

<https://doi.org/10.15407/knit2023.04.078>

УДК 550.3

Л. Ф. ЧОРНОГОР, зав. кафедри космічної радіофізики, Заслужений проф.,
Заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державної премії УРСР в галузі науки і техніки (1989 р.),
двічі лауреат Премії Ради Міністрів СРСР, 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
площа Свободи 4, Харків, Україна, 61022

ГЛОБАЛЬНІ ВАРІАЦІЇ ГЕОМАГНІТНОГО ПОЛЯ, ВИКЛИКАНІ ВИБУХОМ ВУЛКАНА ТОНГА 15 СІЧНЯ 2022 р.

Вибух вулкана Тонга 15 січня 2022 р. призвів до значних збурень у системі Земля (літосфера, Світовий океан) — атмосфера — іоносфера — магнітосфера. Мета цієї роботи — викладення результатів дослідження глобальних варіацій геомагнітного поля, викликаних вибухом вулкана Тонга 15 січня 2022 р. Для аналізу варіацій X-, Y- і Z-компонентів геомагнітного поля використано реєстрації на 12 станціях світової мережі INTERMAGNET. Під час обробки часових рядів спочатку віднімався тренд, обчислений на інтервалі 60 хв з кроком 1 хв, а потім застосовувався системний спектральний аналіз. Аналіз стану космічної погоди дозволив обрати як контрольні дні 13 та 17 січня 2022 р. Аналіз часових варіацій рівня усіх компонентів геомагнітного поля показав таке. У день вибуху вулкана приблизно після 04:21 мали місце суттєві варіації рівня усіх компонентів, проте найбільші варіації спостерігалися у рівні Y-компонента. Найменший час запізнювання становив 6 хв. При цьому квазіперіодичні варіації геомагнітного поля з періодом 4...4.5 хв і амплітудою близько 2 нТл були викликані акустичним резонансом у полі стоячої акустичної хвилі, згенерованої вибухом вулкана. Крім того, виявлено шість груп можливих збурень, стимульованих вибухом вулкана. Важливо, що у кожній групі час запізнювання збурень зростає при збільшенні відстані між вулканом і станцією. Встановлено, що збурення переносилися зі швидкостями, близькими до 4, 1.5, 1 км/с та 500, 313 і 200 м/с. Такі швидкості характерні для повільних МГД-хвиль, вибухової хвилі, атмосферної гравітаційної хвилі, хвилі Лемба та іоносферної хвилі від цунамі.

Ключові слова: вулкан Тонга, вибух, магнітний ефект, час запізнювання, удавана швидкість, МГД-хвиля, вибухова хвиля, атмосферна гравітаційна хвиля, цунамі.

ВСТУП

15 січня 2022 р. в інтервалі часу 04:00—05:00 UT (тут і надалі час всесвітній) спостерігалось п'ять вибухів підводного вулкана Тонга (20°54' пд. ш., 175°38' зх. д.) [13, 14, 33, 34]. Другий вибух о 04:15 UT був найпотужнішим. Продукти викиду досягли висоти 50...58 км. Такі викиди стали ре-

кордними. Максимальна висота викидів найпотужнішого вулкана Кракатау, що вибухнув 26—27 серпня 1883 р., становила 40...55 км.

Теплова енергія викидів вулкана Тонга була близькою до $3.9 \cdot 10^{18}$ Дж, середня теплова потужність — $9.1 \cdot 10^{12}$ Вт [5]. Маса викидів сягала 2.9 Гг, а їхній об'єм $1.9 \cdot 10^9$ м³. Індекс вулканічної вибуховості (VEI) не перевищував 5.8. За даними

Цитування: Черногор Л. Ф. Глобальні варіації геомагнітного поля, викликані вибухом вулкана Тонга 15 січня 2022 р. *Космічна наука і технологія*. 2023. 29, № 4 (143). С. 78—105. <https://doi.org/10.15407/knit2023.04.078>

© Видавель 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/>)

різних досліджень енергія вибуху становила від 4...18 до 478 ± 191 Мт ТНТ [13, 14, 30].

Вибух вулкана Тонга супроводжувався суттєвими збуреннями усіх підсистем у системі Земля (літосфера, Світовий океан) — атмосфера — іоносфера — магнітосфера [5]. Проведено спостереження за землетрусом з магнітудою 5.8 [36], поширенням сейсмічних хвиль [33, 34, 36], цунами [16, 27, 29, 37, 40, 41], хвилі Лемба [29, 30, 32—35, 45], гравітаційної, інфразвуквої та звукової хвилі [10, 15—17, 25, 33, 34, 44], а також процесами в атмосфері та іоносфері [8, 9, 11, 12, 14, 17, 24, 32, 42, 45].

Теоретичний аналіз комплексу фізичних процесів проведено в роботах [5, 9—22].

Вибух також супроводжувався варіаціями геомагнітного поля [7, 13, 26, 28, 31, 38, 39, 43].

У роботі [39] описано квазіперіодичні збурення рівня Y -компонента з амплітудою порядку 3 нТл і періодом 4 хв на відстані 835 км від вулкана. Час запізнювання був меншим від 10 хв.

У роботах [28, 43] аналізувались геомагнітні варіації на частоті 3.8 мГц (період $T \approx 4.4$ хв). Ці варіації автори пов'язали з атмосферним акустичним резонансом. Важливо, що коливання з частотою 3.8 мГц одночасно спостерігалися як поблизу вулкана (станція API), так і у магнітоспряженій області (станція HON). Амплітуда практично синхронних коливань на цих станціях дорівнювала відповідно 2 та 0.2 нТл. Час запізнювання магнітного ефекту не перевищував 6 хв. Проте подібні коливання не реєструвалися на відстанях $r > 2.7$ Мм.

Роботу [38] було присвячено дослідженню магнітних варіацій з періодом 3...8 хв та амплітудою порядку 1 нТл, що мали час запізнювання близько 30 хв (швидкість поширення 470 м/с). Ці варіації автори пов'язують з іоносферною хвилею, згенерованою вулканом, а варіації з періодами 13...93 та 5...100 хв — з впливом цунами та атмосферно-іоносферних хвиль.

У роботі [26] описано результати багатоінструментальних досліджень магнітного ефекту вулкана Тонга. Для аналізу автори використали дані супутників ICON і Swarm та наземних магнітометрів. Було вивчено вплив вибуху вулкана на іоносферну динамо-область, нейтральні вітри та іоносферні струми.

У роботі [31] досліджувався вплив вибуху вулкана на інтенсивність екваторіального електроструменя і виявлено ефект повороту напрямку цього електроструменя, викликаного сильним зональним вітром, спрямованим на схід.

У роботі [13] описано хвильові процеси та збурення атмосферного електричного і магнітного полів. Для дослідження магнітного ефекту використано дані спостережень 14 станцій світової мережі станцій INTERMAGNET, віддалених від вулкана на відстань від 2.790 до 16.225 Мм. Встановлено, що збурення геомагнітного поля носили глобальний характер. Виявлено дві групи збурень. У першій групі майже синхронно спостерігалися збурення практично відразу після вибуху. У другій групі магнітні збурення виникали після приходу атмосферних хвиль.

Актуальним завданням є подальший аналіз збурень магнітного поля Землі, що пов'язані з вибухом вулкана Тонга.

Мета цієї роботи — викладення результатів дослідження глобальних варіацій геомагнітного поля, викликаних вибухом вулкана Тонга 15 січня 2022 р.

ВІДОМОСТІ ПРО ВУЛКАН ТОНГА

Вулкан Тонга розташовується в океані на глибині близько 200 м. Інтенсивне виверження вулкана 15 січня 2022 р. реєструвалося приблизно з 04:00 до 16:00 UT. Продуктивність вулкана сягала 67 кт/с, або 44000 м³/с. Активність вулкана спостерігалася впродовж 12 ± 1 год.

Енергія вибухової хвилі дорівнювала 16...18 Мт ТНТ [5].

Вулкан Тонга належить до п'ятірки найбільш потужних вулканів.

СТАН КОСМІЧНОЇ ПОГОДИ

За даними сайтів [http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp] та [https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html] стан космічної погоди з 12 до 18 січня 2022 р. був таким. Число сонячних плям не перевищувало 100. Індекс $F_{10.7} = 100...120$ с.о.п. (1 с.о.п. = 10^{-22} Вт·м⁻²·Гц⁻¹). Суттєве (у рази) збурення параметрів сонячного вітру мало місце у ніч з 14 на 15 січня 2022 р. Значення рівня компонента B_z міжпланетного магнітного поля зменшилися

від ± 4 до -14 нТл. Індекс A_p , навпаки, при цьому збільшився від 5 до 67 нТл, індекс K_p — від 1 до 5.7, а D_{st} -індекс зменшився від 10 до -90 нТл. Таким чином, в ніч з 14 на 15 січня 2022 р. мала місце помірна магнітна буря класу G2. З 15 до 18 січня 2022 р. спостерігалася фаза відновлення магнітної бурі. Приблизно з 12:00 15 січня 2022 р. мала місце суббура, яка могла маскувати магнітний ефект вибуху вулкана.

Найбільш спокійною була доба 13 січня 2022 р. Саме її обрано на роль контрольної доби. Додатково як контрольна використовується також доба 17 січня 2022 р.

ЗАСОБИ ТА МЕТОДИ

За вихідні дані обрано результати вимірювань часових варіацій на світовій мережі станцій INTERMAGNET [<https://www.intermagnet.org/>]. Перелік використаних станцій наведено у табл. 1. Дислокацію станцій відносно вулкана Тонга показано на рис. 1. Важливо, що ці станції були розташовані як на схід, так і на захід від вулкана, а також південніше, і північніше від нього. Ми аналізували часові варіації X -, Y - і Z -компонентів магнітного поля Землі для 12, 13, 15, 16, 17 та 18 січня 2022 р. Як відомо, часова роздільна здатність дорівнювала 1 хв. Похибка вимірювань не перевищувала 1 нТл. Додамо, що часові варіації всіх компонентів на станціях RPT і IPM, які лежали на нічно-

му боці Землі, були досить малими, а тому далі не описуються. Під час пошуку можливої реакції геомагнітного поля на вибух вулкана Тонга використовувався такий алгоритм.

1. Оскільки варіації геомагнітного поля можуть викликатися багатьма потужними джерелами енерговиділення, на першому етапі виділялися будь-які характерні зміни варіацій рівня X -, Y - і Z -компонентів, які спостерігалися після вибуху і які могли бути пов'язані з вибухом. Це є необхідною, але не достатньою умовою.

2. На другому етапі відсіюються варіації, які були подібні до варіацій у контрольні дні і викликалися, наприклад, добовими процесами, рухом сонячного термінатора тощо.

3. Далі визначалися можливі часи запізнювання збурень та видимі швидкості. Час запізнювання повинен був збільшуватися при збільшенні відстані від вулкана.

4. Якщо видимі швидкості для різних станцій були достатньо близькими, вони створювали статистичну групу та статистичний ряд. Близькість видимих швидкостей у даній групі вважалася достатньою умовою того, що збурення викликане вибухом вулкана.

5. Додатковою достатньою умовою було фізичне тлумачення видимих швидкостей. Ці швидкості повинні були відповідати відомим швидкостям хвиль певної фізичної природи.

Таблиця 1. Основні дані про геомагнітні станції

Назва станції	Координати		Країна	Відстань до місця вибуху, км
	Широта	Довгота		
Apia (API)	13.8155° S	171.7812° W	Західне Самоа	840
Eyrewell (EYR)	43.4740° S	172.3930° E	Нова Зеландія	2790
Canberra (CNB)	35.3200° S	149.3600° E	Австралія	3806
Alice Springs (ASP)	23.7620° S	133.8830° E	Австралія	5210
Kakadu (KDU)	12.6900° S	132.4700° E	Австралія	5602
Gingin (GNG)	31.3560° S	115.7150° E	Австралія	6887
Learmonth (LRM)	22.2200° S	114.1000° E	Австралія	7233
Kakioka (KAK)	36.2320° N	140.1860° E	Японія	7852
Shumagin (SHU)	55.3500° N	160.4600° W	Сполучені Штати Америки	8557
Dalat (DLT)	11.9400° N	108.4800° E	В'єтнам	9068
Cocos (Keeling) Islands (CKI)	12.1875° S	96.8336° E	Австралія	9308
Gan International Airport (GAN)	0.6946° S	73.1537° E	Мальдіви	12210

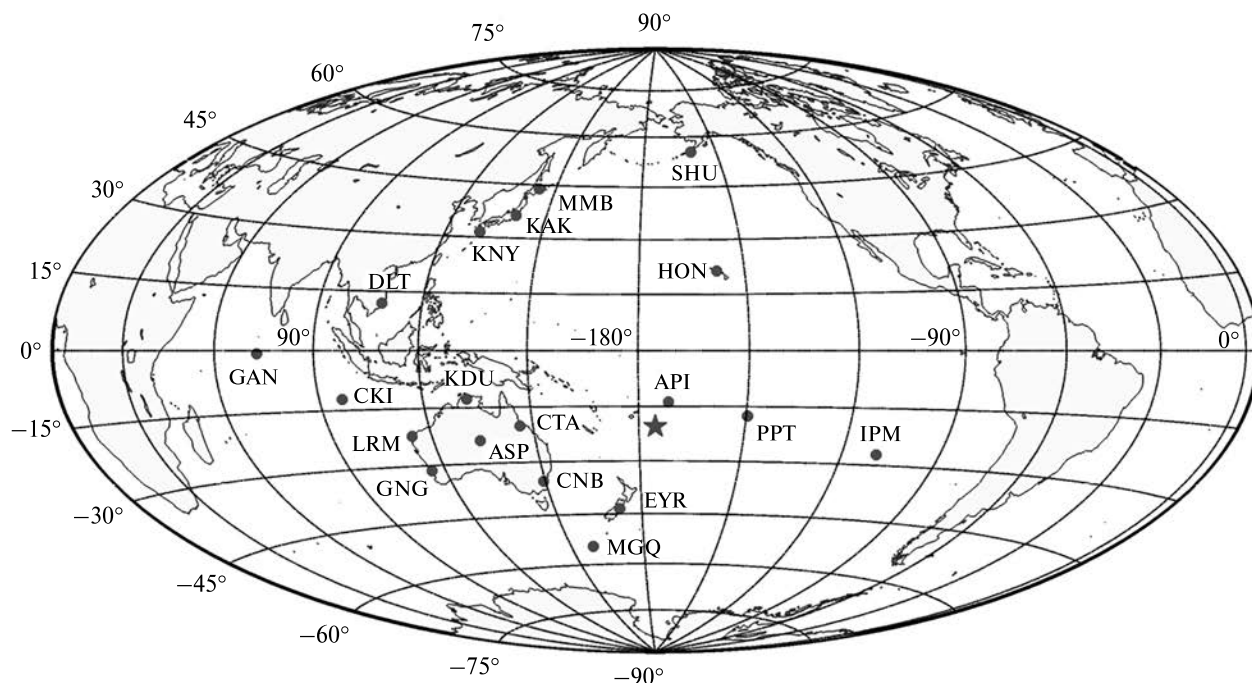


Рис. 1. Розташування геомагнітних станцій відносно вулкана Тонга, позначеного зіркою

6. Отримані результати, за можливістю, порівнювалися з результатами для інших вулканів, які вибухали раніше.

