

УДК 550.24; 551.594

## ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА ХУНГА-ТОНГА-ХУНГА-ХААПАН 15.01.2022 г.

© 2022 г. Академик РАН В. В. Адушкин<sup>1</sup>, Ю. С. Рыбнов<sup>1,\*</sup>, А. А. Спивак<sup>1</sup>

Поступило 08.02.2022 г.

После доработки 16.02.2022 г.

Принято к публикации 17.02.2022 г.

Приведен анализ результатов инструментальных наблюдений за метеопараметрами, микробарическими вариациями и вариациями электрического поля в обсерватории Михнево и Центре геофизического мониторинга Москвы ИДГ РАН, а также геомагнитными вариациями в обсерваториях сети INTERMAGNET в период эксплозивного извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15.01.2022 г. Показано, что эксплозия вулкана сопровождалась волновыми возмущениями атмосферы, а также вариациями магнитного и электрического поля на значительных эпицентральных расстояниях. Отмечается, что наряду с вызванными в эпицентре эксплозии волнами Лэмба зарегистрированы волны, вызванные виртуальным источником, расположенным в антиподе, а также вторичные и третичные прямые (из эпицентра эксплозии) и антиподные волны, что свидетельствует о том, что волновой атмосферный сигнал трижды обогнул земную сферу. Оценка энергии источника, выполненная по характерной частоте в спектре сигнала, дает значение  $\sim 10^{18}$  Дж, что в пересчете на взрывной источник соответствует  $\sim 200$  Мт тротилового взрыву. Показано, что эксплозия вулкана вызвала глобальные вариации электрического и магнитного полей.

*Ключевые слова:* вулкан, извержение, эксплозия, акустический сигнал, антипод, геомагнитные вариации, вариации электрического поля

DOI: 10.31857/S2686739722060032

Изучение вулканической деятельности, в первую очередь крупных вулканов, представляет значительный интерес как с точки зрения ожидания возможных погодных аномалий, так и прогнозирования климатических изменений в перспективе. Особый интерес вызывают мощные вулканические извержения в акваториях, что объясняется в этом случае возможностью возникновения цунами. Последствия вулканических извержений эксплозивного типа проявляются в виде воздушных волн, электрических и магнитных эффектов [1–7]. Инструментальные наблюдения за геофизическими полями в период сильных вулканических извержений позволяют расширить сложившиеся представления не только о механизмах этих природных явлений, но также возможных экологических последствий.

В настоящей работе рассматриваются геофизические эффекты мощного эксплозивного извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай ( $20^{\circ}32'36''$  ю.ш.;  $175^{\circ}23'33''$  з.д.), произошедшего

