

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra28.03.212>
УДК 551.590+551.524+550.388

Л.Ф. Черногор, Ю.Б. Милованов

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

ІОНОСФЕРНІ ЗБУРЕННЯ У БЛИЖНІЙ ЗОНІ, ВИКЛИКАНІ ЕКСПЛОЗИВНИМ ВИВЕРЖЕННЯМ ВУЛКАНА ТОНГА 15 СІЧНЯ 2022 Р.

Предмет і мета роботи. Теплова енергія вулкана Тонга складала $3.9 \cdot 10^{18}$ Дж, а потужність — $9.1 \cdot 10^{13}$ Вт. Енергія вибухових хвиль наближалася до $(6.7...7.5) \cdot 10^{13}$ Дж, а потужність — до 10^{11} Вт. Іоносферним ефектам, що були викликані експлозивним виверженням вулкана Тонга 15 січня 2022 року, присвячено низку робіт. Установлено, що іоносферні збурення поширювалися на глобальні відстані. Проте найбільші збурення очікувалися у ближній зоні. Метою цієї роботи є дослідження аперіодичних і квазіперіодичних збурень у ближній зоні, згенерованих вибухом вулкана Тонга.

Методи і методологія. Для виявлення іоносферних збурень, викликаних виверженням вулкана, аналізувалися часові варіації повного електронного вмісту (ПЕВ) у вертикальному стовпі. Сумарна похибка оцінки ПЕВ не перевищувала 0.1 TECU.

Результати. Отримано кількісні характеристики збурень у іоносфері, викликаних експлозивним виверженням вулкана. Доведено, що поява іоносферної «діри» обумовлена саме вибухом вулкана. Дефіцит ПЕВ за абсолютною величиною зменшувався від ~ 10.0 до ~ 2.5 TECU при збільшенні відстані від вулкана. Час появи іоносферної «діри» при цьому збільшувався від ~ 20 до ~ 100 хв. Спостерігалися три групи збурень. Перша з них мала N-подібний профіль і була спричинена вибуховою хвилею, швидкість якої перевищувала ~ 1000 м/с. Друга група збурень мала швидкість поширення $\sim 340...620$ м/с, властиву атмосферним гравітаційним хвилям. Швидкість поширення збурень у третій групі складала $110...320$ м/с. Такі збурення могли бути згенеровані цунамі, хвилями Лемба або атмосферними гравітаційними хвилями. Періоди збурень складали $5...20$ хв, а їхня амплітуда — $0.5...1.0$ TECU.

Висновки. Доведено, що аперіодичні та квазіперіодичні іоносферні збурення були викликані саме вибухом вулкана Тонга.

Ключові слова: вулкан Тонга, іоносфера, повний електронний вміст, іоносферна «діра», квазіперіодичні збурення, параметри збурень.

Вступ

Теплова енергія потужних вулканів сягає $10^{19}...10^{20}$ Дж, а потужність — $10^{14}...10^{15}$ Вт [1–5]. Енергія вибухових хвиль для експлозивних вулканів наближається до $10^{17}...10^{18}$ Дж, а потуж-

ність — до $10^{14}...10^{15}$ Вт [1–5]. Потужні вулкани здатні викликати перебудову взаємодії всіх підсистем у системі «Земля (внутрішні геооболонки) — атмосфера — іоносфера — магнітосфера» [1, 2, 4, 5]. Саме таким було експлозивне виверження вулкана Тонга 15 січня 2022 р.

Цитування: Черногор Л.Ф., Милованов Ю.Б. Іоносферні збурення у ближній зоні, викликані експлозивним виверженням вулкана Тонга 15 січня 2022 р. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2023. Т. 28. № 3. С. 212–223. <https://doi.org/10.15407/rpra28.03.212>
Citation: Chernogor, L.F., Mylovanov, Yu.B., 2023. Near-zone ionospheric disturbances caused by explosive eruption of Tonga volcano on 15 January 2022. *Radio Phys. Radio Astron.*, **28**(3), pp. 212–223. <https://doi.org/10.15407/rpra28.03.212>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2023. Статтю опубліковано відповідно до умов відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

© Publisher PH "Akadempriodyka" of the NAS of Ukraine, 2023. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Вплив вулканів на верхню атмосферу та іоносферу досліджується принаймні з 1980-х рр. [6–15]. Було встановлено, що за збурення верхньої атмосфери та іоносфери відповідальні атмосферні гравітаційні й акустичні хвилі.

Іоносферним ефектам, що були викликані виверженням вулкана Тонга 15 січня 2022 р., присвячено низку робіт [16–29]. Виявлено аперіодичні (іоносферна «діра») та квазіперіодичні (рухомі іоносферні збурення) процеси. Значне місце відводилося збуренням екваторіальної іонізаційної аномалії [17], збуренню системи вітрів [28], іоносферних струмів [28, 29], ефектам у магнітоспряженій області [20, 24], дослідженню рухомих іоносферних збурень [19, 23, 25–27]. Установлено, що іоносферні збурення від виверження вулкана поширювалися на глобальні відстані. Проте найбільші збурення очікувалися у ближній зоні (у радіусі $r \sim 0.1 \dots 1.0$ Мм).

Метою цієї роботи є дослідження аперіодичних і квазіперіодичних збурень у ближній зоні, згенерованих потужним виверженням вулкана Тонга 15 січня 2022 р.

1. Загальні відомості про вулкан Тонга

Офіційна назва вулкана — Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай. Ми будемо вживати спрощену назву — Тонга. Підводний вулкан Тонга знаходиться у південній частині Тихого океану на глибині близько 200 м. Його географічні координати — $20^{\circ}54'$ пд. ш., $175^{\circ}38'$ зх. д.

15 січня 2022 р. в інтервалі часу 04:00–05:00 UT (UT — всесвітній час) спостерігалось п'ять вибухів вулкана. Найпотужніший із них мав місце о 04:15 UT. Виверження вулкана тривало 12 ± 2 год. Маса викидів склала 2.9 Гт, а об'єм — 1.9 км^3 . Середня продуктивність вулкана була значною — 67 кт/с, або $4.5 \cdot 10^4 \text{ м}^3/\text{с}$ [2–5]. Початкова швидкість вулканічного струменя сягала декількох сотень метрів за секунду, а його початковий радіус — десятків метрів. Струміння піднявся на висоту близько 2 км.

Далі мав місце конвективний підйом продуктів вибуху із середньою швидкістю 33 м/с на рекордну висоту 50...58 км. Саме в цьому полягає унікальність вулкана Тонга. Магнітуда вулкана наближалась до 5.5, індекс вулканічної вибухо-

вості $VEI \approx 5.8$, а інтенсивність — 10.8. Тобто цей вулкан належить до п'ятірки найбільш потужних вулканів, які вибухали впродовж останнього століття [2–5]. Теплова енергія вулкана становила $3.9 \cdot 10^{18}$ Дж, а потужність — $9.1 \cdot 10^{13}$ Вт [2, 4, 5]. Енергія вибуху, за нашими оцінками, дорівнювала 16...18 Мт ТНТ (ТНТ — тринітротолуол). За оцінками інших авторів, ця енергія варіювалася в межах від 4...18 до 478 ± 191 Мт ТНТ [18, 30].

2. Стан космічної погоди

Для коректного виділення іоносферних ефектів експлозивного виверження вулкана Тонга спочатку необхідно ретельно проаналізувати стан космічної погоди з 12 до 18 січня 2022 р., а також вибрати придатні для порівняння контрольні дні. Для цього скористаємося даними сайтів <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp> та <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>.