На початку розгляду підкреслимо, що варіації рівня компонентів у контрольні дні були більш плавними. У день вибуху вулкана Тонга вони стали немонотонними. Мали місце як аперіодичні, так і квазіперіодичні збурення рівня компонентів геомагнітного поля. Із часових залежностей рівня компонентів спочатку віднімали ковзний тренд, обчислений на інтервалі 60 хв з кроком 1 хв, а різниця піддавалася спектральному аналізу із застосуванням віконного та адаптивно-го перетворення Фур'є та вейвлет-аналізу [2].

АНАЛІЗ ЧАСОВИХ ВАРІАЦІЙ РІВНЯ ГЕОМАГНІТНОГО ПОЛЯ

Станція Аріа (API). Часові варіації усіх компонентів геомагнітного поля у контрольні дні були в значній мірі подібними (рис. 2). X - та Y -компоненти злегка флюктували біля рівня -10 нТл та -5 нТл відповідно. Рівень Z -компонента змінювався у межах від 6 до -3 нТл та від 3 до -5 нТл відповідно.

У день вибуху вулкана з часом запізнювання $\Delta t_1 \approx 8.5$ хв рівень X -компонента виріс від -15 до -3 нТл, а потім зменшився від -3 до -23 нТл. Все це тривало не менше 120 хв. Крім того, впродовж 90 хв рівень коливався з періодом $T \approx 5$ хв та амплітудою $\Delta X_a \approx 1 \dots 1.5$ нТл. Рівень Y -компонента спочатку збільшувався від 0 до 32 нТл, а потім зменшувався від 32 до 10 нТл.

На цей аперіодичний процес наклалися квазіперіодичні коливання з $T \approx 4 \dots 4.5$ хв. Важливо, що перше коливання мало час запізнювання $\Delta t_0 \approx 6$ хв, тривалість $\Delta T_0 \approx 32 \dots 36$ хв і амплітуду до 2 нТл. З $\Delta t_1 \approx 8.5$ хв рівень Z -компонента спочатку зменшився від -1 до -12 нТл, а потім виріс від -12 до 2 нТл. Також мали місце коливання з $T \approx 5$ хв.

Станція Eyrewell (EYR). 13 січня 2022 р. рівень X -компонента, флюктуючи, зменшувався від -15 до $-(30 \pm 1)$ нТл. З 08:00 UT рівень X -компонента флюктував біля значення -26 нТл (рис. 3). Рівень Y -компонента спочатку зменшувався від $10 \dots 12$ приблизно до 2 нТл, що мало місце о 07:00–07:30 UT. Потім він збільшився до 7 нТл, після чого спостерігалось його зменшення до $2 \dots 3$ нТл. Рі-

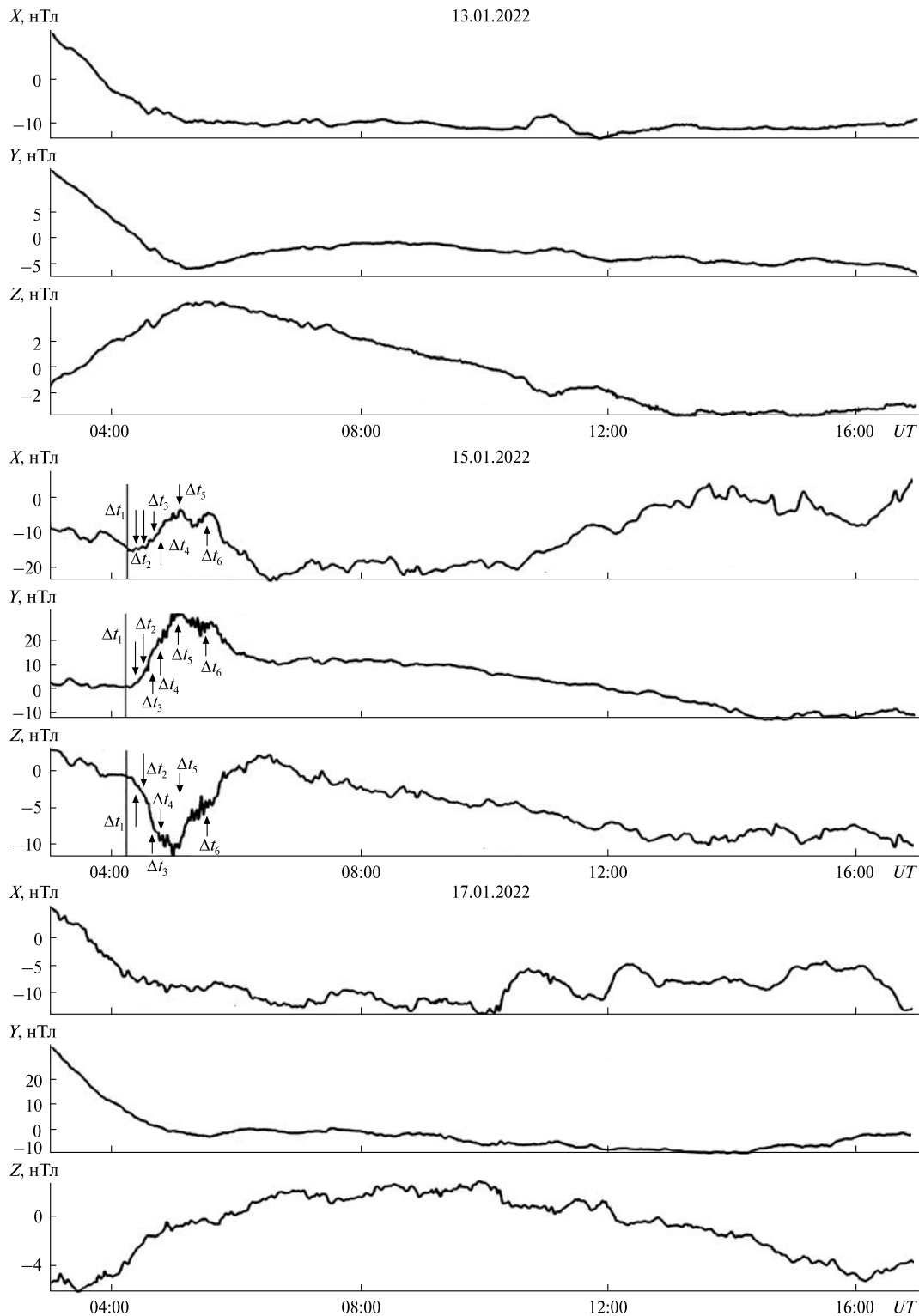


Рис. 2. Часові варіації компонентів геомагнітного поля на станції API. Стрілки вказують на моменти часу можливої реакції магнітного поля на вибух вулкана. Вертикальною лінією показано момент вибуху вулкана

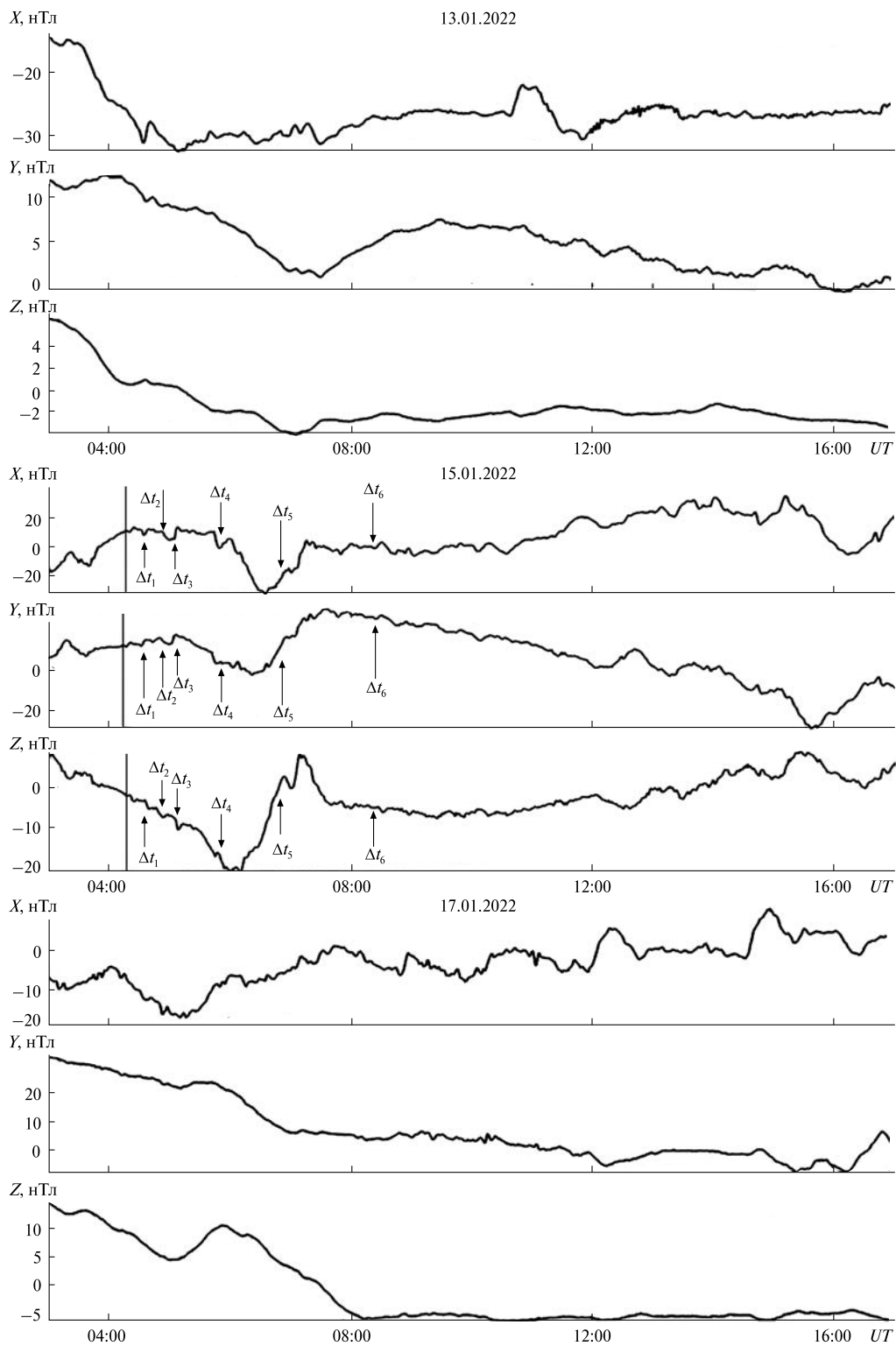


Рис. 3. Часові варіації компонентів геомагнітного поля на станції EYR. Стрілки вказують на моменти часу можливої реакції магнітного поля на вибух вулкана. Вертикальною лінією показано момент вибуху вулкана

вень Z -компонента зменшився від 6 до -2 нТл. Далі він флюктував поблизу цього рівня.

17 січня рівень X -компонента флюктував біля 5 нТл, амплітуда флюктуацій сягала 6...7 нТл. Рівень Y -компонента, флюктуючи, зменшувався приблизно від 30 до -10 нТл. Водночас рівень Z -компонента, флюктуючи, зменшувався від 15 до -5 нТл.

У день вибуху вулкана спостерігалось до шести груп збурень. Найбільш яскравим було бухтоподібне збурення, яке мало час запізнювання $\tau_X \approx 86$ хв, $\tau_Y \approx 51$ хв і $\tau_Z \approx 51$ хв. Провали у X -, Y - і Z -компонентах сягали відповідно -40 , -25 і -25 нТл. Після провалів у рівнях Y - і Z -компонентів спостерігалось збільшення до 30 та 8 нТл відповідно. Амплітуда інших збурень зазвичай не перевищувала одиниць нанотесла.

Станція Canberra (CNB). 13 січня 2022 р. рівень флюктуацій усіх компонентів не перевищував 1...4 нТл (рис. 4). Для Y -компонента мало місце зменшення рівня від 23 до 0 нТл. З 03:00 до 06:00 для Z -компонента спостерігався провал від 2 до -9 нТл. Далі рівень флюктував біля -2 нТл.

17 січня 2022 р. рівень X -компонента, флюктуючи у межах ± 5 ...7 нТл, поступово збільшувався від -10 до 5 нТл. Натомість рівень Y -компонента зменшувався від 37 приблизно до 0 нТл. Рівень Z -компонента спочатку зростав від -25 до -7 нТл, а потім флюктував у межах ± 3 ...4 нТл.

У день вибуху вулкана тренд X спочатку збільшувався від -10 до 10 нТл, потім зменшувався від 10 до -10 нТл, а потім знову зростав від -10 до 30 нТл. Рівень флюктуацій становив ± 3 ...5 нТл. Тренд Y спочатку зменшився від 22 до -33 нТл, потім він збільшувався від -33 до 33 нТл, а потім знову зменшувався від 33 до -25 нТл. Тренд Z спочатку зменшувався від -10 до -16 нТл, потім він зростав від -16 до 10 нТл, а потім знову зменшувався від 10 до -8 нТл. За ним настало збільшення Z від -8 до 10 нТл. На повільний тренд усіх компонентів наклалися варіації рівня з амплітудою в одиниці нанотесла.

Станція Alice Springs (ASP). У контрольний день 13 січня 2022 р. тренд X спочатку зменшувався від 10 до -8 ... -10 нТл, а потім залишився біля рівня -6 нТл (рис. 5). Тренд Y зменшувався від 20 до 2...3 нТл. Тренд Z спочатку різко змен-

шився від 13 до -4 нТл, а потім варіював від -4 до -3 нТл. Рівень флюктуацій усіх компонентів зазвичай не перевищував 1...2 нТл.

У контрольний день 17 січня 2022 р. тренд X змінювався незначно, рівень флюктуацій не перевищував ± 3 ...5 нТл. Тренд Y зменшувався від 40 до -5 нТл. Амплітуда флюктуацій сягала ± 8 ...10 нТл. Тренд Z спочатку різко зменшився від 18 до -4 нТл, надалі $Z \approx -4$ нТл. Рівень флюктуацій не перевищував ± 1 нТл.

У день вибуху вулкана мали місце бухтоподібні збурення усіх компонентів геомагнітного поля, на які наклалися флюктуації з амплітудою до 4...5 нТл. У тренді X спостерігався провал від -3 до -20 нТл. Провал у тренді Y був значно більшим: від 20 до -30 нТл, його тривалість наближалась до 4 год. За провалом спостерігався потужний сплеск від -30 до 30 нТл тривалістю більш ніж 7 год. Тренд Z спочатку збільшувався від -20 до -13 нТл, потім зменшувався від -13 до -22 нТл, а надалі він збільшувався від -22 до 10 нТл. За сплеском Z мало місце зменшення тренду до -10 нТл.

