

УДК 550.34;550.24

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ИЗВЕРЖЕНИЕМ ВУЛКАНА В РАЙОНЕ АРХИПЕЛАГА ТОНГА 15 ЯНВАРЯ 2022 Г.

© 2023 г. В. М. Овчинников^{1, *}, О. А. Усольцева^{1, **}

¹Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, г. Москва, Россия

*E-mail: ovch1@yandex.ru

**E-mail: kriukova@mail.ru

Поступила в редакцию 13.09.2022 г.

После доработки 07.11.2022 г.

Принята к публикации 09.12.2022 г.

Изучение связанного с извержением сейсмического процесса и оценка энергетических параметров и структуры волнового поля по сейсмическим данным составляют предмет настоящей работы. В структуре волнового поля выделены три типа возмущений. В первую очередь — это поверхностные волны Рэлея со средним периодом колебаний 23 с, хорошо прослеживаемые на расстояниях до 100 градусов. Групповая скорость волн Рэлея составляет 3.6–3.8 км/с. Рассчитанная по ним магнитуда на станциях в основном с океаническими трассами распространения $M_s = 5.52 \pm 0.18$, а соответствующая ей сейсмическая энергия составила порядка $E_c = (1-7) \times 10^{13}$ Дж, а скалярный сейсмический момент $M_0 = 2.4 \times 10^{17}$ Дж. На сейсмических каналах с полосой частот от 0.0003 до 0.1 Гц обнаружены два других типа колебаний. Для первого кажущаяся скорость распространения возмущения лежит в диапазоне 0.28–0.37 км/с с характерным периодом 268 с. Этот тип возмущений связан с гравитационным откликом сейсмометра на акустическое возмущение (волна Лэмба) в атмосфере. Для второго типа сейсмических возмущений скорость распространения составляет 0.21–0.28 км/с с характерными периодами 450 с на горизонтальных компонентах сейсмоприемников. Этот тип сейсмических возмущений, вероятно, обусловлен взаимодействием гравитационной волны в гидросфере с побережьем островов, на которых расположены сейсмические станции.

Ключевые слова: сейсмические волны Рэлея, скалярный сейсмический момент, сейсмическая энергия, инфразвуковые волны в атмосфере, гравитационные волны в гидросфере.

DOI: 10.31857/S0002333723030092, EDN: КАКМIE

1. ВВЕДЕНИЕ

Сейсмические явления на Земле определяются многими сложно взаимосвязанными эндогенными и экзогенными процессами, происходящими, в частности, в результате вулканической деятельности. 15.01.2022 г. произошло извержение вулкана на о-вах Тонга, сопровождавшееся акустическими возмущениями в атмосфере, электрическом и магнитном поле Земли, волнами цунами в гидросфере, землетрясениями в твердой Земле [Адушкин и др., 2022; Duncombe, 2022; Rowberry, Gunn et al., 2022; Matoza et al., 2022]. Восточная окраина Австралийской плиты в районе вулканического извержения является одной из наиболее сейсмически активных областей мира из-за высокого темпа сближения Австралийской и Тихоокеанской плит, составляющего 74 мм/год [Benz et al., 2010], где в 2006 г. произошло землетрясение с $M = 8.0$, сопровождавшееся цунами. Изучение изменений сейсмического процесса, структуры сейсмического волнового поля, связанного с извержением, оценка его энергетических парамет-

ров по сейсмическим данным, а также свойств отклика твердой Земли на возмущения в гидросфере и атмосфере составляет предмет настоящего исследования.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ АНАЛИЗА И РЕЗУЛЬТАТЫ

Использован каталог землетрясений Международного сейсмологического центра [International ..., 2022] за январь 2022 г. Представленные в нем параметры сейсмических волн, возбужденных при извержении вулкана, в основном получены в центре данных (IDC) Международной системы контроля Договора о запрещении испытаний ядерного оружия и геофизической службой (BGR) Германии, а также каталог Геологической службы США (USGS). Для количественного описания использованы сейсмограммы ряда станций международной сети сейсмических наблюдений IRIS GSN, оборудованных широкополосными сейсмоприемниками STS-2 (каналы ВНЕ, ВНН,

