

<https://doi.org/10.15407/knit2023.03.067>

УДК 551.5:539.104, 550.388

Л. Ф. ЧОРНОГОР, зав. кафедри, д-р фіз.-мат. наук, проф.

ORCID ID: 0000-0001-5777-2392

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

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

майдан Свободи 4, Харків, Україна, 61022

ВАРІАЦІЇ ПОВНОГО ЕЛЕКТРОННОГО ВМІСТУ В ІОНОСФЕРІ, ВИКЛИКАНІ ВИБУХОМ ВУЛКАНА ТОНГА 15 СІЧНЯ 2022 р.

Про здатність потужних вибухових вулканів впливати на стан іоносфери стало відомо принаймні ще у 1980-ті рр. Новий сплеск інтересу до вивчення ефектів у системі Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера спостерігався після вибуху вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай (коротко Тонга) 15 січня 2022 р. Цей вулкан по праву можна віднести до унікальних. Іоносферним ефектам вулкана Тонга присвячено низку робіт. З використанням часових варіацій повного електронного вмісту (ПЕВ) встановлено, що вибухів вулкана було п'ять. Найсильнішими із них були другий і третій вибухи, причому другий був найінтенсивнішим. Досліджено локальну та глобальну реакції іоносфери на вибух вулкана Тонга. Для цього використовувалися сигнали Глобальної навігаційної супутникової системи та вимірювання на борту супутника «Swarm». Біля місця вибуху вулкана збурення ПЕВ сягало 5...10 TECU. Крім локального ефекту, спостерігалися рухомі іоносферні збурення, викликані генерацією та поширенням акустико-гравітаційних хвиль зі швидкістю від 180 до 1050 м/с. Особливе місце займала хвиля Лемба, що рухалась зі швидкістю 315 м/с та поширювалася на глобальні відстані. У нічний час виявлено екваторіальні плазмові «міхури», які спостерігалися в Азійсько-Океанічному регіоні. При цьому на висотах 400...500 км концентрація електронів N зменшилася на 2-3 порядки. Розмір цих утворень за довготою перевищував 10 Мм, а їхня тривалість становила не менше 4...5 год. Мета роботи — подальший аналіз аперіодичних і квазіперіодичних збурень в іоносфері, викликаних вибухом вулкана Тонга 15 січня 2022 р., у широкому діапазоні відстаней (від 0.1 до 5 Мм) від джерела збурень. Для виявлення реакції іоносфери на вибух вулкана Тонга аналізувалися реєстрації сигналів Глобальної навігаційної супутникової системи. У результаті аналізу часових варіацій ПЕВ у контрольні дні та у день вибуху вулкана встановлено основні закономірності генерації збурень в іоносфері та визначено кількісні характеристики збурень. Виявлено чотири групи збурень, що мали різний час запізнювання відносно моменту вибуху вулкана. Важливо, що час запізнювання збурень збільшувався зі збільшення відстані від вулкана до місця реєстрації. Швидкість збурення у першій групі була близька до 1000 м/с, воно мало N -подібний профіль. Це збурення було згенероване вибуховою хвилею, швидкість якої залежала від надлишку тиску та априорі перевищувала швидкість звуку. Швидкість збурень у другій групі варіювала у межах 336...500 м/с, що властиво швидкості атмосферних гравітаційних хвиль. Швидкість збурень у третій групі перебувала у межах 260...318 м/с. Таку швидкість має хвиля Лемба. У четвертій групі швидкість збурень становила 190...220 м/с. Ця швидкість характерна для цунамі, яке було викликане безпосередньо вибухом вулкана. Період квазіперіодичних збурень змінювався від 10 до 20 хв, а їхня амплітуда — від 0.5 до 1 TECU. Доведено, що спостережувана іоносферна «діра» була згенерована саме вибухом вулкана. При цьому модулі абсолютної та відносної величин збурень мали тенденцію до спадання при збільшенні відстані від епіцентру вибуху (приблизно від 10 TECU до 2 TECU та від 37 % до 7 % відповідно). Час запізнювання появи «діри» та її тривалість, навпаки, збільшувалися зі збільшення відстані від вулкана до місця реєстрації (від 35 до 100 хв і

Цитування: Черногор Л. Ф. Варіації повного електронного вмісту в іоносфері, викликані вибухом вулкана Тонга 15 січня 2022 р. *Космічна наука і технологія*. 2023. 29, № 3 (142). С. 67—87. <https://doi.org/10.15407/knit2023.03.067>

© 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/>)

від 30...40 до 120...150 хв відповідно). Запропоновано механізм генерації іоносферної «діри». В його основі лежать як електричні, так і не електричні процеси (тріщинуватості, тертя частинок, конденсація водяних парів, коагуляція крапель води, прилипання електронів, гравітаційна сегрегація тощо). У результаті порушення глобального електричного кола, появи стороннього електричного струму, збільшення на порядки напруженості атмосферного та іоносферного електричного полів, опускання іоносферної плазми на менші висоти, де відбувається більш активний процес рекомбінації електронів, згенерована іоносферна «діра». Встановлено основні кількісні характеристики збурень. Їхні флуктуації пояснюються географічним положенням станцій, положенням підіоносферних точок по відношенню до екваторіальної іонізаційної аномалії, часом доби, рухом вечірнього сонячного термінатора тощо.

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

ВСТУП

Про здатність потужних вибухових вулканів впливати на стан іоносфери стало відомо принаймні ще у 1980-ті рр. [35, 45]. Було встановлено, що носієм збурень є інтенсивний інфразвук і атмосферні гравітаційні хвилі [11, 17, 19, 20, 35, 45]. Плідними були дослідження іоносферних збурень, що виникали вслід за вибухом вулкана Св. Олени 1980 р. [35, 45, 54]. Пізніше подібні дослідження були продовжені для низки інших потужних вулканів [10, 21, 22, 26, 27, 30, 40, 46, 51].

Новий сплеск інтересу до вивчення ефектів у системі Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера (ЗАІМ) спостерігався після вибуху вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай (коротко Тонга) 15 січня 2022 р. Цей вулкан по праву можна віднести до унікальних. Досить згадати, що максимальна висота викидів сягала 58 км. Навіть для вулкана Кракатау (1883 р.) вона не перевищувала 45...50 км [11, 54].

Встановлено, що вибухів вулкана Тонга в інтервалі часу 04:00—05:00 UT було п'ять. Найсильнішим був другий вибух приблизно о 04:15 UT (тут і надалі час всесвітній) [32, 38, 39]. Вибух призвів до землетрусу з магнітудою $M \approx 5.8$ [5, 32, 42]. Вибух викликав цунамі двох типів зі швидкостями 315 та 200 м/с [7, 28, 31, 36—39, 44, 52, 53]. Перше з них пов'язано з інтенсивною атмосферою хвилею Лемба, а друге — безпосередньо з підняттям товщі води під час підводного вибуху вулкана. Висота хвилі над кратером сягала 90 м [25]. Поблизу вулкана висота цунамі була близькою до 15 м. Біля Чилі вона не перевищувала 3 м, поблизу Перу — 2 м, біля Японії — 1.2 м, поблизу США (Каліфорнія, Аляска) — 1 м, а в Атлантичному океані та навіть у Середземному морі — 10...30 см [8, 30, 31, 44].

Вибух вулкана згенерував декілька типів хвиль у атмосфері: вибухову хвилю зі швидкістю $v \sim 1$ км/с, атмосферну гравітаційну хвилю з $v = 250...1000$ м/с [23, 38, 39], інфразвук з $v \approx 300$ м/с, потужну практично незагасаючу поверхневу хвилю Лемба з $v = 313...317$ м/с та звук [4, 6, 41, 56]. Хвиля Лемба обігнула Земню кулю п'ять разів і спостерігалася впродовж семи діб [6]. За рахунок нелінійних перетворень звук від вибуху вулкана було чутно на Алясці (відстань порядку 9 Мм) [38, 39]. Вибух вулкана спричинив збурення магнітного поля Землі [3, 48, 59]. Величина збурень сягала 14 нТл [48].

Теоретичному аналізу та комплексному моделюванню великої кількості фізичних ефектів у всіх підсистемах системи ЗАІМ присвячено роботи автора [12, 16, 17].

Тертя частинок викиду у вулканічному струмені та плюмі призвело до їхньої електризації, суттєвого збільшення об'ємної щільності електричного заряду та щільності електричного струму у атмосфері, збурення глобального електричного кола, інтенсифікації електричних розрядів. Частота блискавок сягала 20000 хв^{-1} [60]. Всього зафіксовано 400000 блискавок [60]. Електромагнітне випромінювання блискавок з частотою 10...100 кГц збурювало параметри нижньої іоносфери та поширювалося вздовж магнітних силових ліній до магнітосфери, викликаючи збурення у магнітосфері та радіаційному поясі, висипання високоенергійних електронів із радіаційного поясу [12, 16, 17]. Механізми дії електромагнітного випромінювання блискавок описано в роботі [29].

Зупинимося детальніше на описі іоносферних збурень, що спостерігалися різними методами.

Іоносферним ефектам вулкана Тонга присвячено низку робіт [1, 2, 5, 9, 18, 23, 24, 33, 34,

43, 47, 50, 55, 62]. У роботі [5] з використанням часових варіацій повного електронного вмісту (ПЕВ) встановлено, що вибухів вулкана було п'ять. Найсильнішими із них були другий і третій вибухи о 04:18:10 і 04:28:05 UT, причому другий був найбільш інтенсивним. За оцінками, за величиною збурення ПЕВ енергія вибуху становила 9...37 Мт ТНТ. Часові варіації ПЕВ, пов'язані з ударною хвилею, були складними, проте N -подібний профіль спостерігався чітко. Амплітуда відгуку на вибух мала екстраординарне значення: 5...8 TECU, або 21...44 %. У околі вулкана за значним (до 5 TECU) збільшенням ПЕВ мало місце його суттєве (до 13...18 TECU) зменшення, яке тривало 1.5...2 год. Утворилася так звана іоносферна «діра». Її виникнення у роботі [5] було пояснено фазою розрідження у вибуховій хвилі або фазою відновлення магнітної бурі, що спостерігалася 14 січня 2022 р.

У роботі [1] досліджено локальну та глобальну реакції іоносфери на вибух вулкана Тонга. Для цього використовувалися сигнали Глобальної навігаційної супутникової системи (ГНСС) та вимірювання на борту супутника «Swarm». Біля місця вибуху вулкана збурення ПЕВ сягало 5...10 TECU. Крім локального ефекту, спостерігалися рухомі іоносферні збурення (РІЗ), викликані генерацією та поширенням акустико-гравітаційних хвиль зі швидкістю від 180 до 1050 м/с. Особливе місце займала хвиля Лемба, що рухалась зі швидкістю 315 м/с та поширювалася на глобальні відстані. У нічний час виявлено екваторіальні плазмові «міхури», які спостерігалися в Азійсько-Океанічному регіоні. При цьому на висотах 400...500 км концентрація електронів N зменшилася на 2-3 порядки. Розмір цих утворень за довготою перевищував 10 Мм, а їхня тривалість становила не менш ніж 4...5 год.