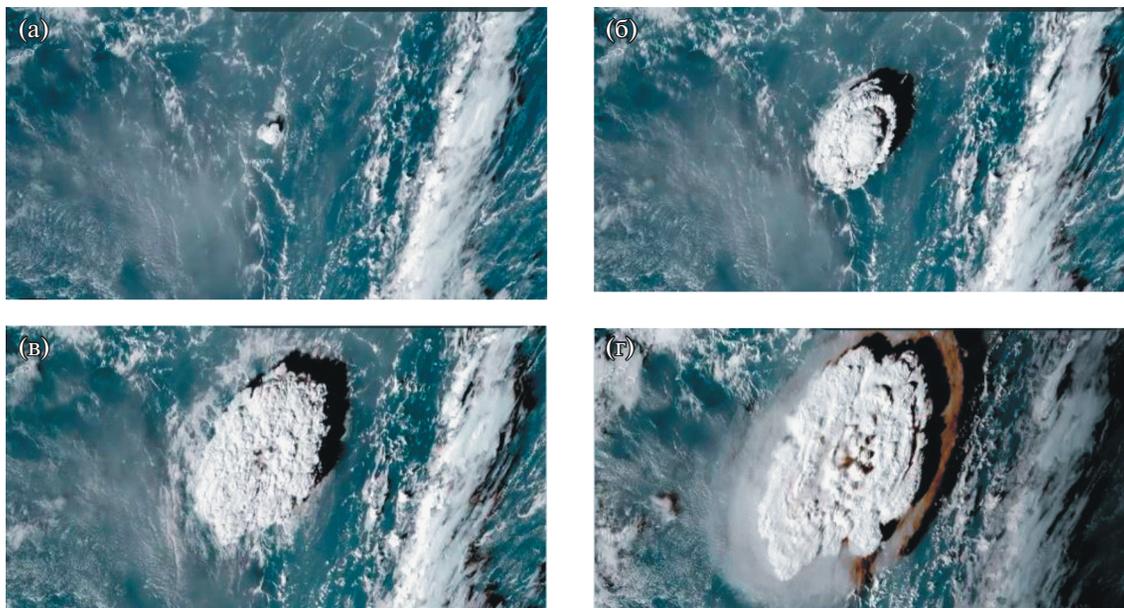
15.01.2022 г. В качестве исходных данных авторами использованы результаты регистрации атмосферного давления, микробарических вариаций и вертикальной компоненты электрического поля в обсерватории Михнево (МНВ) и в Центре геофизического мониторинга Москвы (ЦГМ) Института динамики геосфер РАН, а также данные магнитных измерений, выполненных в обсерваториях сети INTERMAGNET<sup>1</sup> (рассматриваемые сутки характеризовались отсутствием сильных атмосферных явлений в виде ураганов, шквалов и гроз в пунктах регистрации, а также глобальных возмущений электромагнитной природы).

Вулкан Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай расположен в районе островов Полинезии на островной дуге Тонга-Кермадек. Регион отличается повышенной тектонической активностью. Вулкан до настоящего времени не проявлял особо высокой активности. Произошедшие в период с 1912 до 2021 г. извержения (последнее датируется 2014 г.) характеризовались максимальным уровнем 2 по шкале вулканической активности VEI. Извержение вулкана 15.01.2022 г., судя по приведенным в Интернете записям со спутников [8], характери-

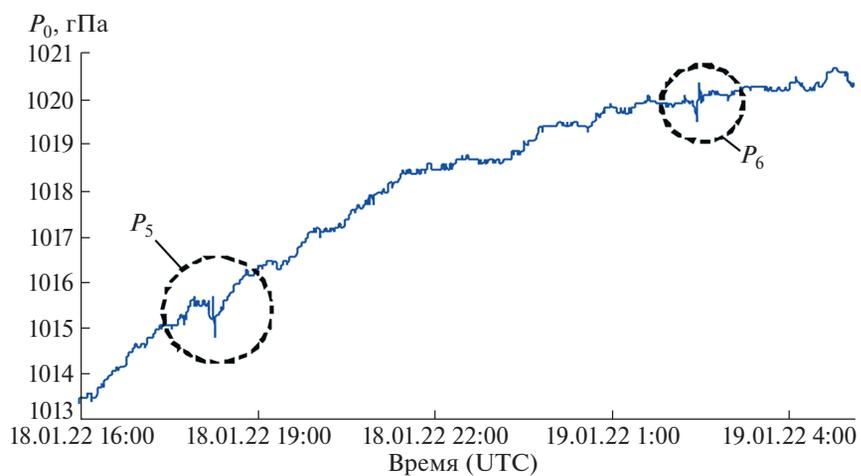
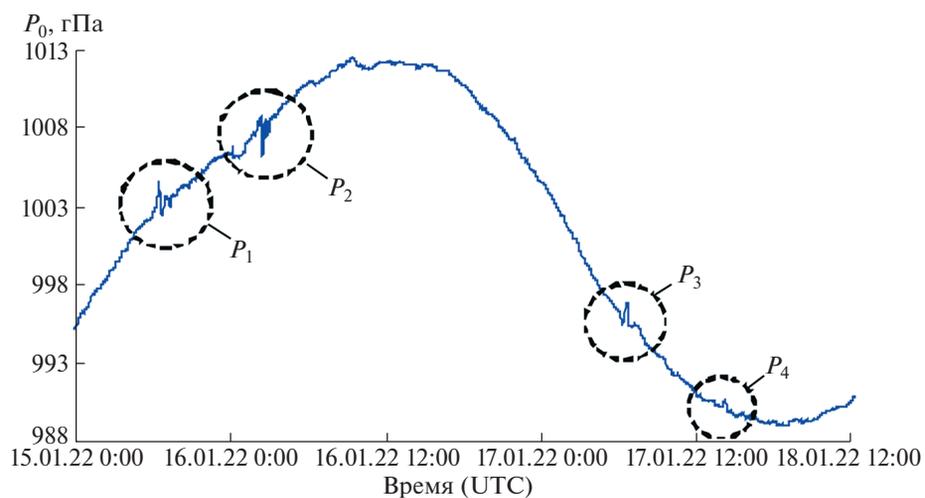
<sup>1</sup>Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: rybnov.y@mail.ru

