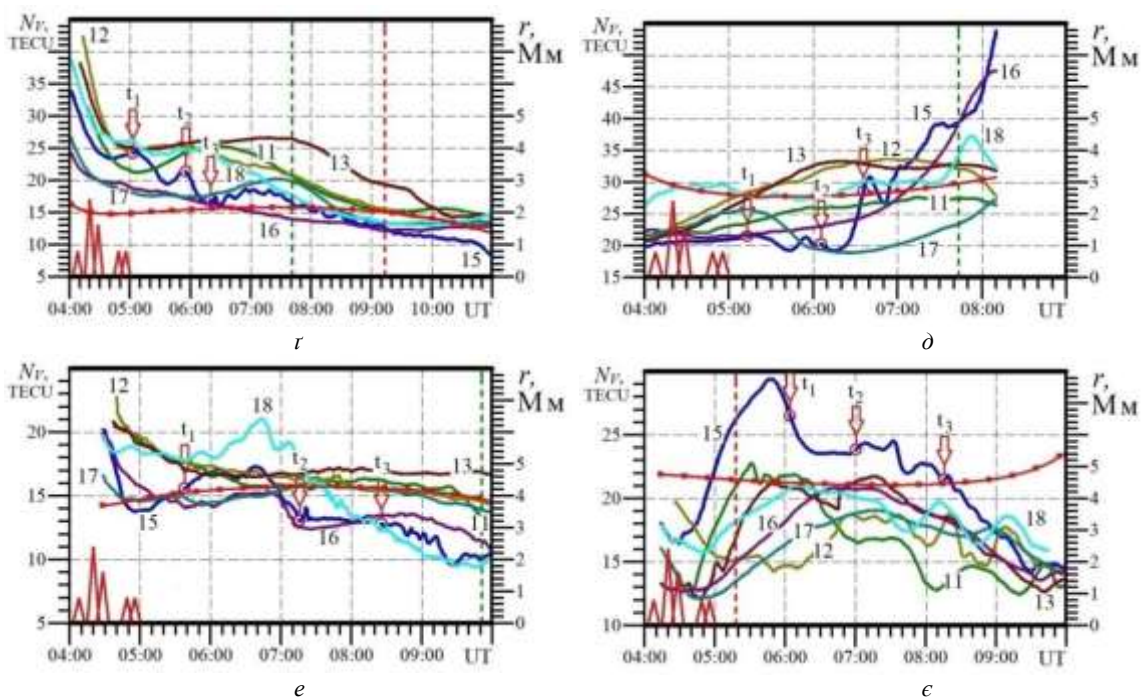


Рис. 3. Часові варіації ПЕВ: *a* – станція FTNA, супутник G18; *b* – станція СКІС, супутник G32; *c* – станція ТНТГ, супутник G10; *d* – станція РТВЛ, супутник G10; *r* – станція АУСК, супутник G32; *д* – станція NRMD, супутник G27; *e* – станція MAC1, супутник G32; *e* – станція GAMB, супутник G12. Номер кривої відповідає номеру дня. Моменти заходу Сонця відзначені вертикальними лініями, ліворуч на поверхні Землі, праворуч на висоті 350 км. Часи вибуху позначені трикутниками. Стрілки з t_1 , t_2 і t_3 – моменти можливої реакції на вибух

Fig. 3. Temporal variations of TEC: *a* is FTNA station, G18 satellite; *b* is CKIS station, G32 satellite; *c* is THTG station, G10 satellite; *d* is PTVL station, G10 satellite; *r* is AUCK station, G32 satellite; *d* is NRMD station, G27 satellite; *e* is MAC1 station, G32 satellite; *e* is GAMB station, G12 satellite. The curve number corresponds to the day number. The moments of sunset are marked by vertical lines, on the left on the Earth's surface, on the right at an altitude of 350 km. The explosion times are marked with triangles. Arrows with t_1 , t_2 and t_3 indicate moments of a possible reaction to the explosion

Розглянемо дані станції NRMD (супутник G27). Відстань $r_{st} \approx 1888$ км. Збурення мали такі часи запізнювання: $\Delta t_1 \approx 53$ хв, $\Delta t_2 \approx 105$ хв і $\Delta t_3 \approx 135$ хв (Рис. 3д). Зменшення ПЕВ розпочалося з часом запізнювання 75 хв і тривало близько 210 хв. Значення $\Delta N_V \approx -5$ TECU або -20% (див. Табл. 3).