У роботі [2] висловлено припущення, що аномалія з екваторіальними плазмовими «міхурами» викликана проявами акустико-гравітаційного резонансу та хвиль Лемба.

У роботі [55] з використанням 4735 приймачів сигналів ГНСС досліджувались РІЗ двох типів: великомасштабні (довжина хвилі $\lambda > 1600$ км, швидкість $v \approx 555$ м/с та 950 м/с, яка поступово зменшувалася до 390 та 600 м/с відповідно)

та середньомасштабні ($v = 200...400$ м/с). Перші демонстрували сильну спрямованість, а другі не мали переважного напрямку руху та були пов'язані з атмосферними гравітаційними хвилями (АГХ). Авторів роботи дуже вразило значення швидкості $v > 900$ м/с.

У роботі [9] з використанням сигналів китайської навігаційної системи Beidou проаналізовано часові варіації ПЕВ на відстанях до 12 Мм від місця вибуху вулкана. Встановлено, що ці варіації зі збільшенням відстані змінювалися немонотонно. Максимальне збурення ПЕВ сягало 20 TECU. Швидкість поширення збурень становила 335 м/с.

У роботі [62] для дослідження часових варіацій ПЕВ використовувались сигнали ГНСС, зареєстровані більш ніж 5000 приймачами. Було вивчено РІЗ, які огинали Земну кулю три рази впродовж 4 діб. Збурення мали швидкість 600...700 м/с, період 10...30 хв та горизонтальну довжину хвилі 500...1000 км. Хвилі проходили шість разів над США. Поблизу точки вибуху вулкана швидкість збурень сягала 1 км/с. Потім вона поступово зменшувалася від 700 до 450 м/с на відстані $r \approx 5$ Мм. Величина збурень була близька до 3 TECU. Їхня тривалість сягала декількох годин.

У роботі [34] встановлено, що коли хвиля Лемба дійшла до Австралії та Нової Зеландії, миттєво з'явилося збурення ПЕВ над Японією, тобто у магнітоспряженій області. Швидкість поширення збурення магнітної силової трубки становила близько 300 км/с.

У роботі [34], як і в роботі [62], стверджується, що енергія хвилі Лемба через акустичний і гравітаційний резонанси (тобто на частотах акустичного обрізання та Брента — Вайсяля) просочується в термосферу та іоносферу, викликаючи РІЗ.

У дослідженні [2] з використанням сигналів ГНСС та іонозонду було встановлено, що, поперше, у денний час гребінь екваторіальної іонізаційної аномалії з південного боку стиснувся більш ніж на 10 TECU. З північного боку ефект був дещо меншим. Розмір у екваторіальному напрямку становив близько 10° , або 1.1 Мм. При цьому від 14:00 до 17:00 UT сформувався єдиний надлишок концентрації електронів поблизу гео-

магнітного екватора. Висота максимуму іонізації $h_m F_2$ шару F_2 зменшувалася від 500 до 260 км. По-друге, подібне стискання гребенів екваторіальної іонізаційної аномалії спостерігалось і в нічний час. Мали місце значні коливання горизонтального вітру, включаючи спрямований на захід вітер. На іонограмах реєструвався частотний F -спред. По-третє, у денний час стискання гребенів екваторіальної іонізаційної аномалії супроводжувалося квазіперіодичними варіаціями термосферного, і в першу чергу зонального вітру з амплітудою, близькою до 200 м/с. Збурення зонального вітру призвели до збурення спрямованого на схід зонального електричного поля на висотах динамо-області атмосфери, що викликало сильний спрямований донизу дрейф плазми та стискання екваторіальної іонізаційної аномалії.

Роботу [33] присвячено опису електродинамічних процесів у екваторіальній іоносфері. Було проаналізовано дані багатьох інструментальних вимірювань за допомогою супутника «Swarm» і наземних магнітометрів і встановлено, що вибух вулкана Тонга призвів до значного збурення екваторіального електроструменя та генерації електроструменя з протилежною спрямованістю. Причиною слугувало сильне збурення спрямованого на схід зонального вітру, викликаного великомасштабними атмосферними збуреннями внаслідок вибуху вулкана.

У роботі [47] описано іоносферні збурення над Японією (відстань від місця розташування вулкана та пунктом спостереження $r \approx 7800$ км), які спостерігалися після вибуху вулкана Тонга. Для аналізу використано дані ГНСС (всього 200 станцій). Виявлено два типи РІЗ. Перший тип спостерігався за 3 год після вибуху, мав швидкість $v \approx 640$ м/с, довжину хвилі $\lambda \approx 400$ км, амплітуду збурення ПЕВ $\Delta N_{va} \approx 0.5$ TECU. Другий тип РІЗ реєструвався за 7 год після вибуху. Для нього $v \approx 310$ м/с, $\lambda \approx 800$ км, $\Delta N_{va} \approx 1$ TECU. У роботі [47] також визначено напрямок переміщення РІЗ.

У роботі [50] аналізувались дані багатоінструментальних вимірювань, виконаних за допомогою 7200 станцій ГНСС, восьми супутників з інфрачервоними давачами та радара «Super-

DARN», розміщеного на о. Хоккайдо. Радар вимірював швидкість дрейфу іоносферної плазми. Головну увагу приділено поясненню механізму виникнення РІЗ у магнітоспряженій області. Амплітуда РІЗ у південній півкулі становила 0.5...1.1 TECU. Механізм переносу збурень із південної півкулі у північну такий. Вибухова хвиля від вулкана, досягнувши E -області іоносфери, у динамо-області згенерувала збурення ПЕВ та електричного поля. Останнє з альвенівською швидкістю перемістилося у магнітоспряжену область над Японією. Виникли квазіперіодичні збурення електричного поля та потоку плазми. За даними радара амплітуда швидкості потоку плазми сягала 100...110 м/с, а період — 36...38 хв. Тоді амплітуда електричного поля становила 2.8...3.1 мВ/м. У незбурених умовах амплітуда цього поля зазвичай на порядок менша. Квазіперіодичні варіації потоку плазми спостерігалися як РІЗ. Важливо, що РІЗ реєструвалися о 07:30, тобто за 3 год 15 хв після вибуху вулкана.

Мета роботи — подальший аналіз аперіодичних і квазіперіодичних збурень в іоносфері, викликаних вибухом вулкана Тонга 15 січня 2022 р., у широкому діапазоні відстаней (від 0.1 до 5 Мм) від джерела збурень.

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ВУЛКАН ТОНГА

Вулкан Тонга лежить у південній частині Тихого океану, у Полінезії (20°54' пд. ш., 175°38' зх. д.) [57]. Розміри кальдери приблизно 2 × 5 км. Кратер вулкана лежить на глибині приблизно 200 м [31].

Вулкан — вибуховий. 15 січня 2022 р. вибухи продовжувалися приблизно від 04:03 до 08:31 UT. Вулкан був активним впродовж 12 ± 2 год [60]. Протягом цього часу в атмосферу було викинуто продуктів масою 2.9 Гт і об'ємом близько 1.9 км³. Для порівняння вкажемо, що всі вулкани світу щорічно викидають близько 3 Гт продуктів, або в середньому 100 т/с. Продуктивність вулкана Тонга становила 67 кт/с, або $4.5 \cdot 10^4$ м³/с. Теплова енергія вулкана сягала $3.9 \cdot 10^{18}$ Дж, а відповідна середня потужність — $9.1 \cdot 10^{13}$ Вт [12, 16, 17]. За даними різних дослідників, енергія вибуху лежала у межах від 4...18 до 275...330 Мт ТНТ та навіть до 478 ± 191 Мт ТНТ [10, 11, 32, 58]. За

нашими оцінками ця енергія не перевищувала 16...18 Мт ТНТ [12, 16, 17].

Вулканічний струмінь з початковим діаметром в десятки метрів із початковою швидкістю в сотні метрів за секунду піднявся на висоту до 2 км [12, 16, 17]. За рахунок конвекції гарячі продукти вибуху (так званий плюм) здатні були піднятися на рекордну висоту в 50...58 км [10, 60]. Середня швидкість підйому становила близько 33 м/с. Продукти викиду поширювалися у західному напрямку на відстань до 15 Мм при ширині $l \sim 3$ Мм з середньою швидкістю близько 20 м/с [12, 16, 17].

Індекс вулканічної вибуховості VEI сягав 5.8, магнітуда вулкана — 5.5, а інтенсивність — 10.8. Для більш потужного вулкана Кракатау VEI дорівнював 6, магнітуда не перевищувала 6.5, інтенсивність — 11.7 [12, 16, 17].

СТАН КОСМІЧНОЇ ПОГОДИ

Для коректного аналізу збурень у іоносфері, викликаних вибухом вулкана Тонга, попередньо потрібно вивчити стан космічної погоди у день вибуху, перед ним, та після нього. Будемо виходити з того, що можливі ефекти вибуху вулкана продовжувалися до чотирьох діб.

Спочатку проаналізуємо часові варіації параметрів сонячного вітру за 12...18 січня 2022 р. (рис. 1). 12 та 13 січня 2022 р. концентрація частинок n_{sw} флукувала у межах $(2...8) \cdot 10^6$ м⁻³. 14 січня 2022 р. впродовж доби величина n_{sw} немонотонно збільшувалася від $4 \cdot 10^6$ до $16.7 \cdot 10^6$ м⁻³. Приблизно з 22:00 14 січня 2022 р. концентрація немонотонно зменшувалася від $16.7 \cdot 10^6$ до $5 \cdot 10^6$ м⁻³ наприкінці доби 15 січня 2022 р. Від 16 до 18 січня 2022 р. величина n_{sw} флукувала в межах $(2...5) \cdot 10^6$ м⁻³.

Швидкість частинок V_{sw} від 12 січня до кінця доби 14 січня 2022 р. була майже незмінною, слабо флукувала біля значення 350...400 км/с. Від кінця доби 14 січня та до кінця доби 18 січня 2022 р. спостерігалася тенденція до збільшення V_{sw} від 400 до 600 км/с. Максимальне значення $V_{sw} \approx 623$ км/с мало місце 16 січня 2022 р.

12...14 січня 2022 р. температура частинок T_{sw} варіювала у межах $(0.1...1.8) \cdot 10^5$ К. Наприкінці доби 14 січня 2022 р. величина T_{sw} різко збіль-

шилася до $3 \cdot 10^5$ К. Найбільший сплеск температури до $4.1 \cdot 10^5$ К спостерігався поблизу 18:00 15 січня 2022 р. Два менших сплески мали місце на межі 16...17 січня та на початку доби 18 січня 2022 р.