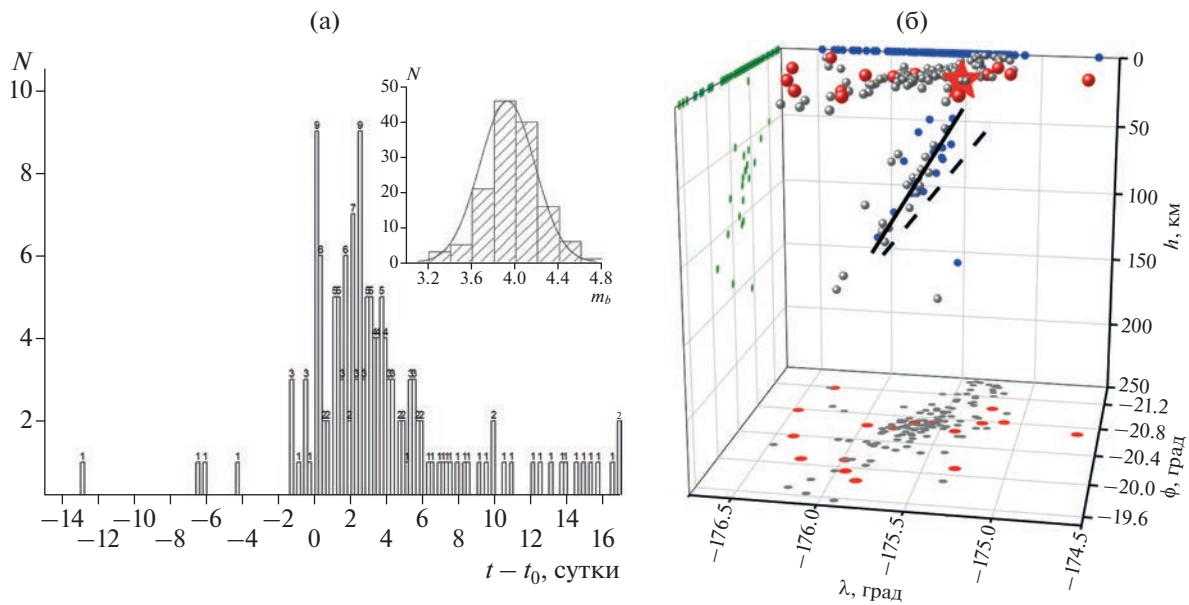


Рис. 1. (а) – Распределение числа сейсмических событий в сутки за 15 сут до и 15 сут после извержения вулкана; на врезке – распределение землетрясений по магнитуде; (б) – распределение землетрясений в пространстве: красная звездочка – извержение вулкана; красные шарики – землетрясения до извержения; серые шарики – землетрясения после извержения; синие, зеленые кружки – проекции землетрясений на две вертикальные, а серые и красные кружки – проекции на горизонтальную плоскость.

VNZ) с полосой частот 0.008–20 Гц и частотой опроса 20 либо 40 Гц, а также STS-1V/VBB, KS-54000 (каналы VNE, VHN, VNZ) с полосой 0.0003–2 Гц и частотой опроса 0.1 Гц. Для интерпретации сейсмических данных также привлекались записи барометрических регистраторов, размещенных в Тихом океане, системы глубоководной оценки и создания бюллетеня цунами (DART), и результаты барометрических измерений давления на сейсмических станциях (канал LDO). Волновые формы получены с сайтов <https://ds.iris.edu/wilber3/> и <https://nctr.pmel.noaa.gov/Dart/>.

2.1. Некоторые статистические характеристики сейсмичности, связанной с извержением вулкана

Извержение вулкана и связанное с ним землетрясение с $m_b = 4.2$ произошло 15 января 2022 г. в 4 ч 14 мин 45 с с координатами 20.546° ю.ш. и 175.37° з.д. [ISC, 2022]. Один из естественно возникающих вопросов заключается в том, могут ли тектонические землетрясения спровоцировать извержения вулканов. Статистические данные о таких извержениях, показывают, что это относительно редкое явление [Bebbington, Marzocchi, 2011; Sawi, Manga, 2018]. Однако корреляционная связь между землетрясениями и извержениями в регионе Фиджи-Тонга на региональном масштабе и временном масштабе в несколько десятков

лет характеризуются высоким коэффициентом корреляции 0.91 [Eggert, Walter, 2008].

