

<https://doi.org/10.15407/knit2024.01.066>
УДК 551.214, 551.59

Л. Ф. ЧОРНОГОР, зав. кафедри, д-р фіз.-мат. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0001-5777-2392

E-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com

М. Б. ШЕВЕЛЕВ, д-р філософії, старш. наук. співроб.

E-mail: mykyta.b.shevelev@gmail.com

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

СТАТИСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИБУХОВИХ ХВИЛЬ У АТМОСФЕРІ, ЗГЕНЕРОВАНИХ СУПЕРВУЛКАНОМ ТОНГА 15 СІЧНЯ 2022 р.

Вибух вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай (коротко — Тонга) 15 січня 2022 р., який можна вважати супервулканом, був унікальним. За інтенсивністю викиду він перевершив навіть знаменитий вулкан Кракатау, що вибухнув 26-27 серпня 1883 р. Максимальна висота викиду досягла 58 км. Вулкан Тонга спричинив цілу низку ефектів у всіх підсистемах системи Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера. Необхідним є більш детальний аналіз ефектів у всіх підсистемах. Метою цієї роботи є статистичний аналіз основних характеристик повітряних хвиль, згенерованих вибухом супервулкана Тонга 15 січня 2022 р. У результаті статистичного аналізу параметрів вибухової хвилі, згенерованої супервулканом Тонга, встановлено таке. Час запізнювання приходу хвилі лінійно збільшувався при збільшенні відстані від вулкана до місця реєстрації. Швидкість поширення вибухової хвилі на відстані до 136.5 Мм залишалася практично незмінною. Різні методики її оцінки дали значення 313...315 м/с. Значення амплітуди вибухової хвилі сильно флукувало (до 2 разів і більше) за незмінної відстані від вулкана до місця спостереження. Це залежало від орієнтації траєкторії хвилі та стану атмосферної погоди на трасі поширення хвилі. Встановлено, що переважною розбіжністю фронту хвилі є циліндрична розбіжність. Цей факт разом зі швидкістю поширення підтверджує, що вибухова хвиля поширювалася чотирикратно навколо Землі як хвиля Лемба.

Ключові слова: вулкан Тонга, вибухова хвиля, статистичні характеристики, кореляційні поля, час запізнювання, швидкість хвилі, амплітуда хвилі, хвиля Лемба, рівняння регресії.

ВСТУП

Виверження вулкана — досить рідкісне, високоенергетичне, видовишне та небезпечне явище природи. Теплова енергія супервулкана сягає 10^{19} ... 10^{20} Дж, потужність — 10^{14} ... 10^{15} Вт. Енергія вибухових хвиль наближається до 10^{17} ... 10^{18} Дж, а потужність — до 10^{14} ... 10^{15} Вт [1, 2].

Розрізняють два основних класи вивержень вулканів: еруптивні (вибухові) та ефузивні (випливні). Найбільший вплив на систему Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера справляють еруптивні вулкани. Під час їхнього виверження, що супроводжується потужним вибухом, виникають землетруси з магнітудою до 7, цунамі з висотою до 10...15 м, спостерігаються викиди попелу

Цитування: Черногор Л. Ф., Шевелев М. Б. Статистичні характеристики вибухових хвиль у атмосфері, згенерованих супервулканом Тонга 15 січня 2022 р. *Космічна наука і технологія*. 2024. **30**, № 1 (146). С. 66—79. <https://doi.org/10.15407/knit2024.01.066>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2023. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

з об'ємом порядку 10 км^3 , який сягає мезосфери ($\sim 50 \text{ км}$), генеруються вибухові хвилі, здатні огинати Земну кулю 4...7 разів, збурюються всі геофізичні поля, викиди у стратосферу призводять до екранування сонячного випромінювання, падіння (до декількох градусів) температури повітря та настання «вулканічної зими», що триває декілька місяців [1, 2]. Від вивержень, землетрусів, цунамі гинуть люди, порушуються комунікації, стають неможливими авіаперельоти тощо [28].

З огляду на унікальність і епізодичність виверження потужного вулкана, актуальним є дослідження кожного виверження та його дії на підсистеми системи Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера.

Унікальним був вибух вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай (коротко — Тонга) 15 січня 2022 р., який можна вважати супервулканом. За інтенсивністю викиду він перевершив навіть знаменитий вулкан Кракатау, що вибухнув 26-27 серпня 1883 р. Максимальна висота викиду досягла 58 км [30, 33].

Ефектам виверження вулкана Тонга уже присвячено багато робіт [9, 13—17, 23, 26, 27]. Вибух вулкана призвів до землетрусу магнітудою 5.8 та виникнення сейсмічних хвиль, які поширювалися на тисячі кілометрів [16, 22]. Виникло цунамі двох типів: традиційне, швидкість $v \approx \approx 200 \text{ м/с}$ якого визначалась глибиною океану ($\sim 4 \text{ км}$) та цунамі атмосферного походження, швидкість якого була близькою до 300 м/с [9, 14, 15, 23, 26, 27]. Поблизу вулкана висота хвиль наближалась до 15 м , поблизу Чилі — до 3 м , поблизу Перу — до 2 м , поблизу Японії — до 1.2 м , а біля Каліфорнії та Аляски — до 1 м , в Атлантичному океані та Середземному морі — $0.1...0.3 \text{ м}$ [9, 14, 15, 23, 26, 27]. Вибух вулкана призвів до збурення іоносферного динамо [13] та екваторіального електроструменя [17].

Вибух вулкана згенерував вибухову (ударну) хвилю у повітрі, хвилю Лемба зі швидкістю приблизно 315 м/с , звук, інфразвук і атмосферну гравітаційну хвилю зі швидкістю $250...1000 \text{ м/с}$ в залежності від висоти [5, 7, 10, 11, 18—21, 31]. Звук було чути на відстані не менше 800 км . Хвиля Лемба чотирикратно, а зворотна хвиля — тричі обійшла навколо планети [7].

Виверження вулкана, крім лави, призвело до викиду в атмосферу попелу, каміння, SO_2 , CO_2 тощо [3]. Загальна маса вивержень об'ємом 1.9 км^3 була близькою до $2.9 \cdot 10^{12} \text{ кг}$ [33]. Висота попелу досягла 58 км , а висота вулканічної «хмари», діаметр якої становив сотні кілометрів, 30 км [33].

Вибух вулкана викликав локальні та глобальні, аперіодичні та квазіперіодичні збурення в іоносфері [4, 6, 10, 13, 24, 29, 34]. Зменшення повного електронного вмісту тривалістю біля 2 годин сягало 10 TECU [6]. Амплітуда рухомих іоносферних збурень із періодом $10...30 \text{ хв}$ і тривалістю до 6 годин була близькою до $1...3 \text{ TECU}$ [34].

У роботах [25, 32] описано магнітний ефект, викликаний вибухом вулкана. Збурення компонентів геомагнітного поля з періодами $T \approx 3...100 \text{ хв}$ становило $1...14 \text{ нТл}$ [25].

Таким чином, вулкан Тонга спричинив цілу низку ефектів у всіх підсистемах системи Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера. Необхідним є більш детальний аналіз ефектів у всіх підсистемах.

Метою цієї роботи є статистичний аналіз основних характеристик повітряних хвиль, згенерованих вибухом супервулкана Тонга 15 січня 2022 р.

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ВУЛКАН ТОНГА

Вулкан Тонга розташований на схід від Австралії, в Королівстві Тонга. Основні відомості про вулкан, виверження якого порівнюється з виверженням інших супервулканів, наведено в табл. 1 і табл. 2. Особливістю цього вулкана було те, що він підводний. Його кратер лежить на глибині 200 м [27]. Інша особливість полягала в тому, що його інтенсивність перевершила інтенсивність подібних вулканів (табл. 2). Це спричинило закидання продуктів вибуху на висоту 58 км [4, 5].

ВИХІДНІ ДАНІ

За вихідні використано дані реєстрації надлишкового тиску Δp у вибуховій хвилі, отримані у Британії та Ірландії [7]. При цьому відстань r від вулкана Тонга до місця реєстрації варіювала від 15.585 до 16.781 Мм (табл. 3). Крім того, використано дані спостережень надлишкового тиску для хвиль, які чотири рази огинали Земну кулю.