Реєстрація збурень на станції MAC1 (супутник G32), для якої $r_{st} \approx 4353$ км, розпочалася з часами запізнювання 78, 176 і 245 хв (Рис. 3e). Зменшення ПЕВ, що не перевищувало 2.5 TECU або 17%, розпочалося за 105 хв після вибуху та тривало близько 120 хв. Період коливань складав 7–10 хв, а амплітуда

– 0.5 TECU (див. Табл. 3).

Таблиця 3. Основні параметри іоносферної «діри» та хвильових збурень

Table 3. Main parameters of the ionospheric «hole» and wave disturbances

Станція	Супутник	$r(\tau)$, км	ΔN_V , TECU	N_V , TECU	δ_V , %	ΔT , хв	τ , хв	T , хв	ΔN_{Va} , TECU
FTNA	G18	677	-10	38	-26	100	40	10	1
СКІС	G32	531	-15	25	-60	140	45	10	0.75
ТНТГ	G10	1975	-3	25	-12	100	60	12.5	0.6
РТВЛ	G10	1835	-7	22	-32	180	70	15	1
АУСК	G32	1987	-4	20	-20	120	45	15	0.6
NRMD	G27	2539	-5	25	-20	210	75	15	0.75
MAC1	G32	4196	-2.5	15	-17	120	105	8.5	0.5
GAMB	G12	4482	-2.5	26	-10	120	105	12	0.4

Для станції GAMB (супутник G12) маємо $r_{st} \approx 4180$ км. Перше збурення мало запізнювання 95 хв, $\Delta t_2 \approx 160$ хв, а $\Delta t_3 \approx 236$ хв (Рис. 3є). Зменшення ПЕВ розпочалося з часом запізнювання близько 105 хв і тривало 120 хв. При цьому $\Delta N_V \approx -2.5$ TECU або -10% . Період квазіперіодичних збурень складав близько 12 хв, а його амплітуда -0.4 TECU (див. Табл. 3).

ОБГОВОРЕННЯ

У роботі проаналізовано часові варіації ПЕВ для відстаней, що змінювалися від декількох сотень до ~ 4400 км. На всіх реєстраціях якісна картина була в цілому подібною: мало місце три групи збурень з часами запізнювання Δt_1 , Δt_2 і Δt_3 . Важливо, що спостерігалася тенденція до збільшення часів запізнювання при збільшенні відстані від вулкану (див. Табл. 2). Це свідчить на користь того, що збурення викликані саме вибухом вулкану, а не іншим джерелом.

За часами запізнювання можна оцінити горизонтальну вдавану швидкість за формулою $v = r/\Delta t$, де r – відстань від епіцентру до підіоносферної точки в момент часу Δt , Δt – час запізнювання реакції на вибух вулкану. Більш фізичною є скоригована швидкість

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

де Δt_0 – час поширення збурення до іоносфери (висоти ~ 200 – 400 км). Зазвичай для лінійних хвиль $\Delta t_0 \approx 10$ хв.

Результати оцінок v'_1 , v'_2 і v'_3 наведено в Табл. 2. Видно, що $v'_1 \approx 1$ км/с або навіть більше цієї величини. Така швидкість властива вибуховим (ударним) хвилям. Відомо, що швидкість ударної хвилі залежить від надлишкового тиску у хвилі, який сягав десятків атмосфер [2]. У роботі [2] оцінено енергію вибухової хвилі $E \approx 7.4 \cdot 10^{16}$ Дж. Характерний розмір, де надлишок тиску дорівнює атмосферному тиску на поверхні Землі ($p_0 \approx 10^5$ Па), дається таким співвідношенням [1, 2]:

$$R_0 = \sqrt[3]{\frac{E}{p_0}} \approx 9 \text{ км.}$$

Ця оцінка справедлива для горизонтального напрямку. Нелінійна вибухова хвиля поступово перетворюється у лінійну хвилю на відстані $R_L \approx 3.16R_0 \approx 28$ км [2]. У вертикальному напрямку картина зовсім інша. Значення атмосферного тиску з ростом висоти зменшується за експоненціальним законом з масштабом $H \approx 7.5$ км. Тому відносний надлишок тиску збільшується за експоненціальним законом, тобто вибухова хвиля залишається нелінійною і на більших висотах. Її загасання викликане нелінійним ефектом, що іменується самовпливом. Швидкість такої нелінійної хвилі тривалий час залишається априорі більшою швидкості звуку. Тому для нелінійної хвилі Δt_0 не перевищує 5 хв. Саме це значення використовувалося для розрахунку вдаваних швидкостей v'_1 , v'_2 та v'_3 .

