

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2024-41-06>

УДК 550.388

Л. Ф. ЧОРНОГОР, д.ф.-м.н., проф., член-кор. НАН України

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

М.Б. ШЕВЕЛЕВ, доктор філософії, старший науковий співробітник, доцент

e-mail: mykyta.b.shevelev@karazin.ua

Р.М. КОВАЛЬОВ, студент

факультету радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем

e-mail: ruvym.kovalov@student.karazin.ua

Д.Р. НОВИЦЬКА, студентка

факультету радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем

e-mail: daria.novytska@student.karazin.ua

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна,

м. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

СТАТИСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВУЛКАНОГЕННИХ ХВИЛЬ ЦУНАМІ В ПІВНІЧНО-ЗАХІДНОМУ РЕГІОНІ ТИХОГО ОКЕАНУ

Актуальність. Атмосфера й іоносфера є основним каналом для функціонування систем телекомунікації, радіонавігації, радіолокації, дистанційного радіозондування та радіоастрономії. На стан атмосферно-іоносферного радіоканалу суттєво впливає низка високоенергетичних природних і техногенних джерел. Вулкани є одним із таких джерел. Вибух вулкану Тонга 15 січня 2022 р. призвів до значного збурення всіх підсистем у системі Земля (літосфера, Світовий океан) - атмосфера - іоносфера - магнітосфера і, відповідно, параметрів радіоканалу. Зокрема, вибух згенерував потужні атмосферні хвилі та цунамі. Детальне дослідження поширення цих хвиль є актуальною задачею.

Мета роботи – статистичний аналіз характеристик атмосферних і океанічних хвиль цунамі в північно-західній частині Тихого океану, згенерованих вибухом підводного надпотужного вулкану Тонга 15 січня 2022 р.

Методи і методологія. Статистичний аналіз головних характеристик хвиль цунамі атмосферного та океанічного походження. Порівняння результатів спостережень із результатами обчислень.

Результати. Виявлено дві групи хвиль цунамі. Перша із них мала атмосферне походження, генерувалася хвилею Лемба та поширювалася зі швидкістю близько 312 м/с. Ця швидкість була однаковою для станцій, розміщених як у відкритому океані, так і у внутрішньому морі. Друга група хвиль цунамі мала океанічне походження, генерувалася безпосередньо підводним вибухом вулкану Тонга та поширювалася зі швидкістю близько 203 м/с для станцій у відкритому океані та зі швидкістю близько 180 м/с для станцій у внутрішньому морі. Висота та амплітуда цунамі змінювалася в широких межах (~1-100 см) і визначалася топологією дна водойми та береговою лінією, а не відстанню від вулкану. Відношення висоти до амплітуди цунамі у середньому складало 2.07 ± 0.32 , 1.98 ± 0.60 для атмосферної та океанічної хвиль відповідно для станцій, розміщених у відкритому океані. Це відношення для станцій, розташованих у внутрішньому морі, були близькими відповідно до 2.24 ± 0.55 і 2.08 ± 0.34 .

Висновки. Визначено головні статистичні характеристики атмосферних і океанічних хвиль цунамі у північно-західній частині Тихого океану, згенерованих вибухом вулкану Тонга 15 січня 2022 р.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: вулкан Тонга, цунамі, статистичні характеристики, час запізнювання, швидкість цунамі, амплітуда цунамі, висота цунамі, результати обчислень

Як цитувати: Чорногор Л.Ф., Шевелев М.Б., Ковальов Р.М., Новицька Д.Р. Статистичні характеристики вулканогенних хвиль цунамі в Північно-західному регіоні Тихого океану. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2024;41:61-69. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2024-41-06>

In cites: Chernogor L.F., Shevelev M.B., Kovalov R.M., Novytska D.R. Statistical Characteristics of Volcanogenic Tsunami Waves in the Northwest Pacific Ocean Region. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, Series "Radio Physics and Electronics". 2024;41:61-69. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2024-41-06>.

ВСТУП

Стан атмосферного радіоканалу, що використовується системами радіозв'язку, радіонавігації, радіолокації, дистанційного радіозондування та радіоастрономії, залежить від стану систем Сонце – міжпланетне середовище – магнітосфера – іоносфера – атмосфера – Земля (літосфера, Світовий океан) –

(ЗАІМ). На стан цих систем суттєво впливає ціла низка високоенергетичних джерел природного та техногенного походження. До природних джерел відносять геокосмічні бурі, падіння великих космічних тіл (метеороїдів, комет), сонячні затемнення, грози, погодні фронти, вулкани, землетруси тощо. Техногенними джерелами є потужні вибухи, пуски великих ракет, потужне радіо- й акустичне випромінювання, інжекція активних хімічних реагентів тощо.

Вулкан є одним із найбільш потужних джерел збурення системи ЗАІМ, а значить, і атмосферно-іоносферного радіоканалу. Вибух підводного вулкану Тонга (географічні координати: 20.54° пд.ш., 175.38° зх.д.) 15 січня 2022 р. відноситься до унікальних подій. В інтервалі часу 04:00-05:00 UT (UT - тут і надалі всесвітній час) мало місце п'ять вибухів. Найпотужніший із них зареєстровано о 04:15. За нашими оцінками енергія вибуху складала 17.6 ± 2.7 Мт ТНТ [1, 2]. В атмосферу було інжектровано 2.9 Гт продуктів виверження об'ємом 1.9 км^3 . Теплова енергія складала $3.9 \cdot 10^{18}$ Дж [1, 2]. Це означає, що мало місце виверження надпотужного вулкану.