Таблиця 1. Основні відомості про вулкани

Дата виверження	Вулкан	Місцевість	Географічні координати	Примітки
26-27 серпня 1883 р.	Кракатау	Індонезія	6°06' пд. ш., 105°25' сх. д.	Сучасна висота 813 м Діаметр кратера 120 м
18 травня 1980 р.	Св. Олени	США, округ Скаманія	46°12' пн.ш., 122°11' зх. д.	Висота 2549 м Зменшилася на 400 м
29 березня та 3-4 квітня 1982 р.	Ель-Чічон	Мексика	17°22' пн. ш., 93°14' зх.д.	Висота 1150 м Діаметр кратера 1000 м Глибина кратера 300 м
15 червня 1991 р.	Пінатубо	Філіппіни	15°08' пн. ш., 120°21' сх.д.	Висота 1486 м, до 1991 р. — 1745 м
15 січня 2022 р.	Тонга	Королівство Тонга	15°36' пд. ш., 175°38' зх. д.	Плініанське виверження під водою на глибині 200 м

Таблиця 2. Основні параметри вулканів

Вулкан	Теплова енергія, 10 ¹⁹ Дж	Енергія вибухової хвилі, 10 ¹⁷ Дж	Магнітуда вулкана	Інтенсивність вулкана	Індекс вибухової потужності	Маса викиду, 10 ¹² кг	Інтенсивність викиду, 10 ⁷ кг/с	Об'єм продуктів викиду, 10 ⁹ м ³	Максимальна висота викиду, км
Кракатау	5	4...8	6.5	11.7	6	29	55	18	40...55
Св. Олени	0.2	1.5	5.1	10.3	5	1.3	2	0.4...0.5	19...25
Ель-Чічон	0.2	~1	5.1	11.2	5	1.3	15	0.5	30...32
Пінатубо	2	0.8...1.2	6.1	12	6	13	80	3.7...5.3	33
Тонга	3.6	0.9	5.5	12.1	5-6	2.9	6.7	1.9	50...58

При цьому сумарна (кумулятивна) відстань сягла 147 Мм [7].

Указані дані доповнено результатами вимірювань на відстані 64 км, де $\Delta p \approx 18$ гПа [31] та на відстанях 1.855 і 7.750 Мм, де надлишок тиску становив 3.71 і 2 гПа відповідно [16].

Для побудови рівняння регресії $\Delta p(r)$ також використано інший масив даних, наведений у роботі [20]. При цьому відстань r змінювалась від 0.8 до 90 Мм. Найбільше даних отримано для $r = 2.5...50$ Мм. Враховуючи, що при $r = \text{const}$ значення для різних станцій змінювалися у 2...5 і навіть більше разів, спочатку оцінювалось середнє значення Δp для даної відстані, а потім будувалося рівняння регресії.

Дані роботи [7] також використовувалися для отримання статистичних характеристик для часу запізнювання Δt , середньої швидкості поширен-

ня у вибуховій хвилі та побудови відповідних рівнянь регресій.

РЕЗУЛЬТАТИ СТАТИСТИЧНОГО АНАЛІЗУ

Час запізнювання вибухової хвилі. Кореляційне поле « $\Delta t - r$ » наведено на рис. 1. Із рис. 1, *a* видно, що чотири точки, які лежать значно нижче лінії регресії, випадають із загальної тенденції. Тому знаходилося рівняння регресії і без цих точок (рис. 1, *б*). Крім того, із залежності $\Delta t = 46.14r + 113.7$ (де r вимірюється у мегаметрах, а Δt — у хвилинах) видно, що при $r = 0$ км маємо $\Delta t \approx 113.7$ хв ≈ 1.9 год (рис. 1, *б*). Такий результат не є фізичним. Тому до експериментальних даних додано $\Delta t = 0$ хв за $r = 0$ км (рис. 1, *в*).

Швидкість поширення повітряної хвилі. За даними табл. 3 побудовано кореляційне поле « $v - r$ » (рис. 2). Із рис. 2, *a* видно, що має місце значний

Таблиця 3. Відомості про станції, які зареєстрували повітряну хвилю, згенеровану супервулканом Тонга 15 січня 2022 р., та основні параметри цієї хвилі (за даними [7])

Назва станції	Широта, град	Довгота, град	Час запізнювання, хв	Відстань від вулкана, Мм	Швидкість хвилі, м/с	Амплітуда хвилі, гПа
Lerwick Observatory	60.13	-1.18	832	15.585	312.2	2.9
Wick Airport	58.45	-3.08	843	15.750	311.4	2.5
Stornoway	58.21	-6.37	841	15.820	313.5	2.5
Edinburgh, Gogarbank	55.93	-3.35	854	16.021	312.7	2.6
Belmullet	54.23	-10.01	846	16.238	319.9	1.1
Bingley	53.82	-1.87	865	16.271	313.5	2.5
Dublin, Phoenix Park	53.36	-6.35	859	16.162	313.6	1.4
Mace Head	53.33	-9.90	850	16.338	320.4	1.4
Smallwood, Sandbach	53.16	-2.33	868	16.337	313.7	2.5
Newchapel	53.09	-2.21	868	16.346	313.9	2.5
Valentia Observatory	51.94	-10.20	855	16.487	321.4	1.0
Roches Point	51.79	-8.24	857	16.523	321.3	1.3
Almondsbury	51.55	-2.56	875	16.508	314.4	2.1
Oldland, East Bristol	51.44	-2.48	874	16.522	315.1	2.2
Reading University	51.44	-0.94	877	16.542	314.4	2.4
Wokingham	51.42	-0.85	876	16.546	314.8	2.3
Thatcham	51.41	-1.28	879	16.542	313.7	2.4
Stratfield Mortimer	51.37	-1.04	871	16.549	316.7	2.3
Herne Bay	51.37	1.11	885	16.571	312.1	2.4
North Hill, Cornwall	50.56	-4.44	880	16.581	314.0	1.3
Jersey Observatory	49.10	-2.10	887	16.781	315.3	1.6

Таблиця 4. Залежність параметрів вибухової хвилі від сумарної відстані (хвилі I, II, III і IV огинали земну кулю 1, 2, 3 та 4 рази відповідно)

Типи хвиль	Часи приходу	Δp , гПа	Δt , год	r , Мм	v , м/с	r_{cum} , Мм
		18				0.064
		7.8				0.736
		4.0				2.0
		3.9				2.307
		2.7				6.732
		2.5				7.219
		2.4				7.723
		2.3				8.544
		2.2				8.917
I	15 січня, 18:52	2.05	14.6	16.5	315	16.5
II	17 січня, 07:00	1.28	50.7	40.0	307	56.5
III	18 січня, 18:35	0.42	86.3	40.0	312	96.5
IV	20 січня, 05:30	0.26	121.2	40.0	318	136.5