Швидкість $v'_2 \approx 170$ – 477 м/с властива атмосферним гравітаційним хвилям на висотах іоносфери.

Швидкість $v'_3 \approx 133$ – 338 м/с близька до швидкості хвилі Лемба та атмосферної гравітаційної хвилі.

Зауважимо, що всі три групи швидкостей відмічалися також і авторами робіт [31–37].

Для станцій, які знаходилися найближче до вулкану (FTNA та SKIS), спостерігалася реакція іоносфери на окремі вибухи, яких було п'ять. Для більш віддалених станцій реакція іоносфери була викликана найпотужнішим вибухом, який мав місце о 04:15 UT.

Зупинимось на обговоренні ефекту зменшення ПЕВ, що отримав назву іоносферної «діри» [39]. Важливо, що спостерігається тенденція до збільшення часу запізнювання та тривалості існування іоносферної «діри» зі збільшенням відстані від епіцентру вибуху (див. табл. 3). Це є підтвердженням того факту, що дефіцит ПЕВ викликано саме вибухом вулкану. Величина цього дефіциту і його відносного значення суттєво залежали від місця дислокації станції та прольотів супутників, часу доби, освітленості іоносфери тощо. Так, станції SKIS і THTG знаходилися на нічній стороні. Зменшення концентрації електронів N у іоносфері після заходу Сонця вплинуло на глибину провалу в ПЕВ на станції SKIS. На станції THTG зменшення N призвело до часткового маскування ефекту від вибухової хвилі. На величину зменшення ΔN_V та δ_N також вплинуло положення екваторіальної іонізаційної аномалії.

Опишемо залежність часу запізнювання збурення від відстані r до вулкану (Рис. 4). Із Рис. 4 видно, що зі збільшенням відстані час запізнювання збурень збільшується. Це означає, що збурення викликані саме вибухом вулкану.

