УДК 551.594

ВОЛНОВЫЕ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ КАТАСТРОФИЧЕСКОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА ХУНГА-ТОНГА-ХУНГА-ХААПАЙ 15.01.2022 г.

© 2022 г. В. В. Адушкин^а, Ю. С. Рыбнов^{а, *}, А. А. Спивак^{а, **}

^аИнститут динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, Ленинский просп., 38, корп. 1, Москва, 119334 Россия *e-mail: rybnov.y@mail.ru **e-mail: aaspivak 100@gmail.com Поступила в редакцию 16.02.2022 г. После доработки 06.04.2022 г. Принята к публикации 08.04.2022 г.

Обсуждаются данные инструментальных наблюдений, выполненных в обсерватории Михнево, обсерваториях сети INTERMAGNET и в Центре геофизического мониторинга Москвы ИДГ РАН в период взрывного извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15.01.2022 г. Показано, что эксплозия вулкана вызвала серию волновых возмущений в атмосфере, а также вариации электрического и магнитного поля Земли на значительных эпицентральных расстояниях. Атмосферные возмущения зарегистрированы в виде волн Лэмба с источником в эпицентре эксплозии, а также виртуальным источником, расположенном в антиподе и формирование которого связано со схождением и суммированием сигналов, распространяющихся вдоль земной сферы. Помимо первичных волн зарегистрированы вторичные и третичные волны, сформировавшиеся в результате неоднократного прохождения вызванного эксплозией сигнала вокруг земной сферы. Оценка энергии источника, выполненная по характерной частоте в спектре сигнала, дает значение ~10¹⁸ Дж, что в пересчете на взрывной источник соответствует ~200 Мт тротиловому взрыву. Показано, что вулканическое извержение сопровождается вариациями электрического и магнитного поля как в период эксплозии, так и в периоды прихода в точку наблюдения волновых атмосферных возмущений.

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

DOI: 10.31857/S0203030622040022

введение

Наметившиеся климатические изменения [Climate ..., 2021], следствием которых является постоянный рост количества погодных катаклизмов [Обзор ..., 2021], вызывают повышенный интерес к изучению экологически опасных явлений и процессов природного и техногенного происхождения [Adushkin, Spivak, 2021]. Среди основных факторов, определяющих негативное влияние на природную среду, следует выделить вулканическую деятельность [Robock, 2000]. Действительно, наиболее сильные извержения вулканов сопровождаются весьма значительными объемами выброшенной в земную атмосферу газо-пепловой массы, что вызывает не только локальное загрязнение атмосферы, но и приводит к изменению температурного режима планеты в течение продолжительного времени. Здесь уместно привести примеры наиболее сильных из известных событий – извержений вулканов Кракатау (27.08.1883 г.) и Безымянный (30.03.1956 г.), в результате которых формировались эруптивные колонны, достигающие высоты соответственно 55 и 40 км. Особую опасность представляют подводные вулканы, которые способны вызвать мощные цунами.

Вулканическая деятельность не ограничивается только загрязнением атмосферы. Следствием извержений, и в первую очередь извержений эксплозивного типа, является ряд геофизических эффектов, связанных с формированием волновых движений воздушных масс в атмосфере, аномальными вариациями электрического поля и т.д. [Адушкин и др., 1984; Адушкин, Фирстов, 2010; Фирстов и др., 2019; Руленко, 1979, 1985; James et al., 2000; Johnston, 1997; Lane, Gilbert, 1992; Mather, Harrison, 2006]. Изучение этих эффектов позволяет не только расширять представления о явлении, формировать углубленное понимание механизмов процессов, сопровождающих вулканические извержения и оценивать их экологические



Рис. 1. Расположение вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай, обсерватории Михнево (МНV) и обсерваторий сети IN-TERMAGNET.

последствия, но также, что важно, разрабатывать подходы к идентификации источников, вызывающих возмущение геофизической среды по наблюдениям, выполненным на больших расстояниях.