Концентрація частинок n_{sw} у сонячному вітрі набувала найменших значень ($\sim(2...3) \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$) 13 та 18 січня 2022 р. (рис. 1). Наприкінці доби 14 січня 2022 р. вона зросла до $16.7 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$. Швидкість сонячного вітру V_{sw} в спокійних умовах була близькою до 350...400 км/с, а починаючи з кінця доби 14 січня 2022 р. вона поступово збільшувалася до 500...623 км/с і залишалася такою до 18 січня 2022 р. включно. Температура плазми T_{sw} у сонячному вітрі з 12 до 14 січня 2022 р. здебільшого була близькою до $(0.2...0.3) \cdot 10^5$ К. Тільки в ніч з 12 на 13 січня 2022 р. вона сягала $\sim 1.8 \cdot 10^5$ К. Під кінець доби 14 січня 2022 р. T_{sw} різко зросла від $0.2 \cdot 10^5$ до $2.9 \cdot 10^5$ К. Найбільший сплеск T_{sw} до $4 \cdot 10^5$ К мав місце 15 січня 2022 р. приблизно о 19:00 UT. Дещо менші сплески T_{sw} спостерігалися в ніч з 16 на 17 та з 17 на 18 січня 2022 р. Динамічний тиск p_{sw} сонячного вітру від 0.5 нПа 13 січня 2022 р. виріс до 3.0...4.6 нПа у наступні дні. Компонента B_y міжпланетного магнітного поля зазвичай флюктувала у межах ± 5 нТл. Максимальне значення рівня B_z компоненти міжпланетного магнітного поля сягало 8.1 нТл 14 січня 2022 р., а його мінімальне значення (-13 нТл) мало місце в кінці доби 14 січня 2022 р. Приплив енергії ε_A сонячного вітру у магнітосферу в спокійні дні зазвичай не перевищував 3...6 ГДж/с. Наприкінці доби 14 січня 2022 р. він зріс до 34.5 ГДж/с. Ще один сплеск ε_A до 25 ГДж/с мав місце у другій по-

помірна магнітна буря. Суббурі мали місце також 15 та 16 січня 2022 р. З огляду на викладені вище обставини, контрольними днями доцільно обрати 13 та 17 січня 2022 р.

3. Засоби та методи дослідження

Для виявлення іоносферних збурень, згенерованих виверженням вулкана Тонга, аналізувалися часові варіації повного електронного вмісту (ПЕВ) у вертикальному стовпі в іоносфері. Дані про ПЕВ отримані за допомогою GPS-технології. Для цього використовувалися результати двочастотних вимірювань псевдодальностей, отримані з низки супутників на приймальних станціях. Контурну мапу з дислокацією станцій показано на рис. 2.

Перелік супутників і станцій наведено у табл. 1. Видно, що відстань від вулкана до станцій r_{st} змінювалася від 57 до 2574 км (табл. 1). Супутники наближалися до епіцентру вибуху на відстань від ~ 100 до ~ 2500 км. Сумарна похибка оцінки ПЕВ N_V не перевищувала 0.1 TECU.

4. Результати аналізу

Приклади часових варіацій ПЕВ для низки станцій і супутників показано на рис. 3. Графіки на рис. 3 показують, що напередодні та наступного дня після вибуху вулкана часові варіації ПЕВ $N_V(t)$ були більш-менш монотонними. 15 січня 2022 р., у день виверження вулкана, монотонність була суттєво порушена. Це пов'язано з появою групи збурень, що мали різні часи запізнювання. Серед цих збурень виділялися як квазіперіодичні (або хвильові), так і аперіодичні збурення. Найбільш яскравим аперіодичним збуренням було тривале (60...180 хв) зменшення ПЕВ, яке отримало назву іоносферної «діри».

Для станції TONG (супутник G32) відстань від підіоносферної точки до епіцентру вибуху поступово зменшувалася від ~ 1000 до ~ 250 км. Реакція на окремі вибухи спостерігалася дуже чітко (рис. 3, а). Параметри іоносферної «діри» були такі: $\Delta N_V \approx -4$ TECU, $\delta_V \approx -16\%$, $\Delta T \approx 150$ хв і $\tau \approx 45$ хв (табл. 2). Інші три групи збурень мали такі часи запізнювання: $\Delta t_1 \approx 20$ хв, $\Delta t_2 \approx 37$ хв і $\Delta t_3 \approx 45$ хв (табл. 3).

Для супутника G24, сигнал якого реєструвався на станції FTNA, підіоносферна точка була

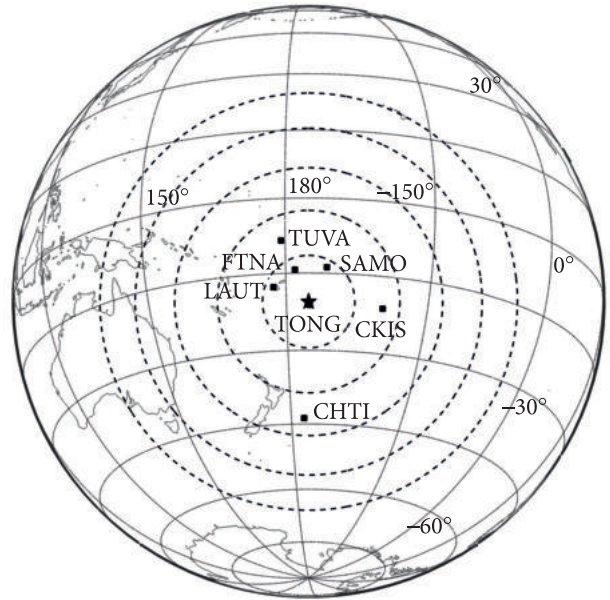


Рис. 2. Контурна мапа дислокації станцій спостереження

Таблиця 1. Розташування станцій у порядку зростання відстані від епіцентру до станції спостереження r_{st}

№	Станція	Супутник	r_{st} , км
1	TONG	G32	57
2	FTNA	G24	758
3	LAUT	G24, G32	826
4	SAMO	G10	846
5	TUVA	G32	1458
6	CKIS	G10	1624
7	CHTI	G32	2574

віддалена від епіцентру вибуху на відстань понад 180 км. Чітко виділялася реакція на окремі вибухи (рис. 3, б). Профіль збурення мав N -подібну форму, що властиве вибухам. Параметри іоносферної «діри» були такі: $\Delta N_V \approx -11$ TECU, $\delta_V \approx -37\%$, $\tau \approx 25$ хв і $\Delta T \approx 140$ хв (табл. 2). Для інших груп збурень $\Delta t_1 \approx 23$ хв, $\Delta t_2 \approx 27$ хв і $\Delta t_3 \approx 47$ хв (табл. 3). Період складав ~ 10 хв, а амплітуда ~ 1 TECU.