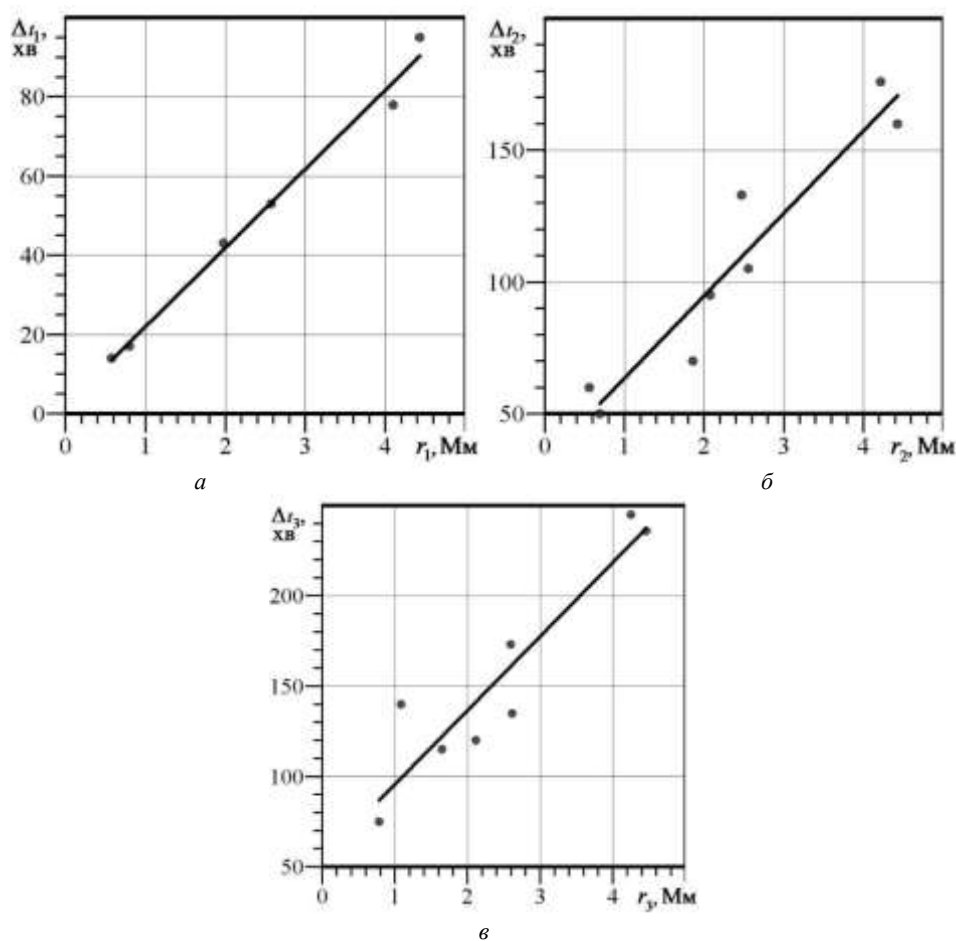


Рис. 4. Залежність часу запізнювання від відстані до вулкану: *a* – $\Delta t_1(r_1)$, *б* – $\Delta t_2(r_2)$ та *в* – $\Delta t_3(r_3)$. Прямая лінія – лінійний тренд.

Fig. 4. Dependence of delay time on the distance to the volcano: *a* is $\Delta t_1(r_1)$, *б* is $\Delta t_2(r_2)$, and *в* is $\Delta t_3(r_3)$. A straight line is a linear trend

Залежності апроксимовано наступними лінійними функціями:

$$\Delta t_1 = 19.9r_1 + 2.1, \quad \sigma = 3.4 \text{ хв}, \quad (1)$$

$$\Delta t_2 = 31.3r_2 + 32.4, \quad \sigma = 14.1 \text{ хв}, \quad (2)$$

$$\Delta t_3 = 41r_3 + 54.8, \quad \sigma = 22.3 \text{ хв}, \quad (3)$$

де часова затримка вимірюється в хвиликах, а відстань у мегаметрах. Зі співвідношень (1)–(3) можна оцінити середні швидкості. Вони дорівнюють 838, 532 та 407 м/с.

Розглянемо залежність параметрів іоносферної «діри» від відстані r (Рис. 5). Із Рис. 5*а* та 5*б* можна бачити, що абсолютне $|\Delta N_V|$ та відносне $|\delta_V|$ значення убувають зі збільшенням r . Це засвідчує на користь того, що іоносферна «діра» викликана саме вибухом вулкану. Лінійні апроксимації мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} \Delta N_V &= 2.5r - 11.7, & \sigma &= 2.6\%, \\ \delta_V &= -7.7r + 42.0, & \sigma &= 11.6\%, \end{aligned}$$

де відстань вимірюється в мегаметрах, ΔN_V – в TECU, а δ_V – в %.

Із умови $\Delta N_V(r_{\max}) = 0$ та $\delta_V(r_{\max}) = 0$ оцінимо максимальний розмір іоносферної «діри»:

$$r_{\max} \approx 4.7 \text{ Мм} \quad \text{або} \quad r_{\max} \approx 5.5 \text{ Мм.}$$

З урахуванням похибки σ маємо:

$$r_{\max} \approx 4.7 \pm 1.0 \text{ Мм} \quad \text{або} \quad r_{\max} \approx 5.5 \pm 1.6 \text{ Мм.}$$

Як бачимо r_{\max} варіюється від ~ 4 до ~ 7 Мм.

Залежності $\tau(r)$ та $\delta_{Va}(r)$ показані відповідно на Рис. 5*в* та 5*г*. Апроксимації мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} \tau &= 17r + 29.5, & \sigma &= 8.4 \text{ хв}, \\ \delta_{Va} &= -0.12r + 0.96, & \sigma &= 0.14\%. \end{aligned}$$

Зростання τ та зменшення δ_{Va} зі зростанням відстані r також свідчить про вулканічну природу збурень. За $r_{\max} \approx 5.1 \pm 0.6$ Мм маємо $\tau(r_{\max}) \approx 108\text{--}125$ хв, або $\tau(r_{\max}) \approx 116 \pm 8$ хв.