Станція Kakadu (KDU). 13 січня 2022 р. тренд X спочатку різко зменшився від 20 до -10 нТл, а потім флюктував біля рівня -10 нТл (рис. 6). Тренд Y поступово зменшувався від 7...8 приблизно до 2 нТл. Тренд Z спочатку (до 06:30) зростав до 14 нТл, потім різко зменшився до 0 нТл, після чого практично не змінювався.

17 січня 2022 р. поведінка усіх трьох трендів якісно була схожою на їхню поведінку 13 січня 2022 р., проте амплітуда флюктуацій зросла до 2...4 нТл.

У день вибуху вулкана тренд X спочатку зменшився від -10 до -20 нТл, потім він до 14:00 збільшувався від -20 до 3 нТл. В інтервалі часу 14:00—17:00 спостерігався провал у залежності $X(t)$ до -18 нТл. Тренд Y спочатку збільшувався від 5 до 13 нТл, потім зменшувався від 13 до -15 нТл, надалі зростав від -15 до 28...30 нТл, а потім поступово зменшувався від 28...30 до -10 нТл. Тренд Z спочатку збільшувався від 5 до 9 нТл, потім він зменшувався від 9 до -7 нТл, надалі знову зростав від -7 до 14 нТл. Після цього спостерігалось поступове зменшення Z від 14 до -4 нТл.

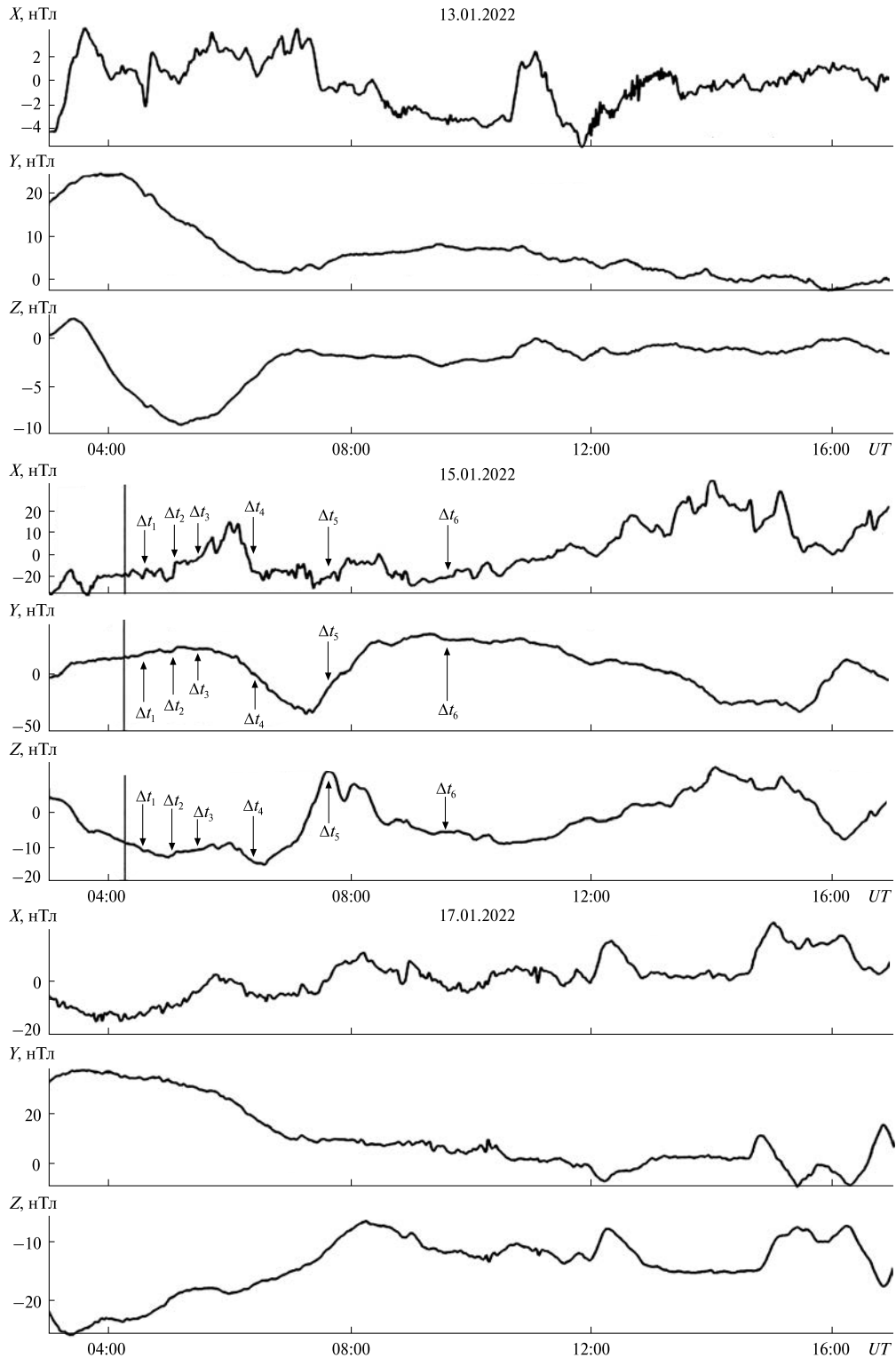


Рис. 4. Часові варіації компонентів геомагнітного поля на станції CNB. Стрілки вказують на моменти часу можливої реакції магнітного поля на вибух вулкана. Вертикальною лінією показано момент вибуху вулкана

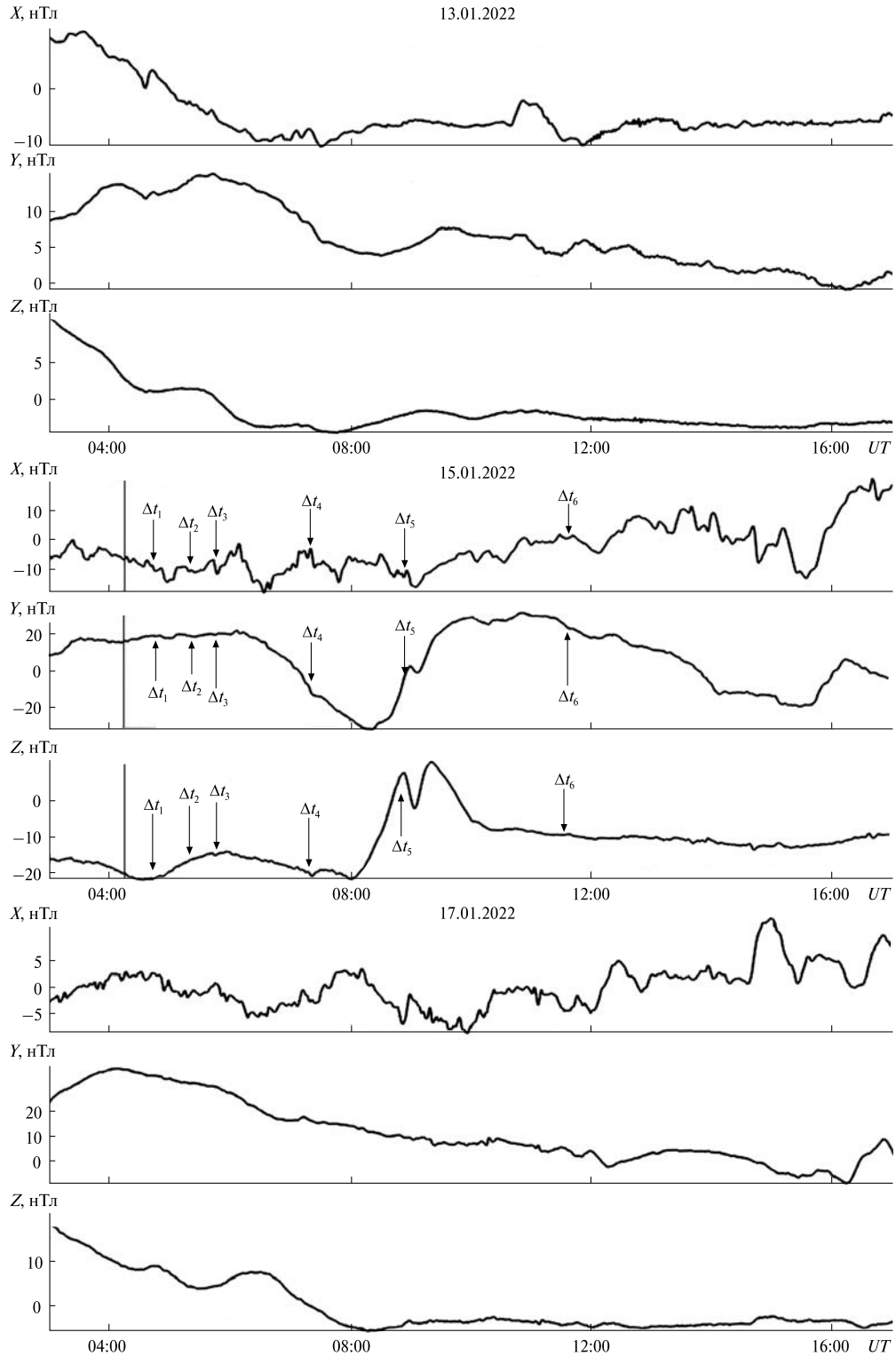


Рис. 5. Часові варіації компонентів геомагнітного поля на станції ASP. Стрілки вказують на моменти часу можливої реакції магнітного поля на вибух вулкана. Вертикальною лінією показано момент вибуху вулкана

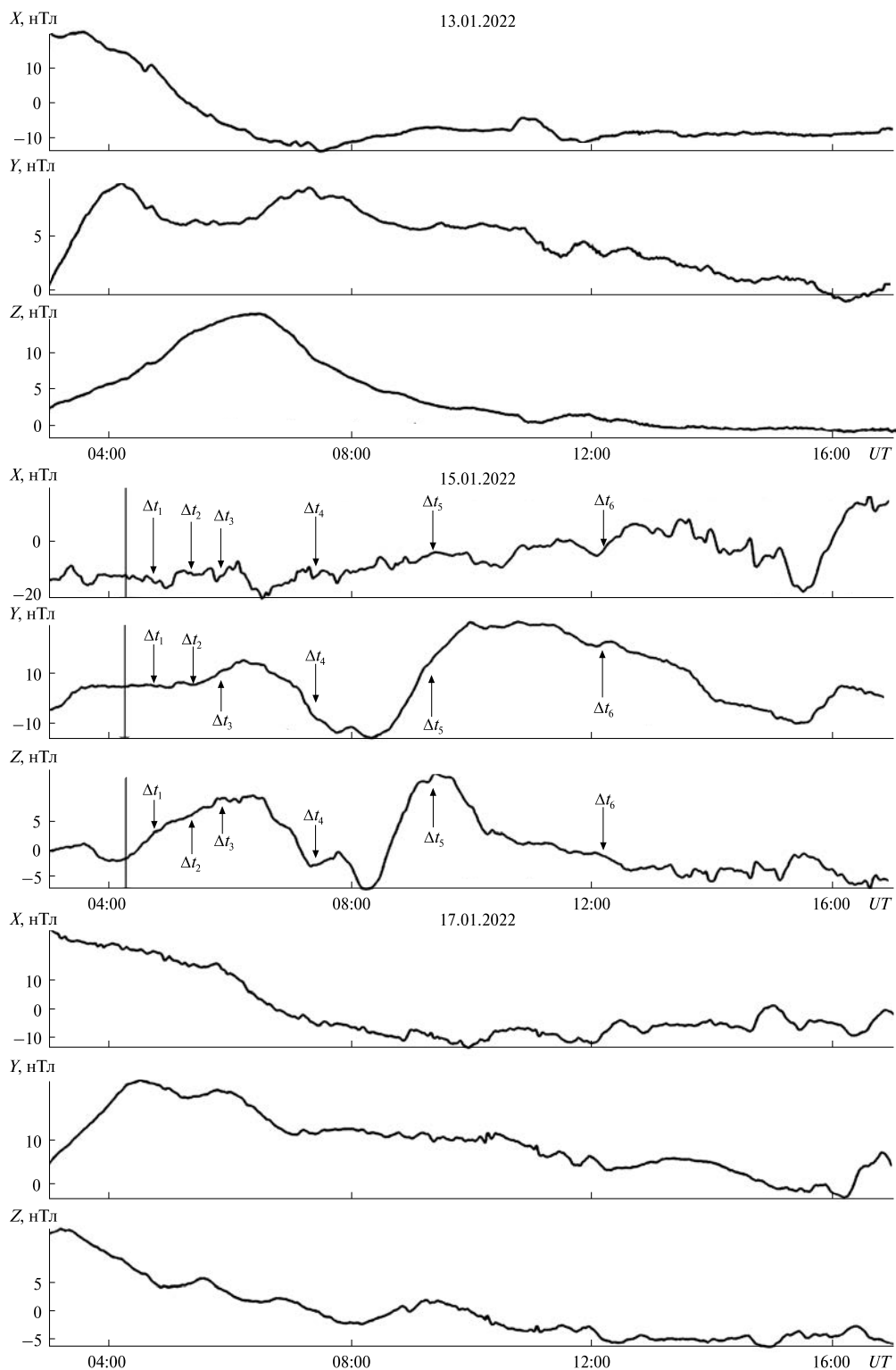


Рис. 6. Часові варіації компонентів геомагнітного поля на станції KDU. Стрілки вказують на моменти часу можливої реакції магнітного поля на вибух вулкана. Вертикальною лінією показано момент вибуху вулкана

На більш-менш плавні зміни усіх компонентів наклалися варіації з амплітудою в одиниці нанотесла.

Станція Gingin (GNG). У контрольний день 13 січня 2022 р. тренд X спочатку різко зменшився від 18 до -5 нТл, надалі він флюктував в околі -5 нТл (рис. 7). Тренд Y , флюктуючи у межах $\pm 3...4$ нТл, поступово зменшувався від 20 до 0 нТл. У інтервалі часу $03:00-09:00$ тренд Z досить різко зменшувався від 27 до -5 нТл, надалі він залишався майже незмінним.

У контрольний день 17 січня 2022 р. тренд X поступово збільшувався від -2 до 10 нТл. Амплітуда флюктуацій рівня X -компонента дорівнювала $\pm 4...10$ нТл. Тренд Y спочатку збільшувався до 30 нТл, надалі поступово зменшувався від 30 до -10 нТл. Амплітуда флюктуацій подекуди сягала $\pm 5...10$ нТл. Тренд Z до $05:30$ збільшувався до 38 нТл, потім до $12:00$ зменшувався до -12 нТл, а надалі майже не змінювався. Амплітуда флюктуацій після $12:00$ становила $\pm 4...5$ нТл.