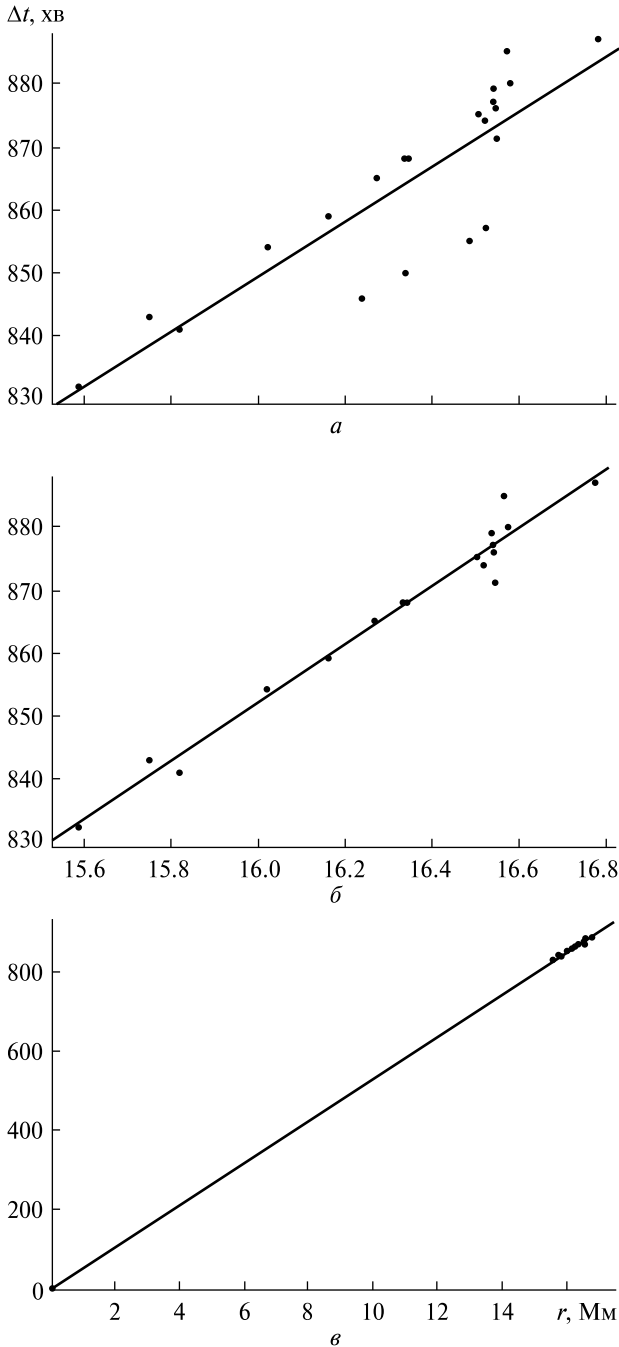


Рис. 1. Залежність часу запізнення від відстані: *a* — апроксимація лінійною регресією: $\Delta t = 43.54r + 152.7$, $R^2 \approx 0.7554$, $\sigma \approx 7.89$ хв; *b* — без урахування точок Belmullet, Mace Head, Valentia Observatory та Roches Point $\Delta t = 46.14r + 113.7$, $R^2 \approx 0.9722$, $\sigma \approx 2.744$ хв; *в* — з урахуванням точки (0, 0) $\Delta t = 53.06r + 0.7861$, $R^2 \approx 0.9997$, $\sigma \approx 3.556$ хв

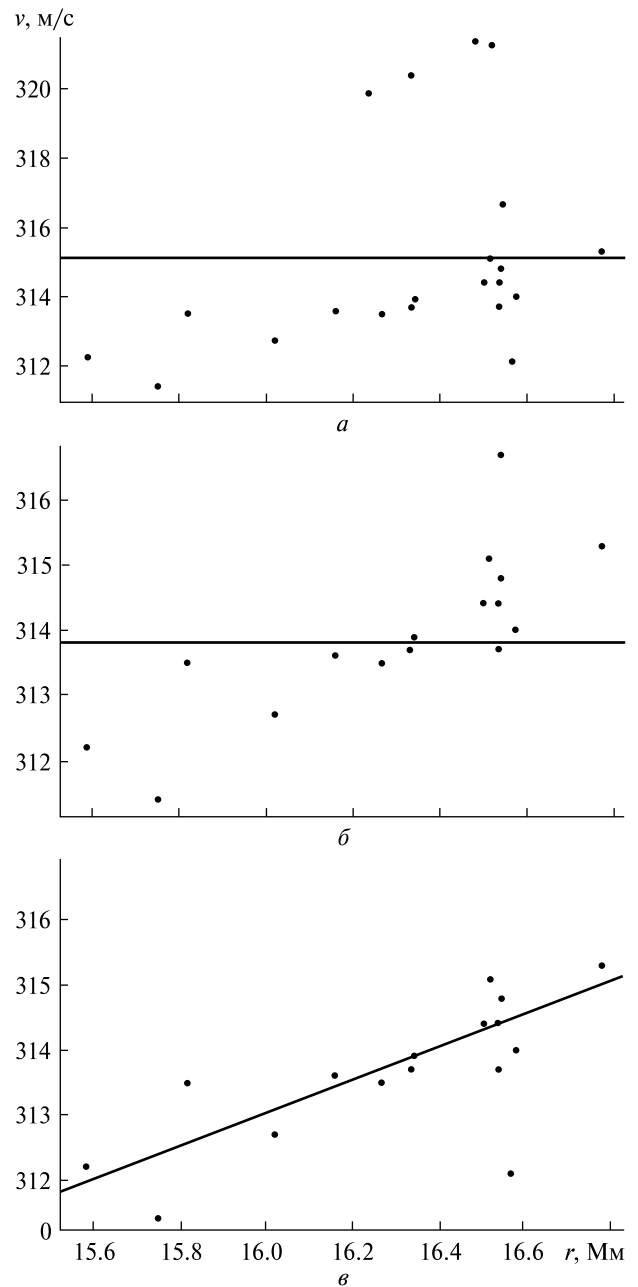


Рис. 2. Залежність швидкості поширення вибухової хвилі від відстані до вулкана 15 січня 2022 р.: *a* — апроксимація регресією $v = \text{const} \approx 315.14$ м/с, $\sigma \approx 3.0$ м/с; *b* — $v = \text{const} \approx 313.8$ м/с, $\sigma \approx 1.3$ м/с; *в* — $v = 2.568r + 271.9$; $R^2 \approx 0.457$; $\sigma \approx 0.9844$ м/с

розкид експериментальних точок. При цьому можна вважати, що при зміні відстані від 15.6 до 16.8 Мм швидкість v може вважатися незмінною. Тоді $v \approx 315.1 \pm 3.0$ м/с.

Якщо викинути точки з v для станцій Belmullet, Mace Head, Valentia Observatory та Roches-Point, що становить 319.9, 320.4, 321.4 і 321.3 м/с відповідно, то прийнятним рівнянням регресії є $v = 313.8 \pm 1.3$ м/с (рис. 2, б). Різниця між отриманими значеннями швидкості лежить у межах похибки.

Лінійне рівняння регресії кореляційного поля (рис. 2, в) має вигляд

$$\Delta v = 3.515r + 257.7, R^2 \approx 0.1295, \sigma \approx 2.90 \text{ м/с.}$$

Видно, що значення R^2 є неприйнятним, недопустимою є й швидкість наростання v , що дорівнює 3.515 м/(Мм·с). Так, для $r \approx 10 \dots 100$ Мм маємо нереальний приріст швидкості 35.15...351.5 м/с.

Амплітуда вибухової хвилі. Кореляційне поле « $\Delta p - r$ » наведено на рис. 3, де можна бачити дуже значний розкид експериментальних точок: від 1.0 до 2.9 гПа. Навіть для приблизно однакової відстані надлишок тиску у хвилі змінюється від 1 до 2.2 гПа, тобто більше, ніж у два рази. Тому розумним рівнянням може бути $\Delta p = 2.06 \pm \pm 0.58$ гПа (див. рис. 3).

Залежність параметрів вибухової хвилі від сумарної відстані. Час запізнювання вибухової хвилі. Кореляційне поле « $\Delta t - r$ » для сумарної відстані, яку пройшла хвиля приблизно за п'ять діб, з використанням даних табл. 4 наведено на рис. 4. Відповідна регресія є прямою лінією (рис. 4, а). Її рівняння:

$$\Delta t = 0.8885r + 0.2298, R^2 \approx 0.9999, \sigma \approx 0.425 \text{ год.} \quad (1)$$

Тут і надалі r вимірюється в Мм, а Δt — в годинах. Для $r = 0$ час $\Delta t \approx 0.4$ год. Для $\Delta t = 14 \dots 114$ год маємо похибку 3...0.3 % відповідно. Ця похибка часу призводить до похибки швидкості 1...10 м/с.