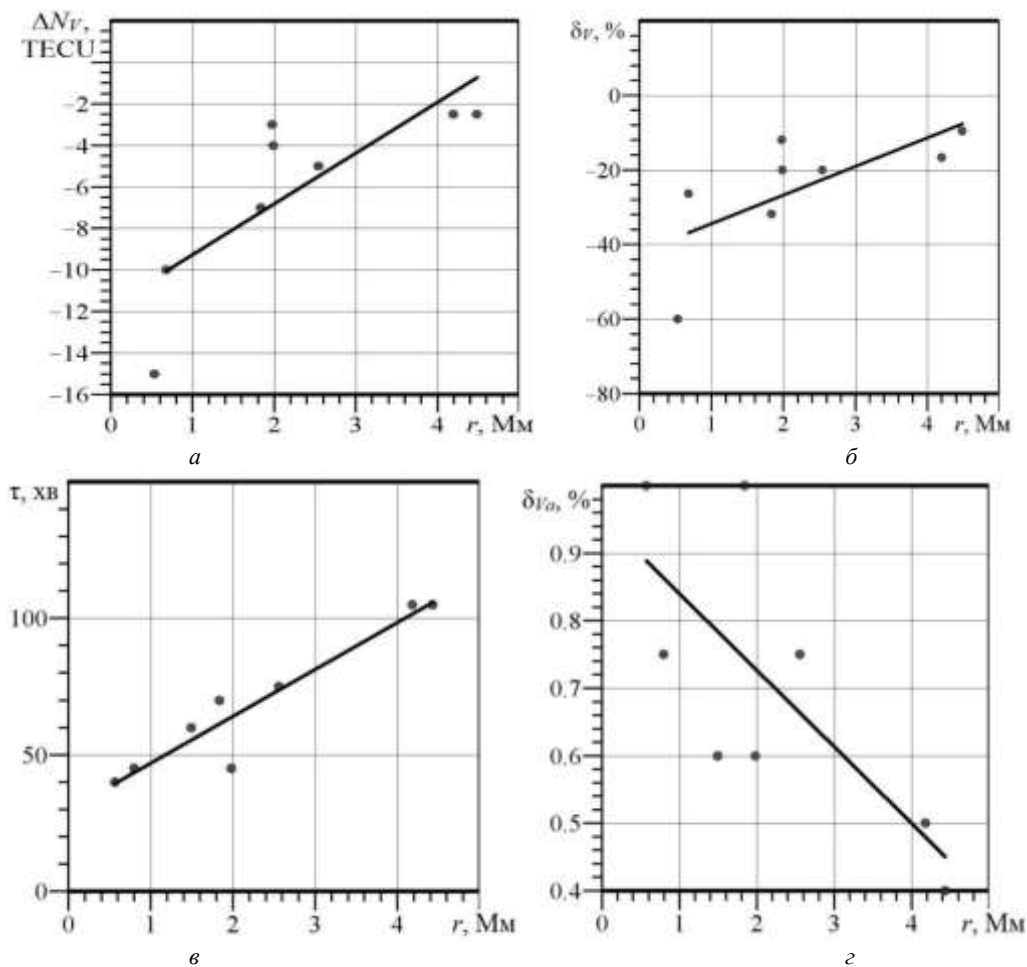


Рис. 5. Залежність основних параметрів «діри» від відстані до вулкану: а – $\Delta Nv(r)$; б – $\delta v(r)$; в – $\tau(r)$ та г – $\delta v_a(r)$
 Fig. 5. Dependence of the «hole» main parameters on the distance to the volcano: а is $\Delta Nv(r)$; б is $\delta v(r)$; в is $\tau(r)$, and г is $\delta v_a(r)$

ГОЛОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Аналіз часових варіацій ПЕВ для станцій, віддалених від епіцентру вибуху вулкану на відстань близько 500–4400 км, показав наступне.

1. Спостерігалось три групи збурень у іоносфері, час запізнювання яких збільшувався при збільшенні відстані від епіцентру. Цим збуренням відповідали три групи горизонтальних удаваних швидкостей: ~ 1000 м/с та дещо більше, ~ 170 – 477 м/с та 133 – 338 м/с. Ці швидкості пов'язані з вибуховою хвилею, атмосферною гравітаційною хвилею та хвилею Лемба.

2. Доведено, що дефіцит ПЕВ (іоносферна «діра») викликаний саме вибухом вулкану, оскільки час запізнювання по відношенню до моменту вибуху зростає при збільшенні відстані від епіцентру вибуху.