При выполнении настоящих исследований нас заинтересовали геофизические эффекты извержения подводного вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай (GEO: 20°32'36' ю.ш., 175°23'33' з.д.), произошедшее 15.01.2022 г. в 04:10 UTC (https:// www.gismeteo.ua/news/stihiynye-yavleniya/38966izverzhenie-vulkana-vozle-tonga-privelo-k-tsunami-vamerikanskom-samoa/). По всем данным это, пожалуй, одно из наиболее сильных событий за последние 30 лет. Вулкан расположен в тихоокеанском архипелаге Тонга и входит в состав 36-ти подводных вулканов высокоактивной вулканической дуги Тонга-Кермадек (рис. 1). Вулкан расположен между островами Хунга-Тонга и Хунга-Хаапай. Однако извержение вулкана в декабре 2014 г. привело к формированию перемычки между этими островами, в результате чего они соединились, и вулкан получил свое современное название. Мощное извержение, произошедшее 15.01.2022 г. уничтожило перемычку между островами (рис. 2), что напоминает последствия известного события — извержения вулкана Кракатау, когда в результате вулканической эксплозии один из самых больших островов Зондского архипелага Кракатау фактически перестал существовать в виде единого острова.

Извержение вулкана Хунга-Тонга и Хунга-Хаапай, которое характеризуется по нашим оценкам уровнем не ниже 5 по шкале VEI, сопровождалось



Рис. 2. Вулкан Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай на спутниковых снимках (*Planet Labs*): 7 января 2022 года (а) и после взрывного извержения вулкана 15 января (б).



Рис. 3. Эруптивное облако вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай (фото из https://news.zerkalo.io/world/8601.html).

образованием мощного эруптивного облака высотой ~20 км и горизонтальными размерами ~5 км у основания и ~250 км в верхней своей части (рис. 3) (https://ria.ru/20220117/vulkan-1768255846.html). Эксплозия вызвала землетрясение магнитудой ~5.8 и цунами высотой ~1.5 м, которое было зарегистрировано не только на островах, расположенных в окрестности вулкана, но также на значительных расстояниях от вулкана, а именно: в Японии (Кагосима) зарегистрировано цунами высотой ~1.2 м, на американском континенте (Порт-Сан-Луис) ~1.3 м, в Акапулько ~1 м, на Курильских островах 0.2 м (https://www.ddc.com).

Мощная и короткая по времени¹ эксплозия вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай (рис. 4) вызвала сильные атмосферные волны, которые были зарегистрированы большим количеством метеостанций (https://try-science.ru/2022/02/pyatikratnoe-exovulkana/). Более того, на значительных расстояниях от вулкана, например на Аляске, были отмечены звуковые эффекты извержения, что само по себе является уникальным событием (https://pronedra.ru/izverzhenie-podvodnogo-vulkana-hunga-tongahunga-haapaj-mozhet-privesti-k-czunami-633297.html).

В настоящей работе рассматриваются геофизические эффекты извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай. Цель исследований — демонстрация на конкретном примере сильного вулканического извержения вызванных им возмущений геофизических полей в приповерхностной атмосфере, что представляется весьма важным с точки зрения влияния вулканической деятельности на среду обитания и на возможные изменения характера климатических изменений вообще.

¹ Длительность эксплозивной стадии извержения не превышала 8 мин.



Рис. 4. Этапы развития эксплозивной стадии извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай, время (UTC): а – 04:10; б – 04:15; в – 04:30; г – 05:00; д – 05:30; е – 06:00; ж – 06:30; з – 07:00 (снимки со спутника GOES-17 (www.NASA.gov)).

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В качестве исходных данных в настоящей работе использованы результаты регистрации атмосферного давления, микробарических вариаций, электрического и магнитного поля в обсерватории Михнево (MHV: GEO: 54.94° N. 37.73° E) и в Центре геофизического мониторинга Москвы (ЦГМ; GEO: 55.71° N, 37.57° Е) Института динамики геосфер РАН [Адушкин и др., 2016; Спивак и др., 2016], а также данные магнитных измерений, выполненных в обсерваториях сети INTERMAG-NET² (табл. 1, см. рис. 1). Следует отметить, что в периоды регистрации в течение 15.01.2022-19.01.2022 гг. в МНV и ЦГМ отсутствовали сильные атмосферные явления в виде ураганов, шквалов и гроз, а также значимые глобальные возмущения электрической и магнитной природы, что значительно упростило анализ влияния вулканического извержения на физические поля.