У день вибуху вулкана варіації всіх компонентів якісно відрізнялися. Після деякого зростання до 10 нТл спостерігалось тривале (до $2.5...5$ год) зменшення рівня усіх компонентів на $10...50$ нТл. Надалі мало місце тривале (до $3...4$ год) збільшення рівня на $15...40$ нТл. На повільні варіації усіх компонентів наклалися варіації з амплітудою $5...9$ нТл.

Станція Learmonth (LRM). 13 січня 2022 р. тренд X стрімко зменшувався в інтервалі часу з $03:30$ до $08:30$ з 29 до -12 нТл, надалі він змінювався несуттєво (рис. 8). При цьому тренд Y зменшувався від 10 до 2 нТл, а тренд Z — від 10 до -3 нТл.

17 січня 2022 р. тренд X сильно флюктував (у межах ± 10 нТл). Тренд до $06:00$ збільшувався, а після цього до $17:00$ зменшувався від 38 до -7 нТл. Амплітуда флюктуацій сягала $\pm 5...6$ нТл. Тренд Z зменшувався від 45 до -10 нТл в інтервалі часу $04:00-10:00$, а потім практично не змінювався.

15 січня 2022 р., у день вибуху вулкана, варіації були суттєво іншими. Після нетривалого збільшення на 10 нТл усіх трендів вони зменшувалися на $20...40$ нТл. Після цього спостерігалось тривале (до $5...7$ год) зростання трендів на $20...50$ нТл. Амплітуда флюктуацій не перевищувала $3...4$ нТл.

Станція Kakioka (KAK). У контрольний день 13 січня 2022 р. тренд X у інтервалі часу $03:00-08:00$ збільшувався від -20 до 5 нТл, а потім поступово зменшувався від 5 до 0 нТл (рис. 9). Тренд Y зменшувався до $05:00$ до -22 нТл, потім збільшувався до 0 нТл до $08:00$, після чого залишався практично незмінним. Тренд Z у інтервалі часу $02:00-06:00$ збільшувався від -20 до 10 нТл, з $07:00$ до $09:00$ він зменшувався від 10 до 0 нТл, а далі майже не змінювався. Величина флюктуацій для всіх компонентів не перевищувала ± 1 нТл.

У контрольний день 17 січня 2022 р. тренд X збільшувався від -10 до 5 нТл, з $08:00$ до $15:00$ спостерігався провал у залежності $X(t)$. З $15:00$ до $17:00$ $X \approx 6$ нТл. Тренд Y спочатку зменшувався до -20 нТл, а потім збільшувався до 0 нТл. Тренд Z зменшувався до $06:40$ до 2 нТл. В інтервалі часу $06:40-12:00$ спостерігався провал від 2 до -2 нТл. Далі $Z \approx 2$ нТл. Амплітуда флюктуацій всіх компонентів сягала $2...3$ нТл.

У день вибуху вулкана рівень флюктуацій усіх компонентів помітно зріс. Після нетривалого зростання від 0 до 2 нТл тренд X спадав з $06:00$ до $10:00$ від 2 до -10 нТл. Далі він впродовж 3 год збільшувався від -10 до 3 нТл. Надалі тренд зменшувався до -18 нТл. Тренд Y також спочатку збільшувався від -12 до 4 нТл, потім впродовж 1.5 год спостерігалось його зменшення. Далі тренд Y збільшувався до $15:00$ до значення 14 нТл. Приблизно з $11:00$ до $15:00$ реєструвалося чітке квазіперіодичне збурення з $T \approx 55...60$ хв і амплітудою 4 нТл. Інші збурення мали амплітуду $1...1.5$ нТл. Тренд Z з $01:00$ до $03:00$ збільшувався від -13 до 2 нТл, потім до $07:00$ залишався майже незмінним. З $07:00$ до $13:00$ він зменшувався від 2 до -5 нТл, а потім тренд зростав. Амплітуда флюктуацій становила 1 нТл.

Станція Shumagin (SHU). 13 січня 2022 р. приблизно з $03:30$ до $17:00$ тренд X зменшувався від 6 до $2...3$ нТл (рис. 10). Тренд Y , навпаки, збільшувався від -3 до 3 нТл. Тренд Z зменшувався з $04:00$ до $10:00$ від 5.3 до -1.8 нТл, а потім поступово збільшувався від -1.8 до 2 нТл. Амплітуда флюктуацій усіх компонентів не перевищувала 1 нТл.

17 січня 2022 р. тренд X лежав у межах $0...5$ нТл. Окремі сплески та провали сягали $10...20$ нТл, їхня тривалість не перевищувала 1 год.

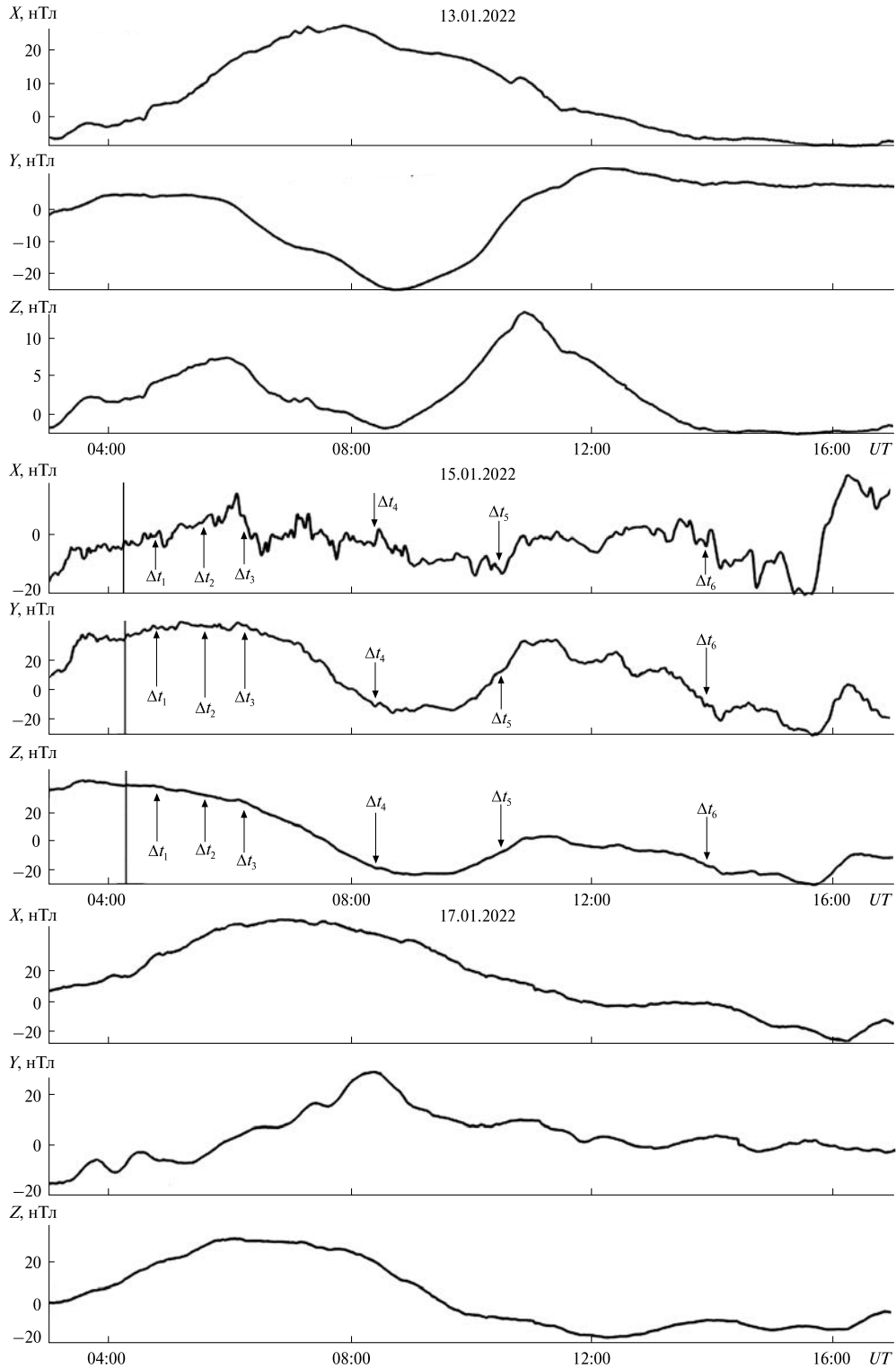


Рис. 7. Часові варіації компонентів геомагнітного поля на станції GNG. Стрілки вказують на моменти часу можливої реакції магнітного поля на вибух вулкана. Вертикальною лінією показано момент вибуху вулкана

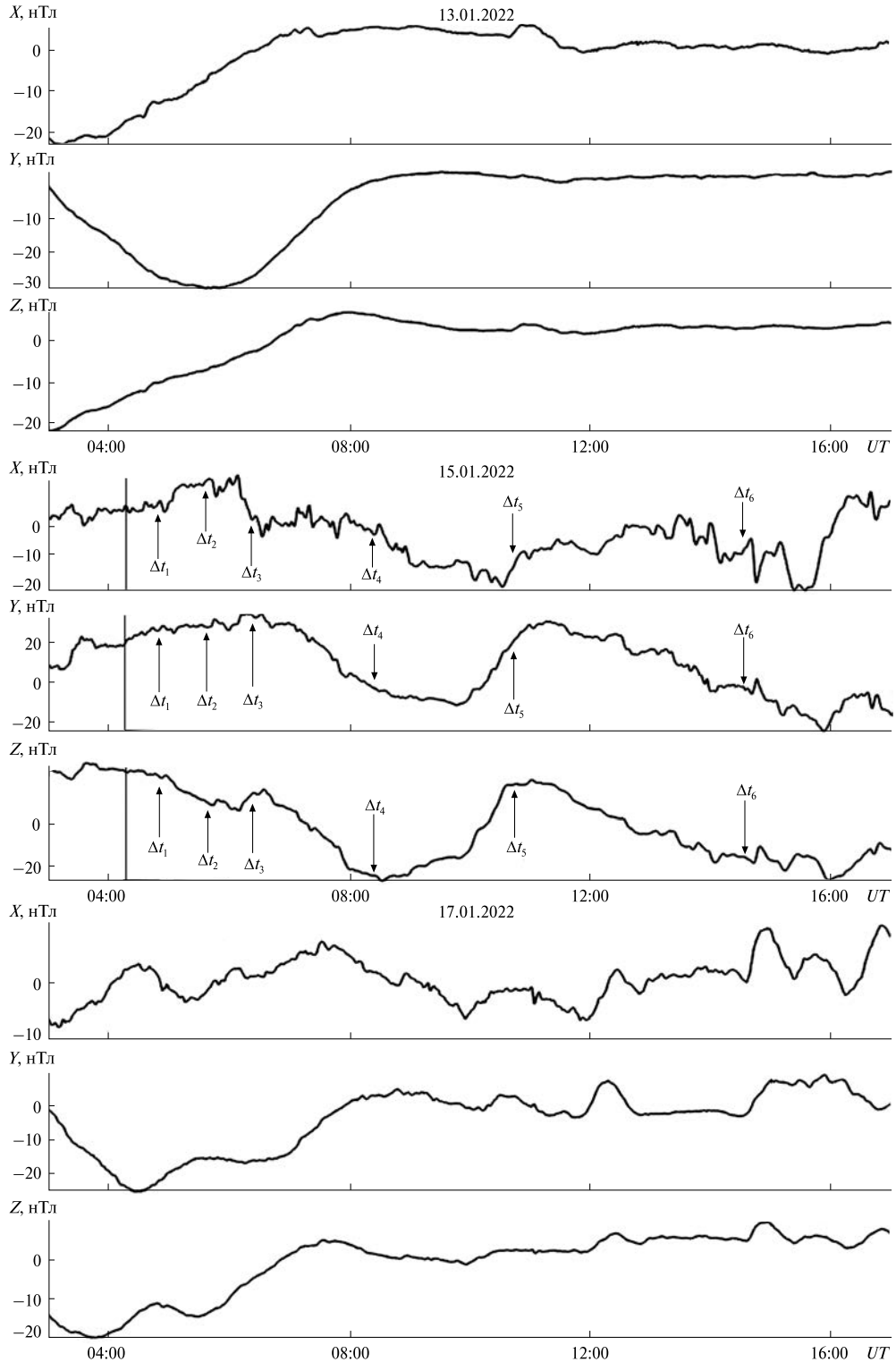


Рис. 8. Часові варіації компонентів геомагнітного поля на станції LRM. Стрілки вказують на моменти часу можливої реакції магнітного поля на вибух вулкана. Вертикальною лінією показано момент вибуху вулкана

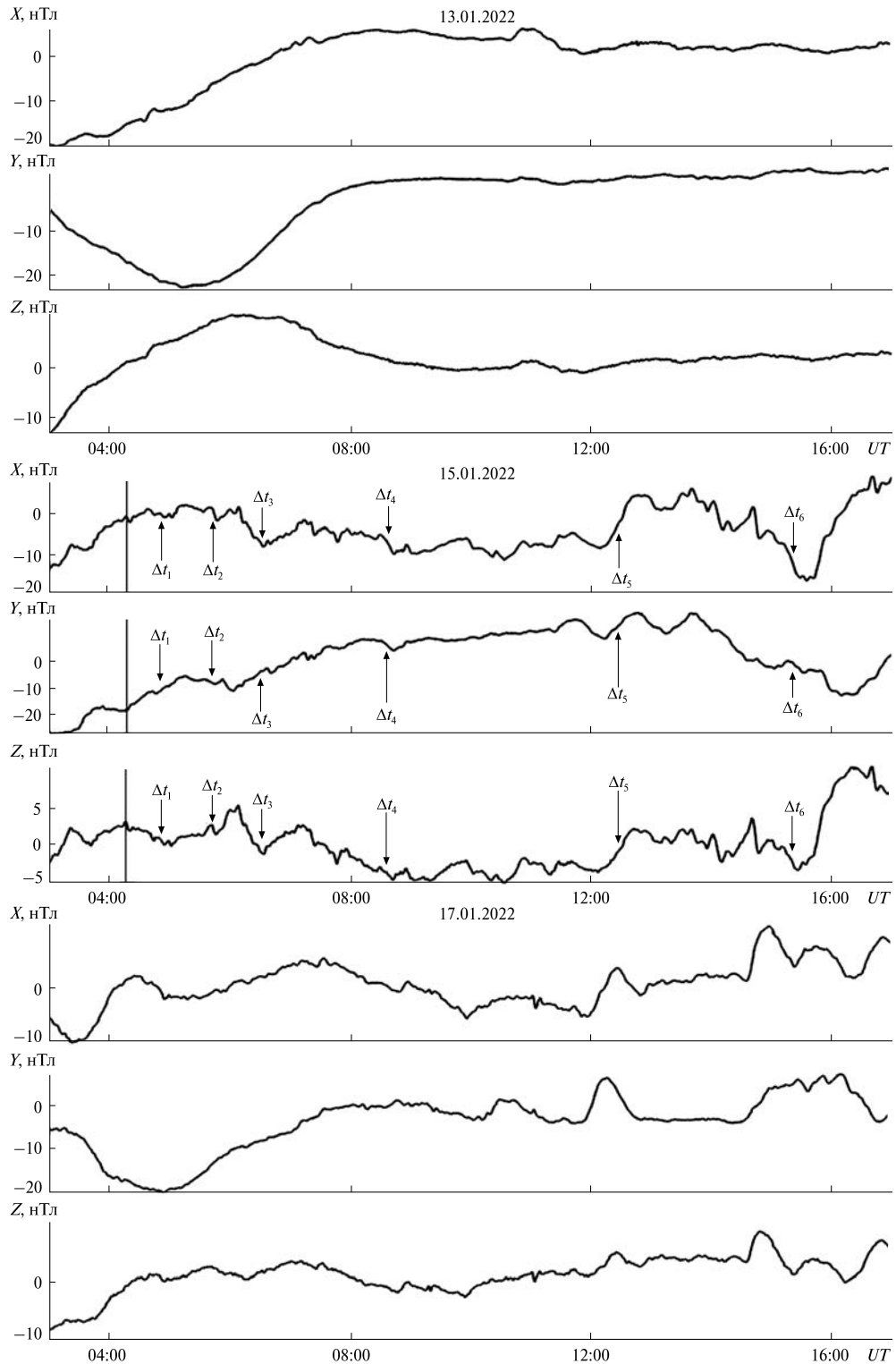


Рис. 9. Часові варіації компонентів геомагнітного поля на станції КАК. Стрілки вказують на моменти часу можливої реакції магнітного поля на вибух вулкана. Вертикальною лінією показано момент вибуху вулкана