Виверження вулкану Тонга призвело до землетрусу магнітудою 5.8 [3-5], генерації сейсмічних хвиль [1-6], цунамі [7-17], хвиль Лемба [15, 18, 19], інфразвуку та звуку в атмосфері [4, 5, 20, 21], квазіперіодичних і аперіодичних збурень в іоносфері [22-25], магнітному полі [26, 27] та магнітосфері [1, 2].

Генерації цунамі під впливом вулкана Тонга присвячено низку робіт [7-17]. Висота хвилі над вулканом сягала 90 м [1, 2, 11]. Цунамі поширювалося в Тихому, Індійському та Атлантичному океанах і навіть у Середземному морі [3-17].

Цунамі Тихого океану на відстанях $r \approx 0.37\text{--}2.53$ Мм від вулкану вивчалися у роботах [17]. Виявлено два типи цунамі [15, 17]. Перший тип цунамі мав швидкість, близьку до 310 м/с. Він мав атмосферне походження. При цьому цунамі було згенероване атмосферою хвилею Лемба. Другий тип цунамі мав швидкість, близьку до 200 м/с. Цей тип мав океанічне походження.

Тихий океан – найбільший за площею (близько $1.79 \cdot 10^8 \text{ км}^2$) та глибиною (до 10994 м). Роботи [12, 16] присвячено дослідженню цунамі в Тихому океані на відстанях $r \approx 7\text{--}8$ Мм. Статистичні характеристики цунамі на відстанях $r \approx 0.37\text{--}2.53$ Мм описано в роботі [17].

Актуальною задачею є отримання статистичних характеристик атмосферних і океанічних хвиль цунамі в найбільш віддаленій (до 8–9 Мм) частині Тихого океану.

Мета роботи є статистичний аналіз характеристик атмосферних і океанічних хвиль цунамі в північно-західній частині Тихого океану, згенерованих вибухом підводного надпотужного вулкану Тонга 15 січня 2022 р.

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ

Дані вимірювань варіацій рівня води глибоководною системою DART представлені на сайті [https://www.ndbc.noaa.gov/to_station.shtml].

Перелік станцій спостережень і параметрів цунамі представлено у Табл. 1 і Табл. 2. Табл. 1 відноситься до станцій, розміщених у відкритому океані, а Табл. 2 – у внутрішньому морі.

Для аналізу використано відомі методи математичної статистики.

РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ

За даними Табл. 1 і Табл. 2 будувалися гістограми для наступних параметрів: відстані r від вулкану до станції спостереження, азимута A приходу цунамі, часів запізнювання атмосферної (Δt_a) та океанічної (Δt_o) хвиль цунамі, швидкостей v_a і v_o , амплітуд A_a і A_o , висот h_a і h_o цих хвиль. Додатково побудовано гістограми для відношень h_a/A_a та h_o/A_o . При цьому під амплітудою $A_{a,o}$ розуміється максимальна висота хвилі по відношенню до незбуреного рівня води. Висотою $h_{a,o}$ називається різниця між максимальним рівнем води та його мінімальним значенням (тобто розмах коливання). За такого значення $h_{a,o} \approx 2A_{a,o}$.

Варіації відстані. Гістограма для відстані всіх станцій від вулкану показана на Рис. 1,а. Із Рис. 1,а видно, що найбільше станцій знаходилося на відстані $r \approx 8.6\text{--}8.9$ Мм. Для станцій у відкритому океані середнє значення $\bar{r} \approx 8.40 \pm 0.32$ Мм, для станцій у внутрішньому морі – $\bar{r} \approx 8.79 \pm 0.09$ Мм.

Варіації азимуту. Відповідна гістограма наведена на Рис. 1,б. Із Рис. 1,б можна бачити, що є два інтервали значень азимуту: від 107° до 143° та від 143° до 189° . Для станцій у відкритому океані середнє значення $\bar{A} \approx 150.42^\circ \pm 12.78^\circ$, а для станцій у внутрішньому морі $\bar{A} \approx 134.53^\circ \pm 4.71^\circ$.

Час запізнювання атмосферної хвилі цунамі. Гістограма для Δt_a показана на Рис. 1,в. Із Рис. 1,в випливає, що частіше за все, $\Delta t_a \approx 7.7\text{--}7.9$ год. Для відкритого океану $\bar{\Delta t}_a \approx 7.48 \pm 0.29$ год, а для внутрішнього моря – $\bar{\Delta t}_a \approx 7.82 \pm 0.08$ год.

Час запізнювання океанічної хвилі цунамі. Гістограма для Δt_o наведена на Рис. 1,г. Із Рис. 1,г можна бачити, що частіше за все Δt_o приймало значення приблизно від 10.7 до 11.4 год, дещо рідше - від 13.6 до 14.3 год. Для відкритого океану $\overline{\Delta t_o} \approx 11.48 \pm 0.84$ год, а для внутрішнього моря - $\overline{\Delta t_o} \approx 13.58 \pm 0.55$ год

Швидкість атмосферної хвилі цунамі. Відповідна гістограма для v_a показана на Рис. 2,а. Із Рис. 2,а випливає, що частіше за все спостерігалися хвилі зі швидкістю 312.05 - 312.14 м/с та 312.23 - 312.31 м/с. Для цунамі у відкритому океані середнє значення $\overline{v_a} \approx 312.22 \pm 0.13$ м/с, а у внутрішньому морі - 312.26 ± 0.12 м/с.