Регистрация временного хода атмосферного давления $P_0(t)$ и других метеопараметров, характеризующих состояние атмосферы, выполнялась в MHV и ЦГМ с помощью автоматизированных цифровых метеостанций Davis Vantage Pro 2. Микробарические вариации регистрировались с помощью микробарометра МБ-03, обеспечивающего устойчивую регистрацию акустических сигналов амплитудой от 0.01 до 200 Па в диапазоне частот 0.0003-10 Гц (по уровню - 3 дБ). Поиск вызванных вулканической эксплозией сигналов выполнялся на основе анализа $P_0(t)$ и исходной записи микробарометра в диапазоне частот 0.005-0.1 Гц с учетом расстояния до источника сигнала (~15293 км) и вероятной скорости его распространения в стратосферном волноводе (280-310 м/с) [Куличков, 1987; Куличков и др.,

² Intermagnet.org

2004]. Регистрация в двух пунктах (МНV и ЦГМ) позволяла осуществлять пеленг на источник.

Измерение компонент индукции магнитного поля B_x , B_y и B_z^3 выполнялось в MHV с помощью феррозондового цифрового магнетометра LEMI-018, обеспечивающего регистрацию в диапазоне ±68000 нТл с разрешением 10 пТл (частота выборки 1 с⁻¹).

При описании электрических возмущений приземного слоя атмосферы использовались результаты непрерывной цифровой регистрации вертикальной компоненты атмосферного электрического поля *E*. Измерения напряженности электрического поля осуществлялись с помощью электростатического флюксметра ИНЭП [Адушкин и др., 2019] в диапазоне частот 0-20 Гц с частотой выборки 1 с⁻¹. Для анализа *E* использовались ряды цифровых записей, сформированные с дискретностью 5 с.

ВОЛНОВЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ, ВЫЗВАННЫЕ ИЗВЕРЖЕНИЕМ ВУЛКАНА ХУНГА-ТОНГА-ХУНГА-ХААПАЙ

Эксплозивный характер извержения вулкана, сопровождавшийся мощными движениями воздушных масс, вызвал заметные вариации атмосферного давления на значительных расстояниях. На рис. 5 приведена запись атмосферного давления в MHV. Из рис. 5 следует, что на суточном ходе Р₀ отчетливо проявляются 6 сигналов, пришедшие в MHV 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. С учетом скоростей распространения (~306-312 м/с), слабым затуханием с расстоянием (по нашим данным ~0.4 дБ на 1000 км) и значением преимущественного периода головной части эти сигналы представляют собой волны Лэмба, распространяющимися в стратосферном волноводе [Gossard, Hook, 1975; Куличков, 1987; Куличков и др., 1985; Адушкин и др., 2020].

На рис. 6 приведены волновые формы первых 4-х сигналов $P_1 - P_4$. Максимальные амплитуды сигналов $P_1 - P_4$ составили соответственно ~260 Па, ~230 Па, ~60 Па и ~50 Па. Очевидно, что первый сигнал P_1 – это пришедший в МНV 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, противопоТаблица 1. Характеристики обсерваторий сети IN-TERMAGNET

Колстаниии	Параметры				
Код станции	широта (GEO)	долгота (GEO)	<i>R</i> , км		
Субширотное расположение станций					
EYR	-43.474	172.393	2790		
СТА	-20.1	146.3	3030		
KAK	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	11 160		
Субмеридианальное 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		

ложного 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 P₅ и Р₆ с большой вероятностью являются соответственно третичным первичным и третичным антиподальным сигналами. Действительно, более детальный анализ с привлечением записей микробарических вариаций и времен прихода сигналов 18.01.2022 г. и 19.01.2022 г. свидетельствует о том, что атмосферные возмущения P_5 и P_6 с, вызваны эксплозией вулкана и соответствуют третьему разу огибания земного шара. Это хорошо видно из рис. 7, на котором приведены волновые формы сигналов P_5 и P_6 , зарегистрированные микробарометром МБ-03. Из рис. 7 следует, что инструментально зарегистрированы аномальные микробарические вариации P₀ в ~17:57 UTC 18.01.2022 г. и ~02:20 UTC 19.01.2022 г., и это с учетом скорости распространения атмосферного возмущения соответствует приходу в MHV 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 ~8 ч. Это подтверждает антиподальное расположение всех вторичных ис-

³ Направление осей координат: *x* – С-Ю, *y* – В-З, *z* – вертикально вниз.



Рис. 5. Запись атмосферного давления в обсерватории MHV в период с 15.01.2022 г. по 19.01.2022 г.







Рис. 7. Микробарические вариации по данным обсерватории MHV 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.).

точников. Согласно оценкам, расстояние от MHV до антипода составляет ~4430 км.