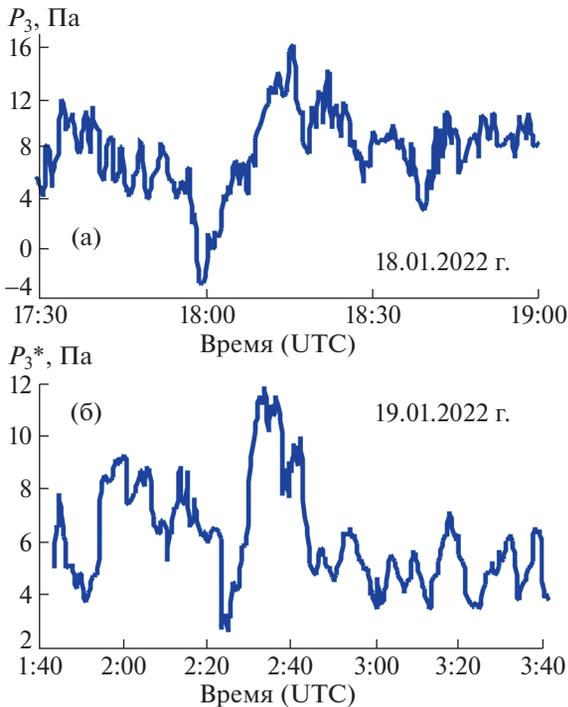
<sup>1</sup> Intermagnet.org



**Рис. 1.** Этапы развития взрывной стадии извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай; время, UTC: (а) – 04:15; (б) – 05:00; (в) – 06:00; (г) – 07:00 (снимки с геостационарного спутника GOES-17 (www.NASA.gov)).



**Рис. 2.** Запись атмосферного давления в обсерватории МНУ в период с 15.01.2022 г. по 19.01.2022 г.



**Рис. 3.** Ход атмосферного давления в обсерватории МНУ в полосе частот 0.0008–10 Гц в период прихода третичного прямого (а) и антиподального (б) сигналов (соответственно 18.01.2022 г. и 19.01.2022 г.).

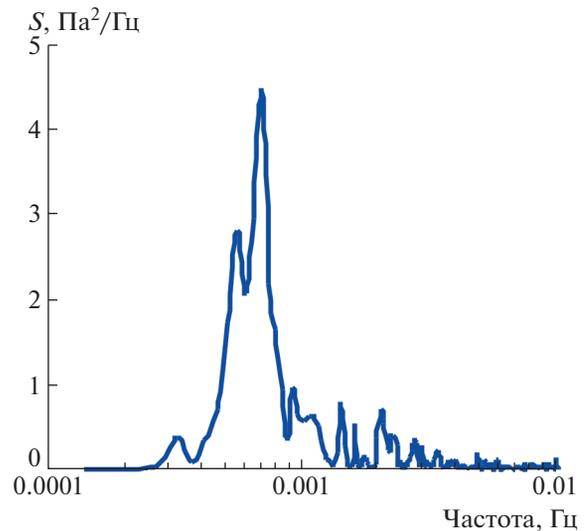
зается по нашему мнению уровнем не менее 5 по шкале VEI, что свидетельствует о том, что это одно из самых сильных извержений Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай.