Тиск p_{sw} 12...13 січня 2022 р. флукував у межах 0.5...2 нПа. 14 січня 2022 р. він немонотонно збільшувався від 0.8 до 4.6 нПа. 15 січня 2022 р. тиск варіював у межах 2.5...4.6 нПа. 16...18 січня 2022 р. він коливався від 1 до 3 нПа.

Викиди енергії у магнітосферу Землі, що описуються функцією Акасофу ϵ_A , різко збільшувалися приблизно від 1 до 34.5 ГДж/с наприкінці доби 14 січня 2022 р. та від 1 до 23 ГДж/с наприкінці доби 15 січня 2022 р.

12 та 13 січня 2022 р. B_z -компонент міжпланетного магнітного поля флукував у межах від -4 до +6 нТл. 14 січня 2022 р. B_z -компонент приймав переважно додатні значення. Приблизно від 12:00 до 24:00 14 січня 2022 р. значення B_z стало від'ємним та досягло свого мінімуму приблизно о 21:00. На Землі настала магнітна буря. Значення K_p -індексу виросло від 0 до 5.7, що спостерігалось приблизно наприкінці доби 14 січня 2022 р. 15 січня 2022 р. цей індекс спочатку зменшувався від 4 до 2, а потім збільшувався до 4.7. Два інші сплески K_p -індексу до 4 і 5 спостерігалися у другій половині доби 16 січня та на початку доби 18 січня 2022 р. відповідно.

Індекс D_{st} слабо флукував у межах ± 8 нТл 12 та 13 січня 2022 р. Усередині доби 14 січня 2022 р. він збільшився до 14 нТл. Настав раптовий початок магнітної бурі, головна фаза якої з $D_{stmin} \approx -91$ нТл продовжувалася приблизно від 15:00 до 22:00 14 січня 2022 р. До 05:00 15 січня 2022 р. тривала фаза відновлення, але від 05:00 і до 11:00 15 січня 2022 р. настала суббуря з $D_{stmin} \approx -55$ нТл. Чергова суббуря ($D_{stmin} \approx -50$ нТл) спостерігалася на початку доби 16 січня 2022 р.

Таким чином, виявлення іоносферних ефектів вибуху вулкана Тонга було ускладнене ефектами іоносферної бурі, що супроводжувала магнітну бурю та суббурі.

Додамо, що за класифікацією NOAA (США) ця буря належала до рівня G2 (помірна буря). За нашими оцінками, її енергія становила 4.2 ПДж, а потужність — 190 ГВт.

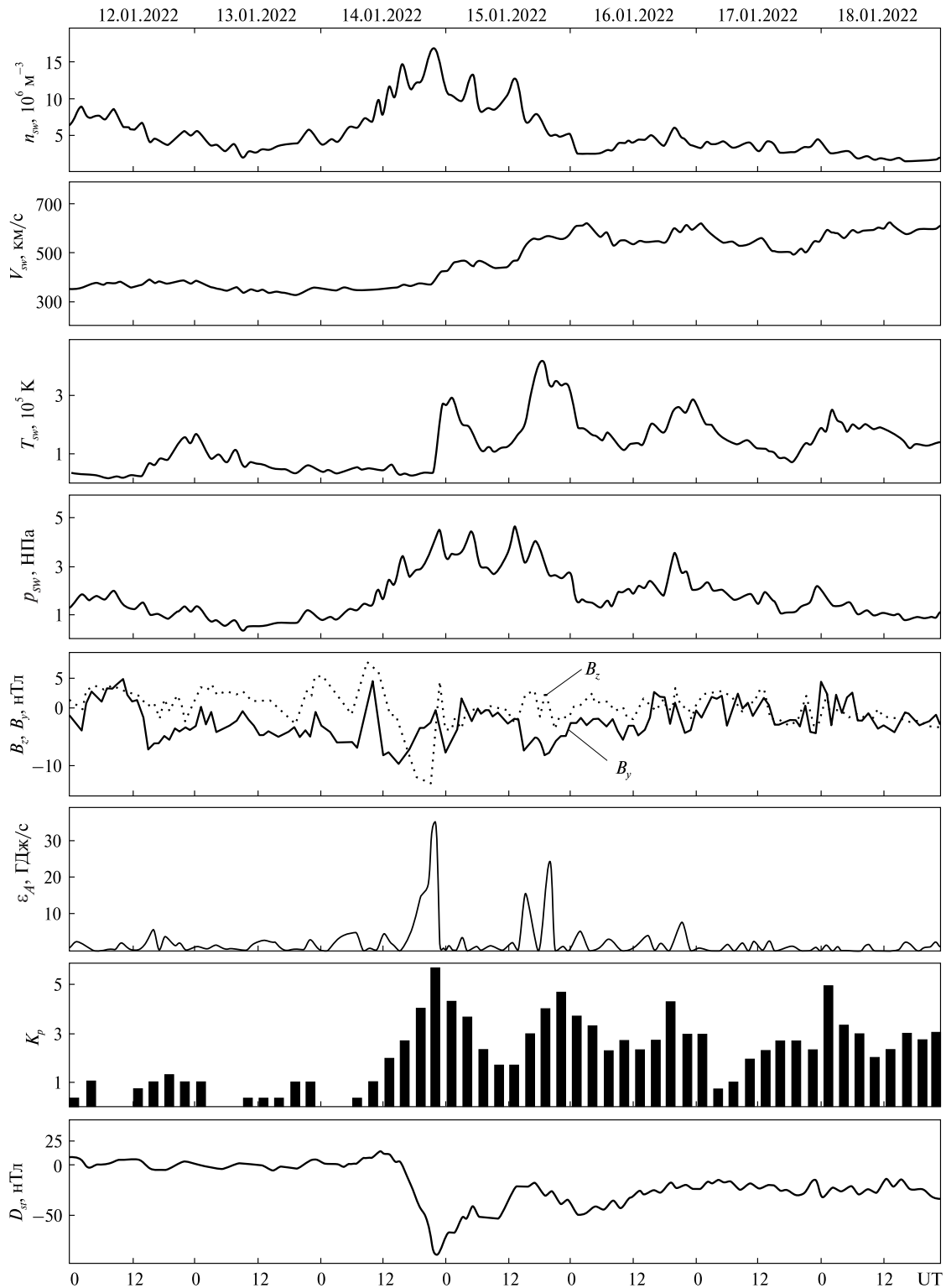


Рис. 1. Часові варіації параметрів сонячного вітру: вимірної концентрації частинок n_{sw} , температури T_{sw} , радіальної швидкості V_{sw} та розрахованого динамічного тиску p_{sw} , вимірних складових B_z і B_y міжпланетного магнітного поля; розрахованих значень енергії ϵ_A , що передається сонячним вітром магнітосфері Землі за одиницю часу; K_p -індекса та D_{st} -індекса (за даними сайту <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>) у період 12 січня — 18 січня 2022 р.

ЗАСОБИ ТА МЕТОДИ

Для виявлення реакції іоносфери на вибух вулкана Тонга аналізувалися реєстрації сигналів ГНСС. У табл. 1 наведено перелік станцій спостережень, що перебували на відстані від 0.7 до 5 Мм від вулкана. Контурну мапу з дислокацією використаних станцій спостережень показано на рис. 2.

Реєстрація сигналів супутників здійснювалася двочастотним радіоприймачем. Затримка сигналів пов'язана з псевдодальностями. Вихідні дані про сигнали та параметри орбіт представлено на сайті [<https://cddis.nasa.gov/DataandDerivedProducts/GNSS>]. За псевдодальностями оцінювався час проходження сигналу від супутника до радіоприймача, внесок іоносфери в затримку сигналу та ПЕВ у вертикальному стовпі N_V . Похибка вимірювання псевдодальностей призводить до

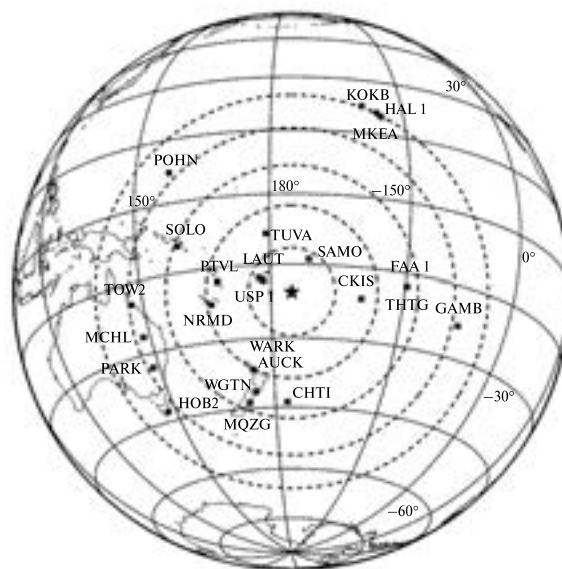


Рис. 2. Контурна мапа розподілу станцій спостереження

Таблиця 1. Список використаних станцій з координатами та країнами власності (r_{st} — відстань від вулкана до станції)

№	Станція	Широта	Довгота	Розміщення	r_{st} , КМ
1	USP1	-18°02'	+178°27'	Fiji	705
2	LAUT	-17°30'	+177°27'	Lautoka, Fiji	826
3	SAMO	-13°44'	-172°13'	Samoa	846
4	TUVA	-08°28'	+179°12'	Tuvalu	1458
5	CKIS	-21°04'	-159°48'	Cook Islands, New Zealand	1624
6	PTVL	-17°38'	+168°19'	Port-Vila, Республіка Вануату	1744
7	NRMD	-22°05'	+166°29'	Nouvelle-Calédonie, France	1888
8	WARK	-36°15'	+174°40'	Warkworth, New Zealand	1994
9	AUCK	-36°42'	+174°83'	Auckland, New Zealand	2004
10	WGTN	-41°08'	+174°48'	Wellington, New Zealand	2465
11	CHTI	-43°44'	-176°37'	Chatham, New Zealand	2574
12	FAA1	-17°33'	-149°36'	Faaa, Tahiti, France	2733
13	THTG	-17°28'	-149°36'	Papeete, Tahiti, France	2734
14	MQZG	-43°42'	+172°39'	Christchurch, New Zealand	2800
15	SOLO	-09°26'	+159°57'	Guadalcanal, Solomon Islands	2918
16	MCHL	-26°21'	+148°08'	Mitchell, Australia	3772
17	PARK	-33°00'	+148°15'	Telescope, Australia	3850
18	TOW2	-19°15'	+146°49'	Townsville, Australia	3953
19	GAMB	-23°00'	-135°00'	Gambier, France	4180
20	POHN	-06°57'	+158°12'	Pohnpei, FSM	4196
21	HOB2	-42°48'	+147°26'	Hobart, Tasmania, Australia	4253
22	MKEA	+19°08'	-155°21'	Mauna-Kea, Hawaii, USA	4969
23	HAL1	+20°42'	-156°15'	Halaula, Hawaii, USA	5017
24	KOKB	+22°07'	-159°39'	Kokee Park, Hawaii, США	5021

похибки оцінки ПЕВ порядку 0.01 TECU. Найбільшу похибку вносить неідентичність каналів у двочастотних радіоприймачах. Сумарна похибка оцінки ПЕВ становить 0.1 TECU.

РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ

Часові варіації ПЕВ для 12, 13, 15, 16, 17 і 18 січня 2022 р. для різних станцій і супутників показано на рис. 3—5. Можна бачити, що у контрольні дні варіації ПЕВ більш-менш монотонні. У день вибуху ця монотонність суттєво порушена. Спостерігалися три типи збурень часових варіацій ПЕВ.

По-перше, після вибуху, як правило, мало місце збільшення ПЕВ від 2 до 8 TECU тривалістю 15...60 хв (фаза стискання), яке змінювалося зменшенням ПЕВ на 2...5 TECU тривалістю 15...60 хв (фаза розрідження). Таке двополярне утворення нагадує літеру N [5]. Саме такі варіації властиві вибуховим процесам.

По-друге, з часом запізнювання $\tau \approx 35...100$ хв спостерігалось зменшення ПЕВ ΔN_V на 2...10 TECU тривалістю 30...150 хв. Відносне зменшення $\delta_V = \Delta N_V / N_{V0}$ (де N_{V0} — очікуване значення ПЕВ за умови відсутності збурення, викликаного вибухом вулкана) змінювалося в межах $-7...-37$ % (табл. 2). Подібне утворення отримало назву іоносферної «діри» [5].

По-третє, крім аперіодичних збурень ПЕВ, мали місце його квазіперіодичні (хвильові) збурення. Частіше всього спостерігалися збурення з періодом $T = 10...20$ хв та амплітудою $\Delta N_{Va} = 0.5...1$ TECU. Відносна амплітуда $\delta_{Va} = \Delta N_{Va} / N_V = 1...3$ %.

Три типи збурень мали різні часи запізнювання Δt по відношенню до моменту вибуху вулкана та відповідно різні позірні швидкості поширення v у горизонтальному напрямку (табл. 3). Із табл. 3 видно, що мали місце три групи часу запізнювання та три групи позірної швидкості.

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

Станція	Супутник	$r(\tau)$, км	ΔN_V , TECU	N_{V0} , TECU	δ_V , %	ΔT , хв	τ , хв	T , хв	ΔN_{Va} , TECU
LAUT	G18	753	-9	30	-30	100	75	10, 20	1...1.5
TONG	G10	684	-6	22	-27	30	50	3...4	0.5...0.7
SAMO	G24	947	-10	27	-37	130	35	—	—
TUVA	G18	1417	-5	30	-17	40	75	—	—
FAA1	G10	1700	-3	22	-14	60	45	15	1
USP1	G32	1258	-4	28	-14	60	45	—	—
CKIS	G23	1616	-4	22	-18	100	70	—	—
PTVL	G18	1538	-5	27	-19	90	45	—	—
NRMD	G18	1667	-5	27	-19	120	45	10	0.5
AUCK	G32	1978	-4	20	-20	120	45	15	0.5...0.7
WGTV	G24	2439	-3	18	-17	120	95	15	0.5...0.7
WARK	G10	2325	-3	18	-17	150	50	15	0.5...0.8
SOLO	G18	2609	-4	40	-10	90	65	15	0.5...1
CHTI	G10	2744	-3	19	-16	100	65	10	0.5
MQZG	G10	2960	-3	18	-17	150	75	15	0.5
PARK	G10	3796	-3	18	-17	100	100	12	0.5
MCHL	G10	3677	-3	22	-14	120	100	12	0.5...0.7
GAMB	G24	4284	-2	27	-7	100	100	10	0.5
POHN	G31	4443	-4	45	-9	100	100	—	—
NOB2	G27	4504	-2	14	-14	75	90	15	0.1
MKEA	G31	—	-2	16	-12.5	—	—	—	—
KOKB	G18	—	-2	16	-12.5	—	—	—	—

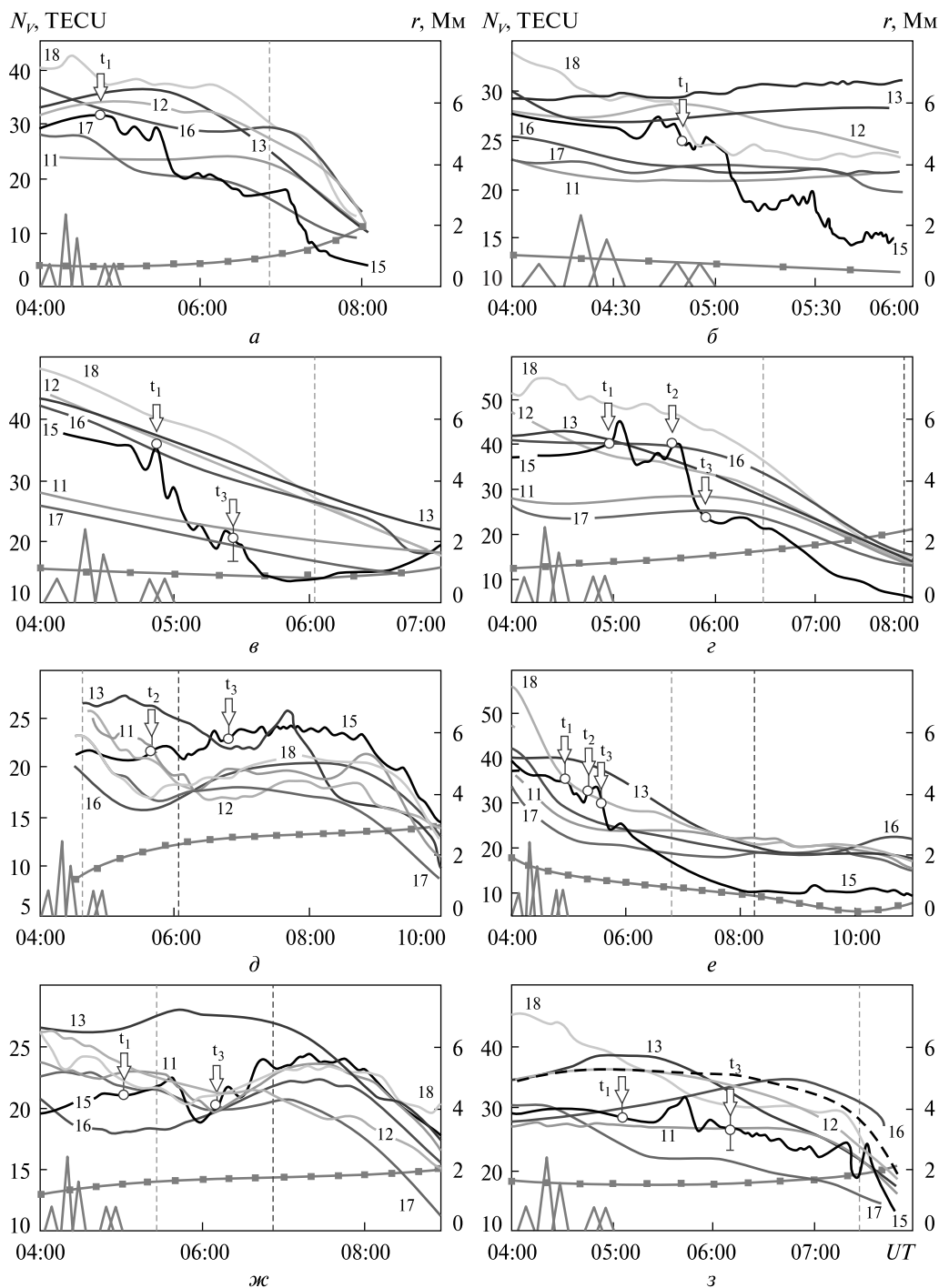


Рис. 3. Часові варіації ПЕВ: *a* – станція LAUT, супутник G18; *б* – станція TONG, супутник G10; *в* – станція SAMO, супутник G24; *г* – станція TUVА, супутник G18; *д* – станція FAA1, супутник G10; *е* – станція USP1, супутник G32; *ж* – станція СКIS, супутник G23; *з* – станція PTVL, супутник G18. Номер кривої відповідає номеру дня. Моменти заходу Сонця відзначено вертикальними лініями: ліворуч – на поверхні Землі, праворуч – на висоті 350 км. Моменти вибуху позначено трикутниками. Лінія з точками – відстань від вулкана до іоносферної точки. Стрілки з t_1 , t_2 і t_3 – моменти можливої реакції на вибух