Основные характеристики зарегистрированных сигналов $P_1 - P_4$: амплитуда относительно тренда P, значение первого периода колебаний Tи длительность τ (включая коду в виде инфразвуковой составляющей) приведены в табл. 2.

Анализ спектральных характеристик волновых возмущений свидетельствует о наличии ярко выраженных преимущественных частот f_0 во всех сигналах $P_1 - P_6$. В качестве примера на рис. 8 приведен спектр сигнала P_1 , полученный с использованием данных регистрации микробарометром MБ-03.

ОТКЛИК ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Электрический эффект эксплозивной стадии извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15.01.2022 г. рассмотрим на примере результатов наблюдений, выполненных в ЦГМ. Следует отметить, что вулканический взрыв практически сразу вызвал изменение в ходе зависимости E(t) в

ЦГМ — обсерватории, расположенной на значительном расстоянии от вулкана. На рис. 9 приведены результаты регистрации вертикальной компоненты электрического, полученные в период эксплозивной стадии извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15.01.2022 г. Данные рис. 9 свидетельствуют о том, что в период с ~04:10 до ~05:00 UTC наблюдаются хорошо выраженные аномалии хода E(t) в виде знакопеременных вариаций с периодом ~60 с и максимальной амплитудой ~20 В/м.

Таблица 2. Характеристики атмосферных сигналов (по данным MHV)

Сигнал	Параметры			
	<i>Р</i> , Па	<i>Т</i> , мин	τ, мин	
<i>P</i> ₁	~260	~16	~70	
P_2	~230	~20	~80	
<i>P</i> ₃	~60	~40	~60	
<i>P</i> ₄	~50	~30	~100	



Рис. 8. Зависимость спектральной плотности от частоты для первичного сигнала прямого распространения *P*₁ по данным регистрации микробарометром МБ-03.



Рис. 9. 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).

Результаты инструментальных наблюдений показывают, что наряду с эксплозией аномальные вариации электрического поля вызываются также волновыми возмущениями прямого и ан-

Таблица 3. Характеристики вариаций электрического поля в периоды прихода в ЦГМ атмосферных сигналов $P_1 - P_4$

Сигнал	Параметры		
	Т, мин	Е*, В/м	
<i>P</i> ₁	~8	~40	
<i>P</i> ₂	~4	~20	
<i>P</i> ₃	~20	~20	
<i>P</i> ₄	~6	~10	

типодного происхождения. Рис. 10 демонстрирует вариации Е, вызванные приходом в ЦГМ наиболее сильных сигналов $P_1 - P_4$. В частности, из рис. 10а следует, что приход первичного сигнала P_1 (время вступления ~18:25 UTC) вызвал ярко выраженные знакопеременные вариации Е с периодом ~8 мин и максимальной амплитудой ~40 В/м. Вариации Е, сопутствующие приходу в ЦГМ сигналов $P_2 - P_4$, приведены соответственно на рис. 106-г. Характеристики вызванных приходом сигналов $P_1 - P_4$ в виде амплитуды относительно тренда Р и периода колебаний Т приведены в табл. 3. Следует отметить, что в периоды прихода сигналов P₁ и P₄ знакопеременные вариации Е наблюдаются на фоне изменения хода E(t) в виде отрицательной бухты со средней амплитудой ~10 В/м.



Рис. 10. Вариации вертикальной компоненты электрического поля в период прихода в точку наблюдений сигналов: а – P_1 , б – P_2 , в – P_3 , г – P_4 по данным ЦГМ (вертикальной стрелкой обозначено время вступления сигналов).

ГЕОМАГНИТНЫЙ ЭФФЕКТ ВУЛКАНИЧЕСКОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ

Известно, что сильная вулканическая деятельность вызывает повышенные вариации магнитного поля Земли [Johnston, 1997; Spivak et al, 2020]. Результаты настоящей работы также свидетельствуют о том, что эксплозия вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай сопровождалась аномальными геомагнитными вариациями, причем на значительных расстояниях от вулкана. В качестве иллюстрации на рис. 11 и 12 приведены результа-

ВУЛКАНОЛОГИЯ И СЕЙСМОЛОГИЯ № 4 2022



Рис. 11. 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); эпицентральное расстояние приведено в поле рисунков (вертикальными стрелками обозначено время эксплозии).