Якщо додати точку $r \approx 0$ Мм і $\Delta t \approx 0$ год, то рівняння регресії набуває вигляду (рис. 4, б):

$$\Delta t = 0.8896r + 0.016, R^2 \approx 0.9999, \sigma \approx 0.360 \text{ год.} \quad (2)$$

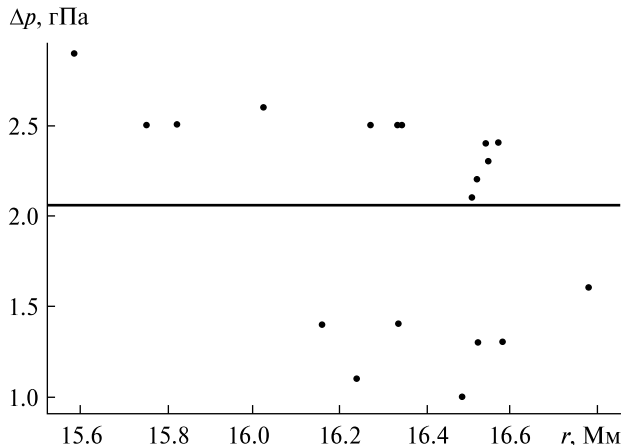


Рис. 3. Залежність амплітуди вибухової хвилі від відстані до вулкана 15 січня 2022 р.: апроксимація регресією $\Delta p = \text{const} \approx 2.06$ гПа, $\sigma \approx 0.58$ гПа

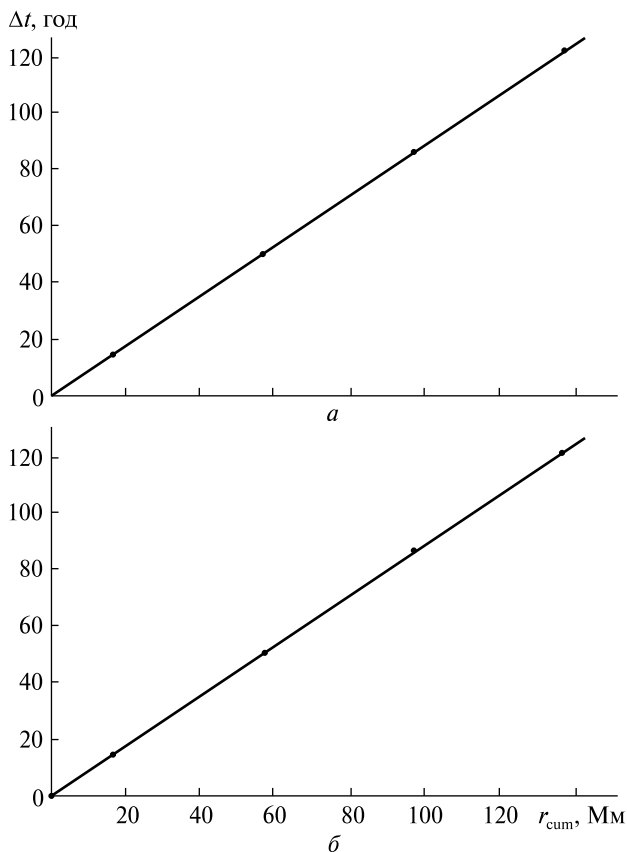


Рис. 4. Залежність часу запізнення приходу вибухової хвилі від сумарної відстані, апроксимація лінійною регресією: а — $\Delta t = 0.8885r_{\text{cum}} + 0.2298$; $R^2 \approx 0.9999$; $\sigma \approx 0.4254$ год; б — $\Delta t = 0.8896r_{\text{cum}} + 0.1159$; $R^2 \approx 1$; $\sigma \approx 0.3599$ год (з урахуванням точки (0, 0))

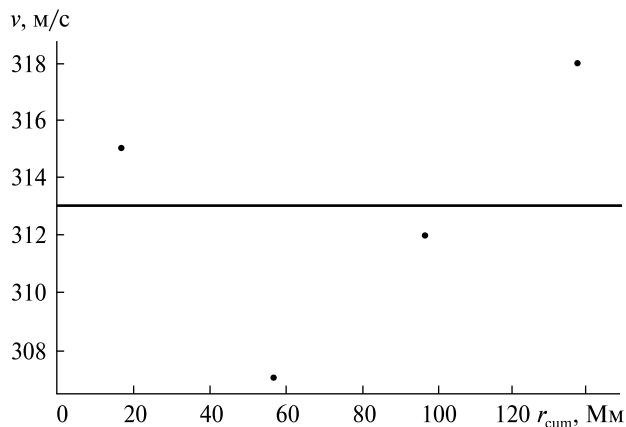


Рис. 5. Залежність швидкості поширення вибухової хвилі від сумарної відстані: апроксимація лінійною регресією $\bar{v} = 313.0$ м/с; $\sigma \approx 4.7$ м/с

При цьому коефіцієнт достовірності R^2 не змінився, але стандартне відхилення σ дещо зменшилося. В обох випадках значення середніх швидкостей становили 312.6 та 312.3 м/с, тобто з точністю до похибки збігалися.

Швидкість вибухової хвилі. Кореляційне поле « $v - r$ » для $r = 16.5 \dots 136.5$ Мм показано на рис. 5. Видно, що експериментальні точки мають значний розкид. Розумною апроксимацією є лінія $v = 313.0 \pm 4.7$ м/с.

Амплітуда вибухової хвилі. Під час пошуку адекватної регресії орієнтуємося на те, що послаблення вибухової хвилі могло бути за рахунок циліндричної (рис. 6, а) або сферичної розбіжностей фронту хвилі. За даними табл. 3 відповідні рівняння регресії мають вигляд

$$\Delta p = 4.863r^{-0.5}, R^2 \approx 0.9604, \sigma \approx 0.927 \text{ гПа}, (3)$$

$$\Delta p = 1.206r^{-1.0}, R^2 \approx 0.6429, \sigma \approx 2.785 \text{ гПа}. (4)$$

Видно, що друга регресія є невдалою з огляду на менший коефіцієнт R^2 та більше значення σ . Якщо для регресії (3), яка є більш фізичною та добре зіставляється з результатами, отриманими низкою зарубіжних дослідників, спробувати врахувати можливе загасання хвилі (рис. 6, б), то рівняння регресії набуде такого вигляду:

$$\Delta p = 6.478r^{-0.5} e^{-0.0002628r}, R^2 \approx 0.9866, \sigma \approx 0.563 \text{ гПа}. (5)$$

Показник степеня змінився несуттєво, дещо збільшилося значення R^2 . Глибина загасання, отримана зі співвідношення (5), дорівнювала приблизно 3805 Мм^{-1} . Це означає, що на відстанях до 136.5 Мм загасанням можна нехтувати. Так, для $r \approx 136.5$ Мм амплітуда з його врахуванням зменшиться на 3.5 %.

Результат можна покращити, якщо вважати показник степеня невідомим, яке потрібно визначити (рис. 6, в). Тоді рівняння регресії набуде такого вигляду:

$$\Delta p = 5.861r^{-0.4118}, R^2 \approx 0.9915, \sigma \approx 0.449 \text{ гПа}. (6)$$

Подальше можливе поліпшення апроксимації полягає у визначенні невідомого показника степеня та врахування можливого загасання (рис. 6, г). На жаль, коефіцієнт достовірності при цьому дещо зменшився, а σ , навпаки, збільшилося.

Тепер опишемо залежність амплітуди від відстані для результатів із бази даних [20], для яких побудовано табл. 5. Апроксимація проводилася для чотирьох рівнянь, які описують циліндричну та сферичну розбіжності фронту хвилі, їхні комбінації та степеневу залежність (рис. 7). Рівняння відповідних регресій мають такий вигляд:

$$\Delta p = 8.21r^{-0.5}, R^2 \approx 0.7924, \sigma \approx 1.288 \text{ гПа}, (7)$$

$$\Delta p = 10.85r^{-1.0}, R^2 \approx 0.8932, \sigma \approx 0.924 \text{ гПа}, (8)$$

$$\Delta p = 7.418r^{-1.0} + 2.885r^{-0.5}, R^2 \approx 0.9270, \sigma \approx 0.784 \text{ гПа}, (9)$$

$$\Delta p = 10.4r^{-0.845}, R^2 \approx 0.9082, \sigma \approx 0.879 \text{ гПа}. (10)$$

У табл. 5 наведено також відносні похибки апроксимації рівняннями регресії.

Із рис. 7, а видно, що рівняння (7) добре описує дані спостережень для $r \sim 1$ Мм, а також для $r > 15$ Мм. У діапазоні відстаней $r = 1.6 \dots 15$ Мм відносна похибка δ_1 становила 0.18...0.35 (табл. 5).

Рівняння (8) задовільно описує експериментальну залежність лише для $r \approx 1 \dots 4$ Мм (рис. 7, б). Співвідношення (9) добре описує залежність $\Delta p(r)$ для всього діапазону $r = 1 \dots 90$ Мм (рис. 7, в). При цьому R^2 приймає найбільше значення, а σ — найменше.