Эксплозия вулкана началась 15.01.2022 г. в ~04:10 UTC с формирования быстро разрастающегося облака из водно-пепло-газовой смеси и пирокластического материала (рис. 1). Вся взрывная стадия, включая начальный этап формирования эруптивного облака<sup>2</sup>, заняла примерно 8 мин. Извержение вызвало мощные движения воздушных масс, что привело к заметным вариациям атмосферного давления на значительных расстояниях<sup>3</sup>. В качестве примера на рис. 2 представлена запись атмосферного давления  $P_0$  в обсерватории Михнево ИДГ РАН, расположенной на расстоянии ~15 295 км от вулкана. Из рис. 2 следует, что на достаточно гладком суточном ходе  $P_0$  отчетливо проявляются 6 сигналов, пришедшие в МНУ соответственно в ~18:30 UTC 15.01.2022 г., ~2:25 UTC 16.01.2022 г., ~06:40 UTC 17.01.2022 г., ~14:13 UTC 17.01.2022 г., ~17:55 UTC 18.01.2022 г. и ~02:20 UTC 19.01.2022 г.<sup>4</sup> Макси-

<sup>2</sup> По имеющимся данным [8, 9], высота подъема облака составила 20–30 км.

<sup>3</sup> При соответствующей энергии источника волны Лэмба и инфразвуковые колебания могут обегать весь земной шар.

<sup>4</sup> Время достижения максимальной амплитуды сигналов.



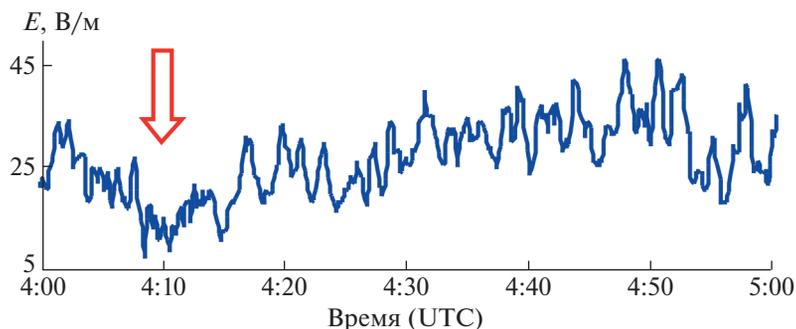
**Рис. 4.** Зависимость спектральной плотности от частоты для первичного сигнала прямого распространения.

имальные амплитуды первых 4 сигналов  $P_1$ – $P_4$  составили соответственно ~260, ~230, ~60 и ~50 Па.