Рис. 12. 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 субмеридианальном направлении от вулкана); эпицентральное расстояние приведено в поле рисунков (вертикальными стрелками обозначено время эксплозии).

ты наблюдений за горизонтальной — наиболее чувствительной к внешним возмущениям компонентой магнитного поля $B_H = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}$, полученные в обсерваториях сети INTERMAGNET, расположенных на разных расстояниях от вулкана соответственно в субширотном и субмеридианальном (см. рис. 1) направлениях. Обращаясь к рис. 11 и 12, отмечаем, что в период эксплозии отчетливо регистрируется изменение хода B_H в виде



Рис. 13. Геомагнитные вариации в периоды прихода в точку регистрации (MHV) атмосферных сигналов $P_1 - P_4$ (вертикальные стрелки – времена вступления атмосферных сигналов).

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.

Согласно данным работы [Spivak et al., 2020] геомагнитные вариации наблюдаются также в периоды прихода в точку регистрации атмосферных сигналов. Геомагнитный эффект, сопровождающий сигналы $P_1 - P_6$, рассмотрим на примере данных MHV. На рис. 13 приведены геомагнитные вариации в MHV, зарегистрированные как в период эксплозии вулкана, так и в периоды прихода в MHV атмосферных сигналов. Следует заметить, что в целом вариации *В_Н* зарегистрированы именно в период эксплозии вулкана и в периоды прихода атмосферных сигналов. Наблюдаемое некоторое опережение либо запаздывание геомагнитных вариаций относительно времен прихода атмосферных сигналов объясняется, по всей видимости, геофизическими условиями, как вдоль трасс распространения сигналов, так и в пункте регистрации.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Приведенные данные свидетельствуют о наличии хорошо выраженного геофизического эффекта при извержении вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15.01.2022 г. При этом эффект наблюдается не только в виде атмосферных сигналов — прямых и антиподальных, но также в вариациях электрического и магнитного поля, причем на значительных расстояниях от источника возмущений.

Особый интерес вызывает энергия источника. В настоящей работе оценка энергии вулканического источника W выполнялась с привлечением метода, разработанного в работах [Adushkin et al., 2019; Rybnov et al., 2021]. Метод основан на свойстве вызванного взрывом атмосферного сигнала сохранять значение преимущественной частоты f_0 при его распространении на значительные расстояния. Верификация метода на большом количестве природных и техногенных источников взрывного типа известной энергии показала его высокую эффективность. Согласно работам [Adushkin et al., 2019; Rybnov et al., 2021] зависимость $W(f_0)$ представима в виде:

$$W \sim \frac{8 \times 10^{10}}{f_0^{2.25}} \,\mathrm{Дж},\tag{1}$$

где f_0 измеряется в Гц.



Рис. 14. Спектр атмосферного сигнала, вызванного эксплозией вулкана Безымянный 30.03.1956 г. [Пасечник, Федосеенко, 1958].

Как это следует из рис. 8, характерная частота первичного прямого атмосферного сигнала Р₁ составляет ~0.0007 Гц. С учетом этого зависимость (1) дает верхнюю оценку энергии эксплозии вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай $W \sim 10^{18}$ Дж, что в пересчете на взрывной источник соответствует ~200 Мт тротилового взрыва. Это значение согласуется с данными, полученными при ядерном взрыве в атмосфере эквивалентной мощностью 50 Мт 30.10.1961 г. Взрыв вызвал две прямых и одну антиподальную волну [Gossard, Hook, 1975; Wexler, Hass, 1962]. Эксплозия же вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай вызвала, как это показано выше, три прямых и три антиподальных волны. То есть атмосферный сигнал трижды обогнул земную сферу, что свидетельствует о том, что энергия источника существенно превышала 50 Мт.

Вместе с тем можно оценить и нижнюю границу оценки W для рассматриваемого извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай, привлекая данные по энергии эксплозивного извержения вулкана Безымянный (30.03.1956 г.), которые приведены в работе [Пасечник, 1958; Пасечник, Федосеенко, 1958]. Спектр атмосферного сигнала, вызванного эксплозией вулкана Безымянный, приведен на рис. 14. Значение f_0 , составляет для этого случая ~0.003 Гц. Величина энергии эксплозии вулкана Безымянный по данным работы [Пасечник, Федосеенко, 1958] *W* ~≈ 10¹⁶ Дж или ~2.4 Мт в тротиловом эквиваленте. Оценки по формуле (1) дают значение $W \sim 3.8 \times 10^{16}$ Дж или ~9 Мт, что в ~3.5 раза превышает величину, приведенную в работе [Пасечник, Федосеенко, 1958]. С учетом этого возможная нижняя граница оценки W для эксплозии вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай может составлять $W \sim 2.6 \times 10^{17}$ Дж или ~60 Мт в тротиловом эквиваленте.