Швидкість океанічної хвилі цунамі. Із гістограми видно, що найчастіше швидкість v_o океанічної хвилі цунамі змінювалася в межах 206 - 214 м/с та у межах 171 - 180 м/с (Рис. 2,б). Для відкритого океану середнє значення $\overline{v_o} \approx 203.80 \pm 8.59$ м/с. Для внутрішнього моря - $\overline{v_o} \approx 180.14 \pm 6.98$ м/с.

Амплітуда атмосферної хвилі цунамі. Гістограма для A_a показана на Рис. 2,в. Можна бачити, що частіше за все A_a варіювала у межах 2-14 см, але на деяких станціях амплітуда A_a сягала 14-25 см та навіть 48-60 см. Для відкритого океану середня амплітуда $\overline{A_a} \approx 23.03 \pm 24.02$ см, а для внутрішнього моря $\overline{A_a} \approx 7.96 \pm 6.16$ см.

Амплітуда океанічної хвилі цунамі. Відповідна гістограма наведена на Рис. 2,г. Із Рис. 2,г можна бачити, що A_o найчастіше змінювалася у межах 3 - 21 см, але могла сягати 56 - 91 см. Середнє значення для відкритого океану складало 37.29 ± 29.28 см, а для внутрішнього моря - 10.24 ± 6.68 см.

Висота атмосферної хвилі цунамі. Із гістограми видно, що висота цунамі h_a частіше за все варіювала у межах від приблизно 5 до 30 см, але могла сягати 80-130 см (Рис. 3, а). Середнє значення сильно флюктувало: в відкритому океані $\overline{h_a} \approx 45.22 \pm 46.05$ см, а у внутрішньому морі $\overline{h_a} \approx 16.67 \pm 10.81$ см.

Висота океанічної хвилі цунамі. Гістограма для h_o показана на Рис. 3,б. Найчастіше висота h_o складала приблизно 9-45 см, але могла сягати 118-191 см. У відкритому океані середнє значення $\overline{h_o} \approx 67.02 \pm 59.63$ см, а у внутрішньому морі $\overline{h_o} \approx 20.78 \pm 11.95$ см. В обох випадках висота h_o сильно флюктувала.

Відношення h_a/A_a для атмосферної хвилі цунамі. Гістограма для цього відношення наведена на Рис. 3,в. Величина h_a/A_a змінюється, як правило, в межах 1.7-2.6. Для відкритого океану в середньому $\overline{h_a/A_a} \approx 2.07 \pm 0.32$, а для внутрішнього моря $\overline{h_a/A_a} \approx 2.24 \pm 0.55$.

Відношення h_o/A_o для океанічної хвилі цунамі. Відповідна гістограма показана на Рис. 3,г. Відношення h_o/A_o , частіше за все, складало 1.4-2.6. У відкритому океані середнє значення $\overline{h_o/A_o} \approx 1.98 \pm 0.60$, а у внутрішньому морі $\overline{h_o/A_o} \approx 2.08 \pm 0.34$.

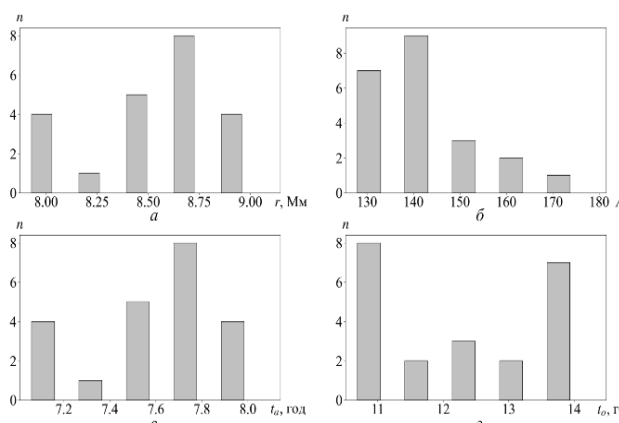


Рис. 1. Кількість подій: а – відстань станції від вулкана; б – азимут приходу цунамі; в – час запізнювання атмосферної хвилі цунамі; г – час запізнювання океанічної хвилі цунамі.

Fig. 1. Number of events: a - distance of the station from the volcano; b - azimuth of tsunami arrival; c - lag time of the atmospheric tsunami wave; d - lag time of the oceanic tsunami wave.

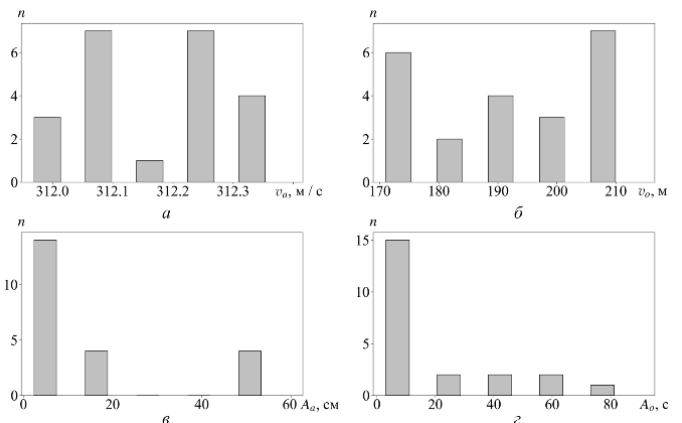


Рис. 2. Кількість подій: а – швидкість атмосферної хвилі цунамі; б – швидкість океанічної хвилі цунамі; в – амплітуда атмосферної хвилі цунамі; г – амплітуда океанічної хвилі цунамі.