Підіоносферна точка для супутника G24, сигнали якого реєструвалися на станції LAUT, наближалася до епіцентру вибуху на відстань $r \approx 200$ км. У цьому випадку $\Delta N_V \approx -10$ TECU або -40% , $\tau \approx 35$ хв і $\Delta T \approx 180$ хв (рис. 3, в). Інші групи збурень мали часи запізнювання 15, 22 та 40 хв (табл. 3). Для хвильових збурень $T \approx 5$ хв, а

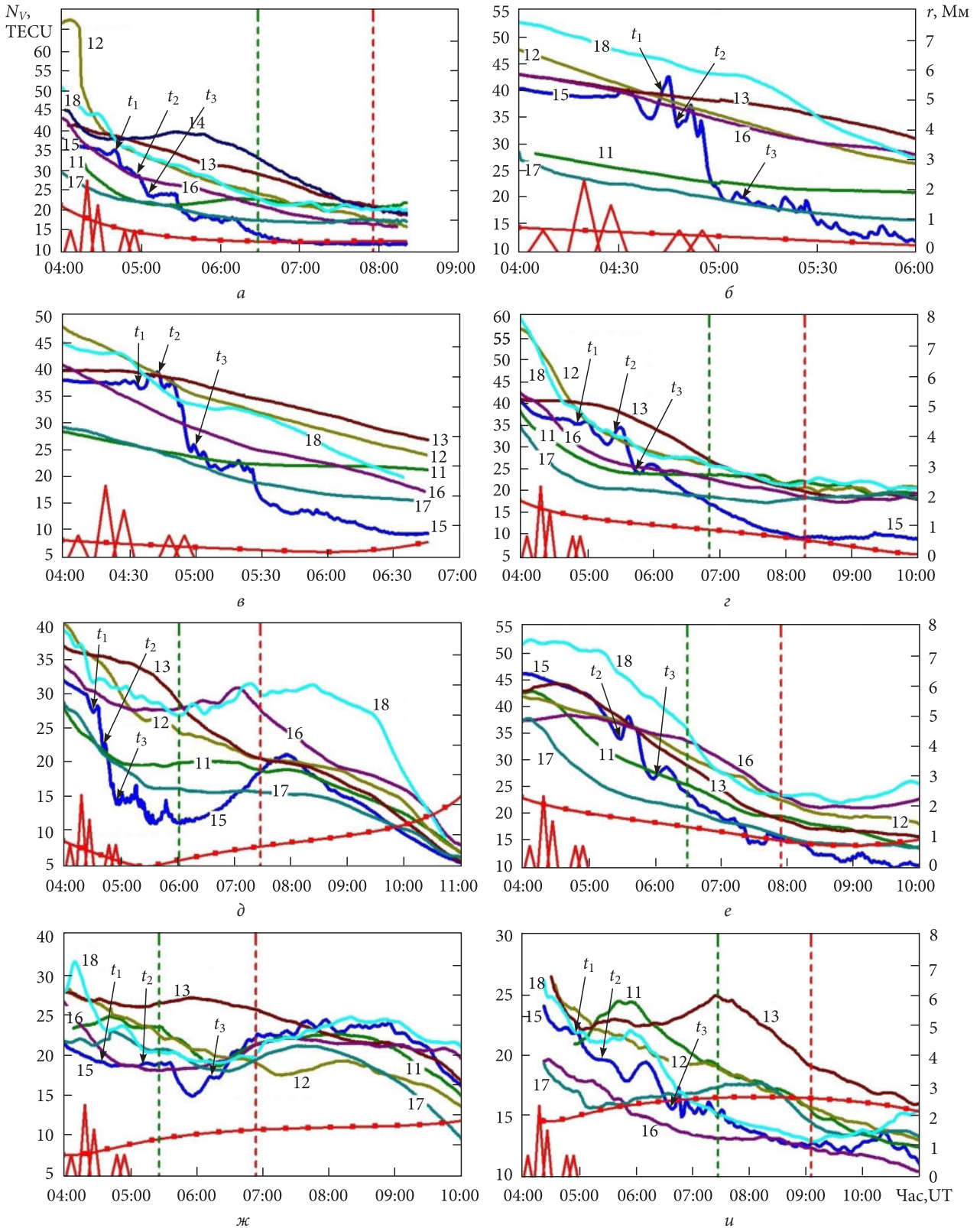


Рис. 3. Часові варіації ПЕВ: а – станція TONG, супутник G32; б – станція FTNA, супутник G24; в – станція LAUT, супутник G24; г – станція LAUT, супутник G32; д – станція SAMO, супутник G10; е – станція TUVA, супутник G32; ж – станція SKIS, супутник G10; и – станція СНТИ, супутник G32. Номер кривої відповідає номеру дня. Моменти заходу Сонця відзначені вертикальними лініями, ліворуч на поверхні Землі, праворуч на висоті 350 км. Часи вибуху позначені трикутниками. Лінія з точками – відстань від вулкана до іоносферної точки. Стрілки з t_1 , t_2 і t_3 – моменти можливої реакції на вибух

$\Delta N_{Va} \approx 1$ TECU. Реакція на окремі вибухи також проявлялася не дуже чітко. Час запізнювання реакції на ці вибухи складав 15...20 хв.

Розглянемо дані станції LAUT (супутник G32). Відстань від підіоносферної точки до епіцентру вибуху поступово зменшувалася від ~ 1800 до ~ 100 км. Досить чітко спостерігалася реакція на вибухові хвилі (рис. 3, з). Реакція ПЕВ має N -подібний профіль. Іоносферна «діра» мала такі параметри: $\Delta N_V \approx -3$ TECU, а $\delta_V \approx -14\%$. Тривалість $\Delta T \approx 180$ хв, а $\tau \approx 60$ хв (табл. 2). Хвильові збурення (крім реакції на вибухові хвилі) практично не спостерігалися. Часи запізнювання груп збурень дорівнювали 33, 65 та 85 хв (табл. 3).

Для станції SAMO (супутник G10) мало місце найбільше наближення підіоносферної точки до епіцентру вибуху (~ 100 км); дефіцит ПЕВ ΔN_V склав близько -10 TECU або -40% (рис. 3, д). Час запізнювання $\tau \approx 20$ хв, а тривалість ефекту $\Delta T \sim 180$ хв (табл. 2). Крім аперіодичного збурення, спостерігалися три інші групи збурень, що мали часи запізнювання $\Delta t_1 \approx 15$ хв, $\Delta t_2 \approx 25$ хв

і $\Delta t_3 \approx 40$ хв (табл. 3). Період хвильових збурень $T \approx 20$ хв, а їхня амплітуда $\Delta N_{Va} \approx 1$ TECU. Реакція на окремі вибухи була виражена не дуже чітко, їхній час запізнювання був близьким до 15 хв.

Для супутника G32, сигнал якого реєструвався на станції TUVA, підіоносферна точка була на відстані від епіцентру від 2000 км до 800 км. Реакція на вибух спостерігалася впевнено. Варіації ПЕВ мали N -подібний профіль (рис. 3, е). Параметри іоносферної «діри» були такими: $\Delta N_V \approx -3$ TECU, $\delta_V \approx -15\%$, $\Delta T \approx 180$ хв, а $\tau \approx 75$ хв (табл. 2). Збурення другої і третьої груп мали часи запізнювання близько 70 та 102 хв, період $T \approx 15...20$ хв, а $\Delta N_{Va} \approx 0.6...1$ TECU (табл. 3).

Підіоносферна точка для супутника G10 (станція SKIS) наближалася до епіцентру вибуху на мінімальну відстань ~ 1000 км. Реакція на окремі вибухи не спостерігалася. Дефіцит ПЕВ склав -4 TECU, або -21% ; тривалість існування «діри» $\Delta T \approx 60$ хв, а $\tau \approx 80$ хв (рис. 3, ж). Досить чітко були виражені хвильові збурення з $T \approx 12$ хв і $\Delta N_{Va} \approx 1$ TECU (табл. 2). Три групи збурень мали

Таблиця 2. Основні параметри іоносферної «діри» та хвильових збурень

Станція	Супутник	$r(\tau)$, км	ΔN_V , TECU	N_{V0} , TECU	δ_V , %	ΔT , хв	τ , хв	T , хв	ΔN_{Va} , TECU
TONG	G32	677	-4	25	-16	150	45	10	0.5
FTNA	G24	660	-11	30	-37	140	25	10	1.0
LAUT	G24	421	-10	25	-40	180	35	5	1.0
LAUT	G32	1289	-3	22	-14	180	60	—	—
SAMO	G10	463	-10	25	-40	180	20	20	1.0
TUVA	G32	1652	-3	20	-15	180	75	15...20	0.6...1.0
SKIS	G10	1355	-4	19	-21	60	80	12	1.0
CHTI	G32	2426	-2.5	15	-17	180	100	10	0.6...1.0