Далее необходимо отметить, что механизм влияния вулканических извержений на магнитное и электрическое поле Земли в настоящее время до конца не ясен. Локальные эффекты можно отнести, по всей видимости, на счет интенсивного выброса сильно разогретого материала в атмосферу. Вместе с тем установленное в настоящей работе "дальнодействие" вулканического извержения требует проведения дальнейших более детальных исследований. Можно предполагать, что на эксплозивной стадии извержения в результате интенсивного истечения водно-пепло-газовой смеси в приповерхностной зоне Земли происходит формирование источника сильного акустического и электрического воздействия на ионосферу. В результате это вызывает в ионосфере в эпицентре такого источника магнитогидродинамическое возмущение, которое распространяется по ионосфере с высокой скоростью (например, ~22 км/с [Сорокин, Федорович, 1982]).

Результаты работы свидетельствуют о том, что порождаемые деятельностью вулкана воздушные волны (как прямые, так и антиподальные) также являются причиной возмущения магнитного и электрического поля. Это может происходить, например, в результате формирования аэроэлектрических структур в приземном слое атмосферы, либо, что более вероятно, при посредничестве ионосферы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные продемонстрировали сложность геофизических процессов, сопутствующих сильному извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15.01.2022 г. Событие следует рассматривать как одно из сильнейших извержений вулканов за последнее время. Свидетельством этому является неоднократное огибание (по крайней мере три раза) вызванным эксплозией атмосферным сигналом земной сферы, что зарегистрировано впервые.

Важно отметить, что эксплозия вулкана вызвала значимые вариации электрического и магнитного полей на значительных расстояниях от источника возмущений. При этом вызванные вариации рассмотренных геофизических полей наблюдаются не только в период самой эксплозии, но и в периоды прихода атмосферных возмущений в точку регистрации.

Предложить ясную физическую интерпретацию установленных эффектов в настоящее время затруднительно. Для этого требуется дальнейшее накопление данных и их детальный анализ. Помимо этого, необходимо разрабатывать аналитические и расчетные модели процесса, основанные на конкретных механизмах воздействия вулканических эксплозий на среду.

По мнению авторов приведенные результаты дополняют соответствующую базу данных и могут представлять интерес при совершенствовании известных и разработке новых моделей влияния вулканической деятельности на окружающую геофизическую среду и их верификации.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены по государственному заданию № 1021052706233-4-1.5.4 "Проявление процессов природного и техногенного происхождения в геофизических полях (FMWN-2022-0012)".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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.

Адушкин В.В., Фирстов П.П. Особенности эксплозивных процессов вулканических извержений и их проявление в волновых возмущениях в атмосфере // Экстремальные природные явления и катастрофы. Т. 2. М.: ИФЗ РАН, 2010. С. 264–278.

Адушкин В.В., Овчинников В.М., Санина И.А., Ризниченко О.Ю. "Михнево": от сейсмостанции № 1 до современной геофизической обсерватории // Физика Земли. 2016. № 1. С. 108–119.

Адушкин В.В., Соловьев С.П., Спивак А.А. Электрические поля техногенных и природных процессов. М.: ГЕОС, 2018. 464 с.

Куличков С.Н. О распространении волн Лэмба в атмосфере вдоль земной поверхности // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1987. Т. 23. № 12. С. 1251–1261.

Куличков С.Н., Авилов К.В., Буш Г.А., Попов О.Е. и др. Об аномально быстрых инфразвуковых приходах на больших расстояниях от наземных взрывов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40. № 1. С. 3–12.

Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2020 г. М.: Росгидромет, 2021. 205 с.

Пасечник И.П. Сейсмические и воздушные волны, возникшие при извержении вулкана Безымянный 30 марта 1956 г. // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1958. № 9. С. 1121–1126.

Пасечник И.П., Федосеенко Н.Е. К изучению связи между микрофлуктуациями атмосферного давления и некоторыми сейсмическими явлениями / Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1958. № 1. С. 1121–1126.