Fig. 2. Number of events: a - atmospheric tsunami wave velocity; b - oceanic tsunami wave velocity; c - atmospheric tsunami wave amplitude; d - oceanic tsunami wave amplitude.

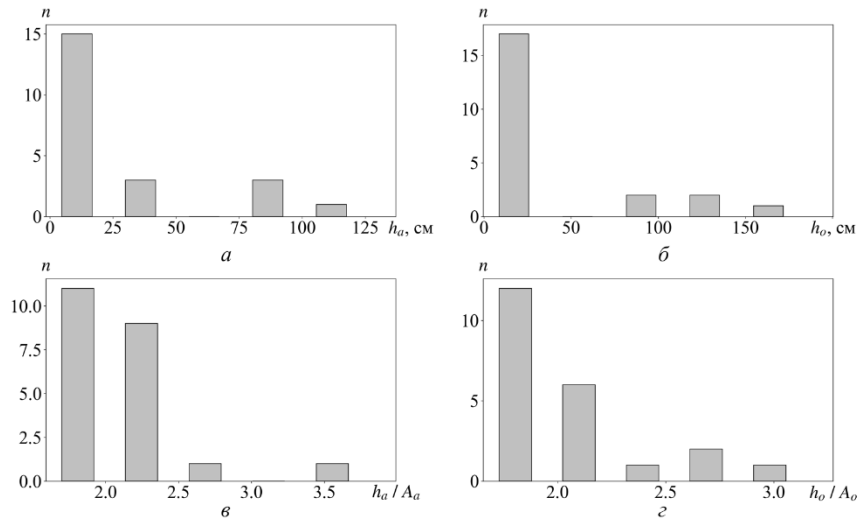


Рис. 3. Кількість подій: а – висота атмосферної хвилі цунамі; б – висота океанічної хвилі цунамі; в – відношення h_a/A_a для атмосферної хвилі цунамі; г – відношення h_o/A_o для океанічної хвилі цунамі.

Fig. 3. Number of events: a - height of the atmospheric tsunami wave; b - height of the oceanic tsunami wave; c - h_a/A_a ratio for the atmospheric tsunami wave; d - h_o/A_o ratio for the oceanic tsunami wave.

ОБГОВОРЕННЯ

Особливістю цієї роботи є дослідження характеристик цунамі на максимальній відстані від вулкану, яка сягала 8-9 Мм. Відстань між станціями була відносно невеликою. Так, для станцій у відкритому океані $\bar{r} \approx 8.40 \pm 0.32$ Мм, тобто відносне середнє квадратичне відхилення (СКВ) не перевищувало 3.8%. Для станцій у внутрішньому морі $\bar{r} \approx 8.79 \pm 0.09$ Мм, а відносне СКВ було близьким до 1%. Це означає, що залежність від відстані r певних параметрів цунамі була другорядною.

Другорядною була також залежність і від азимуту. Так, для станцій у відкритому океані $\bar{A} \approx 150.42^\circ \pm 12.78^\circ$ або відносне СКВ складало 8.5%. Для станцій у внутрішньому морі $\bar{A} \approx 134.53^\circ \pm 4.71^\circ$, а відносне СКВ було близьким до 3.5%.

Залежність часу запізнювання від відстані. Із Табл. 1 і 2 видно, що Δt_a та Δt_o збільшувались при зростанні r . Ця залежність близька до лінійної. Кореляційні поля $\Delta t_a - r$ і $\Delta t_o - r$ дозволили побудувати такі регресії:

$$\Delta t_a \approx 0.8898r, R^2 \approx 0.9999, \sigma \approx 0.0031 \text{ год}, \quad (1)$$

$$\Delta t_o \approx 1.4513r, R^2 \approx 0.4776, \sigma \approx 0.9248 \text{ год}, \quad (2)$$

де Δt_a та Δt_o вимірюються в годинах, а r – в мегаметрах. R^2 – коефіцієнт достовірності апроксимації, σ – СКВ часу запізнювання. Для Δt_a коефіцієнт R^2 близький до граничного значення (1), а для $\Delta t_o \approx 0.4776$ є прийнятним. Із (1) та (2) випливає, що швидкість поширення цунамі

$$(d\Delta t_a / dr)^{-1} = v_{av} \approx 312.18 \text{ м/с}, \quad (3)$$

$$(d\Delta t_o / dr)^{-1} = v_{ov} \approx 191.40 \text{ м/с}. \quad (4)$$

Швидкість поширення атмосферних хвиль цунамі. Отримана із (3) швидкість $v_a \approx 312.18$ м/с дуже близька до середньої швидкості $\bar{v}_a \approx 312.22 \pm 0.13$ м/с та $\bar{v}_a \approx 312.16 \pm 0.12$ м/с, отриманих для станцій у відкритому океані та у внутрішньому морі. Таку швидкість мають атмосферні хвилі Лемба, для яких швидкість [1, 2]

$$v_L = \sqrt{\frac{\gamma k T}{M}}, \quad (5)$$

де $\gamma \approx 1.4$ – показник адіабати, k – стала Больцмана, T – середня температура повітря в тропосфері, M – середня маса молекули. Для $T \approx 230$ К, $M \approx 4.6 \cdot 10^{-26}$ кг маємо $v_L \approx 311$ м/с. Дійсно, $v_a \approx \bar{v}_a = v_L$. Це означає, що потужна атмосферна хвиля Лемба, якій властива відсутність загасання та дисперсії, поширюючись в повітрі

періодично тисне на водну поверхню, генеруючи цунамі. Дійсно, такі атмосферні хвилі цунамі були виявлені та описані й іншими авторами [12, 15, 16].