3. Величина виявлених ефектів суттєво залежала від місця дислокації станції, положення екваторіальної іонізаційної аномалії, часу доби, освітленості іоносфери тощо. Зменшення ПЕВ сягало 10 – 15 TECU, а відносне зменшення – 25 – 60% .

4. Хвильові збурення зазвичай мали період 10 – 15 хв та амплітуду 0.5 – 1 TECU.

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. The Encyclopedia of Volcanoes, 2nd ed. (Academic, London, 2015).

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00063-8>

2. Черногор ЛФ. Фізичні ефекти у системі Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера, викликані потужним вибухом вулкану Тонга 15 січня 2022 р. *Космічна наука і технологія*. 2022. (У друці).
3. 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).
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Cheng K, Huang Y-N. Ionospheric disturbances observed during the period of Mount Pinatubo eruptions in June 1991. *J. Geophys. Res.* 1992;97(A11):16995-17004. <https://doi.org/10.1029/92JA01462>
12. Dautermann T, Calais E, Mattioli GS. Global Positioning System detection and energy estimation of the ionospheric wave caused by the 13 July 2003 explosion of the Soufrière Hills Volcano, Montserrat. *J. Geophys. Res.* 2009;114:B02202. <https://doi.org/10.1029/2008JB005722>
13. Dautermann T, Calais E, Lognonné P, Mattioli G. Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling after the 2003 Explosive eruption of the Soufriere Hills Volcano, Montserrat. *Geophys. J. Int.* 2009;179(3):1537-1546. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04390.x>
14. 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>
15. Igarashi K, Kainuma S, Nishimuta I, Okamoto S, Kuroiwa H, Tanaka T, Ogawa T. Ionospheric and atmospheric disturbances around Japan caused by the eruption of Mount Pinatubo on 15 June 1991. *J. Atmos. and Terr. Phys.* 1994;56(9):1227-1234.
16. Johnson JB. Generation and propagation of infrasonic airwaves from volcanic explosions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research.* 2003;121(1-2):1-14. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(02\)00408-0](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(02)00408-0)
17. Liu CH, Klostermeyer J, Yeh KC, Jones TB, Robinson T, Holt O, Leiting R, Ogawa T, Sinno K, Kato S, Ogawa T, Bedard AJ, Kersley L. Global dynamic responses of the atmosphere to the eruption of Mount St. Helens on May 18, 1980. *J. Geophys. Res.* 1982;87(A8):6281-6290. <https://doi.org/10.1029/JA087iA08p06281>
18. Roberts DH, Klobuchar JA, Fougere PF, Hendrickson DH. A large-amplitude traveling ionospheric disturbance produced by the May 18, 1980, explosion of Mount St. Helens. *J. Geophys. Res.* 1982;87(A8):6291-6301. <https://doi.org/10.1029/JA087iA08p06291>
19. Rozhnoi A, Hayakawa M, Solovieva M, Hobara Y, Fedun V. Ionospheric effects of the Mt. Kirishima volcanic eruption as seen from subionospheric VLF observations. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* 2014;107:54-59. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.10.014>
20. Shults K, Astafyeva E, Adourian S. Ionospheric detection and localization of volcano eruptions on the example of the April 2015 Calbuco events. *J. Geophys. Res. Space Physics.* 2016;121:10,303-10,315, <https://doi.org/10.1002/2016JA023382>
21. The Encyclopedia of Volcanoes (Second Edition). Academic Press; 2015. 1421 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00063-8>

22. Nakashima Y, Heki K, Takeo A, Cahyadi MN, Aditiya A, Yoshizawa K. Atmospheric resonant oscillations by the 2014 eruption of the Kelud volcano, Indonesia, observed with the ionospheric total electron contents and seismic signals. *Earth and Planetary Science Letters*. 2016;434:112-116. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.11.029>
23. 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, Gubanov 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>
24. 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.
25. 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>
26. 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>
27. 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>
28. 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>
29. 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>
30. 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>
31. Amores A, Monserrat S, Marcos M, Argüeso D, Villalonga J, Jordà G, Gomis D. Numerical Simulation of Atmospheric Lamb Waves Generated by the 2022 Hunga-Tonga Volcanic Eruption. *Geophysical Research Letters*. 2022;49(6):e2022GL098240. <https://doi.org/10.1029/2022GL098240>
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. 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>
34. 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>
35. 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>
36. 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>
37. 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>
38. Aa E, Zhang S-R, Wang W, Erickson PJ, Qian L, Eastes R, Harding BJ, Immel TJ, Karan DK, Daniell RE, Coster AJ, Goncharenko LP, Vierinen J, Cai X, Spicher A. Pronounced Suppression and X-Pattern Merging of Equatorial Ionization Anomalies After the 2022 Tonga Volcano Eruption. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2022;127(6):e2022JA030527. <https://doi.org/10.1029/2022JA030527>
39. 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>
40. Themens DR, Watson C, Žagar N, Vasylyevych 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. 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>
42. 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>
43. 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>