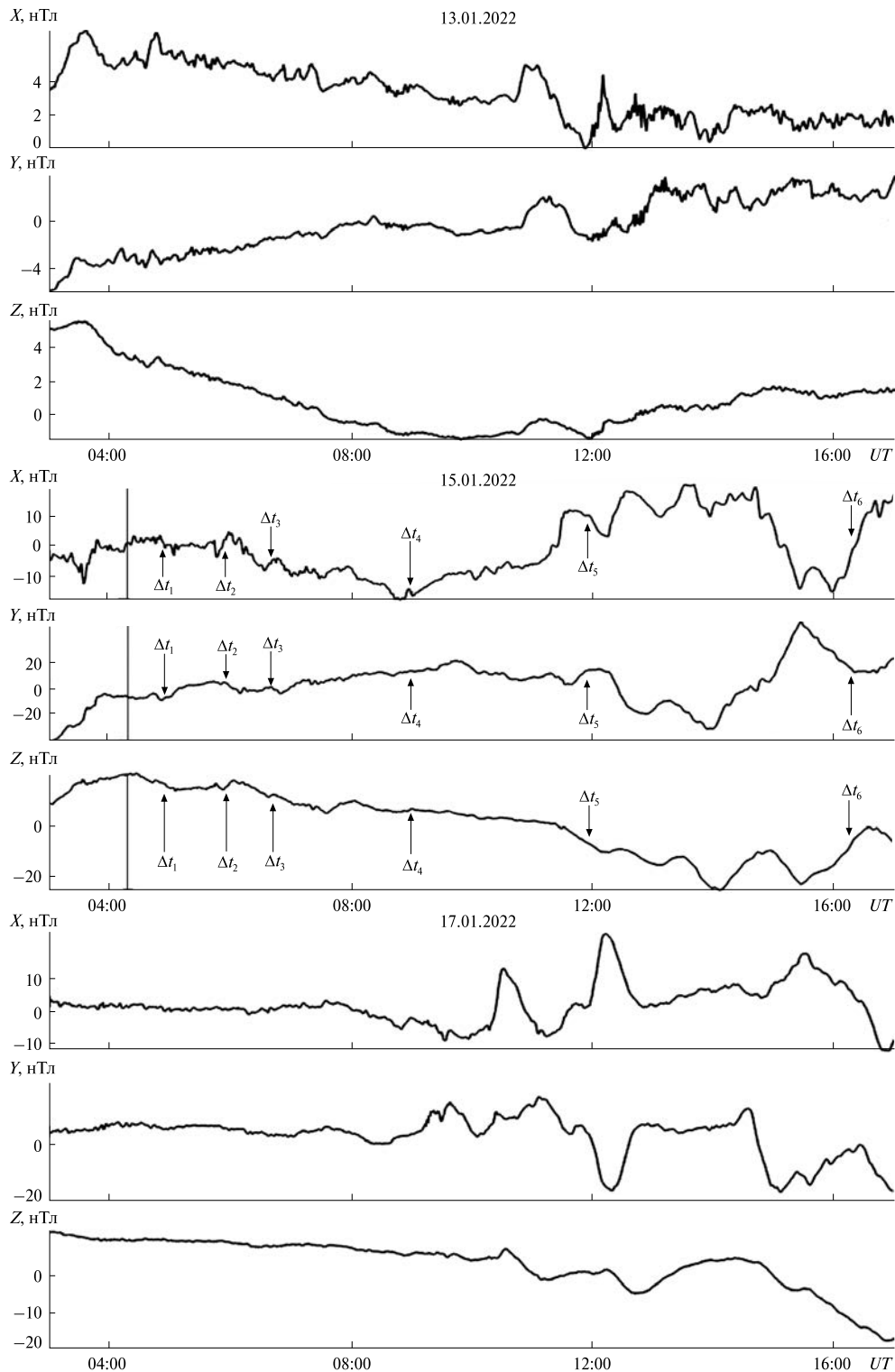


Рис. 10. Часові варіації компонентів геомагнітного поля на станції SHU. Стрілки вказують на моменти часу можливої реакції магнітного поля на вибух вулкана. Вертикальною лінією показано момент вибуху вулкана

Значні флуктуації (до 10...20 нТл) спостерігалися в часових варіаціях Y - і Z -компонентів.

У день вибуху вулкана тренд X спочатку з 06:00 до 09:00 зменшувався від 0 до -18 нТл, потім він збільшувався від -18 до 15 нТл. З 15:00 до 17:00 спостерігався провал у залежності $X(t)$ від 15 до -15 нТл. В інтервалі часу 11:00—13:30 мало місце чітке коливання рівня з амплітудою 4 нТл та періодом $T \approx 50$ хв. Тренд Y з 04:00 до 09:40 збільшувався від -5 до 20 нТл, потім спостерігалася його падіння до -30 нТл. Воно продовжувалося до 15:00. Далі мав місце сплеск рівня до 50 нТл, який тривав приблизно 1.5 год. Тренд Z з 04:00 до 11:00 зменшувався від 20 до 0 нТл. З 11:00 до 16:00 реєструвався провал в $X(t)$ від 0 до -20 нТл. З 12:00 до 17:00 мало місце чітке коливання з амплітудою 6...7 нТл і періодом приблизно 80 хв.

Станція Dalat (DLT). 13 січня 2022 р. спостерігалися незначні (одиниці нанотесла) флуктуації рівня всіх компонентів (рис. 11).

17 січня 2022 р. з 04:00 до 13:00 тренд X зменшувався від 63 до 13 нТл, надалі спостерігалися його флуктуації у межах 4...6 нТл. Тренд Y з 02:00 до 03:00 збільшувався від -2 до 12 нТл. Потім мало місце його стрімке падіння від 12 до -7 нТл. Далі рівень Y -компонента флюктував у межах $\pm 2...3$ нТл. Тренд Z в інтервалі часу 00:00—04:00 зменшувався від 0 до -32 нТл. Далі мало місце його стрімке зростання до 2 нТл, на зміну якому прийшло поступове зменшення до 5 нТл.

У день вибуху вулкана варіації всіх компонентів були значними. З 06:00 до 11:00 мало місце бухтоподібне зменшення тренду X від 20 до -27 нТл. Наступний провал у залежності $X(t)$ спостерігався з 13:00 до 17:00. Значні і тривалі збурення Y реєструвалися з 04:00 до 17:00. Тренд Z з 04:20 до 05:30 збільшувався від -9 до 4 нТл, потім мав місце провал від 4 до 2 нТл. Йому на зміну прийшло зростання Z від 2 до 17 нТл. Далі спостерігалася спочатку стрімке падіння тренду до 0 нТл, а потім повільне зменшення від 0 до -5 нТл. Близько 15:30 знову спостерігалися помітні (~5 нТл) варіації тренду.

Станція Cocos (Keeling) Islands (CKI). У контрольний день 13 січня 2022 р. приблизно до 05:00 мало місце зростання тренду до 23 нТл,

після чого спостерігалася стрімке падіння від 23 до -2 нТл, а потім і більш повільне падіння від -2 до -9 нТл (рис. 12). Тренд Y з 01:00 до 04:45 спочатку збільшувався від -18 до 2 нТл, а потім до 06:00 зменшувався до -9 нТл. З 06:00 до 10:00 мало місце стрімке зростання Y від -9 до 16 нТл, яке змінилося поступовим зменшенням тренду до 3 нТл о 17:00. Тренд Z з 03:30 до 06:30 зменшувався від 5.5 до -3 нТл. Значні сплески Z від -2.5 до 1.9 нТл та від -2 до 1.2 нТл мали місце з 09:00 до 12:00 та з 12:00 до 17:00.

У контрольний день 17 січня 2022 р. з 03:00 до 05:00 тренд X дорівнював приблизно 30 нТл. З 06:00 до 10:00 спостерігалася стрімке зменшення тренду від 38 до -8 нТл. Незначні (від 10 до 15 нТл) сплески відмічалися з 12:00 до 16:00 та з 16:00 до 19:00. Тренд Y різко збільшувався з 03:00 до 06:15 від -38 до 18 нТл, а потім, флюктуючи, поступово зменшувався від 18 до 0 нТл о 17:00. Тренд Z стрімко збільшувався у інтервалі часу 00:00—05:50 від -16 до 18 нТл, далі він впродовж трьох годин різко зменшувався. Після 09:00 мали місце флуктуації Z у межах $\pm 2...3$ нТл.

У день вибуху вулкана варіації усіх компонентів значно підсилювались. Тренд X до 05:30 спочатку збільшувався, а з 06:00 різко зменшувався від 17 до -12 нТл. Після 10:00 до 12:00 відмічалася його зростання від -12 до 0 нТл. З 13:00 до 17:00 мав місце провал у тренді від 0 до -30 нТл. Тренд Y з 04:00 до 07:40 збільшувався від 4 до 18 нТл. З 07:40 до 12:30 спостерігалася бухтоподібне зменшення Y від 18...20 до 0 нТл. Після 12:30 реєструвалося зменшення тренду Y до -7 о 17:00. Тренд Z в інтервалі часу 03:30—09:30 різко спадав від 8 до -18 нТл. З 09:30 до 15:00 мав місце сплеск у залежності $Z(t)$ від -18 до 4 нТл. Ще один сплеск Z до 6 нТл спостерігався від 15:00 до 17:00.

Станція Gan International Airport (GAN). 13 січня 2022 р. тренд X спочатку збільшувався від 03:00 до 07:00 від -2 до 27 нТл, а потім зменшувався в інтервалі часу 08:00—17:00 від 27 до -9 нТл (рис. 13). Тренд Y з 02:00 до 04:00 збільшувався від -7 до 4 нТл, потім з 06:00 до 08:45 різко зменшувався від 4 до -26 нТл. В інтервалі часу з 09:00 до 11:45 тренд збільшувався від -26 до 12 нТл. Надалі він поступово зменшувався від 12

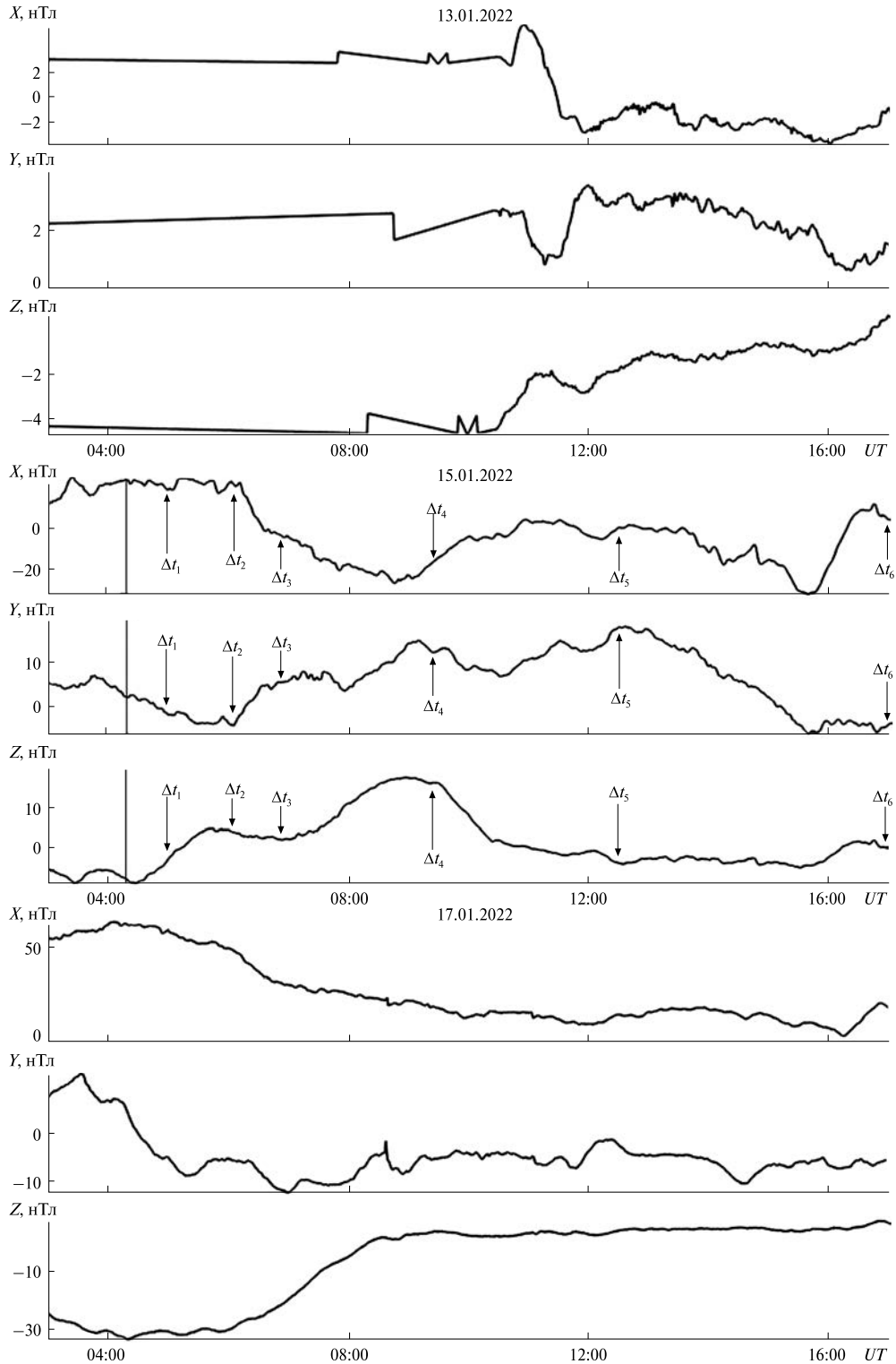


Рис. 11. Часові варіації компонентів геомагнітного поля на станції DLT. Стрілки вказують на моменти часу можливої реакції магнітного поля на вибух вулкана. Вертикальною лінією показано момент вибуху вулкана