В данной работе мы ограничились анализом сейсмичности в районе извержения на локальном масштабе на площади около 8000 кв. км в январе 2022 г. На рис. 1а показано распределение числа землетрясений по дням, из которого следует, что извержение вулкана активизировало сейсмическую активность. Из 149 землетрясений в январе месяце 110 произошли в течение 6 дней после начала извержения. За 15 дней до извержения наблюдалось только 11 землетрясений и 28 за последние дни января. По глубине распределение землетрясений следующее: до извержения 1 землетрясение на глубине от 50 до 450 км и 10 с глубиной менее 10 км, после извержения 21 и 113 землетрясений соответственно. 17 землетрясений, предшествующих извержению вулкана, образуют кластер (рис. 1б), примерно равномерно распределенный по площади (красные точки на горизонтальной плоскости), а последующие землетрясения более плотно сгруппированы относительно эпицентра извержения (серые точки).

Проекция координат гипоцентров землетрясений на плоскость “глубина–долгота” описываются прямой с углом наклона 58° (рис. 1б), близким к наклону 49° [Лыскова, 2014] Тихоокеанской плиты (рис. 2а), погружающейся с Востока на Запад под Австралийскую плиту.

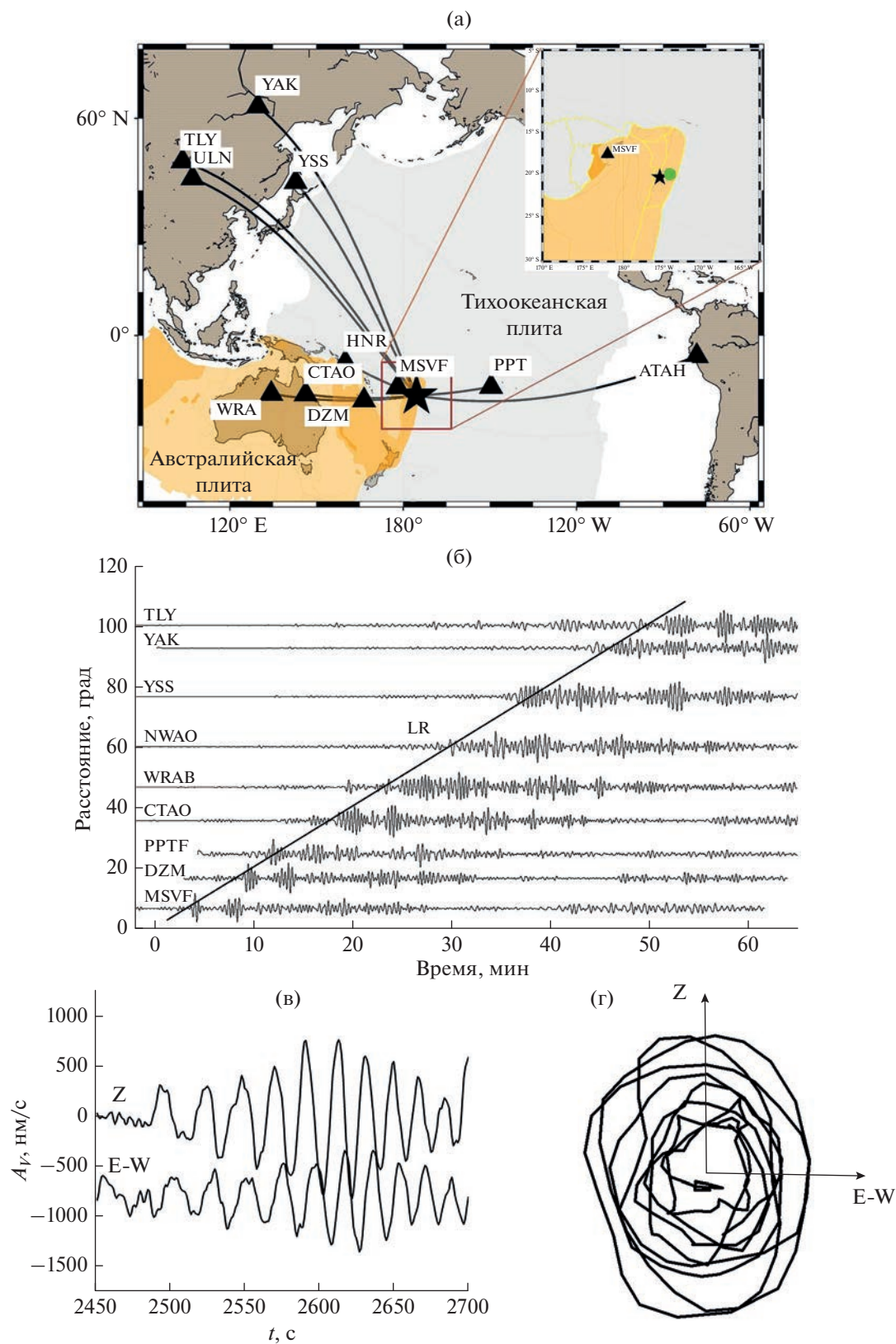


Рис. 2. (а) – Расположение станций (черные треугольники) относительно вулкана (звездочка); (б) – сейсмограммы с записями поверхностных волн Рэля, использованные для определения магнитуды; (в) – фрагмент волн Рэля на станции СТАО на вертикальном и горизонтальном канале; (г) – траектория движения частиц в вертикальной плоскости, проходящей через станцию и эпицентр. Зеленая точка на врезке в (а) - землетрясение 03.05.2006.

Таблица 1. Основные параметры для определения магнитуды

Код станции	Расстояние, градус	A/T , нм/с	M_s
MSVF	6.7	150000/25	5.45
DZM	16.8	21715.7/22	5.6
PPT	24.81	4699.1/21.92	5.1
HHR	26.2	11690/23	5.36