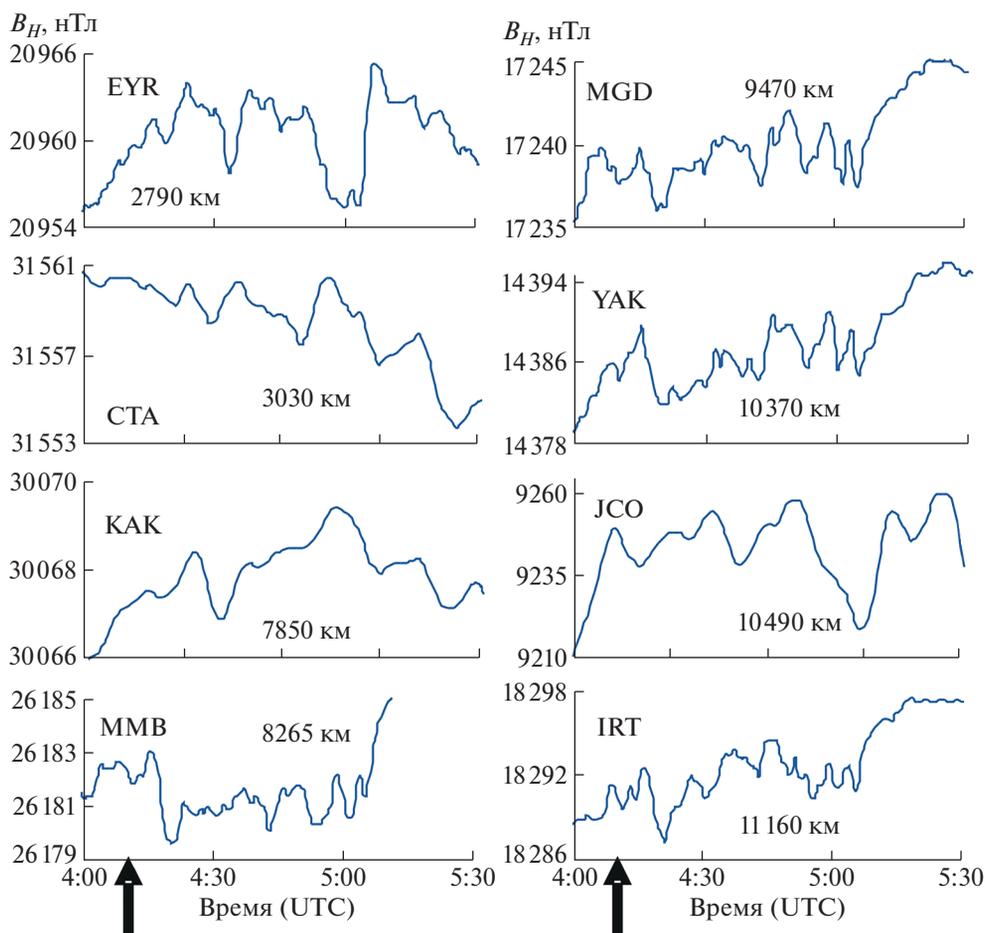
С учетом скоростей распространения (~306–312 м/с), слабым затуханием с расстоянием (по нашим данным ~0.4 дБ на 1000 км) и значением преимущественной частоты эти сигналы представляют собой волны Лэмба, распространяющиеся в стратосферном волноводе [10–12]. Очевидно, что первый сигнал  $P_1$  – это пришедший в МНУ первичный сигнал с азимута на эпицентр вулкана, вызванный мощными движениями воздушных масс в эпицентре эксплозии. Второй сигнал  $P_2$  – сигнал от виртуального источника, сформировавшегося в результате схождения первичного сигнала, огибающего земную сферу, в точке антипода. Этот сигнал зарегистрирован с азимута, противоположного азимуту первичного сигнала. Третий и четвертый сигналы  $P_3$  и  $P_4$  – это соответственно прямой и антиподальный сигналы, сформировавшиеся при повторном огибании земного шара основным (первичным) сигналом. Сигналы  $P_5$  и  $P_6$  с большой вероятностью являют-

**Таблица 1.** Характеристики атмосферных сигналов (по данным МНУ)

| Сигнал | Параметры |           |              |
|--------|-----------|-----------|--------------|
|        | $P$ , Па  | $T$ , мин | $\tau$ , мин |
| $P_1$  | ~260      | ~16       | ~70          |
| $P_2$  | ~230      | ~20       | ~80          |
| $P_3$  | ~60       | ~40       | ~60          |
| $P_4$  | ~50       | ~30       | ~100         |



**Рис. 5.** Вертикальная компонента электрического поля в период эксплозивного извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15.01.2022 г. по данным ЦГМ (вертикальной стрелкой обозначено время эксплозии).



**Рис. 6.** Вариации горизонтальной компоненты магнитного поля Земли в период эксплозии вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15.01.2022 г. (регистрация в обсерваториях сети INTERMAGNET, расположенных в субширотном направлении от вулкана); эпицентрального расстояния приведено в поле рисунков (вертикальными стрелками обозначено время эксплозии).

ся соответственно третичным первичным и третичным антиподальным сигналами (см. ниже).

Более детальный анализ записей атмосферного давления, микробарических вариаций и времен прихода сигналов 18.01.2022 г. и 19.01.2022 г.