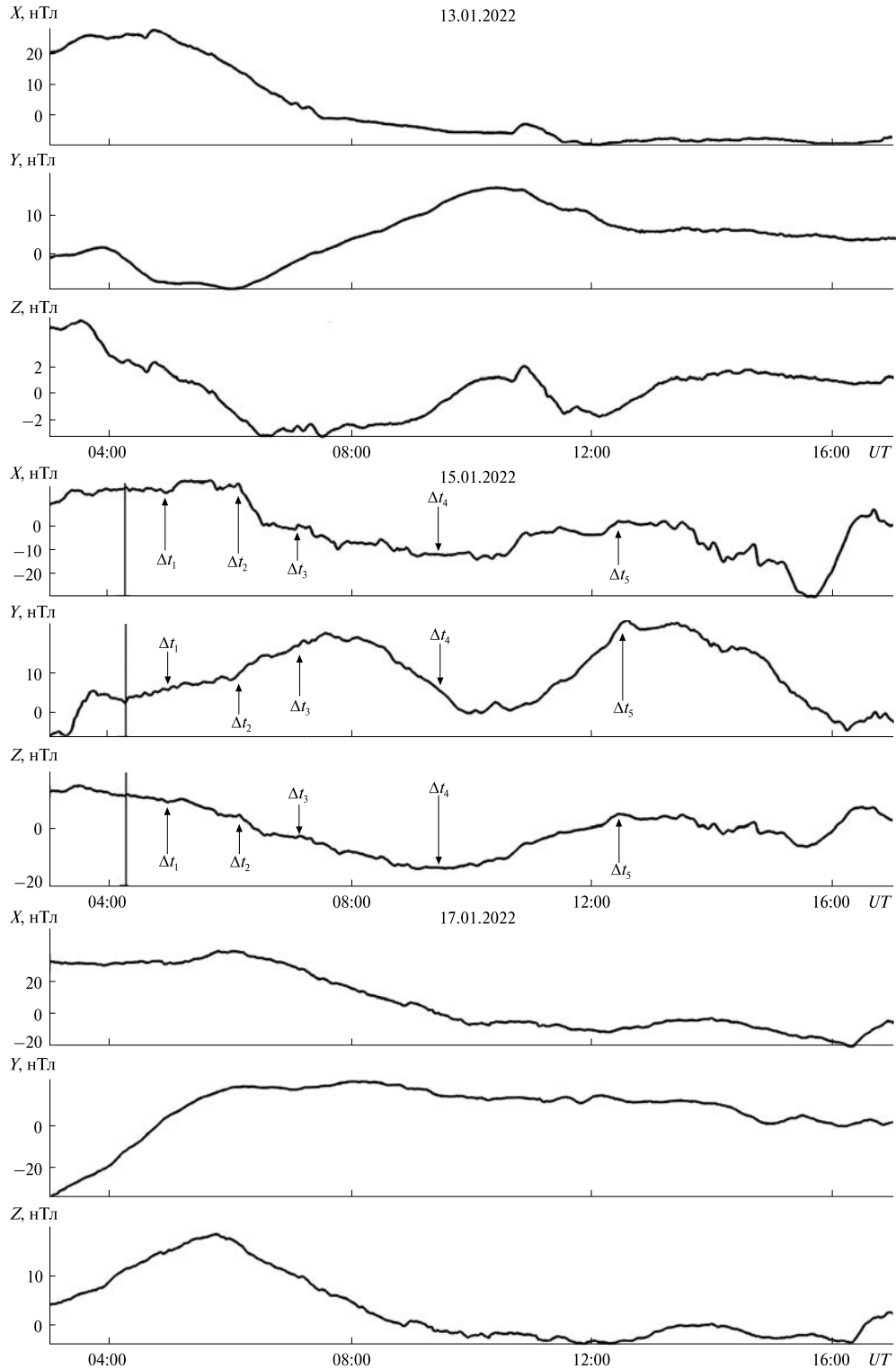


Рис. 12. Часові варіації компонентів геомагнітного поля на станції СКІ. Стрілки вказують на моменти часу можливої реакції магнітного поля на вибух вулкана. Вертикальною лінією показано момент вибуху вулкана

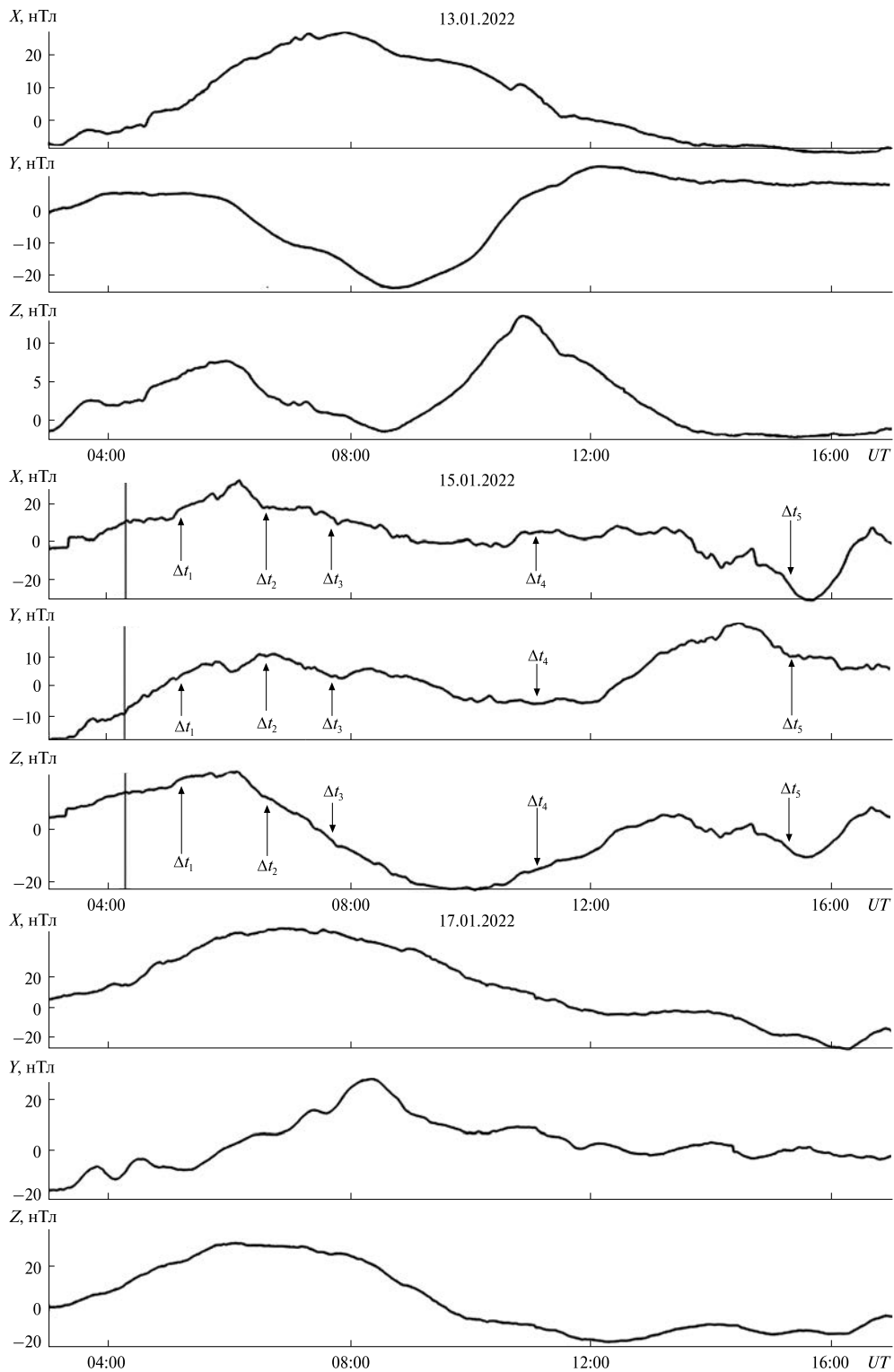


Рис. 13. Часові варіації компонентів геомагнітного поля на станції GAN. Стрілки вказують на моменти часу можливої реакції магнітного поля на вибух вулкана. Вертикальною лінією показано момент вибуху вулкана

до 5 нТл о 18:00. У тренді \bar{Z} спостерігалось два значних сплески: з 03:00 до 08:25 від 2 до 7 нТл та з 08:30 до 14:00 від 3 до 13 нТл.

17 січня 2022 р. тренд X з 02:00 до 07:00 збільшувався від -15 до 50 нТл, потім до 12:00 він зменшувався до -10 нТл. Далі мали місце флуктуації X у межах ± 5 нТл. У тренді Y , крім потужного (від -7 до 28 нТл) сплеску в інтервалі часу 05:00—12:00, спостерігалися більш короточасні ($\sim 1...2$ год) сплески величиною до $4...5$ нТл. У тренді Z з 03:00 до 10:00 мав місце потужний сплеск від $-5...-10$ до 30 нТл. Після 10:00 реєструвалися відносно невеликі (до $5...6$ нТл) сплески.

У день вибуху вулкана варіації всіх компонентів помітно підсилилися. Тренд X від 00:00 до 06:00 збільшувався від -40 до 10 нТл. З 06:00 до 10:30 значення X спадали від 10 до 0 нТл. Крім флуктуацій у межах ± 5 нТл, в інтервалі часу з 13:00 до 16:30 спостерігався провал від 1 до -30 нТл. Тренд Y з 02:30 до 06:00 збільшувався від -23 до 10 нТл. З 06:00 до 14:00 мав місце глибокий провал з $10...20$ до -6 нТл. Після 14:00 й до 17:00 реєструвалося зменшення Y від 20 до 0 нТл. Тренд Z спочатку до 06:00 збільшувався до 20 нТл. Йому на зміну прийшов глибокий провал (від 20 до -22 нТл), що тривав близько 7 год. Далі спостерігалися помірні (до $10...15$ нТл) варіації тренду Z .

СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ВАРІАЦІЙ РІВНЯ ГЕОМАГНІТНОГО ПОЛЯ

Часи запізнювання можливої реакції магнітного поля на вибух вулкана та видимі швидкості для шести груп характерних варіацій компонентів геомагнітного поля наведено у табл. 2. Найбільш чітко варіації спостерігалися для Y -компонента. За даними табл. 2 побудовано кореляційні поля «час запізнювання — відстань до вулкана» (рис. 14). Деякий розкид точок свідчить, зокрема, про те, що поширення збурень відбувалося не строго в радіальних напрямках. Далі кореляційні поля апроксимовано наступними лінійними залежностями:

$$\Delta t_1 = 4.157r + 5.1, \quad \sigma = 0.32 \text{ хв}, \quad R^2 = 0.9995, \quad (1)$$

$$\Delta t_2 = 11.14r + 4.6, \quad \sigma = 0.55 \text{ хв}, \quad R^2 = 0.9998, \quad (2)$$

$$\Delta t_3 = 16.62r + 5.0, \quad \sigma = 1.7 \text{ хв}, \quad R^2 = 0.9990, \quad (3)$$

$$\Delta t_4 = 33.13r + 4.6, \quad \sigma = 3.0 \text{ хв}, \quad R^2 = 0.9991, \quad (4)$$

$$\Delta t_5 = 53.11r + 6.1, \quad \sigma = 9.98 \text{ хв}, \quad R^2 = 0.9969, \quad (5)$$

$$\Delta t_6 = 83.02r + 9.0, \quad \sigma = 3.3 \text{ хв}, \quad R^2 = 0.9998. \quad (6)$$

Тут відстань дається у мегаметрах, а час — у хвилинах. За $r \rightarrow 0$ маємо $\Delta t_0 \approx 4.6...9.0$ хв. Такий час необхідний для поширення хвилі до іоносфери, точніше до динамо-області.

Із залежностей (1)—(6) і співвідношення

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

Таблиця 2. Значення часу запізнювання та вдовоної швидкості збурень геомагнітного поля

Станція	Δt_1 , хв	v'_1 , м/с	Δt_2 , хв	v'_2 , м/с	Δt_3 , хв	v'_3 , м/с	Δt_4 , хв	v'_4 , м/с	Δt_5 , хв	v'_5 , м/с	Δt_6 , хв	v'_6 , м/с
API	8.5	4000	14	1560	19	1000	33	500	50	311	75	200
EYR	17	3875	38	1410	50	1033	97	505	155	310	245	194
CNB	21	4000	47	1500	73	933	130	507	208	312	322	200
ASP	27	3950	63	1500	92	1000	185	482	282	313	440	200
KDU	28	4060	67	1500	98	1004	190	505	305	311	475	199
GNG	34	4000	82	1500	119	1007	250	469	372	312	580	200
LRM	35	4018	85	1500	125	1000	245	500	390	313	615	198
KAK	38	3967	90	1540	135	1007	260	513	490	315	665	198
SHU	40	4070	100	1501	147	1004	285	509	460	313	720	199
DLT	43	3976	106	1501	156	1001	305	504	488	313	760	200
CKI	44	3978	110	1477	170	913	310	509	500	313	780	200
GAN	56	3990	140	1507	208	1002	410	502	660	311	1020	200

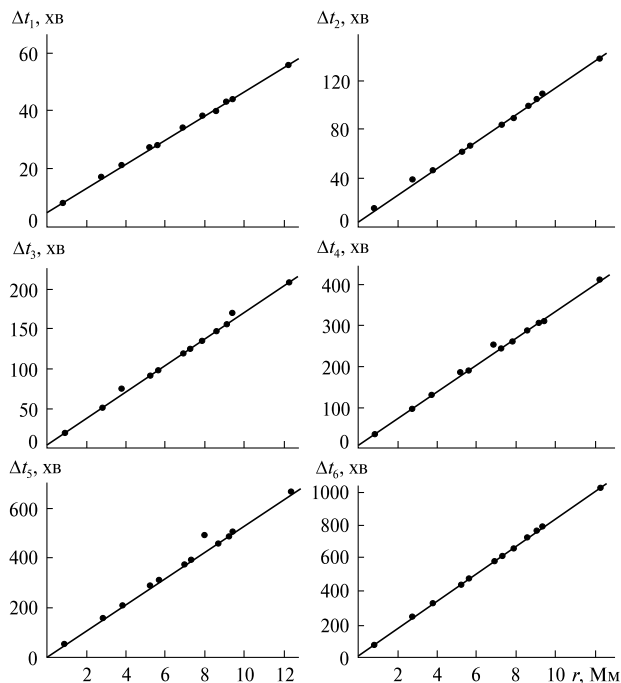


Рис. 14. Кореляційні поля «час запізнювання — відстань до вулкана»