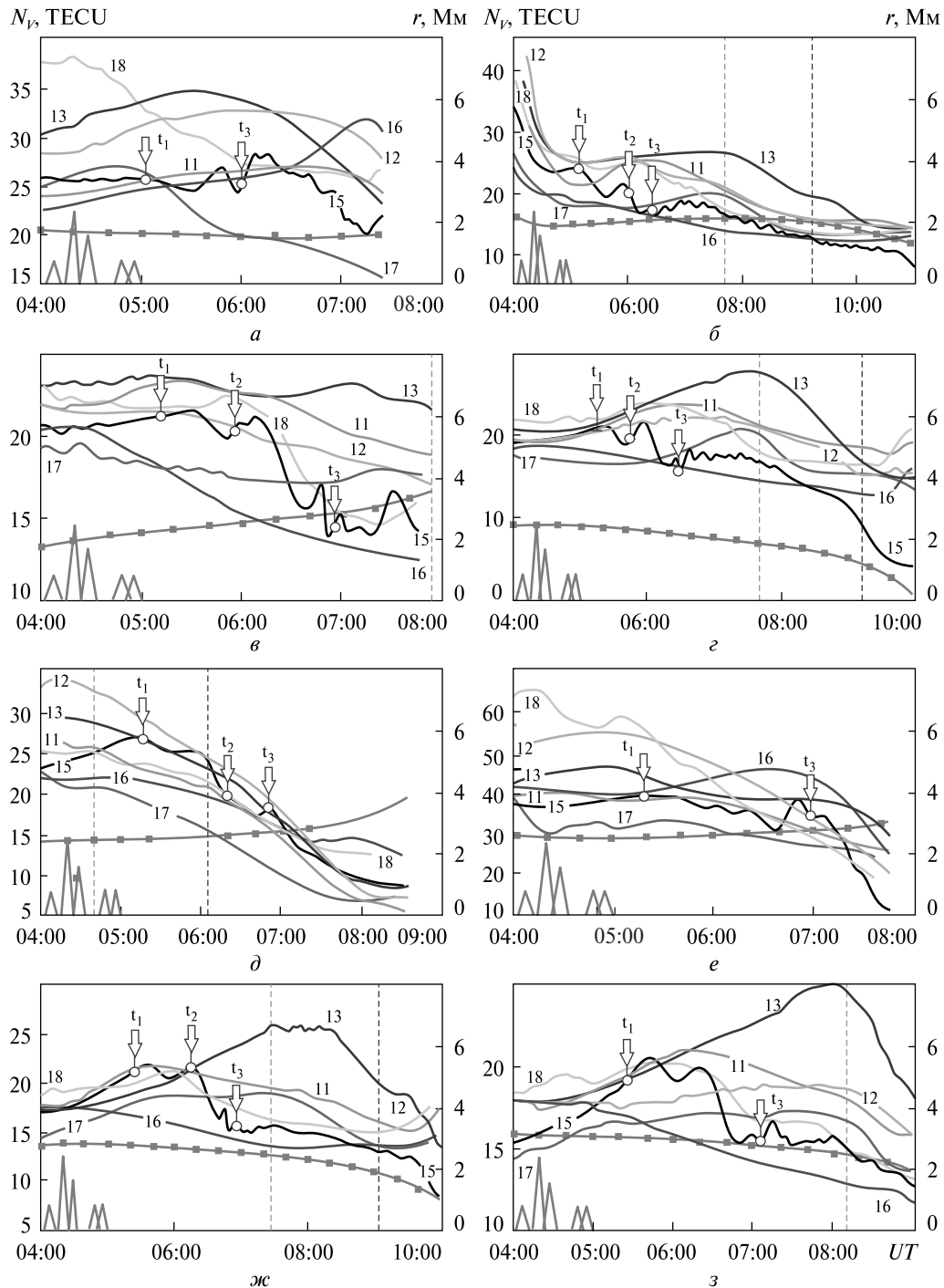


Рис. 4. Часові варіації ПЕВ: *a* – станція NRMD, супутник G18; *б* – станція AUCK, супутник G32; *в* – станція WGTN, супутник G24; *г* – станція WARK, супутник G10; *д* – станція THTG, супутник G18; *е* – станція SOLO, супутник G18; *ж* – станція СНТІ, супутник G10; *з* – станція MQZG, супутник G10. Номер кривої відповідає номеру дня. Моменти заходу Сонця відзначено вертикальними лініями: ліворуч – на поверхні Землі, праворуч – на висоті 350 км. Моменти вибуху позначено трикутниками. Лінія з точками – відстань від вулкана до іоносферної точки. Стрілки з t_1 , t_2 і t_3 – моменти можливої реакції на вибух

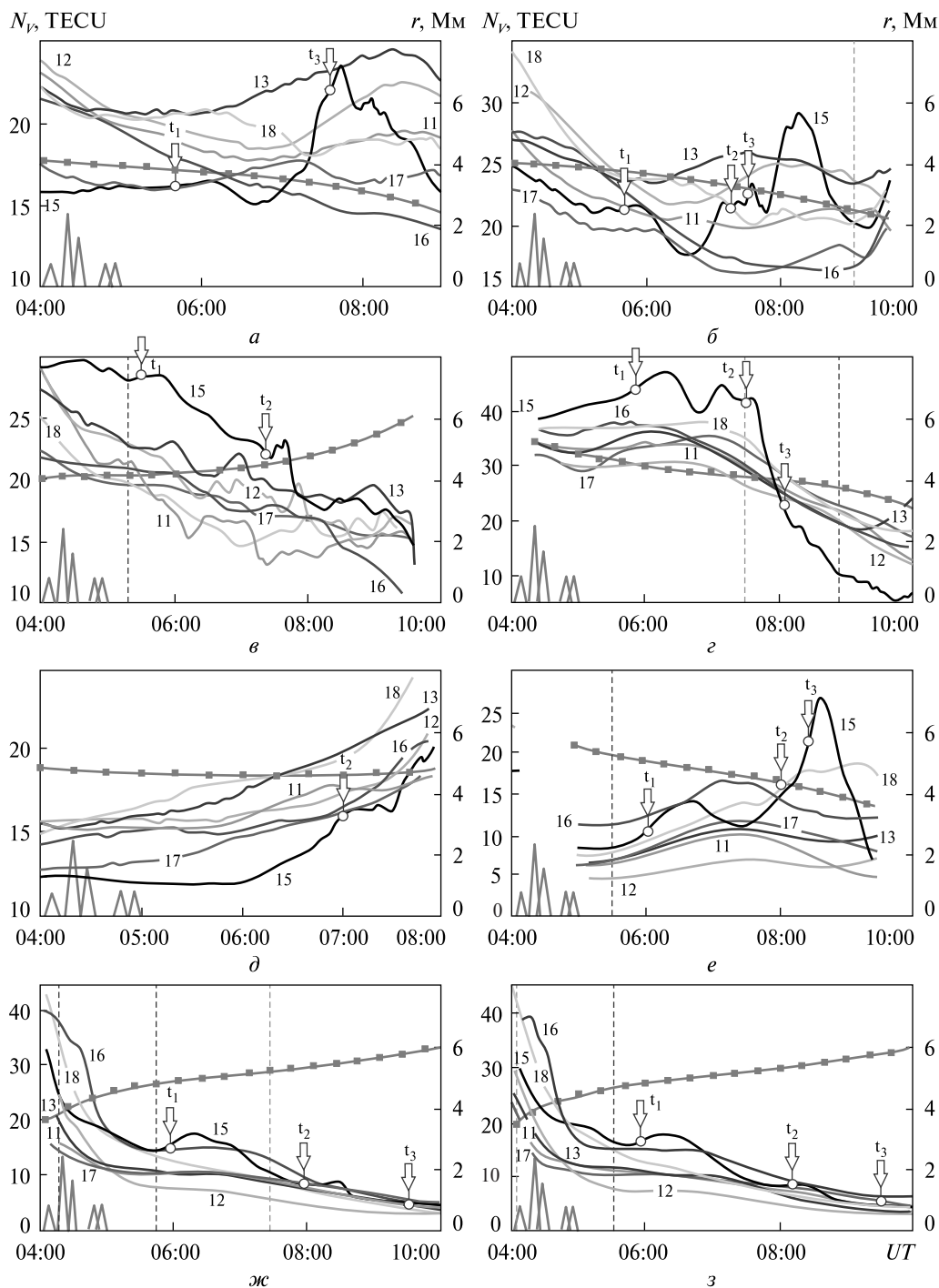


Рис. 5. Часові варіації ПЕВ: *a* — станція PARK, супутник G10; *б* — станція MCHL, супутник G10; *в* — станція GAMB, супутник G24; *г* — станція POHN, супутник G31; *д* — станція NOV2, супутник G27; *е* — станція MKEA, супутник G31; *ж* — станція KOKV, супутник G18; *з* — станція HAL1, супутник G18. Номер кривої відповідає номеру дня. Моменти заходу Сонця відзначено вертикальними лініями: ліворуч — на поверхні Землі, праворуч — на висоті 350 км. Моменти вибуху позначено трикутниками. Лінія з точками — відстань від вулкана до іоносферної точки. Стрілки з t_1 , t_2 і t_3 — моменти можливої реакції на вибух

Скоригована позірна швидкість обчислювалася за такою простою формулою:

$$v' = \frac{r_1}{\Delta t - \Delta t_0},$$

де r_1 — відстань між епіцентром вибуху та місцем появи збурення, Δt_0 — час поширення збурення від поверхні землі до висоти іоносферного шару, що давав найбільший внесок у ПЕВ ($z \approx 300$ км).

Для першої групи $v_1' \approx 1000$ м/с, для другої групи $v_2' = 336...500$ м/с, а для третьої — $v_3' = 260...318$ м/с. Крім цих трьох груп, на низці реєстрацій спостерігалася четверта група збурень, якій відповідала швидкість 190...220 м/с.

Узагальнені дані про основні параметри іоносферної «діри» та квазіперіодичних збурень наведено в табл. 2, а часи запізнювання та позірні швидкості — в табл. 3.

Далі розглянемо результати статистичного аналізу. За даними табл. 2 побудовано залежності « $\Delta N_V - r$ », « $\delta_V - r$ », « $\Delta T - r$ », « $\tau - r$ », « $T - r$ » і « $\Delta N_{Va} - r$ » (рис. 6).

Із рис. 6, а та б можна бачити, що мала місце тенденція до зменшення абсолютних значень збурень $|\Delta N_V|$ і $|\delta_V|$ зі збільшенням відстані r від вулкана до місця вимірювання. Водночас тривалість і час запізнювання появи збурення, навпаки, збільшувалися зі збільшенням відстані r (рис. 6, в та г). При цьому амплітуда квазіперіодичних збурень зменшувалася (рис. 6, е). Все це свідчить про те, що іоносферна «діра» була створена саме вибухом вулкана.

Період коливач флукутував у межах 10...15 хв (рис. 6, д).