Таблиця 3. Параметри збурень хвильових процесів

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
TONG	G32	899	20	1034	739	37	391	677	45	282
FTNA	G24	670	23	620	651	27	493	561	47	225
LAUT	G24	491	15	861	464	22	455	406	40	193
LAUT	G32	1424	33	863	1268	65	352	1196	85	249
SAMO	G10	516	15	906	406	25	338	223	40	106
TUVA	G32	—	—	—	1677	70	430	1525	102	263
SKIS	G10	947	20	1089	1174	50	440	1493	115	225
CHTI	G32	2054	40	992	2242	65	623	2554	140	317

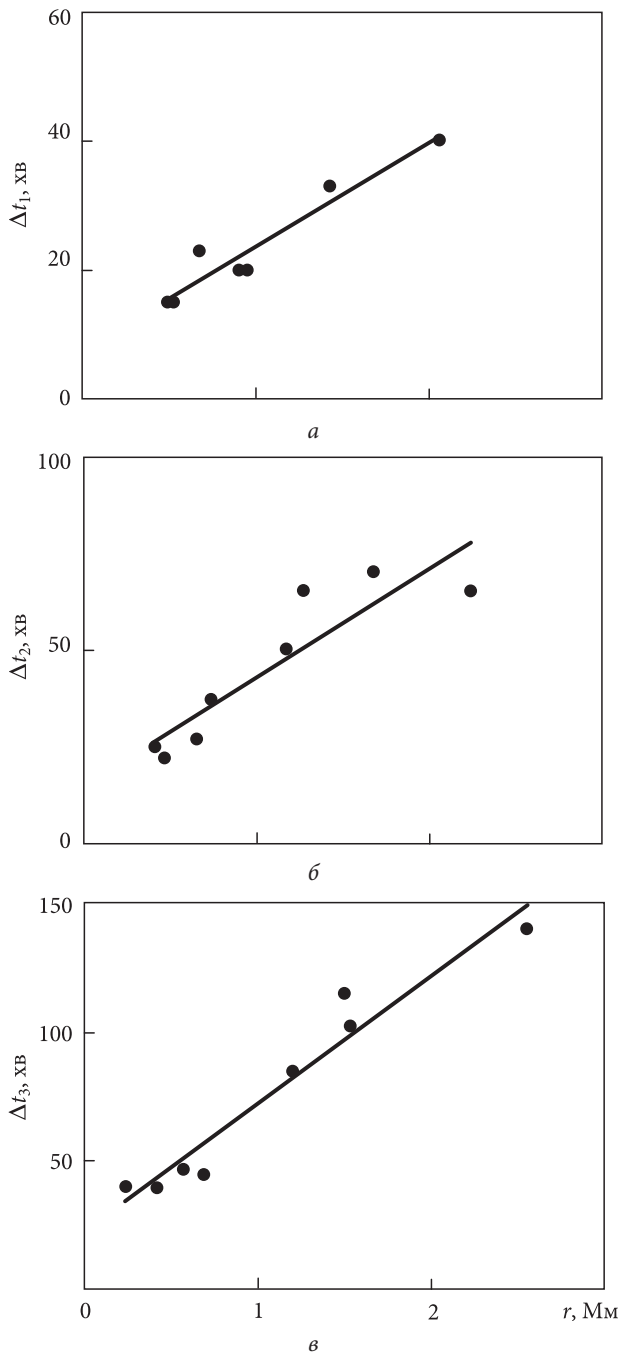


Рис. 4. Залежності часу запізнювання трьох типів хвильових процесів від відстані та їхні лінійні тренди

такі часи запізнювання: $\Delta t_1 \approx 20$ хв, $\Delta t_2 \approx 50$ хв і $\Delta t_3 \approx 115$ хв (табл. 3).

Підіоносферна точка для супутника G32 (станція СНТІ) віддалена від епіцентру вибуху на відстань $\sim 2\,500 \dots 2\,800$ км. Профіль збурення ПЕВ мав N -подібну форму (рис. 3, u). Дефіцит ПЕВ склав -2.5 TECU, або -17% . При цьому $\Delta T \approx 180$ хв, а $\tau \approx 100$ хв (табл. 2). Виділялися три

групи збурень з часами запізнювання близько 40, 65 та 140 хв (табл. 3). Період хвильових збурень $T \approx 10$ хв, а їхня амплітуда — $0.6 \dots 1.0$ TECU.

5. Обговорення

У цілому на різних станціях якісна картина варіацій $N_V(t)$ була подібною. Майже завжди спостерігався N -подібний профіль збурення. Такий профіль властивий вибуховим процесам: спочатку виникає фаза стиснення, а потім — фаза розрідження. Тривалість такого процесу — $40 \dots 60$ хв, розмах — $2 \dots 8$ TECU. Реакція на вибухову хвилю поширювалася зі швидкістю $v_1 \approx 1\,000$ м/с і більше.

Друга група збурень мала швидкість $\sim 340 \dots 620$ м/с. Така швидкість характерна для атмосферних гравітаційних хвиль на висотах іоносфери. Швидкість поширення збурень у третій групі варіювала від ~ 110 до 320 м/с. У цьому випадку збурення в іоносфері могли викликатися як цунамі (швидкість $v \sim 200$ м/с і 315 м/с), так і атмосферними гравітаційними хвилями та хвилею Лемба ($v \sim 315$ м/с). Важливо, що зі збільшенням відстані від епіцентру вибуху мала місце тенденція до збільшення часу запізнювання появи дефіциту ПЕВ та до зменшення його абсолютної відносної величини. Усе це свідчить, що причиною виникнення іоносферної «діри» є вибух вулкана.

Як видно із табл. 3, спостерігається тенденція до збільшення часів запізнювання збурень у всіх трьох групах при збільшенні відстані від епіцентру вибуху до місця появи збурення. Це також свідчить на користь вулканічного походження збурень.

Отримані результати добре узгоджуються з відомими даними для інших станцій і супутників [18, 20, 25–27].

Наведемо результати статистичного аналізу. На рис. 4 наведено залежності від відстані r часу запізнювання трьох груп збурень. Графіки на рис. 4 показують, що зі збільшенням відстані r від вулкана до місця вимірювання спостерігалася досить стійка тенденція до зростання часу запізнювання. Відповідні рівняння лінійної апроксимації мають вигляд:

$$\Delta t_1 = 16.0r + 7.7, \quad \sigma = 2.6 \text{ хв}; \quad (1)$$

$$\Delta t_2 = 27.9r + 15.1, \quad \sigma = 8.6 \text{ хв}; \quad (2)$$

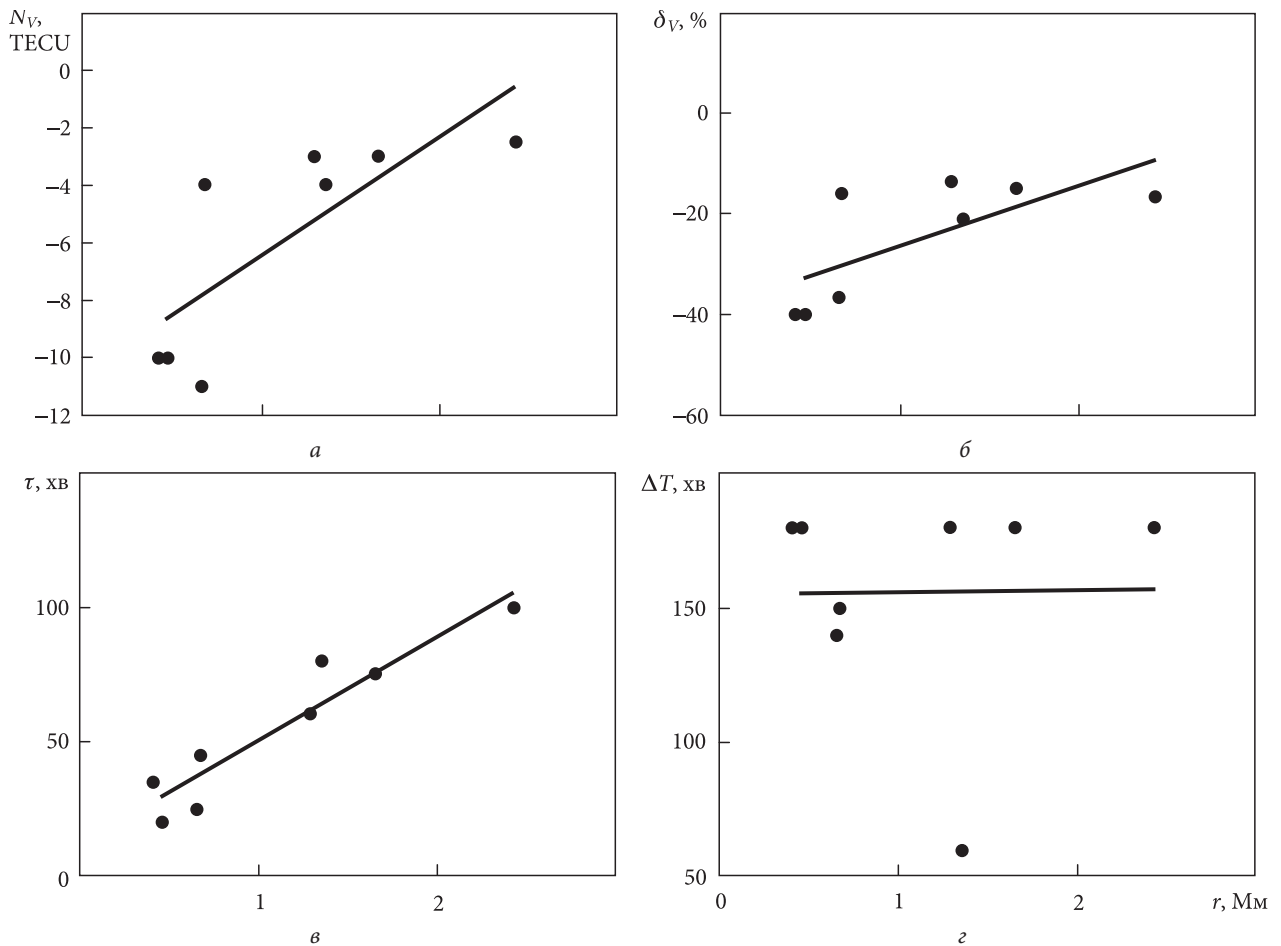


Рис. 5. Залежність параметрів іоносферної «діри» від відстані: а – збурення ПЕВ; б – відносного збурення ПЕВ; в – часу запізнювання збурення ПЕВ; з – тривалості збурення ПЕВ

$$\Delta t_3 = 49.3r + 23.6, \quad \sigma = 9.5 \text{ хв}, \quad (3)$$

де відстань вимірюється в мегаметрах, а час запізнювання – у хвилинах. За умови $r \rightarrow 0$ маємо $\Delta t_{10} = 7.7 \pm 2.6$ хв, $\Delta t_{20} = 15.1 \pm 8.6$ хв і $\Delta t_{30} = 23.6 \pm 9.5$ хв. Середні швидкості поширення $\bar{v} = (d\Delta t/dr)^{-1}$ склали $\bar{v}_1 \approx 1040$ м/с, $\bar{v}_2 \approx 600$ м/с та $\bar{v}_3 \approx 340$ м/с. Ймовірніше за все, швидкість \bar{v}_1 властива вибуховій хвилі, швидкість \bar{v}_2 – атмосферній гравітаційній хвилі, а \bar{v}_3 – атмосферній гравітаційній хвилі та хвилі Лемба [20, 30].

Результати статистичного аналізу параметрів іоносферної «діри» показано на рис. 5. Зі збільшенням відстані r абсолютні значення збурення $|\Delta N_V|$ та відносного збурення $|\delta_V|$ зменшувалися (рис. 5, а, б), а час запізнювання «діри» – навпаки, збільшувався (рис. 5, в). Тривалість «діри» від r практично не залежала (рис. 5, з). Рівняння лі-

нійної апроксимації мають вигляд:

$$\Delta N_V = 4.1r - 10.5, \quad \sigma = 2.3 \text{ TECU},$$

$$\delta_V = 12r - 38.3, \quad \sigma = 8.4 \%,$$

$$\tau = 38.6r + 11.8, \quad \sigma = 9.5 \text{ хв}.$$

Поблизу вулкана ($r \rightarrow 0$) $\Delta N_{V\min} \approx -(10.5 \pm 2.3)$ TECU, а $\delta_{V\min} \approx -(38.3 \pm 8.4)\%$. Оцінимо максимальний розмір «діри» із умови $\Delta N_V(r_{\max}) = 0$ та $\delta_V(r_{\max}) = 0$. Звідси маємо $r_{\max1} \approx 2.6 \pm 0.6$ Мм, $r_{\max2} \approx 3.2 \pm 0.7$ Мм. Тоді середнє значення $r_{\max} \approx 2.9 \pm 0.3$ Мм. За умови $r_{\max} \approx 2.9 \pm 0.3$ Мм отримуємо $\tau_{\max} \approx 123 \pm 21$ хв.

Окремо зупинимося на параметрах квазіперіодичних збурень. Період коливань від відстані r , ймовірно, не залежав і набув значення $T = 12 \pm 5$ хв. Залежність амплітуди квазіперіодичного збурення від відстані r мала тенденцію

до зменшення. Рівняння лінійної апроксимації таке:

$$\delta_{Va} = -0.1r + 0.9, \quad \sigma = 0.2 \%, \quad (4)$$

де r вимірюється в мегаметрах, а амплітуда — у відсотках.

За умови $r \rightarrow 0$ маємо $\delta_{Va} \approx 0.9 \pm 0.2 \%$. Якщо $r_{\max} \approx 2.9 \pm 0.3$ Мм, то $\delta_{Va} \approx 0.58 - 0.64 \%$. Максимальну відстань поширення квазіперіодичних збурень оцінимо з рівняння (4) за умови $\delta_{Va}(r_{\max\delta}) \approx 0$. Тоді $r_{\max\delta} \approx 9 \pm 2$ Мм.

Висновки

Аналіз часових варіацій ПЕВ дозволив отримати кількісні характеристики збурень у іоносфері, викликаних експлозивним виверженням вулкана Тонга.

1. Доведено, що поява іоносферної «діри» обумовлена саме вибухом вулкана. Дефіцит ПЕВ за абсолютною величиною зменшувався від ~ 10 до ~ 2.5 TECU (у відносних одиницях — від ~ 40 до $\sim 14 \dots 15 \%$) при збільшенні відстані від вулкана. Час появи іоносферної «діри» при цьому збільшувався від ~ 20 до ~ 100 хв.

2. Спостерігалось три групи збурень. Перша із них мала N -подібний профіль і викликала вибухову хвилю, швидкість якої перевищувала ~ 1000 м/с. Друга група збурень мала швидкість

поширення $\sim 340 \dots 620$ м/с. Така швидкість властива атмосферним гравітаційним хвилям на висотах іоносфери. Швидкість поширення збурень у третій групі змінювалася від ~ 110 до 320 м/с. Такі збурення могли бути згенеровані цунамі, хвилями Лемба та атмосферними гравітаційними хвилями.