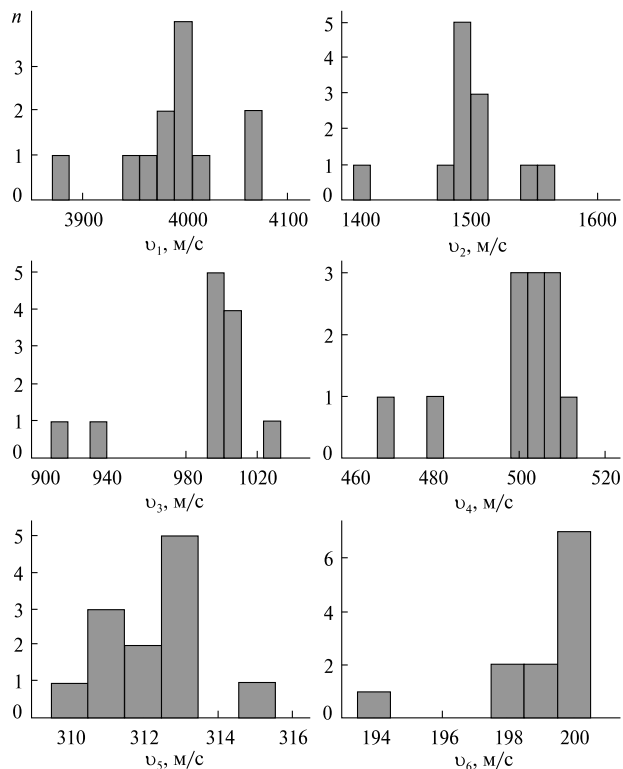


Рис. 15. Розподіл горизонтальних позірних швидкостей збурень, що супроводжували вибух вулкана Тонга

отримано такі середні швидкості: $v_1 \approx 4$ км/с, $v_2 \approx 1.5$ км/с, $v_3 \approx 1$ км/с, $v_4 \approx 503$ м/с, $v_5 \approx 314$ м/с та $v_6 \approx 201$ м/с. Ці значення швидкостей близькі до значень, що впливають із гістограм (рис. 15).

Видиму горизонтальну швидкість поширення збурень можна оцінити із співвідношення

$$v = \frac{r}{\Delta t - \Delta t_0},$$

де Δt_0 — час поширення вибухової хвилі до іоносферної динамо-області.

ОБГОВОРЕННЯ

Станція АРІ знаходиться найближче до вулкана Тонга. Перше збурення рівня Y-компонента мало місце в інтервалі часу 04:21—04:57, тобто час запізнювання дорівнював $\Delta t_0 \approx 6$ хв. Такий час необхідний для поширення стоячої акустичної хвилі до динамо-області іоносфери, де відбулася генерація цього магнітного ефекту. Важливо, що період збурення $T_0 \approx 4...4.5$ хв, тривалість

$\Delta T_0 \approx 32...36$ хв. Все це вказує на те, що магнітний ефект був згенерований за рахунок акустичного резонансу у порожнині Земля — динамо-область атмосфери, що виникав у полі стоячої акустичної хвилі від вибуху вулкана.

Оскільки станція АРІ знаходиться на відстані від вулкана $r \approx 840$ км, то радіус r_L магнітної силової трубки становить не менше 1000 км. Це означає, що магнітний ефект від акустичного резонансу міг спостерігатися і у магнітоспряженій області на відстанях порядку 1000 км від центра магнітної силової трубки. Дійсно, у магнітоспряженій області було виявлено коливання з тим же періодом T_0 та амплітудою 0.2 нТл тривалістю ΔT_0 [28, 43]. Важливо, що час запізнювання становив $\Delta t_0 \approx 6$ хв. Це означає, що збурення від станції АРІ до станції НОН передавалося магнітною силовою трубкою завдовжки 10 Мм зі швидкістю Альвена $v_A \approx 1$ Мм/с за час порядку 10 с, що набагато менше за Δt_0 . Додамо, що станція НОН знаходиться на відстані від центра

магнітної силової трубки порядку 900 км, що менше від r_L .

На збурення, зумовлене акустичним резонансом, наклалися й інші збурення з іншими часами запізнювання (див. табл. 2). Всього таких збурень могло бути шість. Як видно з табл. 2, для інших станцій також мало місце шість груп збурень геомагнітного поля. Важливо, що зі збільшенням відстані від вулкана час запізнювання зростає. Це, безперечно, свідчить на користь того, що збурення геомагнітного поля викликане саме вибухом вулкана. Проте потрібно мати на увазі, що час запізнювання реакції магнітного поля на вибух вулкана у період суббурі визначається не дуже надійно.

Значення швидкостей були близькі до 4, 1.5, 1 км/с та 500, 313 і 200 м/с. Усі ці швидкості мають певний фізичний сенс. Перша та друга із них відповідають швидкості повільних МГД-хвиль [1]. Приблизно таку ж швидкість спостерігали під час пусків потужних ракет [3, 23]. Швидкість $v_3 \approx 1$ км/с характерна для вибухових хвиль. Саме таку швидкість виявили автори робіт [6, 24, 33, 34] під час вибуху вулкана Тонга. Швидкість v_4 — це швидкість атмосферних гравітаційних хвиль на висотах іоносфери [17, 42]. Швидкість $v_5 \approx 313$ м/с має хвиля Лемба, яка генерується при дуже значних енерговиділеннях (≥ 10 Мт ТНТ) та поширюється вздовж поверхні Землі практично без загасання та частково проникаючи на іоносферні висоти [5, 29, 32, 45]. Найменша швидкість $v_6 \approx 200$ м/с, мабуть, пов'язана з середньою швидкістю цунамі, яке після вибуху вулкана спостерігалось багатьма дослідниками та генерувало збурення в іоносфері [16, 37, 40, 41].

Таким чином, описані збурення геомагнітного поля, що мали місце 15 січня 2022 р. та були відсутні у контрольні дні, швидше за все, були викликані вибухом вулкана. За перенесення збурень відповідали хвилі різної фізичної природи: швидкі та повільні МГД-хвилі, вибухова хвиля,

атмосферна гравітаційна хвиля, хвиля Лемба та іоносферна хвиля від цунамі.

ГОЛОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Аналіз результатів вимірювань на 12 магнітних станціях мережі INTERMAGNET показав таке.

1. У день вибуху вулкана Тонга варіації рівня усіх компонентів геомагнітного поля були більш немонотонними, ніж у контрольні дні. Більшим був і рівень флуктуацій. Все це свідчило про те, що вибух вулкана призвів до реєстрованого магнітного ефекту.

2. Збурення геомагнітного поля мало різні часи запізнювання. Виділено шість основних груп збурень. Важливо, що для кожної групи час запізнювання збільшувався при збільшенні відстані від вулкана до місця реєстрації.

3. Оцінено удавану швидкість поширення збурення для кожної групи. Виявлено такі швидкості: 4, 1.5, 1 км/с та 500, 313, 200 м/с. Перші дві швидкості властиві повільним МГД-хвилям, третя — вибуховій хвилі, четверта — атмосферній гравітаційній хвилі, п'ята — хвилі Лемба, а шоста — цунамі.

4. На найближчій станції АРІ також спостерігався магнітний ефект, згенерований за рахунок акустичного резонансу у полі стоячої акустичної хвилі. Період становив близько 4...4.5 хв, амплітуда — 2 нТл, а тривалість — 32...36 хв.

Автор вдячний М. Голуб за допомогу в обробці даних спостережень, а Є. Жданку за допомогу в оформленні рукопису.

Робота виконувалась за часткової підтримки держбюджетних НДР, заданих МОН України (номери держресурсації 0121U109881, 0121U109882 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»).

ЛІТЕРАТУРА

1. Сорокин В. М., Федорович Г. В. *Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме*. Москва: Энергоатомиздат, 1982. 135 с.
2. Черногор Л. Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2008. **48**, № 5. С. 681—702.
3. Черногор Л. Ф. *Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет: Монография*. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2009. 386 с.
4. Черногор Л. Ф. *Физика и экология катастроф: Монография*. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2012. 556 с.
5. Черногор Л. Ф. Фізичні ефекти у системі Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера, викликані потужним вибухом вулкана Тонга 15 січня 2022 р. *Космічна наука і технологія*. 2023. **29**, № 2. С. 54—77.
6. Черногор Л. Ф. Варіації повного електронного вмісту в іоносфері, викликані вибухом вулкана Тонга 15 січня 2022 р. *Космічна наука і технологія*. 2023. **29**, № 3. С. 67—87.
7. Черногор Л. Ф., Голуб М. Ю. Великомасштабні збурення геомагнітного поля, що супроводжували потужний вибух вулкана Тонга 15 січня 2022 р. *Вісн. Харків. нац. ун-ту ім. В. Н. Каразіна. Сер. «Радіофізика та електроніка»*. 2023. № 37. С. 33—48.
8. Черногор Л. Ф., Милованов Ю. Б. Область зниженої концентрації електронів у іоносфері, утвореної вибухом вулкана Тонга 15 січня 2022 р. *Кінематика і фізика небес. тіл*. 2023. 39, № 4. С. 34—54.
9. Черногор Л. Ф., Милованов Ю. Б., Дорохов В. Л. Іоносферні ефекти ударної хвилі, згенерованої вибухом вулкана Тонга 15 січня 2022 р. *Вісн. Харків. нац. ун-ту ім. В. Н. Каразіна. Сер. «Радіофізика та електроніка»*. 2023. № 37.
10. Черногор Л. Ф., Шевелев М. Б. Статистичні характеристики вибухових хвиль у атмосфері, згенерованих супервулканом Тонга 15 січня 2022 р. *Космічна наука і технологія*. 2023. 29, № 6.
11. Aa E., Zhang S.-R., Erickson P. J., Vierinen J., Coster A. J., Goncharenko L. P., Spicher A., Rideout W. Significant Ionospheric Hole and Equatorial Plasma Bubbles After the 2022 Tonga Volcano Eruption. *Space Weather*. 2022. **20**, № 7. id:e2022SW003101. DOI:10.1029/2022SW003101
12. 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. Pronounced Suppression and X-Pattern Merging of Equatorial Ionization Anomalies After the 2022 Tonga Volcano Eruption. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2022. **127**, № 6. id:e2022JA030527. DOI:10.1029/2022JA030527
13. Adushkin V. V., Rybnov Y. S., Spivak A. A. Wave-related, electrical, and magnetic effects due to the January 15, 2022 catastrophic eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano. *J. Volcanolog. Seismol.* 2022. **16**, № 4, P. 251—263. DOI:10.1134/S0742046322040029
14. Astafyeva E., Maletckii B., Mikesell T. D., Munaibari E., Ravanelli M., Coisson P., Manta F., Rolland L. The 15 January 2022 Hunga Tonga eruption history as inferred from ionospheric observations. *Geophys. Res. Lett.* 2022. **49**, № 10. id:e2022GL098827. DOI:10.1029/2022GL098827
15. Burt S. Multiple airwaves crossing Britain and Ireland following the eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai on 15 January 2022. *Weather. Special Issue: The January 2022 eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai*. 2022. **77**, № 3. P. 76—81. DOI:10.1002/wea.4182
16. Carvajal M., Sepúlveda I., Gubler A., Garreaud R. Worldwide signature of the 2022 Tonga volcanic tsunami. *Geophys. Res. Lett.* 2022. **49**, № 6. id:e2022GL098153. DOI:10.1029/2022GL098153
17. Chen C.-H., Zhang X., Sun Y.-Y., Wang F., Liu T.-C., Lin C.-Y., Gao Y., Lyu J., Jin X., Zhao X., Cheng X., Zhang P., Chen Q., Zhang D., Mao Z., Liu J.-Y. Individual Wave Propagations in Ionosphere and Troposphere Triggered by the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Underwater Volcano Eruption on 15 January 2022. *Remote Sensing*. 2022. **14**, № 9. id:2179. DOI:10.3390/rs14092179
18. Chernogor L. F. 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, 2022. Kyiv, Ukraine. Book of Abstracts*. 2022. P. 12—13.
19. Chernogor L. F. 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, 2022. Kyiv, Ukraine. Book of Abstracts*. 2022. P. 79—80.
20. Chernogor L. F. 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, 2022. Kyiv, Ukraine. Book of Abstracts*. 2022. P. 81—82.
21. Chernogor L. F. 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, 2022. Kyiv, Ukraine. Book of Abstracts*. 2022. P. 89—90.