Швидкість поширення океанічних хвиль цунамі. Із (4) маємо $v_o \approx 191.40$ м/с. Ця швидкість близька до середньої швидкості у відкритому океані (203.80 ± 8.59 м/с) та в внутрішньому морі (180.14 ± 6.98 м/с). Значення $v_o \approx 191.40$ м/с є середнім між цими двома швидкостями. Різниця між $\bar{v}_o \approx 203.80 \pm 8.59$ м/с та $\bar{v}_0 \approx 180.14 \pm 6.98$ м/с пояснює, чому $R^2 \approx 0.4746$, тобто суттєво відрізняється від 1. Швидкість цунамі океанічного походження дається відомим співвідношенням для довгих хвиль гравітаційного походження [18]:

$$v_{ts} = \sqrt{gH}, \quad (6)$$

де $g \approx 9.8$ м/с² - прискорення вільного падіння, H - глибина водоймища. Для Тихого океану середня глибина $\bar{H} \approx 3984$ м. Тоді із (6) маємо $v_{ts} \approx 198$ м/с. Середня глибина Японського моря площею близько 1 млн км² складає 1753 м. При цьому $v_{ts} \approx 131$ м/с. Видно, що для цунамі у відкритому океані значення $v_o \approx 191.40$ м/с, $\bar{v}_o \approx 203.80 \pm 8.59$ м/с, $v_{ts} \approx 198$ м/с є дуже близькими. Для цунамі в внутрішньому морі $v_o \approx 180.14 \pm 6.98$ м/с дещо менше за $v_{ts} \approx 198$ м/с, оскільки частину шляху цунамі поширюється у Японському морі, де його швидкість зменшується в порівнянні з $v_{ts} \approx 198$ м/с. Швидкість v_o та $\bar{v}_o$ близькі до швидкостей, описаних у роботах [3-17].

Амплітуда та висота цунамі. Залежність амплітуди цунамі від відстані r досліджена авторами [17]. Вони встановили, що

$$A = 8.556r^{-0.8915}, \quad R^2 \approx 0.9048, \quad \sigma \approx 1.762 \text{ см},$$

де A – в см, а r – в Мм.

У цій роботі значення r змінюються несуттєво. Тому амплітуда та висота цунамі визначалася не значенням r , а конфігурацією дна та берегової лінії та змінювалася в широких межах (A_a від 2-14 до 48-60 см, A_o від 3-21 до 56-91 см).

Відношення h_a/A_a для атмосферних хвиль цунамі було близьким до 2.07 ± 0.32 для відкритого океана та до 2.44 ± 0.55 для внутрішнього моря. Для океанічної хвилі цунамі це відношення складало 1.98 ± 0.60 для відкритого океана та 2.08 ± 0.34 для внутрішнього моря.

ГОЛОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Статистичний аналіз характеристик цунамі на станціях, віддалених від вулкану Тонга на 8-9 Мм, показав наступне.

1. Статистичні характеристики для станцій, розташованих у відкритому океані та у внутрішньому морі, помітно відрізнялися.
2. Час запізнювання приходу хвилі лінійно збільшувався зі збільшенням відстані від вулкану до місця реєстрації.
3. Виявлено дві швидкості поширення цунамі. Перша із них була однаковою для станцій у відкритому океані та у внутрішньому морі та складала близько 312 м/с. При цьому цунамі генерувалися атмосферою хвилею Лемба. Друга швидкість для станцій у відкритому океані складала близько 203 м/с, а для станцій у внутрішньому морі - 180 м/с. Це цунамі було океанічного походження, згенероване безпосередньо підводним вибухом вулкану Тонга.
4. Спостережувані та обчислені значення швидкостей хвилі Лемба та океанічних хвиль добре узгоджуються між собою.
5. Значення амплітуди та висоти цунамі для різних станцій змінювалися у широких (від ~ 1 см до ~ 1 м) межах і визначалися не відстанню до вулкана, а топологією дна та береговою лінією у місці розташування станції.
6. Середнє відношення висоти до амплітуди цунамі складало для станцій, розміщених у відкритому океані 2.07 ± 0.32 та 1.98 ± 0.60 відповідно для атмосферної та океанічної хвиль цунамі. Для цих же хвиль і станцій, розміщених у внутрішньому морі, ці відношення складали 2.24 ± 0.55 і 2.08 ± 0.34 .

ФІНАНСУВАННЯ РОБОТИ

Робота Л. Ф. Черногора та М. Б. Шевелева частково підтримана фінансуванням держбюджетних НДР, заданих МОН України (номери держреєстрації 0124U000461 і 0124U000478).