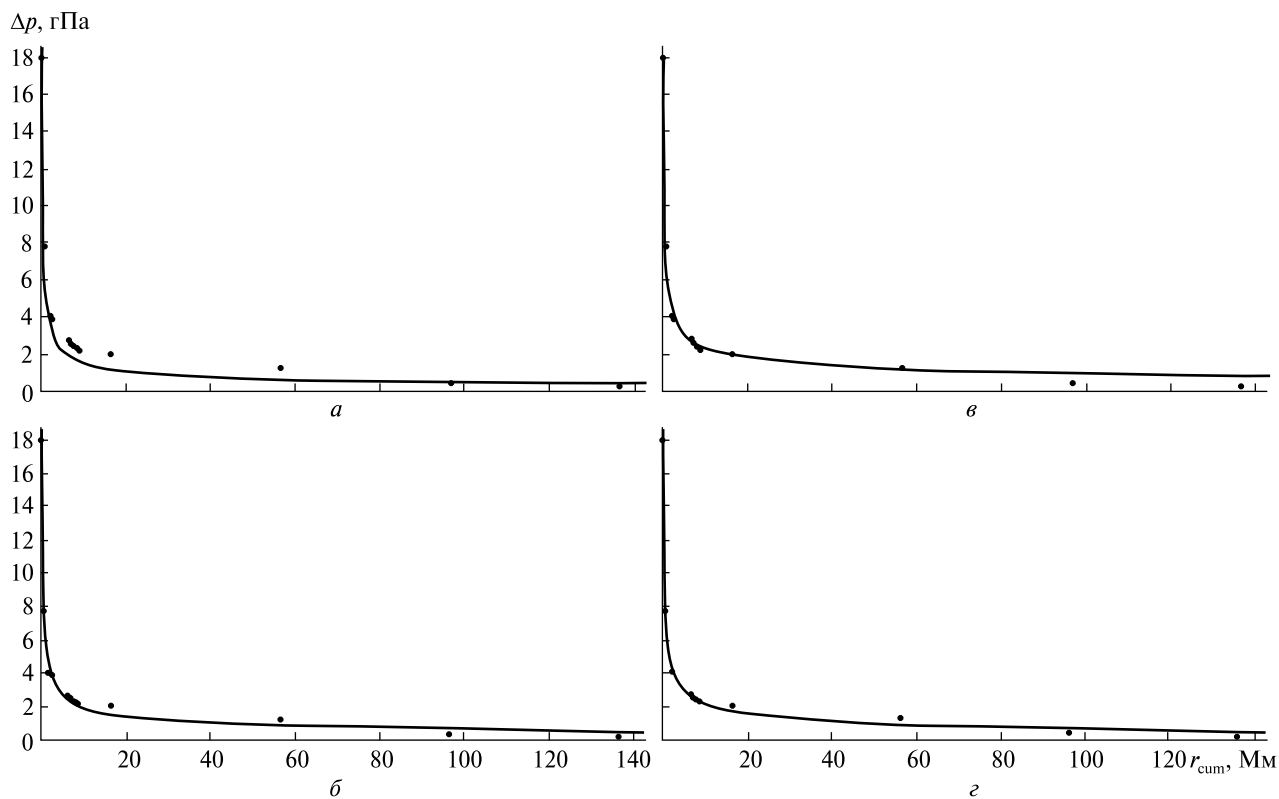


Рис. 6. Залежність варіацій тиску у повітряній хвилі від відстані: *а* — $\Delta p \approx 4.863r^{-0.5}$, $R^2 \approx 0.9604$, $\sigma \approx 0.927$ гПа; *б* — $\Delta p \approx 6.478r^{-0.5}e^{-0.0002628r}$, $R^2 \approx 0.9866$, $\sigma \approx 0.563$ гПа; *в* — $\Delta p \approx 5.861r^{-0.4118}$, $R^2 \approx 0.9915$, $\sigma \approx 0.449$ гПа; *г* — $\Delta p \approx 5.783r^{-0.4159}e^{-0.0043r}$, $R^2 \approx 0.9798$, $\sigma \approx 1.013$ гПа

Таблиця 5. Залежність надлишкового тиску від відстані та відносні похибки апроксимації рівняннями регресії (7)—(10) (відповідно $\delta_1 - \delta_4$)

<i>r</i> , Мм	<i>p</i> , гПа	δ_1	δ_2	δ_3	δ_4
0.800	14	-0.344	-0.031	-0.107	-0.103
1.6	5.5	0.180	0.233	0.258	0.271
1.9	4.5	0.324	0.269	0.333	0.344
2.5	4	0.298	0.085	0.198	0.199
3	3.5	0.354	0.033	0.182	0.174
4	3.2	0.283	-0.152	0.030	0.007
5	2.8	0.311	-0.225	-0.009	-0.047
6	2.6	0.289	-0.304	-0.071	-0.120
7	2.4	0.293	-0.354	-0.104	-0.163
8	2.3	0.262	-0.41	-0.153	-0.220
9	2.2	0.244	-0.452	-0.188	-0.262
10	2	0.298	-0.458	-0.173	-0.257
15	1.8	0.178	-0.598	-0.311	-0.414
20	1.6	0.147	-0.661	-0.365	-0.483
30	1.4	0.071	-0.742	-0.447	-0.580
40	1.3	-0.001	-0.791	-0.506	-0.646
50	1.2	-0.032	-0.819	-0.536	-0.682
60	1.15	-0.078	-0.843	-0.569	-0.716
70	1.1	-0.108	-0.859	-0.590	-0.739
80	1.07	-0.142	-0.873	-0.612	-0.760
90	1.05	-0.176	-0.885	-0.632	-0.779