CTAO	35.9	12400/20	5.67
WRA	47.0	7885/20	5.67
YSS	77.0	7660/25.2	5.65
YAK	93.1	3570/29.6	5.63
ATAH	94.3	1422.2/20.5	5.3
ULN	97.1	2640/24.4	5.63
TLY	100.45	1325/31.2	5.65

2.2. Магнитуда и энергия сейсмического источника по волнам Рэлея

На сейсмических станциях наиболее отчетливо выделяются поверхностные волны Рэлея, хорошо прослеживаемые на расстояниях более 100° . Однако в бюллетене [ISC, 2022] приведены параметры волн Рэлея только на трех станциях и магнитуда по объемным волнам $m_b = 4.2$. Чтобы определить магнитуду M_s мы использовали сейсмограммы 11 станций (рис. 2а), для измерения параметров (максимальная амплитуда, соответствующий ей период и время вступления) волн Рэлея (рис. 2б). Выбор станций основывался на примерно равномерном распределении станций по расстоянию.

Идентификация наблюдаемых на сейсмограммах вступлений как волн Рэлея вытекает из хорошо видимой на (рис. 2б) временной упорядоченности вступлений с групповой скоростью распространения волн, составившей 3.6–3.8 км/с, характерной для смешанных и океанических трасс распространения [Кейлис-Борок, 1960]. Другой признак – эллиптическая поляризация движения частиц в волне. На рис. 2в показаны фрагменты вертикальной и горизонтальной (радиальной) составляющих волнового пакета с визуальным фазовым сдвигом на $\frac{1}{4}$ периода между ними на станции СТАО, расположенной на расстоянии 35.9° к западу от эпицентра извержения вулкана, а на рис. 2г ретроградное эллиптическое движение частиц среды в нем. Отношение осей эллипса 0.6–0.7, близко к теоретическому значению $2/3$ [Буллен, 1966] для волн Рэлея в полупространстве. Сейсмограммы похожи на записи поверхностных волн от землетрясений и взрывов, но отличаются большим числом волновых цугов колебаний. В частности, волны Рэлея от землетрясения 2006 г., эпицентр которого расположен примерно в 30 км, состоят только из одного цуга колебаний.