REFERENCES

1. The Encyclopedia of Volcanoes, 2nd ed. (Academic, London, 2015). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00063-8>
2. 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 press).
3. 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).
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Cheng K, Huang Y-N. Ionospheric disturbances observed during the period of Mount Pinatubo eruptions in June 1991. *J. Geophys. Res.* 1992;97(A11):16995-17004. <https://doi.org/10.1029/92JA01462>
 12. Dautermann T, Calais E, Mattioli GS. Global Positioning System detection and energy estimation of the ionospheric wave caused by the 13 July 2003 explosion of the Soufrière Hills Volcano, Montserrat. *J. Geophys. Res.* 2009;114:B02202. <https://doi.org/10.1029/2008JB005722>
 13. Dautermann T, Calais E, Lognonné P, Mattioli G. Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling after the 2003 Explosive eruption of the Soufriere Hills Volcano, Montserrat. *Geophys. J. Int.* 2009;179(3):1537-1546. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04390.x>
 14. 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>
 15. Igarashi K, Kainuma S, Nishimuta I, Okamoto S, Kuroiwa H, Tanaka T, Ogawa T. Ionospheric and atmospheric disturbances around Japan caused by the eruption of Mount Pinatubo on 15 June 1991. *J. Atmos. and Terr. Phys.* 1994;56(9):1227-1234.
 16. Johnson JB. Generation and propagation of infrasonic airwaves from volcanic explosions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research.* 2003;121(1-2):1-14. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(02\)00408-0](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(02)00408-0)
 17. Liu CH, Klostermeyer J, Yeh KC, Jones TB, Robinson T, Holt O, Leitinger R, Ogawa T, Sinno K, Kato S, Ogawa T, Bedard AJ, Kersley L. Global dynamic responses of the atmosphere to the eruption of Mount St. Helens on May 18, 1980. *J. Geophys. Res.* 1982;87(A8):6281-6290. <https://doi.org/10.1029/JA087iA08p06281>
 18. Roberts DH, Klobuchar JA, Fougere PF, Hendrickson DH. A large-amplitude traveling ionospheric disturbance produced by the May 18, 1980, explosion of Mount St. Helens. *J. Geophys. Res.* 1982;87(A8):6291-6301. <https://doi.org/10.1029/JA087iA08p06291>
 19. Rozhnoi A, Hayakawa M, Solovieva M, Hobara Y, Fedun V. Ionospheric effects of the Mt. Kirishima volcanic eruption as seen from subionospheric VLF observations. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* 2014;107:54-59. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.10.014>
 20. Shults K, Astafyeva E, Adourian S. Ionospheric detection and localization of volcano eruptions on the example of the April 2015 Calbuco events. *J. Geophys. Res. Space Physics.* 2016;121:10,303-10,315. <https://doi.org/10.1002/2016JA023382>
 21. The Encyclopedia of Volcanoes (Second Edition). Academic Press; 2015. 1421 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00063-8>
 22. Nakashima Y, Heki K, Takeo A, Cahyadi MN, Aditiya A, Yoshizawa K. Atmospheric resonant oscillations by the 2014 eruption of the Kelud volcano, Indonesia, observed with the ionospheric total electron contents and seismic signals. *Earth and Planetary Science Letters.* 2016;434:112-116. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.11.029>
 23. 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>
 24. 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.
 25. 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>
 26. 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>
 27. 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>
 28. 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>
 29. 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>

30. 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>
31. Amores A, Monserrat S, Marcos M, Argüeso D, Villalonga J, Jordà G, Gomis D. Numerical Simulation of Atmospheric Lamb Waves Generated by the 2022 Hunga-Tonga Volcanic Eruption. *Geophysical Research Letters*. 2022;49(6):e2022GL098240. <https://doi.org/10.1029/2022GL098240>
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. 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>
34. 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>
35. 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>
36. 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>
37. 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>
38. Aa E, Zhang S-R, Wang W, Erickson PJ, Qian L, Eastes R, Harding BJ, Immel TJ, Karan DK, Daniell RE, Coster AJ, Goncharenko LP, Vierinen J, Cai X, Spicher A. Pronounced Suppression and X-Pattern Merging of Equatorial Ionization Anomalies After the 2022 Tonga Volcano Eruption. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2022;127(6):e2022JA030527. <https://doi.org/10.1029/2022JA030527>
39. 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>
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. 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>
42. 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>

43. 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>

Стаття надійшла до редакції: 25 січня 2023 р.