свидетельствует о том, что действительно атмосферные возмущения  $P_5$  и  $P_6$  вызваны эксплозией вулкана и соответствуют третьему разу огибания земного шара. Это хорошо видно из рис. 3, на котором приведены более детально волновые фор-

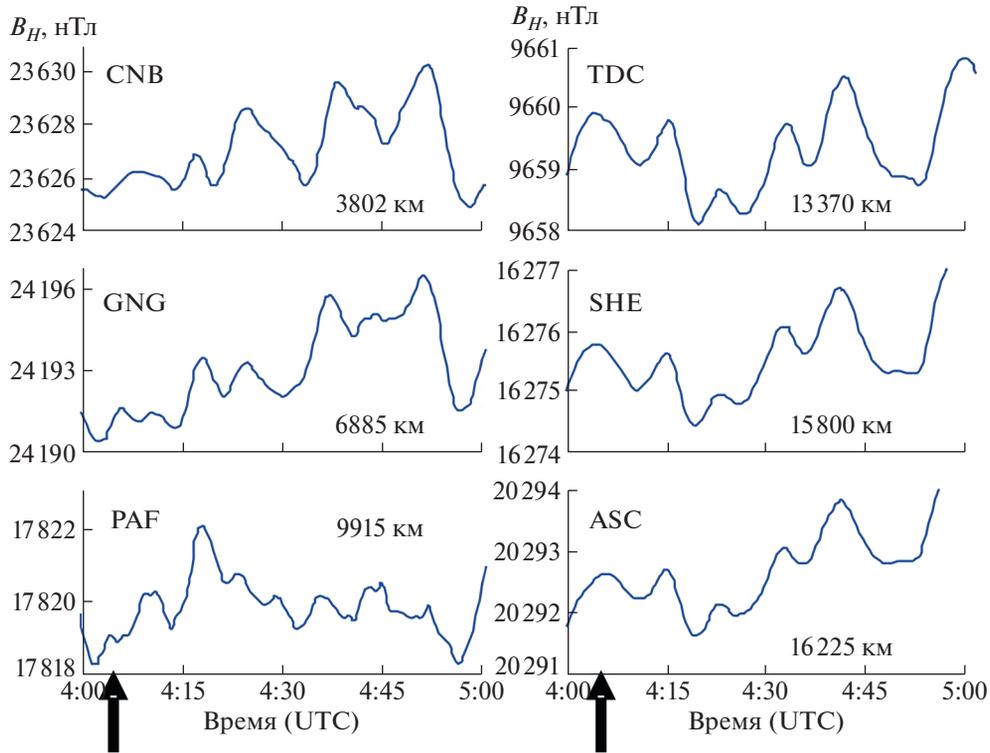


Рис. 7. Вариации горизонтальной компоненты магнитного поля Земли в период эксплозии вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15.01.2022 г.

мы сигналов  $P_5$  и  $P_6$ , зарегистрированные микробарометром МБ-03 [12]. Из данных рис. 3 следует, что инструментально зарегистрированные аномальные микробарические вариации  $P_0$  в  $\sim 17:57$  UTC 18.01.2022 г. и  $\sim 02:20$  UTC 19.01.2022 г. с учетом скорости распространения атмосферного возмущения соответствуют приходу в МНУ третичного прямого (из эпицентра эксплозии) и соответствующего ему третичного антиподального сигнала.

Здесь следует отметить, что времена “запаздывания” между прямыми сигналами и соответствующими им антиподальными сигналами близки между собой и составляют  $\sim 8$  ч. Это подтверждает антиподальное расположение всех вторичных источников. Согласно оценкам, расстояние от МНУ до антипода составляет примерно 4430 км.

Основные характеристики зарегистрированных сигналов  $P_1$ – $P_4$ : амплитуда относительно тренда  $P$ , значение первого периода колебаний  $T$  и длительность  $\tau$  (включая коду в виде инфразвуковой составляющей) приведены в табл. 1.

Анализ спектральных характеристик волновых возмущений свидетельствует о наличии ярко выраженной преимущественной частоты в районе 0.0007 Гц (рис. 4). Оценка энергии источника, выполненная по характерной частоте в спектре сигнала [13], дает значение  $\sim 10^{18}$  Дж, что в пере-

счете на взрывной источник соответствует  $\sim 200$  Мт тротилового взрыва. Это согласуется с данными, полученными при регистрации двух прямых и одной антиподальной волны, вызванных ядерным взрывом в атмосфере эквивалентной мощностью 50 Мт 30.10.1961 г. [10, 14].