Измеренные значения максимальной амплитуды и периода приведены в табл. 1.

Для определения магнитуды M_s (табл. 1) использовано эмпирическое соотношение для землетрясений [Ванек и др., 1962]

$$M_s = \lg(A/T) + 1.66 \lg(\Delta) + 0.3, \quad (1)$$

где: A – максимальная амплитуда смещения (в нм) в волне Рэлея (L_R); T – соответствующий ей период; Δ – эпицентральный расстояние в градусах. Среднее значение магнитуды по 11 измерениям $M_s = 5.52 \pm 0.18$.

Используя соотношение между моментной магнитудой и скалярным сейсмическим моментом M_0 [Kanamori, 1977]

$$M_s \approx M_w = \frac{2}{3} \lg M_0 - 6.07, \quad (2)$$

для скалярного момента получаем $2.4 \times 10^{17} < M_0 < 5.6 \times 10^{17}$ Дж. Т.е. энергия источника, возбуждавшего волны Рэлея, составляет $(0.57–1.36) \times 10^2$ Мт ($1 \text{ кТ} = 4.2 \times 10^{12}$ Дж). Верхняя оценка мощности соответствует магнитуде $M_s = 5.8$ по данным Геологической службы США (USGS). Отметим, что мощность, оцененная по инфразвуковым волнам в атмосфере, составила 200 Мт [Адушкин и др., 2022].

Высота волн цунами вблизи островных и прибрежных территорий расположения сейсмических станций (рис. 2а) может быть определена из соотношения [Носов, 2019]:

$$M_w = \lg H_{\max} + \lg \Delta + 5.8.$$

Для станций на расстояниях от 7° до 100° она составляет небольшую величину $13 \text{ см} > H_{\max} > 2 \text{ см}$. Прямые измерения высоты волн на океанических станциях Новой Зеландии указывают на хорошую согласованность, в частности, с амплитудой первого пика от 21 до 3 см на расстояниях от 3 до 20° [Gusman et al., 2022].