Руленко О.П. Электрические процессы в парогазовых облаках вулкана Карымского // Докл. АН СССР. 1979. Т. 245. № 5. С. 1083–1086.

Руленко О.П. Электризация вулканических облаков // Вулканология и сейсмология. 1985. № 2. С. 71–83.

Сорокин В.М., Федорович Г.В. Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме. М.: Энергоиздат, 1982. 136 с.

Спивак А.А., Кишкина С.Б., Локтев Д.Н., Рыбнов Ю.С., Соловьев С.П., Харламов В.А. Аппаратура и методики для мониторинга геофизических полей мегаполиса и их применение в Центре геофизического мониторинга г. Москвы ИДГ РАН // Сейсмические приборы. 2016. Т. 52. № 2. С. 65–78.

Фирстов П.П., Акбашев Р.Р., Жаринов Н.А., Максимов А.П., Маневич Т.М., Мельников Д.В. Электризация эруптивных облаков вулкана Шевелуч в зависимости от характера эксплозии // Вулканология и сейсмология. 2019. № 3. С. 49–62.

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. \mathbb{N} 6. P. 898–906.

Adushkin V.V., Spivak A.A. Impact of Natural Extreme Events on Geophysical Fields in the Environment // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2021. V. 57. № 5. P. 583–592.

Climate change 2021. The Physical Science Basis. IPCC Sixth Assessment Report. Geneve, 2021. 3949 p.

Gossard E.A., Hook W.H. Waves in the atmosphere. Amsterdam, Oxford, N.Y.: Elsivier Sci. Publ. Comp., 1975. 456 p.

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.

Johnston M.J.S. Review of electric and magnetic fields accompanying seismic and volcanic activity // Surveys in Geophysics. 1997. V. 18. P. 441–475.

Lane S.J., Gilbert J.S. Electric potential gradient changes during explosive activity at Sakurajima volcano, Japan // Bull. of Volcanology. 1992. V. 54. № 7. P. 590–594.

Mather T.A., Harison R.G. Electrification of volcanic plumes // Surveys in Geophysics. 2006. V. 27. \mathbb{N}_{2} 4. P. 387–432.

Robock A. Volcanic eruptions and climate // Rev. Geophys. 2000. V. 38. P. 191–219.

Rybnov Yu.S., Spivak A.A., Kharlamov V.A. Analysis of methods for estimating the energy fo sources of acousticgravity waves in the Earth's atmosphere // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2021. V. 57. \mathbb{N} 5. P. 761–767.

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. N $_{\circ}$ 5. P. 708–720.

Wexler H., Hass W.H. Global atmospheric pressure effect of the October 30, 1961, explosion // J. Geophys. Rews. 1962. V. 67. № 10. P. 3875.

Wave, Electrical and Magnetic Effects of the Catastrophic Eruption of the Hunga-Tonga-Hunga-Haapai Volcano on January 15, 2022

V. V. Adushkin¹, Yu. S. Rybnov^{1, *}, and A. A. Spivak^{1, **}

¹Academician M.A. Sadovsky Institute of Geospheric Dynamics of the Russian Academy of Sciences, Leninsky prosp., 38, bld. 1, Moscow, 119334 Russia *e-mail: rybnov.y@mail.ru **e-mail: aaspivak100@gmail.com

The data of instrumental observations made at the Mikhnevo Observatory, the INTERMAGNET network observatories and the Moscow Geophysical Monitoring Center of the IDG RAS during the explosive eruption of the Hunga-Tonga-Hunga-Haapai volcano on 15.01.2022 are discussed. It is shown that the explosion of the volcano caused a series of wave disturbances in the atmosphere, as well as variations in the electric and magnetic fields of the Earth at significant epicentral distances. Atmospheric disturbances were registered in the form of Lamb waves with a source in the epicenter of the explosion, as well as a virtual source located in the antipode and the formation of which is associated with the convergence and summation of signals propagating along the Earth's sphere. In addition to the primary waves, secondary and tertiary waves have been recorded, formed as a result of the repeated passage of the signal caused by the explosion around the Earth's sphere. The estimation of the source energy, performed by the characteristic frequency in the signal spectrum, gives a value of ~1018 J, which, in terms of an explosive source, corresponds to ~200 Mt of TNT explosion. It is shown that a volcanic eruption is accompanied by variations in the electric and magnetic fields both during the explosion and during the arrival of wave atmospheric disturbances at the observation point.

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