Представляет интерес рассмотрение реакции на эксплозию геофизических полей. Действительно, мощные движения, вызванные эксплозией, в частности, в вертикальном направлении, возбуждают глобальные токовые системы, которые проявляются на земной поверхности на значительных эпицентральных расстояниях  $R$  от вулкана в виде вызванных вариаций напряженности электрического поля и геомагнитных вариаций [2].

Результаты инструментальных наблюдений, выполненных в МНУ и ЦГМ, свидетельствуют о том, что в период эксплозии регистрируются аномальные вариации вертикальной компоненты напряженности электрического поля  $E$ . В качестве примера на рис. 5 приведены вариации  $E$  в период эксплозии по данным ЦГМ. Из графика на рис. 5 хорошо видно, что с весьма небольшой задержкой после начала эксплозии вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай регистрируются характерные знакопеременные вариации  $E$  с периодом  $\sim 2$  мин и максимальной амплитудой  $\sim 10$ – $12$  В/м.

**Таблица 2.** Характеристики обсерваторий сети INTERMAGNET

| Код станции                            | Параметры    |               |       |
|--|--------------|---------------|-------|
|  | Широта (GEO) | Долгота (GEO) | R, км |
| Субширотное расположение станций       |              |               |       |
| EYR                                    | −43.474      | 172.393       | 2790  |
| СТА                                    | −20.1        | 146.3         | 3030  |
| КАК                                    | 36.23        | 140.18        | 7850  |
| MMB                                    | 43.91        | 144.19        | 8265  |
| MGD                                    | 60.051       | 150.728       | 9470  |
| YAK                                    | 61.96        | 129.66        | 10370 |
| JCO                                    | 70.356       | 148.799       | 10490 |
| IRT                                    | 52.27        | 104.45        | 11160 |
| Субмеридиональное расположение станций |              |               |       |
| CNB                                    | −35.23       | 149.36        | 3802  |
| GNG                                    | −31.356      | 115.715       | 6885  |
| PAF                                    | −49.35       | 70.26         | 9915  |
| TDC                                    | −37.067      | −12.316       | 13370 |
| SHE                                    | −15.961      | 354.253       | 15800 |
| ASC                                    | −7.95        | 345.62        | 16225 |

Одновременно с этим в период эксплозии регистрируются геомагнитные вариации. В качестве иллюстрации на рис. 6 и 7 приведены результаты наблюдений за горизонтальной — наиболее чувствительной к внешним возмущениям компоненты магнитного поля  $B_H$ , полученные в обсерваториях сети INTERMAGNET, расположенных на разных расстояниях от вулкана соответственно в субширотном и субмеридиональном направлениях (координаты обсерваторий и расстояния до вулкана приведены в табл. 2). Обращаясь к рис. 6 и 7, отмечаем: в период эксплозии отчетливо регистрируется изменение хода  $B_H$  в виде практически знакопеременных вариаций, длительность которых достигает ~60 мин. При этом наблюдаемые аномальные вариации регистрируются практически одновременно на значительно отличающихся эпицентральных расстояниях от вулкана, что свидетельствует о глобальном характере вызванного возмущения.