3. Періоди хвильових збурень змінювалися у межах $\sim 5 \dots 20$ хв, а їхня амплітуда — у межах $0.5 \dots 1.0$ TECU.

4. Величина збурень суттєво залежала від географічних координат станцій і супутників, положення підіоносферних точок, освітленості іоносфери, присутності екваторіальної іонізаційної аномалії тощо.

Автори вдячні науковому співробітнику кафедри космічної радіофізики Харківського національного університету В.Л. Дорохову за надану допомогу під час пошуку вихідних даних.

Роботу виконано за часткової підтримки держбюджетних НДР, заданих МОН України (номери держреєстрації 0121U109881 та 0122U001476) та за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України, проєкт 2020.02/0015 «Теоретичні та експериментальні дослідження глобальних збурень природного і техногенного походження в системі Земля—атмосфера—іоносфера».

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Черногор Л.Ф. *Фізика і екологія катастроф*. Монографія. Харків: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2012. 556 с.
2. Черногор Л.Ф. Фізичні ефекти у системі Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера, викликані потужним вибухом вулкана Тонга 15 січня 2022 р. *Космічна наука і технологія*. 2023. Т. 29, № 2. С. 54–77.
3. Chernogor L.F., Shevelev M.B. Infrasonic effect of the explosion of the Tonga super volcano on January 15, 2022. *Proc. of the XXIIth Int. Young Scientists' Conf. on Applied Physics*. Kyiv, Ukraine, 18–22 Oct. 2022. P. 126–127.
4. Chernogor L.F. Effects of the Tonga volcano explosion on January 15, 2022. *Int. Conf. "Astronomy and Space Physics"*. Book of Abstracts. Kyiv, Ukraine, 18–21 Oct. 2022. P. 12–13.
5. Chernogor L.F. The Tonga super-volcano explosion as a subject of applied physics. *The 18th Int. Conf. on Electronics and Applied Physics APHYS'2022*. Kyiv, Ukraine, 18–22 Oct. 2022. P. 130–131.
6. Roberts D.H., Klobuchar J.A., Fougere P.F., Hendrickson D.H. A large-amplitude traveling ionospheric disturbance produced by the May 18, 1980, explosion of Mount St. Helens. *J. Geophys. Res.* 1982. Vol. 87, Iss. A8. P. 6291–6301.
7. Liu C.H., Klostermeyer J., Yeh K.C., Jones T.B., Robinson T., Holt O., Leitinger R., Ogawa T., Sinno K., Kato S., Ogawa T., Bedard A.J., and Kersley L. Global dynamic responses of the atmosphere to the eruption of Mount St. Helens on May 18, 1980. *J. Geophys. Res.* 1982. Vol. 87, Iss. A8. P. 6281–6290.
8. Igarashi K., Kainuma S., Nishimuta I., Okamoto S., Kuroiwa H., Tanaka T., and Ogawa T. Ionospheric and atmospheric disturbances around Japan caused by the eruption of Mount Pinatubo on 15 June 1991. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1994. Vol. 56, Iss. 9. P. 1227–1234.
9. Cheng K., and Huang Y.-N. Ionospheric disturbances observed during the period of Mount Pinatubo eruptions in June 1991. *J. Geophys. Res.* 1992. Vol. 97, Iss. A11. P. 16995–17004.
10. Heki K. Explosion energy of the 2004 eruption of the Asama Volcano, central Japan, inferred from ionospheric disturbances. *Geophys. Res. Lett.* 2006. Vol. 33, Iss. 14, id. L14303.
11. Dautermann T., Calais E., and Mattioli G.S. 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. Vol. 114, Iss. B2, id. B02202. DOI: 10.1029/2008JB005722

12. Dautermann T., Calais E., Lognonn' e P., and Mattioli G. Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling after the 2003 Explosive eruption of the Soufriere Hills Volcano, Montserrat. *Geophys. J. Int.* 2009. Vol. 179, Iss. 3. P. 1537–1546.
13. Rozhnoi A., Hayakawa M., Solovieva M., Hobaru Y., and Fedun V. Ionospheric effects of the Mt. Kirishima volcanic eruption as seen from subionospheric VLF observations. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2014. Vol. 107. P. 54–59.
14. Shults K., Astafyeva E., and Adourian S. Ionospheric detection and localization of volcano eruptions on the example of the April 2015 Calbuco events. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2016. Vol. 121, Iss. 10. P. 303–315.
15. Nakashima Y., Heki K., Takeo A., Cahyadi M.N., Aditiya A., and 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 Planet. Sci. Lett.* 2016. Vol. 434. P. 112–116. DOI: 10.1016/j.epsl.2015.11.029
16. Aa E., Zhang S.-R., Erickson P.J., Vierinen J., Coster A.J., Goncharenko L.P., Spicher A., and Rideout W. Significant Ionospheric Hole and Equatorial Plasma Bubbles After the 2022 Tonga Volcano Eruption. *Space Weather.* 2022. Vol. 20, Iss. 7, id. e2022SW003101. DOI: 10.1029/2022SW003101
17. Aa E., Zhang S.-R., Wang W., Erickson P.J., Qian L., Eastes R., Harding B.J., Immel T.J., Karan D.K., Daniell R.E., Coster A.J., Goncharenko L.P., Vierinen J., Cai X., and Spicher A. Pronounced Suppression and X-Pattern Merging of Equatorial Ionization Anomalies After the 2022 Tonga Volcano Eruption. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2022. Vol. 27, Iss. 6, id. e2022JA030527.
18. Astafyeva E., Maletckii B., Mikesell T.D., Munaibari E., Ravanelli M., Coisson P., Manta F., and Rolland L. The 15 January 2022 Hunga Tonga eruption history as inferred from ionospheric observations. *Geophys. Res. Lett.* 2022. Vol. 49, Iss. 10, id. e2022GL098827.
19. Chen C.-H., Zhang X., Sun Y.-Y., Wang F., Liu T.-C., Lin C.-Y., Gao Y., Lyu J., Jin X., Zhao X., Cheng X., Zhang P., Chen Q., Zhang D., Mao Z., and Liu J.-Y. Individual Wave Propagations in Ionosphere and Troposphere Triggered by the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Underwater Volcano Eruption on 15 January 2022. *Remote Sens.* 2022. Vol. 14, Iss. 9, id. 2179.
20. Lin J.-T., Rajesh P.K., Lin C.C.H., Chou M.-Y., Liu J.-Y., Yue J., Hsiao T.-Y., Tsai H.-F., Chao H.-M., and Kung M.-M. Rapid Conjugate Appearance of the Giant Ionospheric Lamb Wave Signatures in the Northern Hemisphere after Hunga-Tonga Volcano Eruptions. *Geophys. Res. Lett.* 2022. Vol. 49, Iss. 8, id. e2022GL098222.
21. Rajesh P.K., Lin C.C.H., Lin J.T., Lin C.Y., Liu J.Y., Matsuo T., Huang C.Y., Chou M.Y., Yue J., Nishioka M., Jin H., Choi J.M., Chen S. P., Chou M., and Tsai H.F. Extreme poleward expanding super plasma bubbles over Asia-Pacific region triggered by Tonga volcano eruption during the recovery-phase of geomagnetic storm. *Geophys. Res. Lett.* 2022. Vol. 49, Iss. 15, id. e2022GL099798.
22. Chernogor L.F., Mylovanov Y.B., and Dorohov V.L. Ionospheric Effects accompanying the January 15, 2022 Tonga Volcano Explosion. *Int. Conf. "Astronomy and Space Physics"*. Book of Abstracts. Kyiv, Ukraine, 18–21 Oct. 2022. P. 83–84.
23. Saito S. Ionospheric disturbances observed over Japan following the eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai on 15 January 2022. *Earth, Planets Space.* 2022. Vol. 74, Iss. 1, id. 57.
24. Shinbori A., Otsuka Y., Sori T., Nishioka M., Perwitasari S., Tsuda T., and 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. Vol. 74, Iss. 106.
25. Zhang S.-R., Vierinen J., Aa E., Goncharenko L.P., Erickson P.J., Rideout W., Coster A.J. and Spicher A. 2022 Tonga Volcanic Eruption Induced Global Propagation of Ionospheric Disturbances via Lamb Waves. *Front. Astron. Space Sci.* 2022. Vol. 9, id. 871275.
26. Themens D.R., Watson C., Žagar N., Vasylykevych S., Elvidge S., McCaffrey A., Prikryl P., Reid B., Wood A., and Jayachandran P.T. Global propagation of ionospheric disturbances associated with the 2022 Tonga volcanic eruption. *Geophys. Res. Lett.* 2022. Vol. 49, Iss. 7, id. e2022GL098158.
27. Ern M., Hoffmann L., Rhode S., and Preusse P. The mesoscale gravity wave response to the 2022 Tonga volcanic eruption: AIRS and MLS satellite observations and source backtracing. *Geophys. Res. Lett.* 2022. Vol. 49, Iss. 10, id. e2022GL098626.
28. Harding B.J., Wu Y.-J.J., Alken P., Yamazaki Y., Triplett C.C., Immel T.J., Gasque L.C., Mende S.B., and Xiong C. Impacts of the January 2022 Tonga Volcanic Eruption on the Ionospheric Dynamo: ICON-MIGHTI and Swarm Observations of Extreme Neutral Winds and Currents. *Geophys. Res. Lett.* 2022. Vol. 49, Iss. 9, id. e2022GL098577.
29. Le G., Liu G., Yizengaw E., and Englert C.R. Intense equatorial electrojet and counter electrojet caused by the 15 January 2022 Tonga volcanic eruption: Space- and ground-based observations. *Geophys. Res. Lett.* 2022. Vol. 49, Iss. 11, id. e2022GL099002.
30. Kulichkov S.N., Chunchuzov I.P., Popov O.E., Gorchakov G.I., Mishenin A.A., Perepelkin V.G., Bush G.A., Skorokhod A.I., Vinogradov Yu.A., Semutnikova E.G., Šepić J., Medvedev I.P., Gushchin R.A., Kopeikin V.M., Belikov I.B., Gubanova D.P., Karpov A.V., and Tikhonov A.V. Acoustic-Gravity Lamb Waves from the Eruption of the Hunga-Tonga-Hunga-Hapai Volcano, Its Energy Release and Impact on Aerosol Concentrations and Tsunami. *Pure Appl. Geophys.* 2022. Vol. 179. P. 1533–1548.