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Chernogor L.F. Physical effects of the January 15, 2022, powerful Tonga volcano explosion in the Earth-atmosphere-ionosphere-magnetosphere system. Space: Science & Technology. 2023;29(2):54-77. <https://doi.org/10.15407/knit2023.02.054>

2. Chernogor LF. Physical effects from the powerful Tonga volcanic eruption of January 15, 2022, in the earth–atmosphere–ionosphere–magnetosphere system. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2023;253: 106157. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2023.106157>
3. 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):1-9. <https://doi.org/10.1029/2022GL098123>
4. Matoza R. S., Fee D., Assink J. D., Iezzi A. M., Green D. N., Kim K., Toney L., Lecocq T., Krishnamoorthy S., Lalande J. M., Nishida K., Gee K. L., Haney M. M., Ortiz H. D., Brissaud Q., Martire L., Rolland L., Vergados P., Nippres A., Park J., Shani-Kadmiel S., Witsil A., Arrowsmith S., Caudron C., Watada S., Perttu A. B., Taisne B., Mialle P., Le Pichon A., Vergoz J., Hupe P., Blom P. S., Waxler R., De Angelis S., Snively J. B., Ringler A. T., Anthony R. E., Jolly A. D., Kilgour G., Averbuch G., Ripepe M., Ichihara M., Arciniega-Ceballos A., Astafyeva E., Ceranna L., Cevuard S., Che I.-Y., De Negri R., Ebeling C. W., Evers L. G., Franco-Marin L. E., Gabrielson T. B., Hafner K., Harrison R. G., Komjathy A., Lacanna G., Lyons J., Macpherson K. A., Marchetti E., McKee K. F., Mellors R. J., Mendo-Pérez G., Mikesell T. D., Munaibari E., Oyola-Merced M., Park I., Pilger C., Ramos C., Ruiz M. C., Sabatini R., Schwaiger H. F., Tailpied D., Talmadge C., Vidot J., Webster J., Wilson D. C. (2022). Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga. *Science*.377(6601). P. 95—100. <https://doi.org/10.1126/science.abo7063>
5. Matoza R. S., Fee D., Assink J. D., Iezzi A. M., Green D. N., Kim K., Toney L., Lecocq T., Krishnamoorthy S., Lalande J. M., Nishida K., Gee K. L., Haney M. M., Ortiz H. D., Brissaud Q., Martire L., Rolland L., Vergados P., Nippres A., Park J., Shani-Kadmiel S., Witsil A., Arrowsmith S., Caudron C., Watada S., Perttu A. B., Taisne B., Mialle P., Le Pichon A., Vergoz J., Hupe P., Blom P. S., Waxler R., De Angelis S., Snively J. B., Ringler A. T., Anthony R. E., Jolly A. D., Kilgour G., Averbuch G., Ripepe M., Ichihara M., Arciniega-Ceballos A., Astafyeva E., Ceranna L., Cevuard S., Che I.-Y., De Negri R., Ebeling C. W., Evers L. G., Franco-Marin L. E., Gabrielson T. B., Hafner K., Harrison R. G., Komjathy A., Lacanna G., Lyons J., Macpherson K. A., Marchetti E., McKee K. F., Mellors R. J., Mendo-Pérez G., Mikesell T. D., Munaibari E., Oyola-Merced M., Park I., Pilger C., Ramos C., Ruiz M. C., Sabatini R., Schwaiger H. F., Tailpied D., Talmadge C., Vidot J., Webster J., Wilson D. C. (2022). Supplementary Materials for Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga. *Science*.377(6601). <https://doi.org/10.1126/science.abo7063>
6. Tarumi K, Yoshizawa K. Eruption sequence of the 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai explosion from back-projection of teleseismic P waves. *Earth and Planetary Science Letters*. 2023;602: 117966. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117966>
7. Pakoksung K, Suppasri A, Imamura F. The near-field tsunami generated by the 15 January 2022 eruption of the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano and its impact on Tongatapu, Tonga. *Scientific Reports*. 2022;12:15187. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19486-w>
8. 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 Letter*. 2022;9:24. <https://doi.org/10.1186/s40562-022-232-z>
9. 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>
10. Carvajal M, Sepúlveda I, Gubler A, Garreaud R. Worldwide signature of the 2022 Tonga volcanic tsunami. *Geophysical Research Letters*. 2022;49 (6):1-4. <https://doi.org/10.1029/2022GL098153>
11. Heidarzadeh M, Gusman AR, Ishibe T, Sabeti R, Šepić J. Estimating the eruption-induced water displacement source of the 15 January 2022 Tonga volcanic tsunami from tsunami spectra and numerical modelling. *Ocean Engineering*. 2022;261:112165. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112165>
12. 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/10.17/s024-022-03058-0>
13. Lynett P. The tsunamis generated by the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano on January 15, 2022. Preprint available at Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1377508/v1>
14. Lynett P, McCann M, Zhou Z, et al. Diverse tsunamigenesis triggered by the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption. *Nature*. 2022;609:728-733. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05170-6>
15. Kubota T, Saito T, Nishida K. Global fast-traveling tsunamis driven by atmospheric Lamb waves on the 2022 Tonga eruption. *Science*. 2022; 377(6601):91-94. <https://doi.org/10.1126/science.abo4364>
16. 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
17. Chernogor L, Luo Y. Statistical Analysis of Seismic and Tsunami Waves Generated by the 2022 Tonga Volcano's Eruption [Internet]. *A Comprehensive Study of Volcanic Phenomena [Working Title]*. IntechOpen; 2024. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.1006881>