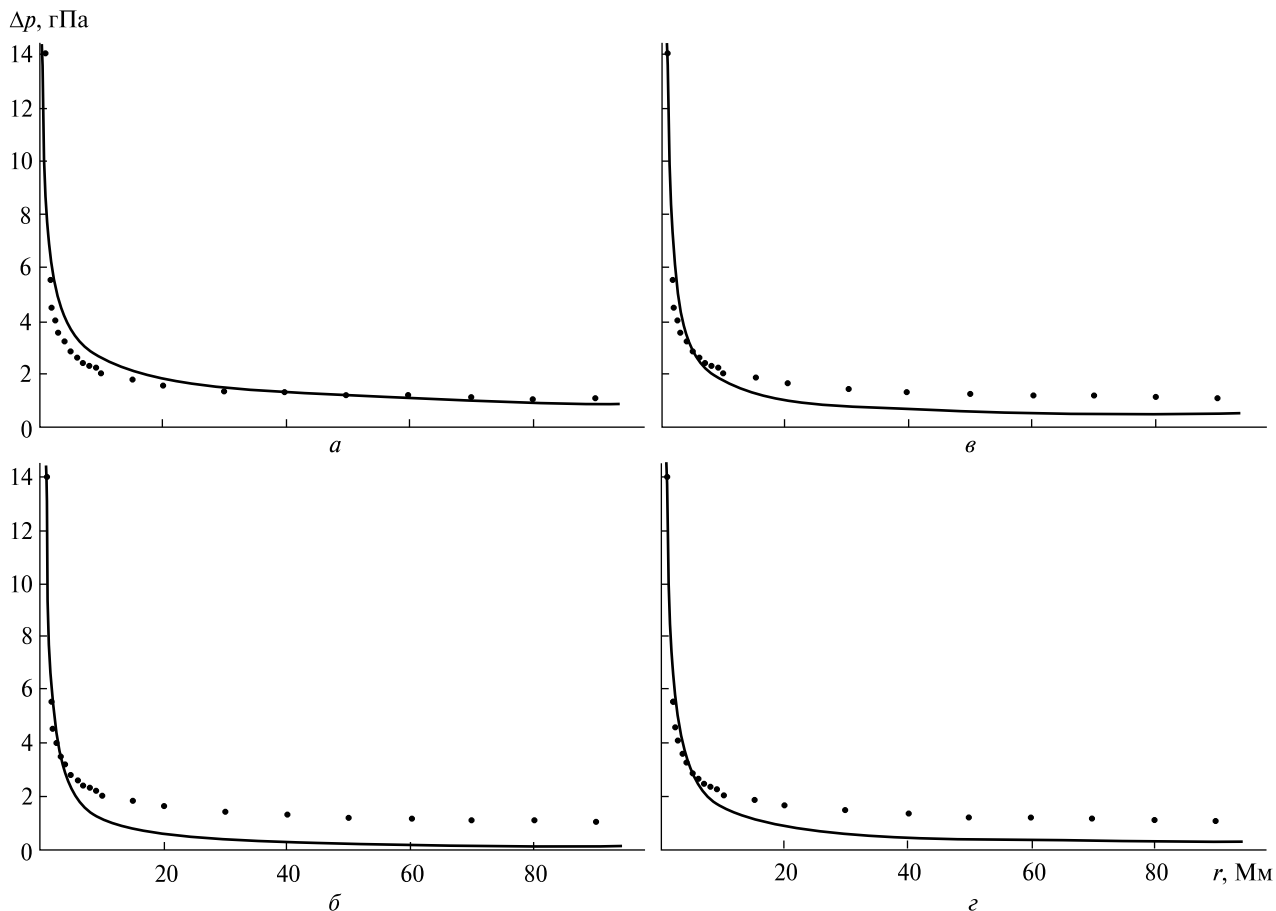


Рис. 7. Залежність амплітуди хвилі від сумарної відстані за даними [20]: $a - \Delta p \approx 8.21r^{-0.5}$, $R^2 \approx 0.7924$, $\sigma \approx 1.288$ гПа; $б - \Delta p \approx 10.85r^{-1.0}$, $R^2 \approx 0.8932$, $\sigma \approx 0.924$ гПа; $в - \Delta p \approx 7.418r^{-1.0} + 2.885r^{-1/2}$, $R^2 \approx 0.927$, $\sigma \approx 0.784$ гПа; $г - \Delta p \approx 10.4r^{-0.845}$, $R^2 \approx 0.9082$, $\sigma \approx 0.879$ гПа

Залежність (10) не є фізичною, не описує відому залежність від відстані ($r^{-0.5}$ або $r^{-1.0}$) та дає значну відносну похибку ($|\delta_4| = 0.1 \dots 0.78$).

ОБГОВОРЕННЯ

Час запізнювання вибухової хвилі. Рівняння регресії

$$\Delta t = 52.82r + 1.094, R^2 \approx 0.9981, \sigma \approx 8.22 \text{ хв}, \quad (11)$$

яке враховує додаткову точку $\Delta t = 0$ хв за $r = 0$ км, є більш вдалим, ніж рівняння регресії

$$\Delta t = 43.54r + 152.7, R^2 \approx 0.7554, \sigma \approx 7.89 \text{ хв},$$

тому що перша регресія є фізичною. Крім того, значення коефіцієнта достовірності R^2 для регресії (11) значно більше.

Якщо вилучити з розгляду станції Belmullet, Mace Head, Valentia Observatory та Roches Point, то регресія набуває вигляду

$$\Delta t = 53.06r + 0.786, R^2 \approx 0.9997, \sigma \approx 3.56 \text{ хв}. \quad (12)$$

При цьому коефіцієнт R^2 збільшився незначно, а σ зменшилося більш ніж удвічі.

Із рівнянь регресій (11) і (12) доцільно обчислити швидкість вибухової хвилі:

$$v = \left(\frac{d}{dr} \Delta t(r) \right)^{-1},$$

яка дорівнює 315.5 і 314.1 м/с відповідно. Похибка при цьому визначається відношенням $\sigma/\Delta t$. Для $\sigma \approx 3.56 \dots 8.22$ хв та $\Delta t \approx 800$ хв маємо 0.4...1 %. Тоді для регресії (11) і (12) отримаємо

315.5 ± 3.2 м/с та 314.1 ± 1.2 м/с. Як бачимо, різниця між ними лежить у межах похибки.

Важливо, що отримане значення швидкості дуже близьке до значень, наведених у роботах [5, 30].

Швидкість вибухової хвилі. Для швидкості отримано дві регресії:

$$v = 315.1 \pm 3.0 \text{ м/с,}$$

$$v = 3.515r + 257.7, R^2 \approx 0.1295, \sigma \approx 2.90 \text{ м/с. (13)}$$

Як видно, значення 315.1 ± 3.0 м/с практично не відрізняється від значень, отриманих із співвідношень (11) і (12). Регресія (13) не є фізичною, оскільки швидкість занадто сильно збільшується зі збільшенням відстані. Так, dv/dr дорівнює 3.595 м/(Мм×с). Наприклад, для $r \approx 100$ Мм маємо $v \approx 609$ м/с. Така швидкість не є фізичною, оскільки вибухова хвиля має швидкість хвилі Лемба [5, 19—21, 30].

Хвилі Лемба генеруються лише при значному енерговиділенні, наприклад не меншому за 10^{16} Дж, або 2 Мт ТНТ. Такі енергії виділяються при термоядерних вибухах [16], падіннях великих метеороїдів [12] та вибухах вулканів [11].

Хвилі Лемба мають низку особливостей [12]. Вони поширюються, огинаючи Землю, в глобальних масштабах. Вони поверхневі, у них вертикальна складова швидкості дорівнює 0 м/с. Хвилі Лемба — недиспергуючі, поширюються практично без загасання. Вони поширюються вгору, згасаючи в e разів на відстані

$$H_L = \frac{v_s^2}{g} \frac{2}{2-\gamma} = \frac{2\gamma}{2-\gamma} H,$$

де v_s — швидкість звуку, g — прискорення вільного падіння, γ — показник адіабати, H — масштаб висоти нейтральної атмосфери. Для $H \approx 7.5$ км, $\gamma \approx 1.4$ маємо $H_L \approx 35$ км.

Амплітуда вибухової хвилі. Як видно з кореляційного поля « $\Delta p - r$ », амплітуда хвилі дуже флюктує (більш ніж удвічі) навіть при майже незмінному значенні відстані між вулканом і місцем спостереження. Оскільки енергія вибухової хвилі E пропорційна Δp^2 [12], то оцінювання енергії хвилі за її амплітудою практично недоцільне. Деяка користь може бути, якщо для оцінки енергії скористатися середнім значенням $\Delta p \approx 2.06 \pm 0.58$ гПа. При цьому невизначеність E буде сягати ± 60 %.

Звернемося до рис. 3. Можна бачити, що є дві групи точок. Якщо зіставити ці точки з координатами станцій (табл. 3), то можна помітити, що меншим значенням Δp відповідають довготи $-8^\circ \dots -10^\circ$, а більшим значенням Δp — довготи $-1^\circ \dots -2^\circ$. Це вказує на тенденцію до довготного ефекту. Крім того, меншим значенням надлишкового тиску відповідають більші значення швидкості ($v \geq 320$ м/с). Усе це вказує на визначальний вплив фонового вітру на параметри інфразвуку. Добре відомо, що попутний вітер зменшує амплітуду інфразвуку та збільшує його швидкість. Зустрічний вітер, навпаки, підсилює амплітуду хвилі, а швидкість — зменшує.

Доцільно розділити апроксимації для менших і більших значень надлишкового тиску, наведених у табл. 3 і показаних на рис. 3. Ці апроксимації мають такий вигляд:

$$\Delta p \approx 1.31 \text{ гПа, } \sigma \approx 0.20 \text{ гПа,}$$

$$\Delta p \approx 2.44 \text{ гПа, } \sigma \approx 0.19 \text{ гПа.}$$

Перейдемо далі до обговорення залежностей часу запізнювання, швидкості та амплітуди вибухової хвилі від сумарної (кумулятивної) відстані.

Час запізнювання описується рівняннями (1) і (2). Друге рівняння має переваги над першим тому, що точка $r = 0$ Мм і $\Delta t \approx 0$ год є природною. Із (1) отримуємо швидкість

$$v = \left(\frac{d}{dr} \Delta t(r) \right)^{-1} \approx 312.6 \text{ м/с,}$$

а із рівняння (2) — $v \approx 312.3$ м/с. Ці результати добре узгоджуються з результатами, установленими для британських та ірландських станцій, для яких $v = 315.1 \pm 3.0$ м/с або $v = 313.8 \pm 1.3$ м/с.

Додамо, що за даними рис. 5 швидкість $v = 313.0 \pm 4.7$ м/с.

Таким чином, усі підходи для оцінки швидкості хвилі Лемба дають близькі оцінки (313... 315 м/с). Отримані значення швидкості повністю відповідають результатам робіт [5, 19—21, 30].

Амплітуда хвилі досить швидко зменшується при збільшенні відстані від вулкана (див. рис. 6, 7).