Полученные данные характеризуют крупномасштабный и подтверждают эксплозивный характер извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15.01.2022 г. По мнению авторов, приведенные данные могут быть использованы при разработке теоретических и расчетных моделей сильных вулканических извержений эксплозивного типа.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены по государственному заданию № 122032900185-5 “Проявление процессов природного и техногенного происхождения в геофизических полях”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин В.В., Гостинцев Ю.А., Фирстов П.П. О природе воздушных волн при сильных эксплозивных извержениях // Вулканология и сейсмология. 1984. № 5. С. 3–11.
2. Spivak A.A., Rybnov Yu.S., Riabova S.A., Soloviev S.P., Kharlamov V.A. Acoustic, Magnetic and Electric Effects of Stromboli Volcano Eruption, Italy, in July–August 2019 // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2020. V. 56. № 5. P. 708–720.
3. Фирстов П.П., Акбашев Р.Р., Жаринов Н.А., Максимов А.П., Маневич Т.М., Мельников Д.В. Электризация эруптивных облаков вулкана Швелуч в зависимости от характера эксплозии // Вулканология и сейсмология. 2019. № 3. С. 49–62.
4. Руленко О.П. Электризация вулканических облаков // Вулканология и сейсмология. 1985. № 2. С. 71–83.
5. James M.R., Lane S.J., Jennie S.G. Volcanic Plume Electrification: Experimental Investigation of a Fracture-charging Mechanism // J. Geophys. Res.: Solid Earth. 2000. V. 105. B7. P. 16641–16649.
6. Johnston M.J.S. Review of Electric and Magnetic Fields Accompanying Seismic and Volcanic Activity // Surveys in geophysics. 1997. V. 18. P. 441–475.
7. Mather T.A., Harison R.G. Electrification of Volcanic Plumes // Surveys in Geophysics. 2006. V. 27. № 4. P. 387–432.
8. <https://nplus1.ru/material/2022/01/21/tonga>
9. <https://regnum.ru/news/accidents/3477676.html>
10. Gossard E.A., Hook W.H. Waves in the Atmosphere. Amsterdam; Oxford. N.Y.: Elsevier Sci. Publ. Comp., 1975. 456 p.
11. Куличков С.Н. О распространении волн Лэмба в атмосфере вдоль земной поверхности // Изв. АН СССР. Физика земли и океана. Т. 23. № 12. С. 1251–1261.
12. Адушкин В.В., Рыбнов Ю.С., Спивак А.А. Инфразвук в атмосфере. М.: ТОРУС ПРЕСС, 2020. 332 с.
13. Adushkin V.V., Rybnov Yu.S., Spivak A.A., Kharlamov V.A. Relationship between the Parameters of Infrasound Waves and the Energy of the Source // Izvestiya, Physics of the solid Earth. 2019. V. 55. № 6. P. 898–906.
14. Wexler H., Hass W.H. Global Atmospheric Pressure Effect of the October 30, 1961, Explosion // J. Geophys. Res. 1962. V. 67. № 10. P. 3875.

## **GEOPHYSICAL EFFECTS OF THE VOLCANIC ERUPTION OF HUNGA-TONGA-HUNGA-HAARAI ON JANUARY 15, 2022**

**Academician of the RAS V. V. Adushkin<sup>a</sup>, Yu. S. Rybnov<sup>a,#</sup>, and A. A. Spivak<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>*M.A. Sadovsky Institute of the Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

<sup>#</sup>*E-mail: rybnov.y@mail.ru*

The analysis of the results of instrumental observations of meteorological parameters, microbaric variations and electric field variations at the Mikhnevo Observatory and the Center for Geophysical Monitoring of Moscow of the IDG RAS, as well as geomagnetic variations at the INTERMAGNET observatories during the explosive eruption of the Khunga-Tonga-Khunga-Khaapai volcano on January 15, 2022, is presented. It is shown that the explosion of the volcano was accompanied by wave disturbances of the atmosphere, as well as variations in the magnetic and electric fields at a significant epicentral distance. It is noted that along with the Lamb waves caused at the epicenter of the explosion, waves caused by a virtual source located at the antipode, as well as secondary and tertiary direct (from the epicenter of the explosion) and antipodal waves were recorded, which indicates that the atmospheric wave signal circled the Earth three times. The estimate of the source energy, performed by the characteristic frequency in the signal spectrum, gives a value of  $\sim 1018$  J, which, in terms of an explosive source, corresponds to  $\sim 200$  Mt of a TNT explosion. It is shown that the explosion of the volcano caused global variations in the electric and magnetic fields.

*Keywords:* volcano, eruption, explosion, acoustic signal, antipode, geomagnetic variations, electric field variations