18. Amores A, Monserrat S, Marcos M, Argüeso D, Villalonga J, Jordà G, et al. Numerical simulation of atmospheric Lamb waves generated by the 2022 Hunga-Tonga volcanic eruption. *Geophysical Research Letters*. 2022;49 (6):1-8. <https://doi.org/10.1029/2022GL098240>
19. Otsuka S. Visualizing Lamb waves from a volcanic eruption using meteorological satellite Himawari-8. *Geophysical Research Letters*. 2022;49 (8):1-9. <https://doi.org/10.1029/2022GL098324>
20. Chernogor LF, Shevelev MB. Statistical characteristics of explosive waves in the atmosphere generated by the Tonga supervolcano on January 15, 2022. *Space: Science & Technology*. 2024;30(1):66-79. <https://doi.org/10.15407/knit2024.01.066>
21. Shinbori A, Otsuka Y, Sori T, et al. New aspects of the upper atmospheric disturbances caused by the explosive eruption of the 2022 Hunga Tonga–Hunga Ha’apai volcano. *Earth, Planets and Space*. 2023;75:175. <https://doi.org/10.1186/s40623-023-01930-4>
22. Astafyeva E, Maletckii B, Mikesell TD, Munaibari E, Ravanelli M, Coisson P, et al. The 15 January 2022 Hunga Tonga eruption history as inferred from ionospheric observations. *Geophysical Research Letters*. 2022;49 (10):1-10. <https://doi.org/10.1029/2022GL098827>
23. Чорногор Л. Ф. Варіації повного електронного вмісту в іоносфері, викликані вибухом вулкану Тонга 15 січня 2022 року / Л. Ф. Чорногор // Космічна наука і технологія. 2023;29(3):67–87. <https://doi.org/10.15407/knit2023.03.067>
24. Chernogor L. F., Mylovanov Yu. B. Electron Density Reduction Caused by the Tonga Volcano Eruption on January 15, 2022 // *Kinemat. Phys. Celest. Bodies*. 2023;39(4):204–216. <https://doi.org/10.3103/S0884591323040037>
25. Чорногор Л.Ф., Милованов Ю.Б. Іоносферні збурення у ближній зоні, викликані експлозивним виверженням вулкана Тонга 15 січня 2022 р. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2023;28(3): 212—223. <https://doi.org/10.15407/rpra27.03.212>
26. Chernogor L. F., Holub M. Yu. Bay-Shaped Variations in the Geomagnetic Field that Accompanied the Catastrophic Explosion of the Tonga Volcano on January 15, 2022 // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2023;39(5):247–260. <https://doi.org/10.3103/S0884591323050033>
27. Чорногор Л. Ф. Глобальні варіації геомагнітного поля, викликані вибухом вулкану Тонга 15 січня 2022 р. / Л. Ф. Чорногор // Космічна наука і технологія. 2023; 29(4):78—105. <https://doi.org/10.15407/knit2023.04.006>

REFERENCES

1. Chernogor LF. Physical effects of the January 15, 2022, powerful Tonga volcano explosion in the Earth-atmosphere-ionosphere-magnetosphere system. *Space: Science & Technology*. 2023;29(2):54-77. <https://doi.org/10.15407/knit2023.02.054>
2. Chernogor LF. Physical effects from the powerful Tonga volcanic eruption of January 15, 2022, in the earth–atmosphere–ionosphere–magnetosphere system. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2023;253: 106157. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2023.106157>
3. 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):1-9. <https://doi.org/10.1029/2022GL098123>
4. Matoza R. S., Fee D., Assink J. D., Iezzi A. M., et al (2022). Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga. *Science*. 377(6601). P. 95—100. DOI:10.1126/science.abo7063
5. Matoza R. S., Fee D., Assink J. D., Iezzi A. M., et al (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
6. Tarumi K, Yoshizawa K. Eruption sequence of the 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai explosion from back-projection of teleseismic P waves. *Earth and Planetary Science Letters*. 2023;602: 117966. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117966>
7. Pakoksung K, Suppasri A, Imamura F. The near-field tsunami generated by the 15 January 2022 eruption of the Hunga Tonga-Hunga Ha’apai volcano and its impact on Tongatapu, Tonga. *Scientific Reports*. 2022;12:15187. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19486-w>
8. 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 Letter*. 2022;9:24. <https://doi.org/10.1186/s40562-022-232-z>
9. 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>