Із залежностей (3)—(6) перевагу віддаємо залежності (3). При цьому коефіцієнт достовір-

ності $R^2 \approx 0.9604$, а $\sigma \approx 0.927$ гПа. Головне те, що залежність описує циліндричну розбіжність хвилі. Саме такою є хвиля Лемба, яка поширюється вздовж поверхні Землі у своєрідному хвилеводі.

Отримана регресія (5) насправді не описує загасання вибухової хвилі за рахунок поглинання. Важливою є тільки циліндрична розбіжність фронту хвилі.

З іншої бази даних маємо набір рівнянь регресій (7)–(10). Залежність (7) має найменший коефіцієнт достовірності та найбільше стандартне відхилення, проте вона добре описує $\Delta p(r)$ для $r \sim 1$ Мм та $r > 15$ Мм. Залежність (8) незадовільна майже для всіх відстаней (крім $r = 1 \dots 4$ Мм). Прийнятною є також залежність (9). Для $r < 6$ Мм переважає залежність $\Delta p \approx r^{-1}$, а для $r > 7$ — залежність $\Delta p \approx r^{-0.5}$. Для $r \approx 6.6$ Мм їхній внесок приблизно однаковий. Залежність (10) не є фізичною та дає значні відхилення від даних спостережень за $r > 7$ Мм.

ГОЛОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

У результаті статистичного аналізу параметрів вибухової хвилі, згенерованої супервулканом Тонга, встановлено таке.

1. Час запізнювання приходу хвилі лінійно збільшувався при збільшенні відстані від вулкана до місця реєстрації.

2. Швидкість поширення вибухової хвилі на відстані до 136.5 Мм залишалася практично незмінною. Різні методи її оцінювання дали значення 313...315 м/с.

3. Значення амплітуди вибухової хвилі сильно флукувало (до 2 разів і більше) при незмінній відстані від вулкана до місця спостереження. Це залежало від орієнтації траєкторії хвилі та стану атмосферної погоди на трасі поширення хвилі.

4. Встановлено, що переважною розбіжністю фронту хвилі є циліндрична розбіжність. Цей факт разом зі швидкістю поширення підтверджує, що вибухова хвиля поширювалася чотирикратно навколо Землі як хвиля Лемба.

5. Оцінка глибини загасання хвилі Лемба становила приблизно 3805 Мм^{-1} . Така хвиля дійсно здатна обігнути нашу планету 6...7 разів.

Автори щиро вдячні рецензенту за корисні та конструктивні зауваження та поради.

Роботу виконано 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». Робота також частково підтримувалась у рамках держбюджетної НДР, заданої МОН України (номер держреєстрації 0122U001476).

REFERENCES

- Chernogor L. F. (2012). *Physics and ecology of the catastrophes*. Kharkiv, Ukraine: V. N. Karazin Kharkiv Nat. Univ. Publ. [in Russian].
- Chernogor L. F. (2020). Parameters of the Infrasonic Signal Generated in the Atmosphere by Explosion of Powerful Volcano. *Physics of atmosphere and geospace*, **1**(1), 5–20.
- Aa E., Zhang S.-R., Erickson P. J., Vierinen J., Coster A. J., Goncharenko L. P., Spicher A., Rideout W. (2022). Significant Ionospheric Hole and Equatorial Plasma Bubbles After the 2022 Tonga Volcano Eruption. *Geophys. Res. Lett.*, **20**(7), e2022SW003101. DOI:10.1029/2022SW003101
- 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), e2022JA030527. DOI:10.1029/2022JA030527
- Amores A., Monserrat S., Marcos M., Argüeso D., Villalonga J., Jordà G., Gomis D. (2022). Numerical Simulation of Atmospheric Lamb Waves Generated by the 2022 Hunga-Tonga Volcanic Eruption. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(6), e2022GL098240. DOI:10.1029/2022GL098240
- 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), e2022GL098827. DOI:10.1029/2022GL098827

7. Burt S. (2022). Multiple airwaves crossing Britain and Ireland following the eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai on 15 January 2022. *Weather. Special Issue: The January 2022 eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai*, **77**(3), 76–81. DOI:10.1002/wea.4182
8. Carr J. L., Horváth Á., Wu D. L., Friberg M. D. (2022). Stereo plume height and motion retrievals for the record-setting Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption of 15 January 2022. *Geophys. Res. Lett.*, **49**, e2022GL098131. DOI:10.1029/2022GL098131
9. Carvajal M., Sepúlveda I., Gubler A., Garreaud R. (2022). Worldwide signature of the 2022 Tonga volcanic tsunami. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(6), e2022GL098153. DOI:10.1029/2022GL098153
10. Chen C.-H., Zhang X., Sun Y.-Y., Wang F., Liu T.-C., Lin C.-Y., Gao Y., Lyu J., Jin X., Zhao X., Cheng X., Zhang P., Chen Q., Zhang D., Mao Z., Liu J.-Y. (2022). Individual Wave Propagations in Ionosphere and Troposphere Triggered by the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Underwater Volcano Eruption on 15 January 2022. *Remote Sensing*, **14**(9), 2179. DOI:10.3390/rs14092179
11. 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 backtracing. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(10), e2022GL098626. DOI:10.1029/2022GL098626
12. Gossard E. E., Hooke W. H. *Waves in the Atmosphere*. New York: Elsevier, 1975. 456 p.
13. Harding B. J., Wu Y.-J. J., Alken P., Yamazaki Y., Triplett C. C., Immel T. J., Gasque L. C., Mende S. B., Xiong C. (2022). Impacts of the January 2022 Tonga Volcanic Eruption on the Ionospheric Dynamo: ICON-MIGHTI and Swarm Observations of Extreme Neutral Winds and Currents. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(9), e2022GL098577. DOI:10.1029/2022GL098577
14. Imamura F., Suppasri A., Arikawa T., Koshimura S., Satake K., Tanioka Y. (2022). Preliminary Observations and Impact in Japan of the Tsunami Caused by the Tonga Volcanic Eruption on January 15, 2022. *Pure and Appl. Geophys.*, **179**, 1549–1560. DOI:10.1007/s00024-022-03058-0
15. Kubota T., Saito T., Nishida K. (2022). Global fast-traveling tsunamis driven by atmospheric Lamb waves on the 2022 Tonga eruption. *Science*, **377**(6601), 91–94. DOI:10.1126/science.abo4364
16. 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., Gubanov 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 and Appl. Geophys.*, **179**, 1533–1548. DOI:10.1007/s00024-022-03046-4
17. Le G., Liu G., Yizengaw E., Englert C. R. (2022). Intense equatorial electrojet and counter electrojet caused by the 15 January 2022 Tonga volcanic eruption: Space- and ground-based observations. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(11), e2022GL099002. DOI:10.1029/2022GL099002
18. Lin J.-T., Rajesh P. K., Lin C. C. H., Chou M.-Y., Liu J.-Y., Yue J., Hsiao T.-Y., Tsai H.-F., Chao H.-M., Kung M.-M. (2022). Rapid Conjugate Appearance of the Giant Ionospheric Lamb Wave Signatures in the Northern Hemisphere After Hunga-Tonga Volcano Eruptions. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(8), e2022GL098222. DOI:10.1029/2022GL098222
19. Matoza R. S., Fee D., Assink J. D., Iezzi A. M., Green D. N., Kim K., Toney L., Lecocq T., Krishnamoorthy S., Lalande J. M., Nishida K., Gee K. L., Haney M. M., Ortiz H. D., Brissaud Q., Martire L., Rolland L., Vergados P., Nippress A., Park J., Shani-Kadmiel S., Witsil A., Arrowsmith S., Caudron C., Watada S., Perttu A. B., Taisne B., Mialle P., Le Pichon A., Vergoz J., Hupe P., Blom P. S., Waxler R., De Angelis S., Snively J. B., Ringler A. T., Anthony R. E., Jolly A. D., Kilgour G., Averbuch G., Ripepe M., Ichihara M., Arciniega-Ceballos A., Astafyeva E., Ceranna L., Cevuard S., Che I.-Y., De Negri R., Ebeling C. W., Evers L. G., Franco-Marin L. E., Gabrielson T. B., Hafner K., Harrison R. G., Komjathy A., Lacanna G., Lyons J., Macpherson K. A., Marchetti E., McKee K. F., Mellors R. J., Mendo-Pérez G., Mikesell T. D., Munaibari E., Oyola-Merced M., Park I., Pilger C., Ramos C., Ruiz M. C., Sabatini R., Schwaiger H. F., Tailpied D., Talmadge C., Vidot J., Webster J., Wilson D. C. (2022). Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga. *Science*, **377**(6601), 95–100. DOI:10.1126/science.abo7063
20. Matoza R. S., Fee D., Assink J. D., Iezzi A. M., Green D. N., Kim K., Toney L., Lecocq T., Krishnamoorthy S., Lalande J. M., Nishida K., Gee K. L., Haney M. M., Ortiz H. D., Brissaud Q., Martire L., Rolland L., Vergados P., Nippress A., Park J., Shani-Kadmiel S., Witsil A., Arrowsmith S., Caudron C., Watada S., Perttu A. B., Taisne B., Mialle P., Le Pichon A., Vergoz J., Hupe P., Blom P. S., Waxler R., De Angelis S., Snively J. B., Ringler A. T., Anthony R. E., Jolly A. D., Kilgour G., Averbuch G., Ripepe M., Ichihara M., Arciniega-Ceballos A., Astafyeva E., Ceranna L., Cevuard S., Che I.-Y., De Negri R., Ebeling C. W., Evers L. G., Franco-Marin L. E., Gabrielson T. B., Hafner K., Harrison R. G., Komjathy A., Lacanna G., Lyons J., Macpherson K. A., Marchetti E., McKee K. F., Mellors R. J., Mendo-Pérez G., Mikesell T. D., Munaibari E., Oyola-Merced M., Park I., Pilger C., Ramos C., Ruiz M. C., Sabatini R., Schwaiger H. F., Tailpied D., Talmadge C., Vidot J., Webster J., Wilson D. C. (2022). Supplementary Materials for Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga. *Science*, **377**(6601), DOI:10.1126/science.abo7063