Стаття надійшла 10.12.2022

REFERENCES

1. Chernogor, L.F., 2012. *Physics and Ecology of Disasters*. Monograph. Kharkiv: V.N. Karazin Kharkiv National University Publ.
2. Chernogor, L.F., 2022. Physical effects of the January 15, 2022, powerful Tonga volcano explosion in the Earth – atmosphere – ionosphere – magnetosphere system. *Space Sci. & Technol.*, **29**(2), pp. 54–77 (in Ukrainian).
3. Chernogor, L.F., Shevelev, M.B., 2022. Infrasonic effect of the explosion of the Tonga super volcano on January 15, 2022. In: *Proc. of the XXIIth Int. Young Scientists' Conf. on Applied Physics*. Kyiv, Ukraine, 18–22 Oct. 2022, pp. 126–127.

4. Chernogor, L.F., 2022. Effects of the Tonga volcano explosion on January 15, 2022. In: *Int. Conf. "Astronomy and Space Physics". Book of Abstracts*. Kyiv, Ukraine, 18–21 Oct. 2022, pp. 12–13.
5. Chernogor, L.F., 2022. The Tonga super-volcano explosion as a subject of applied physics. In: *The 18th Int. Conf. on Electronics and Applied Physics APHYS'2022*. Kyiv, Ukraine, 18–22 Oct. 2022, pp. 130–131.
6. Roberts, D.H., Klobuchar, J.A., Fougere, P.F., Hendrickson, D.H., 1982. A large-amplitude traveling ionospheric disturbance produced by the May 18, 1980, explosion of Mount St. Helens. *J. Geophys. Res.*, **87**(A8), pp. 6291–6301.
7. Liu, C.H., Klostermeyer, J., Yeh, K.C., Jones, T.B., Robinson, T., Holt, O., Leitinger, R., Ogawa, T., Sinno, K., Kato, S., Ogawa, T., Bedard, A.J., Kersley, L., 1982. Global dynamic responses of the atmosphere to the eruption of Mount St. Helens on May 18, 1980. *J. Geophys. Res.*, **87**(A8), pp. 6281–6290.
8. Igarashi, K., Kainuma, S., Nishimuta, I., Okamoto, S., Kuroiwa, H., Tanaka, T., Ogawa, T., 1994. Ionospheric and atmospheric disturbances around Japan caused by the eruption of Mount Pinatubo on 15 June 1991. *J. Atmos. Terr. Phys.* **56**(9), pp. 1227–1234.
9. Cheng, K., Huang, Y.-N., 1992. Ionospheric disturbances observed during the period of Mount Pinatubo eruptions in June 1991. *J. Geophys. Res.*, **97**(A11), pp. 16995–17004.
10. Heki, K., 2006. Explosion energy of the 2004 eruption of the Asama Volcano, central Japan, inferred from ionospheric disturbances. *Geophys. Res. Lett.*, **33**(14), id. L14303.
11. Dautermann, T., Calais, E., Mattioli, G.S., 2009. 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.*, **114**(B2), id. B02202. DOI: 10.1029/2008JB005722
12. Dautermann, T., Calais, E., Lognonné, P., Mattioli, G., 2009. Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling after the 2003 Explosive eruption of the Soufrière Hills Volcano, Montserrat. *Geophys. J. Int.*, **179**(3), pp. 1537–1546.
13. Rozhnoi, A., Hayakawa, M., Solovieva, M., Hobara, Y., Fedun, V., 2014. Ionospheric effects of the Mt. Kirishima volcanic eruption as seen from subionospheric VLF observations. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, **107**, pp. 54–59.
14. Shults, K., Astafyeva, E., Adourian, S., 2016. Ionospheric detection and localization of volcano eruptions on the example of the April 2015 Calbuco events. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, **121**(10), pp. 303–315.
15. Nakashima, Y., Heki, K., Takeo, A., Cahyadi, M.N., Aditiya, A., Yoshizawa K., 2016. Atmospheric resonant oscillations by the 2014 eruption of the Kelud volcano, Indonesia, observed with the ionospheric total electron contents and seismic signals. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **434**, pp. 112–116. DOI: 10.1016/j.epsl.2015.11.029
16. Aa, E., Zhang, S.-R., Erickson, P.J., Vierinen, J., Coster, A.J., Goncharenko, L.P., Spicher, A., Rideout, W., 2022. Significant Ionospheric Hole and Equatorial Plasma Bubbles After the 2022 Tonga Volcano Eruption. *Space Weather.*, **20**(7), id. e2022SW003101. DOI: 10.1029/2022SW003101
17. Aa, E., Zhang, S.-R., Wang, W., Erickson, P.J., Qian, L., Eastes, R., Harding, B.J., Immel, T.J., Karan, D.K., Daniell, R.E., Coster, A.J., Goncharenko, L.P., Vierinen, J., Cai, X., Spicher, A., 2022. Pronounced Suppression and X-Pattern Merging of Equatorial Ionization Anomalies After the 2022 Tonga Volcano Eruption. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, **127**(6), id. e2022JA030527.
18. Astafyeva, E., Maletckii, B., Mikesell, T.D., Munaibari, E., Ravanelli, M., Coisson, P., Manta, F., Rolland, L., 2022. The 15 January 2022 Hunga Tonga eruption history as inferred from ionospheric observations. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(10), id. e2022GL098827.
19. Chen, C.-H., Zhang, X., Sun, Y.-Y., Wang, F., Liu, T.-C., Lin, C.-Y., Gao, Y., Lyu, J., Jin, X., Zhao, X., Cheng, X., Zhang, P., Chen, Q., Zhang, D., Mao, Z., Liu, J.-Y., 2022. Individual Wave Propagations in Ionosphere and Troposphere Triggered by the Hunga Tonga-Hunga Haʻapai Underwater Volcano Eruption on 15 January 2022. *Remote Sens.*, **14**(9), id. 2179.
20. Lin, J.-T., Rajesh, P.K., Lin, C.C.H., Chou, M.-Y., Liu, J.-Y., Yue, J., Hsiao, T.-Y., Tsai, H.-F., Chao, H.-M., Kung, M.-M., 2022. Rapid Conjugate Appearance of the Giant Ionospheric Lamb Wave Signatures in the Northern Hemisphere after Hunga-Tonga Volcano Eruptions. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(8), id. e2022GL098222.
21. Rajesh, P.K., Lin, C.C.H., Lin, J.T., Lin, C.Y., Liu, J.Y., Matsuo, T., Huang, C.Y., Chou, M.Y., Yue, J., Nishioka, M., Jin, H., Choi, J.M., Chen, S. P., Chou, M., Tsai, H.F., 2022. Extreme poleward expanding super plasma bubbles over Asia-Pacific region triggered by Tonga volcano eruption during the recovery-phase of geomagnetic storm. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(15), id. e2022GL099798.