10. Carvajal M, Sepúlveda I, Gubler A, Garreaud R. Worldwide signature of the 2022 Tonga volcanic tsunami. *Geophysical Research Letters*. 2022;49 (6):1-4. <https://doi.org/10.1029/2022GL098153>
11. Heidarzadeh M, Gusman AR, Ishibe T, Sabeti R, Šepić J. Estimating the eruption-induced water displacement source of the 15 January 2022 Tonga volcanic tsunami from tsunami spectra and numerical modelling. *Ocean Engineering*. 2022;261:112165. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112165>
12. 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/10.17/s024-022-03058-0>
13. Lynett P. The tsunamis generated by the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano on January 15, 2022. Preprint available at Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1377508/v1>
14. Lynett P, McCann M, Zhou Z, et al. Diverse tsunamigenesis triggered by the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption. *Nature*. 2022;609:728-733. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05170-6>
15. Kubota T, Saito T, Nishida K. Global fast-traveling tsunamis driven by atmospheric Lamb waves on the 2022 Tonga eruption. *Science*. 2022; 377(6601):91-94. <https://doi.org/10.1126/science.abo4364>
16. 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
17. Chernogor L, Luo Y. Statistical Analysis of Seismic and Tsunami Waves Generated by the 2022 Tonga Volcano's Eruption [Internet]. A Comprehensive Study of Volcanic Phenomena [Working Title]. IntechOpen; 2024. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.1006881>
18. Amores A, Monserrat S, Marcos M, Argüeso D, Villalonga J, Jordà G, et al. Numerical simulation of atmospheric Lamb waves generated by the 2022 Hunga-Tonga volcanic eruption. *Geophysical Research Letters*. 2022;49 (6):1-8. <https://doi.org/10.1029/2022GL098240>
19. Otsuka S. Visualizing Lamb waves from a volcanic eruption using meteorological satellite Himawari-8. *Geophysical Research Letters*. 2022;49 (8):1-9. <https://doi.org/10.1029/2022GL098324>
20. Chernogor LF, Shevelev MB. Statistical characteristics of explosive waves in the atmosphere generated by the Tonga supervolcano on January 15, 2022. *Space: Science & Technology*. 2024;30(1):66-79. <https://doi.org/10.15407/knit2024.01.066>
21. Shinbori A, Otsuka Y, Sori T, et al. New aspects of the upper atmospheric disturbances caused by the explosive eruption of the 2022 Hunga Tonga–Hunga Ha'apai volcano. *Earth, Planets and Space*. 2023;75:175. <https://doi.org/10.1186/s40623-023-01930-4>
22. Astafyeva E, Maletckii B, Mikesell TD, Munaibari E, Ravanelli M, Coisson P, et al. The 15 January 2022 Hunga Tonga eruption history as inferred from ionospheric observations. *Geophysical Research Letters*. 2022;49 (10):1-10. <https://doi.org/10.1029/2022GL098827>
23. Chornogor, L. F. Ionospheric total electron content variations caused by the Tonga volcano explosion of January 15, 2022/ L. F. Chornogor. *Space Science and Technology*. 2023;29(3):67–87. [in Ukrainian]
24. Chernogor L. F., Mylovanov Yu. B. Electron Density Reduction Caused by the Tonga Volcano Eruption on January 15, 2022. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies* 2023;39(4):204–216. <https://doi.org/10.3103/S0884591323040037>
25. Chernogor, L.F., Mylovanov, Yu.B., 2023. Near-zone ionospheric disturbances caused by explosive eruption of Tonga volcano on 15 January 2022. *Radio Physics and Radio Astronomy*. 2023;28(3): 212—223.[in Ukrainian]
26. Chernogor L. F., Holub M. Yu. Bay-Shaped Variations in the Geomagnetic Field that Accompanied the Catastrophic Explosion of the Tonga Volcano on January 15, 2022. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2023;39(5):247–260. <https://doi.org/10.3103/S0884591323050033>
27. Chornogor, L. F. Global Variations in the Geomagnetic Field Caused by the explosion of the Tonga volcano on January 15, 2022/ L. F. Chornogor. *Space Science and Technology*. 2023; 29(4):78—105. [in Ukrainian].

Стаття надійшла до редакції: 21 жовтня 2024 р.

Рекомендовано до друку: 02 грудня 2024 р.

STATISTICAL CHARACTERISTICS OF VOLCANOGENIC TSUNAMI WAVES IN THE NORTHWESTERN PACIFIC REGION

L.F. Chernogor, M.B. Shevelev, R.M. Kovalov, D.R. Novytska

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

Relevance. The atmosphere and ionosphere serve as critical pathways for telecommunication systems, radionavigation, radar operations, remote radio sensing, and radio astronomy. The stability of these atmospheric and ionospheric channels is profoundly influenced by various high-energy natural and anthropogenic phenomena. Among these, volcanic activity stands out as a significant contributor.

The eruption of the Tonga volcano on January 15, 2022, caused notable disturbances across all subsystems of the Earth's lithosphere, oceans, atmosphere, ionosphere, and magnetosphere, thereby affecting the parameters of radio

communication channels. In particular, the eruption generated intense atmospheric waves and tsunami events. An in-depth study of these wave propagation phenomena is a pressing scientific challenge.

Objective The study aims to perform a statistical analysis of the characteristics of atmospheric and oceanic tsunami waves in the northwestern Pacific Ocean induced by the explosive eruption of the Tonga submarine volcano on January 15, 2022.

Methods. Statistical analysis of key parameters of tsunami waves of atmospheric and oceanic origin. Comparative evaluation of observational data with theoretical calculations.

Results. The analysis identified two groups of tsunami waves. The first group was of atmospheric origin, generated by the Lamb wave and propagating at a speed of about 312 m/s. This speed was consistent for stations located both in the open ocean and inland sea. The second group of tsunami waves was of oceanic origin, generated directly by the underwater explosion of the Tonga volcano and propagating at a speed of about 203 m/s for stations in the open ocean and about 180 m/s for stations in the inland sea. The height and amplitude of the tsunami varied widely (~1-100 cm) and were determined by the topology of the reservoir bottom and coastline, rather than the distance from the volcano. The ratio of tsunami height to amplitude averaged 2.07 ± 0.32 and 1.98 ± 0.60 for atmospheric and ocean waves, respectively, for stations located in the open ocean. For stations in the inland sea, these ratios were close to 2.24 ± 0.55 and 2.08 ± 0.34 , respectively.

Conclusions. The study presents the main statistical characteristics of atmospheric and oceanic tsunami waves in the Northwest Pacific Ocean generated by the explosion of the Tonga volcano on January 15, 2022.

KEY WORDS: *Tonga volcano, tsunami, statistical characteristics, lag time, tsunami speed, tsunami amplitude, tsunami height, calculation results.*

he article was received by the editors: October 21 2024

The article is recommended for printing: December 02 2024