Дані спостережень апроксимувалися відповідними лінійними залежностями:

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
1	LAUT	G18	701	20	805						
2	TONG	G10	778	25	651						
3	SAMO	G24	958	26	772				874	60	268
4	TUVA	G18	1282	32	781	1417	70	359	1492	90	289
5	FAA1	G10				2134	75	500	2526	143	302
6	USP1	G32	1301	32	822	1183	56	398	1129	70	294
7	CKIS	G23	1519	36	807				1704	105	283
8	PTVL	G18	1538	40	744				1565	105	260
9	NRMD	G18	1671	38	835				1598	95	297
10	AUCK	G32	1983	43	866	2084	95	382	2120	120	306
11	WGTM	G24	2231	46	906	2441	90	474	2753	150	313
12	WARK	G10	2306	49	877	2231	80	500	2103	124	295
13	TNTG	G18	2542	51	919	2612	115	395	2680	145	317
14	SOLO	G18	2600	53	910				2806	153	314
15	CHTI	G10	2745	60	841	2664	110	424	2568	150	297
16	MQZG	G10	2980	60	914				2710	160	293
17	PARK	G10	3867	75	925				3314	190	301
18	MCHL	G10	3759	75	899	3299	170	336	3208	186	298
19	GAMB	G24	4137	65	1147	4480	176	433			
20	POHN	G31	4489	86	929	4113	185	381	3997	220	311
21	HOV2	G27				4519	155	502			
22	MKEA	G31	5040	96	928	4406	215	352	4208	240	301
23	KOKB	G18	4765	90	929	5253	210	425	5761	305	318
24	HAL1	G18	4761	90	928	5317	225	401	5751	305	318

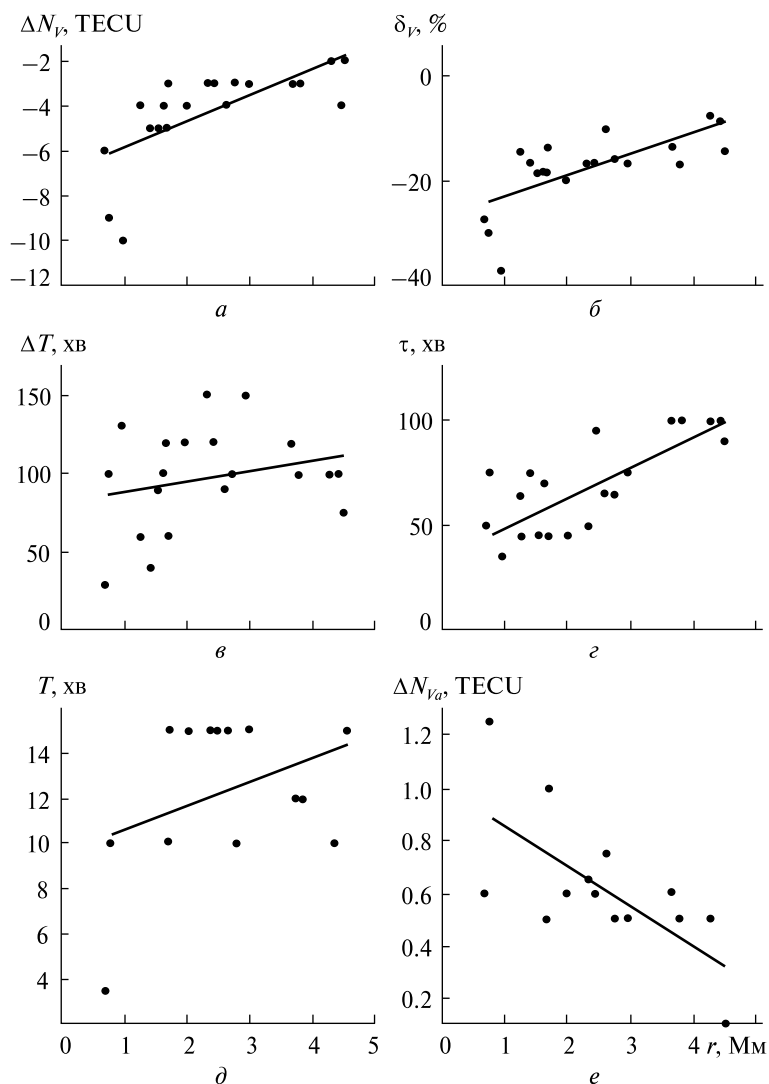


Рис. 6. Залежності параметрів іоносферної «діри» та квазіперіодичних збурень від відстані до вулкана

$$\Delta N_V = 1.2r - 7, \sigma = 1.5 \text{ TECU}, \quad (1)$$

$$\delta_V = 4r - 26.9, \sigma = 5 \%, \quad (2)$$

$$\Delta T = 6.6r + 82.2, \sigma = 31.4 \text{ хв}, \quad (3)$$

$$\tau = 14.2r + 34.8, \sigma = 14.5 \text{ хв}, \quad (4)$$

$$T = r + 9.6, \sigma = 3.2 \text{ хв}, \quad (5)$$

$$\Delta N_{Va} = -0.15r + 1, \sigma = 0.2 \text{ TECU}, \quad (6)$$

де r вимірюється у Мм, ΔN_V , ΔN_{Va} — в TECU, δ_V — у відсотках, ΔT , τ — у хвиликах. Із (1) і (2) випливає, що при $r \rightarrow 0$ в середньому $\Delta N_V \approx$

$\approx -7 \text{ TECU}$, а $\delta_V \approx -26.9 \%$. За $\Delta N_V = 0$ та $\delta_V = 0$ із (1) і (2) маємо середній горизонтальний розмір іоносферної «діри» $r_{\max} \approx 5.8 \text{ Мм}$ або 6.7 Мм . Тоді $r_{\max} = 6.3 \pm 0.5 \text{ Мм}$. Тоді із виразів (3)—(6) маємо $\Delta T_{\max} \approx 124 \pm 33 \text{ хв}$, $\tau_{\max} \approx 124 \pm 18 \text{ хв}$, $T_{\max} \approx 15.8 \pm 3.4 \text{ хв}$ і $\Delta N_{Vamin} \approx 0.06 \pm 0.2 \text{ TECU}$, тобто квазіперіодичні збурення на відстанях r_{\max} практично не рееструвалися. Дійсно, із (6) для $\Delta N_{Va} = 0$ маємо $r_{\max} \approx 6.7 \text{ Мм}$.

За даними табл. 3 побудовано залежності « $\Delta t_1 - r_1$ », « $\Delta t_2 - r_2$ » та « $\Delta t_3 - r_3$ » (рис. 7). Видно досить чітку тенденцію до збільшення часу за-

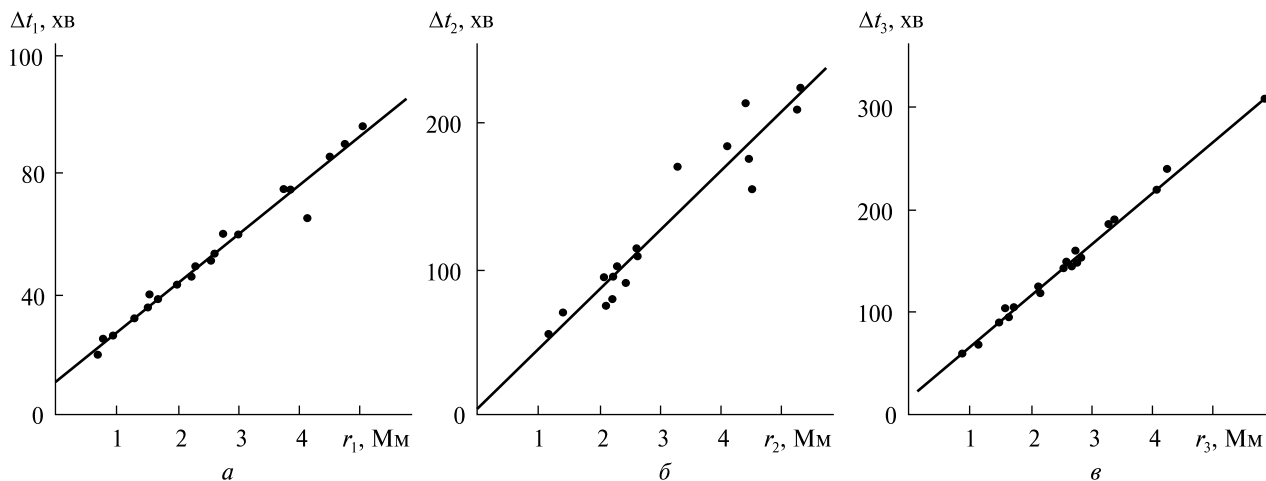


Рис. 7. Залежність часу запізнювання збурення від відстані до вулкана

пізнювання зі збільшенням відстані від вулкана до місця вимірювання. Відповідні лінійні апроксимації мають такий вигляд:

$$\Delta t_1 = 16.3r + 11.0, \quad \sigma = 3.5 \text{ хв}, \quad (7)$$

$$\Delta t_2 = 40.7r + 4.3, \quad \sigma = 17.5 \text{ хв}, \quad (8)$$

$$\Delta t_3 = 50.8r + 16.4, \quad \sigma = 5.2 \text{ хв}. \quad (9)$$

Із (7)–(9) випливає, що середня швидкість поширення збурень у трьох групах дорівнює 1020, 410 і 328 м/с. Такі швидкості властиві відповідно вибуховій хвилі, акустико-гравітаційній і хвилі Лемба або знову ж таки акустико-гравітаційній хвилі. При $r \rightarrow 0$ із (7)–(9) маємо $\Delta t_0 = 5 \dots 10$ хв. Час Δt_0 необхідний для поширення збурення від поверхні Землі до іоносферних висот.

ОБГОВОРЕННЯ

На відміну від контрольних днів, у день вибуху вулкана Тонга часові варіації ПЕВ були явно немонотонними. Це могло свідчити на користь того, що збурення ПЕВ було викликане вибухом вулкана.

За вибухом вулкана виникло N -подібне збурення ПЕВ (див. рис. 3–5). Подібні збурення зазвичай супроводжують вибухові процеси. Час Δt_1 запізнювання цього збурення мав тенденцію до збільшення зі збільшенням відстані r_1 від вулкана до місця реєстрації. Це підтверджує той факт, що N -подібне збурення викликане вибухом вулкана. Горизонтальна позірна швидкість цього збурення сягала 1000 м/с та дещо більше (див.

табл. 3). Таку швидкість мають вибухові хвилі, які належать до нелінійних хвиль. Особливістю таких хвиль є те, що їхня швидкість залежить від надлишку тиску у хвилі. Що більшим є цей надлишок, то більше швидкість хвилі відрізняється від швидкості звуку, яка біля поверхні Землі дорівнює близько 340 м/с. При поширенні у вертикальному напрямку відносний тиск у вибуховій хвилі збільшується доти, доки його зростання не обмежується нелінійними ефектами. Тому середня швидкість залишається рівною порядку 1 км/с, а $\Delta t_0 \approx 5$ хв.

Дві інші групи збурень мали часи запізнювання $\Delta t_2 = 56 \dots 225$ хв і $\Delta t_3 = 60 \dots 305$ хв. Їм відповідали позірні швидкості $v_2' = 336 \dots 500$ м/с та $v_3' = 260 \dots 318$ м/с (див. табл. 3). Важливо, що спостерігалася тенденція до збільшення часу запізнювання при збільшенні відстані від вулкана до місця реєстрації. Швидкість v_2' властива атмосферним гравітаційним хвилям, а швидкість v_3' близька до швидкості хвиль Лемба. Хвилі Лемба генеруються лише за значного енерговиділення (не менше 10 Мт ТНТ $\approx 4.2 \cdot 10^{16}$ Дж). Нагадаємо, що енергія вибуху вулкана Тонга становила 16...18 Мт ТНТ [12, 16, 17]. Хвилі Лемба належать до поверхневих, вони поширюються вздовж поверхні Землі практично без поглинання та дисперсії. Відносний тиск у такій хвилі має порядок 10^{-3} , а надлишок — порядок 100 Па на глобальних відстанях ($r \sim 20$ Мм) [6].