22. Chernogor, L.F., Mylovanov, Y.B., Dorohov V.L., 2022. Ionospheric Effects accompanying the January 15, 2022 Tonga Volcano Explosion. In: *Int. Conf. "Astronomy and Space Physics". Book of Abstracts*. Kyiv, Ukraine, 18–21 Oct. 2022, pp. 83–84.
23. Saito, S., 2022. Ionospheric disturbances observed over Japan following the eruption of Hunga Tonga-Hunga Haʻapai on 15 January 2022. *Earth Planets Space.* **74**(1), id. 57.
24. Shinbori, A., Otsuka, Y., Sori, T., Nishioka, M., Perwitasari, S., Tsuda, T., Nishitani, N., 2022. Electromagnetic conjugacy of ionospheric disturbances after the 2022 Hunga Tonga-Hunga Haʻapai volcanic eruption as seen in GNSS-TEC and SuperDARN Hokkaido pair of radars observations. *Earth Planets Space.* **74**(1), id. 106.
25. Zhang, S.-R., Vierinen, J., Aa, E., Goncharenko, L.P., Erickson, P.J., Rideout, W., Coster, A.J., Spicher, A., 2022. 2022 Tonga Volcanic Eruption Induced Global Propagation of Ionospheric Disturbances via Lamb Waves. *Front. Astron. Space Sci.*, **9**, id. 871275.
26. Themens, D.R., Watson, C., Žagar, N., Vasylyevych, S., Elvidge, S., McCaffrey, A., Prikryl, P., Reid, B., Wood, A., Jayachandran, P.T., 2022. Global propagation of ionospheric disturbances associated with the 2022 Tonga volcanic eruption. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(7), id. e2022GL098158.
27. Ern, M., Hoffmann, L., Rhode, S., Preusse, P., 2022. The mesoscale gravity wave response to the 2022 Tonga volcanic eruption: AIRS and MLS satellite observations and source backtracking. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(10), id. e2022GL098626.
28. Harding, B.J., Wu, Y.-J.J., Alken, P., Yamazaki, Y., Triplett, C.C., Immel, T.J., Gasque, L.C., Mende, S.B., Xiong, C., 2022. Impacts of the January 2022 Tonga Volcanic Eruption on the Ionospheric Dynamometer: ICON-MIGHTI and Swarm Observations of Extreme Neutral Winds and Currents. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(9), id. e2022GL098577.

29. Le, G., Liu, G., Yizengaw, E., Englert, C.R., 2022. Intense equatorial electrojet and counter electrojet caused by the 15 January 2022 Tonga volcanic eruption: Space- and ground-based observations. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(11), id. e2022GL099002.
30. Kulichkov, S.N., Chunchuzov, I.P., Popov, O.E., Gorchakov, G.I., Mishenin, A.A., Perepelkin, V.G., Bush, G.A., Skorokhod, A.I., Vinogradov, Yu.A., Semutnikova, E.G., Šepic, J., Medvedev, I.P., Gushchin, R.A., Kopeikin, V.M., Belikov, I.B., Gubanova, D.P., Karpov, A.V., Tikhonov, A.V., 2022. Acoustic-Gravity Lamb Waves from the Eruption of the Hunga-Tonga-Hunga-Hapai Volcano, Its Energy Release and Impact on Aerosol Concentrations and Tsunami. *Pure Appl. Geophys.*, **179**, pp. 1533–1548.

Received 10.12.2022

L.F. Chernogor, Yu.B. Mylovanov

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

NEAR-ZONE IONOSPHERIC DISTURBANCES CAUSED BY EXPLOSIVE ERUPTION OF TONGA VOLCANO ON 15 JANUARY 2022

Subject and Purpose. The thermal energy of the Tonga volcano reached $3.9 \cdot 10^{18}$ J, its power amounted to $9.1 \cdot 10^{13}$ W. The energy and power of the blast waves approached $(6.7 \dots 7.5) \cdot 10^{13}$ J and 10^{11} W, respectively. Ionospheric effects caused by the explosive eruption of the Tonga volcano on January 15, 2022 have received due attention. It was established that the ionospheric disturbances spread over global distances, with the greatest disturbances occurring in the near zone. The aim of the present paper is to describe aperiodic and quasi-periodic disturbances started by the Tonga volcano explosion and occurring in the near ionospheric zone.

Methods and Methodology. To detect ionospheric disturbances generated by the volcanic eruption, temporal variations of the total electron content (TEC) in a vertical column in the ionosphere were analyzed. The total error of the TEC estimation did not exceed 0.1 TECU.

Results. The quantitative characteristics of ionospheric disturbances caused by the explosive eruption of the Tonga volcano have been obtained. It was proved that the appearance of the ionospheric "hole" was caused directly by the volcanic explosion. With distance away from the volcano, the TEC deficit in absolute values decreased from ~ 10 to ~ 2.5 TECU. As that was happening, the time taken to form the ionospheric "hole" increased from ~ 20 to ~ 100 min. Three groups of disturbances were observed. One group picks out disturbances having an *N*-shaped profile and caused by a blast wave with a speed exceeding ~ 1000 m/s. Another group includes disturbances with a propagation speed within $\sim 340 \dots 620$ m/s, which is characteristic of atmospheric gravity waves at ionospheric heights. The last group is specified by the disturbance propagation speed within ~ 110 to 320 m/s. The disturbances of the kind can be generated by tsunamis, Lamb waves and atmospheric gravity waves. The wave disturbance periods varied within ~ 5 to 20 min, the disturbance amplitudes were within $0.5 \dots 1.0$ TECU.

Conclusions. It has been proven that aperiodic and quasi-periodic ionospheric disturbances in the near zone were caused directly by the explosion of the Tonga volcano.

Keywords: Tonga volcano, ionosphere, total electron content, ionospheric "hole", quasi-periodic disturbances, disturbance parameters.