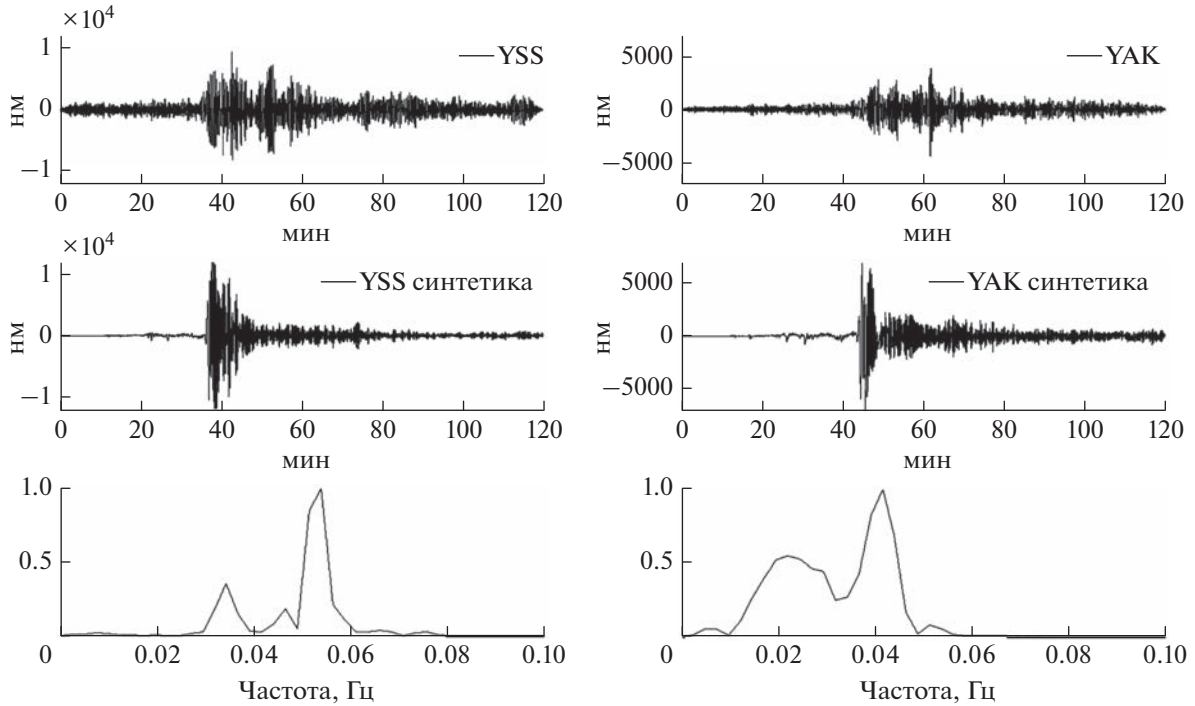


Рис. 3. Пример синтетической сейсмограммы (вертикальная компонента) на станциях YSS, YAK и спектры когерентности. Наблюдаемая сейсмограмма предварительно отфильтрована в полосе 0.01–1 Гц.

Из этих данных средняя скорость распространения возмущений в гидросфере $V = 0.254 \pm 0.038$ км/с, что соответствует скорости распространения гравитационной волны.

Имеется несколько возможностей для оценки излученной при извержении сейсмической энергии. Во-первых, используя эмпирическую зависимость между магнитудой по поверхностным волнам M_s и E_c , [Benioff et al., 1956].

$$\lg E_c = 4.8 + 1.5M_s, \quad (3)$$

откуда с учетом погрешности определения магнитуды $0.65 \times 10^{13} < E_c < 2.3 \times 10^{13}$ Дж.

Либо интервальную оценку [Шебалин, 1974], в соответствии с которой

$$5.0 + 1.5M_s < \lg E_c < 4.0 + 1.8M_s, \quad (4)$$

откуда $1.9 \times 10^{13} < E_c < 6.9 \times 10^{13}$ Дж.

При извержении вулкана сейсмическое волновое поле на временном интервале волн Рэлея,

Таблица 2. Максимальная амплитуда первой волны на DART станциях Новой Зеландии

Код станции	Расстояние, градус	A, см	Время вступления чч :мм	Время пробега, с	V, км/с
NZG	3.33	20.77	4:42	1635	0.226
NZF	9.11	8.36	5:25	4215	0.240
NZK	14.45	5.43	5:53	5895	0.272
NZE	15.6	6.31	6:00	6315	0.274
NZD	16.39	3.13	7:13	10695	0.170
NZL	16.8	4.68	6:8	9495	0.197
NZC	18.	4.69	6:15	7215	0.277
NZJ	19.84	8.15	6:24	7755	0.284
NZB	20.56	2.1	6:30	8115	0.281
NZA	22.74	2.9	6:43	8895	0.284

как было отмечено выше, более сложное, чем при обычных землетрясениях. Наличие нескольких цугов колебаний на сейсмограммах позволяет предположить действие источника возбуждения волн Рэлея либо со сложной временной функцией, либо нескольких источников. Например, в работе [Yuen et al., 2022] авторы полагают, что во временной функции источника через 3.5 мин после начала извержения присутствуют еще три дополнительных импульса, следующих с интервалом около 20 с.

Чтобы получить представление о структуре волнового поля, длительности цуга и корректности определения скалярного сейсмического момента источника волн Рэлея мы рассчитали теоретические сейсмограммы для ряда станций спектрально-элементным методом с использованием алгоритма SPECSEM3D_GLOBE [Komatitsch et al., 2016; 2002] для источника со следующими параметрами механизма очага: простирание $S = 58^\circ$, падение $D = 47^\circ$, уклон (погружение) $R = 92^\circ$ и скалярным сейсмическим моментом $M_0 = 5.6 \times 10^{17}$ Дж, полученным выше. Модель среды включала трехмерную модель коры [Bassin et al., 2000] и учитывала влияние факторов, связанных с эллиптичностью и наличием океанической части на трассе распространения волн. Вычисления проводились с использованием сверхвысокопроизводительных ресурсов Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН (<https://www.jssc.ru>). Примеры наблюдаемых сейсмограмм на станциях YSS (Южно-Сахалинск) и YAK (Якутск) с соответствующими синтетическими показаны на рис. 3. Спектр когерентности указывает на согласованность энергетических составляющих в ре-

альной и синтетической сейсмограммах на частотах 0.054 Гц для YSS, и 0.042 Гц для YAK. Из синтетической сейсмограммы следует, что длительность волн Рэлея составляет около 5 мин.