Важливо, що зі збільшенням висоти надлишковий тиск зменшується за експоненціальним законом, проте відносний надлишковий тиск, навпаки, збільшується зі збільшенням висоти за експоненціальним законом [12, 16, 17]. Під дією хвилі Лемба виникають суттєві збурення іоносфери на висотах не менше 300...400 км, а значить і ПЕВ, що і спостерігалось після вибуху вулкана.

Що стосується четвертої групи збурень в іоносфері, для якої $v_4' = 190...220$ м/с, то вона могла бути згенерована поширенням цунамі. Насправді цунамі, викликане безпосередньо вибухом вулкана, мало швидкість

$$v = \sqrt{gh} \approx 190...220 \text{ м/с}$$

при глибині океану $h \approx 3.7...4.9$ км. Тут g — прискорення вільного падіння.

Додамо, що цунамі, згенероване хвилею Лемба, мало швидкість приблизно 315 м/с.

Амплітуда квазіперіодичних збурень дорівнювала 0.5...1 TECU, а період — 10...20 хв (див. табл. 2).

Перейдемо до обговорення зменшення ПЕВ, що спостерігалось на всіх реєстраціях із часом запізнювання $\tau \approx 35...100$ хв та тривало від 30...40 до 120...150 хв (див. табл. 2). Збільшення часу запізнювання τ та тривалості ΔT збурення зі збільшенням відстані r від епіцентра вибуху до місця реєстрації свідчило про те, що збурення викликане саме вибухом вулкана, а не іншим високоенергетичним джерелом. Таким джерелом могла бути магнітна суббуря, що спостерігалась 15 січня 2022 р. в інтервалі часу 06:00—12:00, або вечірній сонячний термінатор, що на різних реєстраціях проявлявся з 04:00 до 10:00. Дефіцит ПЕВ у збуренні, що дістало назву іоносферної «діри», за абсолютною величиною змінювався від 10 до 2 TECU, або від 37 до 7 % зі збільшенням відстані r від 700 до 5000 км. Така тенденція свідчить також на користь того, що «діра» була згенерована вибухом вулкана Тонга.

Механізм утворення «діри» достеменно невідомий. Є окремі гіпотези [1]. У роботі [5] вважається, що «діра» могла бути викликана фазою розрідження в ударній хвилі. А як же тоді бути з фазою стискання? Ще раніше числовим моделюванням [49, 61] було показано, що зменшення ПЕВ може зумовлюватися сильним розширен-

ням та спливанням термосфери під дією серії нелінійних ударних хвиль. Нагадаємо, що спостерігалось п'ять вибухів вулкана Тонга, кожен із них генерував ударну хвилю. Інша гіпотеза [1] пов'язана з близькістю моменту виникнення «діри» до заходу Сонця та зі зменшенням фотоіонізаційного джерела та нестачею плазми у плазмосфері.

На думку автора цієї роботи, механізм утворення іоносферної «діри» може бути таким. За рахунок тертя вулканічних частинок (трибоелектризація), їхнього руйнування (тріщинуватості) (фрактоелектризація) та впливу водяних парів на електризацію (ватерелектризація) у вулканічній колонці виникають вільні електрони, що відразу прилипають до важких частинок (аерозолів). Мікроскопічні краплі води зазвичай коагулюють, тобто злипаються. Коефіцієнт рекомбінації важких іонів на декілька порядків менший, ніж для електронів. Виникає розділення заряду за рахунок того, що масивніші частинки рухаються донизу, а легші — вгору. Вертикальний електричний струм збільшується на декілька порядків. Фонове значення щільності цього струму має порядок 10 пА/м^2 [11]. Збурюється глобальне електричне коло. Напруженість атмосферного електричного поля збільшується на декілька порядків. Виникнення стороннього електричного струму сприяє збільшенню іоносферного поля E до 10...100 мВ/м при фоновому значенні 0.1...0.3 мВ/м [11]. Спрямоване на захід електричне поле (зональне поле) у іоносфері призводить до $\mathbf{E} \times \mathbf{V}$ -дрейфу та опускання іоносферної плазми зі швидкістю $v \approx E/B_0$, де B_0 — індукція геомагнітного поля поблизу місця локації вулкана. На менших висотах більш активна рекомбінація електронів в іонно-молекулярних реакціях. Все це призводить до генерації іоносферної «діри» під дією вулканічного вибуху. До речі, про електричне поле в іоносфері, спрямоване на захід, йдеться у роботі [2].

Якщо $\tau_{\min} \approx 50$ хв, то на висоті порядку 300 км вертикальна швидкість поширення збурення у «дірі» становить 100 м/с, а горизонтальна швидкість — близько 300 м/с.

Виявлені збурення суттєво залежали від географічного положення станції спостереження,

напрямку прольоту супутника, орієнтації траєкторії підіоносферної точки по відношенню до екваторіальної іонізаційної аномалії та освітленості іоносфери. Цим пояснюються значні флуктуації основних параметрів збурень.

ГОЛОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

У результаті аналізу часових варіацій ПЕВ у контрольні дні та у день вибуху вулкана встановлено основні закономірності у генерації збурень в іоносфері та визначено кількісні характеристики збурень.

1. Виявлено чотири групи збурень, що мали різний час запізнювання по відношенню до моменту вибуху вулкана. Важливо, що час запізнювання збурень збільшувався зі збільшенням відстані від вулкана до місця реєстрації. Швидкість збурення у першій групі була близькою до 1000 м/с, воно мало *N*-подібний профіль. Це збурення було згенероване вибуховою хвилею, швидкість якої залежала від надлишку тиску та априорі перевищувала швидкість звуку. Швидкість збурень у другій групі варіювала у межах 336...500 м/с, що властиво швидкості атмосферних гравітаційних хвиль. Швидкість збурень у третій групі перебувала у межах 260...318 м/с. Таку швидкість має хвиля Лемба. У четвертій групі швидкість збурень становила 190...220 м/с. Ця швидкість характерна для цунамі, яке було викликано безпосередньо вибухом вулкана.

2. Період квазіперіодичних збурень змінювався від 10 до 20 хв, а їхня амплітуда — від 0.5 до 1 TECU.

3. Доведено, що спостережувана іоносферна «діра» була згенерована саме вибухом вулкана. При цьому абсолютна та відносна величини збурень мали тенденцію до зменшення зі збільшенням відстані від епіцентра вибуху (від 10 до

2 TECU та від 37 до 7 % відповідно). Час запізнювання появи «діри» та її тривалість, навпаки, збільшувалися зі збільшенням відстані від вулкана до місця реєстрації (від 35 до 100 хв і від 30...40 до 120...150 хв відповідно).

4. Запропоновано механізм генерації іоносферної «діри». У його основі лежать як електричні, так і не електричні процеси (тріщинуватості, тертя частинок, конденсація водяних парів, коагуляція крапель води, прилипання електронів, гравітаційна сегрегація тощо). У результаті порушення глобального електричного кола, появи стороннього електричного струму, збільшення на порядки напруженості атмосферного та іоносферного електричного полів, опускання іоносферної плазми на менші висоти, де більш активний процес рекомбінації електронів з іоном O^+ , згенерована іоносферна «діра».

5. Встановлено основні кількісні характеристики збурень. Їхні флуктуації пояснюються географічним положенням станцій, положенням підіоносферних точок по відношенню до екваторіальної іонізаційної аномалії, часом доби, рухом вечірнього сонячного термінатора тощо.

Автор вдячний Ю. Б. Милованову за допомогу в обробці даних спостережень, В. Л. Дорохову за надану допомогу під час пошуку вихідних даних.

Робота виконувалась за часткової підтримки держбюджетних НДР, заданих МОН України (номери держреєстрації 0121U109881 та 0122U001476). Дослідження проведено в рамках проекту Національного фонду досліджень України (номер 2020.02/0015 «Теоретичні та експериментальні дослідження глобальних збурень природного і техногенного походження в системі Земля — атмосфера — іоносфера»).

REFERENCES

1. 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.
2. 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. DOI: 10.1029/2022JA030527.
3. Adushkin V. V., Rybnov Y. S., Spivak A. A. (2022). Wave-Related, Electrical, and Magnetic Effects Due to the January 15, 2022 Catastrophic Eruption of Hunga Tonga–Hunga Ha’apai Volcano. *J. Volcanolog. Seismol.*, **16**(4), 251–263. DOI: 10.1134/S0742046322040029.
4. 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), id: e2022GL098240. DOI: 10.1029/2022GL098240.
5. Astafeyeva 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. DOI: 10.1029/2022GL098827.
6. 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.
7. 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**, id: e2022GL098131. DOI: 10.1029/2022GL098131.
8. Carvajal M., Sepúlveda I., Gubler A., Garreaud R. (2022). Worldwide signature of the 2022 Tonga volcanic tsunami. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(6), id: e2022GL098153. DOI: 10.1029/2022GL098153.
9. 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), id: 2179. DOI: 10.3390/rs14092179.
10. Cheng K., Huang Y.-N. (1992). Ionospheric disturbances observed during the period of Mount Pinatubo eruptions in June 1991. *J. Geophys. Res.*, **97**(A11), 16995–17004. DOI: 10.1029/92JA01462.
11. Chernogor L. F. (2012). *Physics and ecology of the catastrophes*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ. [In Russian].
12. Chernogor L. F. (2022). Effects of the Tonga volcano explosion on January 15, 2022. *Int. Conf. “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University” in part of the World Science Day for Peace and Development*. October 18–21. Kyiv, Ukraine. Book of Abstracts, 12–13.
13. Chernogor L. F. (2022). Electrical Effects of the Tonga Volcano Unique Explosion on January 15, 2022. *Int. Conf. “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University” in part of the World Science Day for Peace and Development*. October 18–21. Kyiv, Ukraine. Book of Abstracts, 79–80.
14. Chernogor L. F. (2022). Magnetospheric Effects That Accompanied the Explosion of the Tonga Volcano on January 15, 2022. *Int. Conf. “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University” in part of the World Science Day for Peace and Development*. October 18–21. Kyiv, Ukraine. Book of Abstracts, 81–82.
15. Chernogor L. F. (2022). Magnetic Effects of the Unique Explosion of the Tonga Volcano. *Int. Conf. “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University” in part of the World Science Day for Peace and Development*. October 18–21. Kyiv, Ukraine. Book of Abstracts, 89–90.
16. Chernogor L. F. (2022). The Tonga super-volcano explosion as a subject of applied physics. *Int. Sci. Conf. “Electronics and Applied Physics”, APHYS 2022*. 18–22 October. Kyiv, 130–131.
17. Chernogor L. F. (2023). Physical effects of the January 15, 2022, powerful Tonga volcano explosion in the Earth–atmosphere–ionosphere–magnetosphere system. *Space Science and Technology*, **29**(2), 54–77 [In Ukrainian].
18. Chernogor L. F., Mylovanov Y. B., Dorohov V. L. (2022). Ionospheric Effects accompanying the January 15, 2022 Tonga Volcano Explosion. *Int. Conf. “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University” in part of the World Science Day for Peace and Development*. October 18–21. Kyiv, Ukraine. Book of Abstracts, 83–84.
19. Chernogor L. F., Shevelev M. B. (2022). Statistical characteristics of atmospheric waves, generated by the explosion of the Tonga volcano on January 15, 2022. *Int. Conf. “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University” in part of the World Science Day for Peace and Development*. October 18–21. Kyiv, Ukraine. Book of Abstracts, 85–86.