22. Chernogor L. F. The Tonga super-volcano explosion as a subject of applied physics. *Int. Sci. Conf. "Electronics and Applied Physics", APHYS 2022. 18–22 October, 2022. Kyiv, Ukraine.* 2022. P. 130–131.
23. Chernogor L. F., Blaunstein N. *Radiophysical and Geomagnetic Effects of Rocket Burn and Launch in the Near-the-Earth Environment.* Boca Raton, London, New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013. 542 с.
24. Chernogor L. F., Mylovanov Y. B., Dorohov V. L. 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, 2022. Kyiv, Ukraine. Book of Abstracts.* 2022. P. 83–84.
25. Chernogor L. F., Shevelev M. B. 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, 2022. Kyiv, Ukraine. Book of Abstracts.* 2022. P. 85–86.
26. 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. Impacts of the January 2022 Tonga Volcanic Eruption on the Ionospheric Dynamo: ICON-MIGHTI and Swarm Observations of Extreme Neutral Winds and Currents. *Geophys. Res. Lett.* 2022. **49**, № 9, id:e2022GL098577. DOI:10.1029/2022GL098577
27. 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 Appl. Geophys.* 2022. **179**. P. 1549–1560. DOI:10.1007/s00024-022-03058-0
28. Iyemori T., Nishioka M., Otsuka Y. et al. A confirmation of vertical acoustic resonance and field-aligned current generation just after the 2022 Hunga Tonga Hunga Ha'apai volcanic eruption. *Earth Planets Space.* 2022. **74**. id:103. DOI:10.1186/s40623-022-01653-y
29. Kubota T., Saito T., Nishida K. Global fast-traveling tsunamis driven by atmospheric Lamb waves on the 2022 Tonga eruption. *Science.* 2022. **377**, № 6601. P. 91–94. DOI:10.1126/science.abo4364
30. Kulichkov S. N., Chunchuzov I. P., Popov O. E., Gorchakov G. I., Mishenin A. A., Perepelkin V. G., Bush G. A., Skorokhod A. I., Vinogradov Yu. A., Semutnikova E. G., Šepić J., Medvedev I. P., Gushchin R. A., Kopeikin V. M., Belikov I. B., Gubanova D. P., Karpov A. V., Tikhonov A. V. Acoustic-Gravity Lamb Waves from the Eruption of the Hunga-Tonga-Hunga-Hapai Volcano, Its Energy Release and Impact on Aerosol Concentrations and Tsunami. *Pure and Appl. Geophys.* 2022. **179**. P. 1533–1548. DOI:10.1007/s00024-022-03046-4
31. Le G., Liu G., Yizengaw E., Englert C. R. Intense equatorial electrojet and counter electrojet caused by the 15 January 2022 Tonga volcanic eruption: Space- and ground-based observations. *Geophys. Res. Lett.* 2022. **49**, № 11, id:e2022GL099002. DOI:10.1029/2022GL099002
32. 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. Rapid Conjugate Appearance of the Giant Ionospheric Lamb Wave Signatures in the Northern Hemisphere After Hunga-Tonga Volcano Eruptions. *Geophys. Res. Lett.* 2022. **49**, № 8. id:e2022GL098222. DOI:10.1029/2022GL098222
33. 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. Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga. *Science.* 2022. **377**, № 6601. P. 95–100. DOI:10.1126/science.abo7063
34. 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. Supplementary materials for atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga. *Science.* 2022. **377**, № 6601. DOI:10.1126/science.abo7063
35. Otsuka S. Visualizing Lamb waves from a volcanic eruption using meteorological satellite Himawari-8. *Geophys. Res. Lett.* 2022. **49**, № 8. id:e2022GL098324. DOI:10.1029/2022GL098324

36. Poli P., Shapiro N. M. Rapid characterization of large volcanic eruptions: Measuring the impulse of the Hunga Tonga Ha'apai explosion from teleseismic waves. *Geophys. Res. Lett.* 2022. **49**, № 8. id:e2022GL098123
37. Ramírez-Herrera M. T., 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 Geophys.* 2022. **179**. P. 1117–1137. DOI:10.1007/s00024-022-03017-929
38. Schnepf N. R., Minami T., Toh H., Nair M. C. Magnetic signatures of the 15 January 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcanic eruption. *Geophys. Res. Lett.* 2022. **49**, № 10. id:e2022GL098454.
39. Soares G., Yamazaki Y., Matzka J. Localized geomagnetic disturbance due to ionospheric response to the Hunga Tonga eruption on January 15, 2022. *Geophys. Res. Lett.* 2022. DOI:10.1002/essoar.10510482.1
40. Tanioka Y., Yamanaka Y., Nakagaki T. Characteristics of the deep sea tsunami excited offshore Japan due to the air wave from the 2022 Tonga eruption. *Earth, Planets and Space.* 2022. **74**. id:61. DOI:10.1186/s40623-022-01614-5
41. Terry J. P., Goff J., Winspear N., Bongolan V. P., 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. *Geosci. Lett.* 2022. **9**. id:24. DOI:10.1186/s40562-022-00232-z
42. Themens D. R., Watson C., Žagar N., Vasylykevych S., Elvidge S., McCaffrey A., Prikryl P., Reid B., Wood A., Jayachandran P. T. Global propagation of ionospheric disturbances associated with the 2022 Tonga volcanic eruption. *Geophys. Res. Lett.* 2022. **49**, № 7. id:e2022GL098158. DOI:10.1029/2022GL098158
43. Yamazaki Y., Soares G., Matzka J. 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.* 2022. **127**, № 7. id:e2022JA030540. DOI: 10.1029/2022JA030540
44. 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. 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. Advances.* 2022. **2**, № 3. id:100134. DOI:10.1016/j.eqrea.2022.100134
45. Zhang S.-R., Vierinen J., Aa E., Goncharenko L. P., Erickson P. J., Rideout W., Coster A. J., Spicher A. 2022 Tonga volcanic eruption induced global propagation of ionospheric disturbances via Lamb waves. *Frontiers in Astron. and Space Sci.* 2022. **9**. id:871275. DOI:10.3389/fspas.2022.871275

REFERENCES

1. Sorokin V. M., Fedorovich G. V. (1982). *The physics of slow MHD waves in the ionospheric plasma*. Moscow: Energoatomizdat.
2. Chernogor L. F. (2008). Advanced methods of spectral analysis of quasiperiodic wave-like processes in the ionosphere: Specific features and experimental results. *Geomagn. Aeron.*, **48**, № 5, 652–673. DOI:10.1134/S0016793208050101
3. Chernogor L. F. (2009). *Radiophysical and geomagnetic effects of rocket engine burn: Monograph*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ.
4. Chernogor L. F. (2012). *Physics and ecology of the catastrophes*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ. [in Russian].
5. 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.
6. Chernogor L. F. (2023) Ionospheric total electron content variations caused by the Tonga volcano explosion of January 15, 2022. *Space Science and Technology.* 29(3). 67–87.
7. Chernogor L. F., Holub M. Yu. (2023). Large-scale geomagnetic field disturbances accompanied by the powerful explosion of the Tonga volcano on January 15, 2022. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Ser. Radio Physics and Electronics.* № 37, 33–48.
8. Chernogor L. F., Mylovanov Y. B. (2023) Reduction in the electron density produced by the Tonga volcano explosion on January 15, 2022. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies.* 39(4). 34–54.
9. Chernogor L. F., Mylovanov Y. B., Dorohov V. L. (2023). Ionospheric effects of the shock wave generated by the explosion of the Tonga volcano on January 15, 2022. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Ser. Radio Physics and Electronics.* № 37.
10. Chernogor L. F., Shevelev M. B. A statistical study of the explosive waves launched by the Tonga super-volcano on January 15, 2022. *Space Science and Technology.* 29(6).
11. 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), e2022SW003101. DOI:10.1029/2022SW003101

12. Aa E., Zhang S.-R., Wang W., Erickson P. J., Qian L., Eastes R., Harding B. J., Immel T. J., Karan D. K., Daniell R. E., Coster A. J., Goncharenko L. P., Vierinen J., Cai X., Spicher A. (2022). Pronounced suppression and X-pattern merging of equatorial ionization anomalies after the 2022 Tonga volcano eruption. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, **127**(6), e2022JA030527. DOI:10.1029/2022JA030527
13. 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
14. Astafyeva E., Maletckii B., Mikesell T. D., Munaibari E., Ravanelli M., Coisson P., Manta F., Rolland L. (2022). The 15 January 2022 Hunga Tonga eruption history as inferred from ionospheric observations. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(10), e2022GL098827. DOI:10.1029/2022GL098827
15. 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
16. Carvajal M., Sepúlveda I., Gubler A., Garreaud R. (2022). Worldwide signature of the 2022 Tonga volcanic tsunami. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(6), e2022GL098153. DOI:10.1029/2022GL098153
17. Chen C.-H., Zhang X., Sun Y.-Y., Wang F., Liu T.-C., Lin C.-Y., Gao Y., Lyu J., Jin X., Zhao X., Cheng X., Zhang P., Chen Q., Zhang D., Mao Z., Liu J.-Y. (2022). Individual wave propagations in ionosphere and troposphere triggered by the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai underwater volcano eruption on 15 January 2022. *Remote Sensing*, **14**(9), 2179. DOI:10.3390/rs14092179
18. 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, 2022. Kyiv, Ukraine. *Book of Abstracts*, 12–13.
19. Chernogor L. F. (2022). Electrical effects of the Tonga volcano unique explosion on January 15, 2022. *International Conference "Astronomy and Space Physics in the Kyiv University" in part of the World Science Day for Peace and Development*. October 18–21, 2022. Kyiv, Ukraine. *Book of Abstracts*, 79–80.
20. 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, 2022. Kyiv, Ukraine. *Book of Abstracts*, 81–82.
21. 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, 2022. Kyiv, Ukraine. *Book of Abstracts*, 89–90.
22. 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, 2022. Kyiv, 130–131.
23. Chernogor L. F., Blaunstein N. (2013). *Radiophysical and geomagnetic effects of rocket burn and launch in the near-the-Earth environment*. Boca Raton, London, New York: CRC Press. Taylor & Francis Group.
24. 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, 2022. Kyiv, Ukraine. *Book of Abstracts*, 83–84.
25. Chernogor L. F., Shevelev M. B. (2022). Statistical characteristics of atmospheric waves, generated by the explosion of the Tonga volcano on January 15, 2022. *International Conference "Astronomy and Space Physics in the Kyiv University" in part of the World Science Day for Peace and Development*. October 18–21, 2022. Kyiv, Ukraine. *Book of Abstracts*, 85–86.
26. Harding B. J., Wu Y.-J. J., Alken P., Yamazaki Y., Triplett C. C., Immel T. J., Gasque L. C., Mende S. B., Xiong C. (2022). Impacts of the January 2022 Tonga volcanic eruption on the ionospheric dynamo: ICON-MIGHTI and swarm observations of extreme neutral winds and currents. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(9), e2022GL098577. DOI:10.1029/2022GL098577
27. 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
28. Iyemori T., Nishioka M., Otsuka Y., et al. (2022). A confirmation of vertical acoustic resonance and field-aligned current generation just after the 2022 Hunga Tonga Hunga Ha'apai volcanic eruption. *Earth Planets Space*, **74**, id:103. DOI:10.1186/s40623-022-01653-y
29. 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
30. Kulichkov S. N., Chunchuzov I. P., Popov O. E., Gorchakov G. I., Mishenin A. A., Perepelkin V. G., Bush G. A., Skorokhod A. I., Vinogradov Yu. A., Semutnikova E. G., Šepić J., Medvedev I. P., Gushchin R. A., Kopeikin V. M., Be-

- likov 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
31. Le G., Liu G., Yizengaw E., Englert C. R. (2022). Intense equatorial electrojet and counter electrojet caused by the 15 January 2022 Tonga volcanic eruption: Space- and ground-based observations. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(11), e2022GL099002. DOI:10.1029/2022GL099002
32. Lin J.-T., Rajesh P. K., Lin C. C. H., Chou M.-Y., Liu J.-Y., Yue J., Hsiao T.-Y., Tsai H.-F., Chao H.-M., Kung M.-M. (2022). Rapid conjugate appearance of the giant ionospheric Lamb wave signatures in the northern hemisphere after Hunga-Tonga Volcano Eruptions. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(8), e2022GL098222. DOI:10.1029/2022GL098222
33. 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., 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). Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga. *Science*, **377**(6601), 95–100. DOI:10.1126/science.abo7063
34. 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., 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
35. Otsuka S. (2022). Visualizing Lamb waves from a volcanic eruption using meteorological satellite Himawari-8. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(8), e2022GL098324. DOI:10.1029/2022GL098324
36. Poli P., Shapiro N. M. (2022). Rapid characterization of large volcanic eruptions: Measuring the impulse of the Hunga Tonga Ha'apai explosion from teleseismic waves. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(8), e2022GL098123.
37. 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
38. Schnepf N. R., Minami T., Toh H., Nair M. C. (2022). Magnetic signatures of the 15 January 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcanic eruption. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(10), e2022GL098454.
39. Soares G., Yamazaki Y., Matzka J. (2022). Localized geomagnetic disturbance due to ionospheric response to the Hunga Tonga eruption on January 15, 2022. *Geophys. Res. Lett.*, DOI:10.1002/essoar.10510482.1
40. 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
41. Terry J. P., Goff J., Winspear N., Bongolan V. P., Fisher S. (2022). Tonga volcanic eruption and tsunami, January 2022: globally the most significant opportunity to observe an explosive and tsunamigenic submarine eruption since AD 1883 Krakatau. *Geosci. Lett.*, **9**, 24. DOI:10.1186/s40562-022-00232-z
42. Themens D. R., Watson C., Žagar N., Vasylykevych S., Elvidge S., McCaffrey A., Prikryl P., Reid B., Wood A., Jayachandran P. T. (2022). Global propagation of ionospheric disturbances associated with the 2022 Tonga volcanic eruption. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(7), e2022GL098158. DOI:10.1029/2022GL098158
43. Yamazaki Y., Soares G., Matzka J. (2022). Geomagnetic detection of the atmospheric acoustic resonance at 3.8 mHz during the Hunga Tonga eruption event on 15 January 2022. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, **127**(7), e2022JA030540. DOI: 10.1029/2022JA030540
44. 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. Advs*, **2**(3), 100134. DOI:10.1016/j.eqrea.2022.100134

45. 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**, 871275. DOI:10.3389/fspas.2022.871275

Стаття надійшла до редакції 05.01.2023

Після доопрацювання 28.02.2023

Прийнято до друку 01.03.2023

Received 05.01.2023

Revised 28.02.2023

Accepted 01.03.2023

L. F. Chernogor, Head of the Department of Space Radiophysics, Distinguished Professor of the V. N. Karazin Kharkiv National University, Honored Worker of Science and Technology of Ukraine, laureate of Ukrainian Soviet Socialist Republic State Prize in Science and Technology (1989), twice a laureate of the Prize of the Council of Ministers of the USSR, Dr. Sci. in Phys. & Math., Professor
ORCID ID: 0000-0001-5777-2392

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

V. N. Karazin Kharkiv National University

4 Svoboda Sq., Kharkiv, 61022 Ukraine

GLOBAL VARIATIONS IN THE GEOMAGNETIC FIELD CAUSED BY THE EXPLOSION OF THE TONGA VOLCANO ON JANUARY 15, 2022

The explosion of the Tonga volcano on January 15, 2022, led to significant disturbances in the Earth (lithosphere, World Ocean) — atmosphere — ionosphere — magnetosphere system. The purpose of this paper is to present the results of a study of global variations in the geomagnetic field caused by the explosion of the Tonga volcano on January 15, 2022. To analyze the variations of the *X*-, *Y*-, and *Z*-components of the geomagnetic field, registrations at 12 stations of the worldwide INTERMAGNET network were used. When processing the time series, the trend calculated over 60 min with a step of 1 min was first subtracted, and then a system spectral analysis was applied. An analysis of the state of space weather made it possible to choose January 13 and 17, 2022, as reference days. An analysis of time variations in the level of all components of the geomagnetic field showed the following. On the day of the volcano explosion, approximately after 04:21, there were significant variations in the level of all components, but the largest variations were observed in the level of the *Y*-component. The shortest time delay was 6 min. At the same time, quasi-periodic variations of the geomagnetic field with a period of 4...4.5 min and an amplitude of ~2 nT were caused by acoustic resonance in the field of a standing acoustic wave generated by the explosion of the volcano. In addition, six groups of possible disturbances stimulated by the volcano explosion were found. It is important that in each group, the time delay of disturbances increased with increasing distance between the volcano and the station. It was found that the disturbances were transported at speeds close to 4, 1.5, 1 km/s and 500, 313, and 200 m/s. Such velocities are characteristic of slow MHD waves, a blast wave, an atmospheric gravity wave, a Lamb wave, and an ionospheric tsunami wave.

Keywords: Tonga volcano, explosion, magnetic effect, time delay, apparent velocity, MHD wave, blast wave, atmospheric gravity wave, tsunami.