Рекомендовано до друку 27 лютого 2023 р.

IONOSPHERIC EFFECTS OF THE SHOCK WAVE GENERATED BY THE EXPLOSION OF THE TONGA VOLCANO ON JANUARY 15, 2022

L. F. Chernogor, Yu. B. Mylovanov, V. L. Dorohov

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

Background. Volcanoes belong to high-energy sources capable of causing significant disturbances in all subsystems of the Earth – atmosphere – ionosphere – magnetosphere (EAIM) system. An outstanding event was the explosion of the Hunga Tonga–Hunga Ha'apai volcano (hereinafter Tonga for short) on January 15, 2022. The explosion caused a moderate earthquake with a magnitude of 5.8, the generation of two types of tsunami with speeds of ~ 200 and of 315 m/s and a height that gradually decreased from 90 m above the crater of the underwater volcano to 2–3 dm at a distance of ~ 20 Mm; the spectrum of waves in the atmosphere (explosive, Lamb, atmospheric gravity, infrasound, sound waves); appearance of an ionospheric «hole», wave processes in the ionosphere with a speed from ~ 250 m/s to ~ 1000 m/s, electrification of particles in the volcanic jet and plume, a significant increase in the volume density of the electric charge, its separation, an increase in the atmospheric current density, disturbance of the global electric circuit; the generation of numerous (up to 20000 min⁻¹) lightning in the plume, electromagnetic radiation of which disturbed the temperature and electron density in the lower ionosphere, propagated along the magnetic field lines to the magnetosphere and the radiation belt, causing the precipitation of high-energy particles from the radiation belt. The explosion of the Tonga volcano caused a whole complex of physical processes in the EAIM system. The study of variations of the total electron content (TEC) and parameters of traveling ionospheric disturbances caused by the explosion of the Tonga volcano on January 15, 2022 is an urgent task.

The purpose of this paper is to present the results of analysis of the temporal aperiodic and quasi-periodic variations of TEC generated by the powerful explosion of the Tonga volcano on January 15, 2022, and estimation of their parameters.

Techniques and Methodology. Transionospheric sounding data based on GPS technologies were used to analyze the ionospheric disturbances caused by the explosion of the Tonga volcano. According to the pseudorange measurements, the TEC in the ionosphere in the vertical column was calculated. The total error was about 0.1 TECU.

Results. The analysis of TEC temporal variations for stations located at distances of about 500–4400 km from the epicenter of the volcanic explosion showed the following. Three groups of disturbances in the ionosphere were observed, the time delay of which increased with increasing distance from the epicenter. Three groups of horizontal apparent speeds corresponded to these disturbances: ~ 1000 m/s and slightly more, ~ 170–477 m/s and 133–338 m/s. These speeds are related to the blast wave, atmospheric gravity wave, and Lamb wave. It has been proven that the deficiency of TEC (ionospheric «hole») is caused by the explosion of the volcano, since the time delay in relation to the moment of the explosion and the time of existence of the «hole» increased with increasing distance from the epicenter of the explosion. The magnitude of the detected effects depended significantly on the location of the station, position of the equatorial ionization anomaly, time of day, the illumination of the ionosphere, etc. The decrease in TEC reached 10–15 TECU, and the relative decrease was 25–60%. Wave disturbances usually had a period of 10–15 min and an amplitude of 0.5–1 TECU.

Conclusions. The shock wave generated by the explosion of the Tonga volcano caused aperiodic and quasi-periodic disturbances in the ionosphere.

KEY WORDS: *Tonga volcano, shock wave, ionosphere, total electron content, ionospheric «hole», quasi-periodic disturbance*

The article was received by the editors: 25 January 2023

The article is recommended for printing: 27 February 2023