20. Chernogor L. F., Shevelev M. B. (2023). A statistical study of the explosive waves launched by the Tonga super-volcano on January 15, 2022. *Space Science and Technology*, **29**(6).
21. 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**, id: B02202. DOI: 10.1029/2008JB005722.
22. 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**, 1537–1546. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2009.04390.x.
23. 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), id: e2022GL098626. DOI: 10.1029/2022GL098626.
24. 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), id: e2022GL098577. DOI: 10.1029/2022GL098577.
25. Heidarzadeh M., Gusman A. R., Ishibe T., Sabeti R., Šepić J. (2022). Estimating the eruption-induced water displacement source of the 15 January 2022 Tonga volcanic tsunami from tsunami spectra and numerical modelling. *Ocean Eng.*, **261**, id: 112165. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.112165.
26. Heki K. (2006). Explosion energy of the 2004 eruption of the Asama Volcano, central Japan, inferred from ionospheric disturbances. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, id: L14303. DOI: 10.1029/2006GL026249.
27. 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. and Terr. Phys.*, **56**(9), 1227–1234.
28. 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.
29. Inan U. S., Piddychiy D., Peter W. B., Sauvaud J. A., Parrot M. (2007). DEMETER satellite observations of lightning-induced electron precipitation. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, id: L07103. DOI: 10.1029/2006GL029238
30. Johnson J. B. (2003). Generation and propagation of infrasonic airwaves from volcanic explosions. *J. Volcanology and Geothermal Res.*, **121**(1–2), 1–14. DOI: 10.1016/S0377-0273(02)00408-0.
31. 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.
32. 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.
33. 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. DOI: 10.1029/2022GL099002.
34. 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. DOI: 10.1029/2022GL098222.
35. Liu C. H., Klostermeyer J., Yeh K. C., Jones T. B., Robinson T., Holt O., Leitingner 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), 6281–6290. DOI: 10.1029/JA087iA08p06281.
36. Lynett P. (2022). The Tsunamis Generated by the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Volcano on January 15, 2022. *Preprint (Version 1) available at Research Square*. DOI: 10.21203/rs.3.rs-1377508/v1.
37. Lynett P., McCann M., Zhou Z., et al. (2022). Diverse tsunamigenesis triggered by the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption. *Nature*, **609**, 728–733. DOI: 10.1038/s41586-022-05170-6.
38. 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.
39. 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., Wātada 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., Arciniiega-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.
40. 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 and Planet. Sci. Lett.*, **434**, 112–116. DOI: 10.1016/j.epsl.2015.11.029.
41. Otsuka S. (2022). Visualizing Lamb waves from a volcanic eruption using meteorological satellite Himawari-8. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(8), id:e2022GL098324. DOI:10.1029/2022GL098324.
42. 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), id: e2022GL098123.
43. Rajesh P. K., Lin C. C. H., Lin J. T., Lin C. Y., Liu J. Y., Matsuo T., et al. (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**, id: e2022GL099798. DOI: 10.1029/2022GL099798.
44. Ramírez-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.
45. 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), 6291–6301. DOI: 10.1029/JA087iA08p06291.
46. 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. and Solar-Terr. Phys.*, **107**, 54–59. DOI: 10.1016/j.jastp.2013.10.014.
47. 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**, id: 57. DOI: 10.1186/s40623-022-01619-0.
48. 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), id:e2022GL098454.
49. Shinagawa H., Tsugawa T., Matsumura M., Iyemori T., Saito A., Maruyama T., Jin H., Nishioka M., Otsuka, Y. (2013). Two-dimensional simulation of ionospheric variations in the vicinity of the epicenter of the Tohoku-oki earthquake on 11 March 2011. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 5009–5013. DOI: 10.1002/2013GL057627.
50. 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 Ha’apai volcanic eruption as seen in GNSS-TEC and Super-DARN Hokkaido pair of radars observations. *Earth Planets Space*, **74**(106). DOI: 10.1186/s40623-022-01665-8.
51. 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**, 10,303–10,315. DOI: 10.1002/2016JA023382.
52. 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**, id: 61. DOI: 10.1186/s40623-022-01614-5.
53. 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. *Geoscience Lett.*, **9**, id:24. DOI: 10.1186/s40562-022-00232-z.
54. *The Encyclopedia of Volcanoes* (2015) (2 ed). Academic Press, 1421 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-385938-9.00063-8.
55. 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. DOI: 10.1029/2022GL098158.

56. 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**, id: 117639. DOI: 10.1016/j.epsl.2022.117639.
57. Witze A. (2022). Why the Tongan volcanic eruption was so shocking. *Nature*, **602**, 376–378. <https://media.nature.com/original/magazine-assets/d41586-022-00394-y/d41586-022-00394-y.pdf>
58. 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*, DOI: 10.1038/s41586-022-05012-5.
59. 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), id: e2022JA030540. DOI: 10.1029/2022JA030540.
60. 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), id: 100134. DOI: 10.1016/j.eqrea.2022.100134.
61. Zettergren M. D., Snively J. B., Komjathy A., Verkhoglyadova O. P. (2017). Nonlinear ionospheric responses to large-amplitude infrasonic-acoustic waves generated by undersea earthquakes. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, **122**, 2272–2291. DOI: 10.1002/2016JA023159.
62. 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. *Frontiers in Astron. and Space Sci.*, **9**, id: 871275. DOI: 10.3389/fspas.2022.871275.

Стаття надійшла до редакції 10.12.2022

Після доопрацювання 23.12.2022

Прийнято до друку 15.02.2023

Received 10.12.2022

Revised 23.12.2022

Accepted 15.02.2023

L. F. Chernogor, Head of Department, Dr. Sci. in Phys & Math., Prof.

ORCID ID: 0000-0001-5777-2392

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

V. N. Karazin Kharkiv National University

4 Svoboda Square, Kharkiv, 61022 Ukraine

IONOSPHERIC TOTAL ELECTRON CONTENT VARIATIONS CAUSED BY THE TONGA VOLCANO EXPLOSION ON JANUARY 15, 2022

The capability of volcanoes to generate powerful explosive eruptions influencing the state of the ionosphere became known back in the 1980th. The Hunga-Tonga-Hunga-Ha'apai (Tonga for short) volcano explosion on January 15, 2022, has shown a surge of renewed interest in investigating effects in the Earth — atmosphere — ionosphere — magnetosphere system since this volcano can be rightfully classified as unique. A number of papers have already dealt with the ionospheric effects generated by the Tonga volcano. The temporal variations in the total electron content (TEC) were used to determine the number of volcano explosions to be five. The second and third explosions were the strongest, with the second being the most intense. The response of the ionosphere to the Tonga volcano explosion has been studied on local and global scales by making use of the Global Positioning System satellite constellation and measurements onboard the Swarm satellite network. In the vicinity of the volcano explosion, disturbances in TEC attained 5–10 TECU. In addition to the local effect, traveling ionospheric disturbances were observed to propagate, which were due to the generation and propagation of atmospheric gravity waves with speeds of 180 m/s to 1,050 m/s. Of particular importance to global-scale perturbations is the Lamb wave, which propagated with a speed of 315 m/s. At night-time, plasma depletions of the equatorial ionosphere were revealed over the tropical Pacific Ocean when the electron density at 400–500 km altitude showed a decrease by 2-3 orders of magnitude. The length of these formations in longitude exceeded ~10 Mm, and they were observed for more than 4–5 h. The scientific objective of this study is further analysis of aperiodic and quasi-periodic perturbations in the ionosphere, which were caused by the Tonga volcano explosion, in a wide range of distances from the source of disturbance (from ~0.1 Mm to 5 Mm). To reveal the ionospheric response to the Tonga volcano explosion, the records of signals from Global Positioning System satellites have been analyzed. The intercomparison of temporal variations in TEC observed on the reference days and on the day when the volcano explosion occurred has resulted in the determination of basic principles of the generation of ionospheric perturbations and the estimation of numerical magnitudes of the parameters of the perturbations. Four groups of disturbances have been detected, each of which arrived at different time delays with respect

to the moment of the volcano explosion. It is important to note that the time delay increases with increasing distance from the volcano to the observational instruments. The first group of speeds included the disturbances traveling with a speed close to 1,000 m/s and having an *N*-shaped profile. This perturbation was generated by a blast wave whose speed depended on the excess pressure and a priori exceeded the speed of sound. In the second group, the speed varied in the 336 m/s to 500 m/s range, within which the speeds of atmospheric gravity waves are found. The speeds in the third group exhibited variability within the 260–318 m/s limits, within which the Lamb wave propagates. The speed in the fourth group was estimated to be 190–220 m/s, which is a characteristic speed of the tsunami that was caused directly by the volcano explosion. The period of quasi-periodic perturbations varied from ~10 min to 20 min, while their amplitudes were from 0.5 TECU to 1 TECU. The observed ionospheric «hole» was proved to be produced by the volcano explosion directly, with the modules of the absolute and relative magnitudes of disturbances showing a tendency for decreasing with increasing distance from the explosion epicenter, from ~10 TECU to 2 TECU and from 37 % to 7 %, respectively. Contrary to the amplitude, the «hole» time delay and its duration exhibited an increase with distance from the volcano to the observational sensors, from 35 min to 100 min and from ~30–40 min to 120–150 min, respectively. A mechanism for generating the ionospheric «hole» has been advanced, which is based on both the electric and non-electric processes (cracking, the friction of particles, condensation of water vapor, coagulation of water droplets, attachment of electrons, gravity segregation, etc.). The ionospheric «hole» is formed as a result of perturbing the global electric circuit, arising external electric currents, an increase in the electric field strengths by orders of magnitude in the atmosphere and the ionosphere, diffusion of the ionospheric plasma down to lower altitudes where the recombination processes become fast. The basic numerical characteristics have been established of the disturbances, whose fluctuations account for local time, the dusk terminator, sensor geographic locations, the location of subionospheric points on the satellite to receiver ray paths with respect to the equatorial anomaly, etc.

Keywords: ionosphere, Tonga volcano, volcano explosion, total electron content, ionospheric «hole», wave disturbances, disturbance parameters.