21. Otsuka S. (2022). Visualizing Lamb waves from a volcanic eruption using meteorological satellite Himawari-8. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(8), e2022GL098324. DOI:10.1029/2022GL098324
22. Poli P., Shapiro N. M. (2022). Rapid Characterization of Large Volcanic Eruptions: Measuring the Impulse of the Hunga Tonga Ha'apai Explosion From Teleseismic Waves. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(8), e2022GL098123
23. Ramirez-Herrera M. T., Coca O., Vargas-Espinosa V. (2022). Tsunami Effects on the Coast of Mexico by the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Volcano Eruption, Tonga. *Pure and Appl. Geophys.*, **179**, 1117–1137. DOI:10.1007/s00024-022-03017-9
24. Saito S. (2022). Ionospheric disturbances observed over Japan following the eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai on 15 January 2022. *Earth, Planets and Space*, **74**, 57. DOI:10.1186/s40623-022-01619-0
25. Schnepf N. R., Minami T., Toh H., Nair M. C. (2022). Magnetic Signatures of the 15 January 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Volcanic Eruption. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(10), e2022GL098454.
26. Tanioka Y., Yamanaka Y., Nakagaki T. (2022). Characteristics of the deep sea tsunami excited offshore Japan due to the air wave from the 2022 Tonga eruption. *Earth, Planets and Space*, **74**, 61. DOI: 10.1186/s40623-022-01614-5
27. Terry J. P., Goff J., Winspear N., Bongolan V. P., Fisher S. (2022). Tonga volcanic eruption and tsunami, January 2022: globally the most significant opportunity to observe an explosive and tsunamigenic submarine eruption since AD 1883 Krakatau. *Geosci. Lett.*, **9**, 24. DOI: 10.1186/s40562-022-00232-z
28. *The Encyclopedia of Volcanoes (2nd ed.)*. Academic Press, 2015. 1421 p. DOI:10.1016/B978-0-12-385938-9.00063-8
29. Themens D. R., Watson C., Žagar N., Vasylykevych S., Elvidge S., McCaffrey A., Prikryl P., Reid B., Wood A., Jayachandran P. T. (2022). Global propagation of ionospheric disturbances associated with the 2022 Tonga volcanic eruption. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(7), e2022GL098158. DOI:10.1029/2022GL098158
30. Vergoz J., Hupe P., Listowski C., Le Pichon A., Garcés M. A., Marchetti E., Labazuy P., Ceranna L., Pilger C., Gaebler P., Näsholm S. P., Brissaud Q., Poli P., Shapiro N., De Negri R., Mialle P. (2022). IMS observations of infrasound and acoustic-gravity waves produced by the January 2022 volcanic eruption of Hunga, Tonga: A global analysis. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, **591**, 117639. DOI:10.1016/j.epsl.2022.117639
31. Wright C. J., Hindley N. P., Alexander M. J., Barlow M., Hoffmann L., Mitchell C. N., Prata F., Bouillon M., Carstens J., Clerbaux C., Osprey S. M., Powell N., Randall C. E., Yue J. (2022). Surface-to-space atmospheric waves from Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption. *Nature*, **609**, 741–746. DOI: 10.1038/s41586-022-05012-5
32. Yamazaki Y., Soares G., Matzka J. (2022). Geomagnetic Detection of the Atmospheric Acoustic Resonance at 3.8 mHz During the Hunga Tonga Eruption Event on 15 January 2022. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, **127**(7), e2022JA030540. DOI: 10.1029/2022JA030540
33. Yuen D. A., Scruggs M. A., Spera F. J., Zheng Y., Hu H., McNutt S. R., Thompson G., Mandli K., Keller B. R., Wei S. S., Peng Z., Zhou Z., Mulargia F., Tanioka Y. (2022). 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 Res. Adv.*, **2**(3), 100134. DOI: 10.1016/j.eqrea.2022.100134
34. Zhang S.-R., Vierinen J., Aa E., Goncharenko L. P., Erickson P. J., Rideout W., Coster A. J., Spicher A. (2022). 2022 Tonga Volcanic Eruption Induced Global Propagation of Ionospheric Disturbances via Lamb Waves. *Front. Astron. and Space Sci.*, **9**, 871275. DOI:10.3389/fspas.2022.871275

Стаття надійшла до редакції 18.08.2023

Після доопрацювання 08.09.2023

Прийнято до друку 25.11.2023

Received 18.08.2023

Revised 08.09.2023

Accepted 25.11.2023

L. F. Chernogor, Head of the Department of Space Radiophysics, Dr. Sci. in Phys.&Math., Professor

ORCID ID: 0000-0001-5777-2392

E-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com

M. B. Shevelev, PhD in Phys. & Math., Senior Researcher at the Department of Space Radiophysics

E-mail: mykyta.b.shevelev@gmail.com

V. N. Karazin Kharkiv National University

4 Svoboda Sq., Kharkiv, 61022 Ukraine

A STATISTICAL STUDY OF THE EXPLOSIVE WAVES LAUNCHED BY THE TONGA SUPER-VOLCANO ON JANUARY 15, 2022

The eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano (briefly known as the Tonga volcano), which was the largest explosion recorded by modern instrumentation, attained a maximum on January 15, 2022. Only the Krakatoa eruption of August 26-27, 1883, could have rivaled the atmospheric disturbance produced. The initial volcanic plume rose to 58 kilometers, the greatest height ever reported. The Tonga volcano created a chain of effects in all subsystems of the Earth — atmosphere — ionosphere — magnetosphere system, which requires a more detailed analysis. The purpose of this paper is the statistical study of the main parameters of the wave generated in the air by the explosion of the Tonga super-volcano on January 15, 2022. The statistical study of the parameters of the explosive wave launched by the Tonga super-volcano has established the following. The time delay of the arrival of the wave increases with increasing distance between the volcano and the observatory taking measurements. The speed of propagation for the explosive wave remains virtually unalterable in the range of up to 136.5 Mm. Different techniques for estimating the speed yield the values of 313...315 m/s. At a particular distance between the volcano and the observatory taking measurements, the amplitude of the explosive wave is observed to fluctuate wildly (by a factor of 2 or greater), which is dependent on the orientation of the propagation path and on the state of tropospheric weather along the propagation path. The radiated wave front has been established to be well approximated by a cylindrical wave. This fact, together with the speed of propagation, suggests that the explosive wave made 4-fold travel around the Earth as a Lamb wave of the Earth's atmosphere.

Keywords: Tonga volcano, explosive wave, statistical parameters, scatter diagram, time delay, wave velocity, wave amplitude, Lamb wave, polynomial regression.