Принимая во внимание, что амплитуды смещения на сейсмограммах пропорциональны скалярному сейсмическому моменту, для согласования амплитуд в начальной части поверхностных волн, максимальное значение сейсмического момента $M_0 = 5.6 \times 10^{17}$ Дж, использованное для расчета синтетических сейсмограмм, следует уменьшить в 1.5–1.8 раза, т.е. сдвинуть в сторону нижней границы, полученной из соотношения (2).

2.3. "Медленные волны" на сейсмических станциях

"Медленными волнами" мы для удобства называли сейсмические колебания с отчетливой временной упорядоченностью вступлений, зарегистрированные на сейсмических станциях на значительных от $\frac{3}{4}$ час и более временных интервалах относительно времени в очаге с низкой кажущейся скоростью, которая указывает, что они не являются результатом излучения из очага вулкана. Для анализа использовались сейсмограммы станций на эпицентральных расстояниях 6–150° с каналами VH и барограммы канала LDO, совмещенного с сейсмоприемником, а также барограммы двух станций сети DART, показанных на рис. 4.

Фрагменты сейсмограмм вертикальных каналов длительностью 17 ч, предварительно отфильтрованные полосовым фильтром в диапазоне 100–2000 с, представлены на рис. 5 (слева), а соответствующие им спектры – справа. На вертикальных компонентах максимальная спектраль-

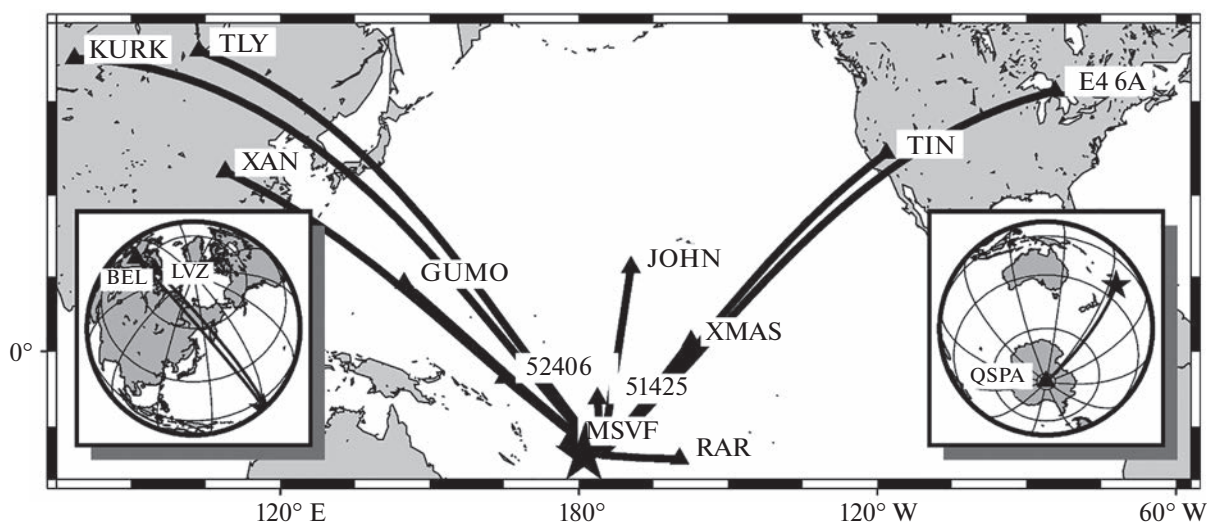


Рис. 4. Карта с расположением станций с каналами VH, сейсмограммы которых использованы для спектрального анализа медленных возмущений и две станции сети DART. Расположение удаленных станций BEL и LVZ в Европе и QSPA в Антарктиде показано на врезках.

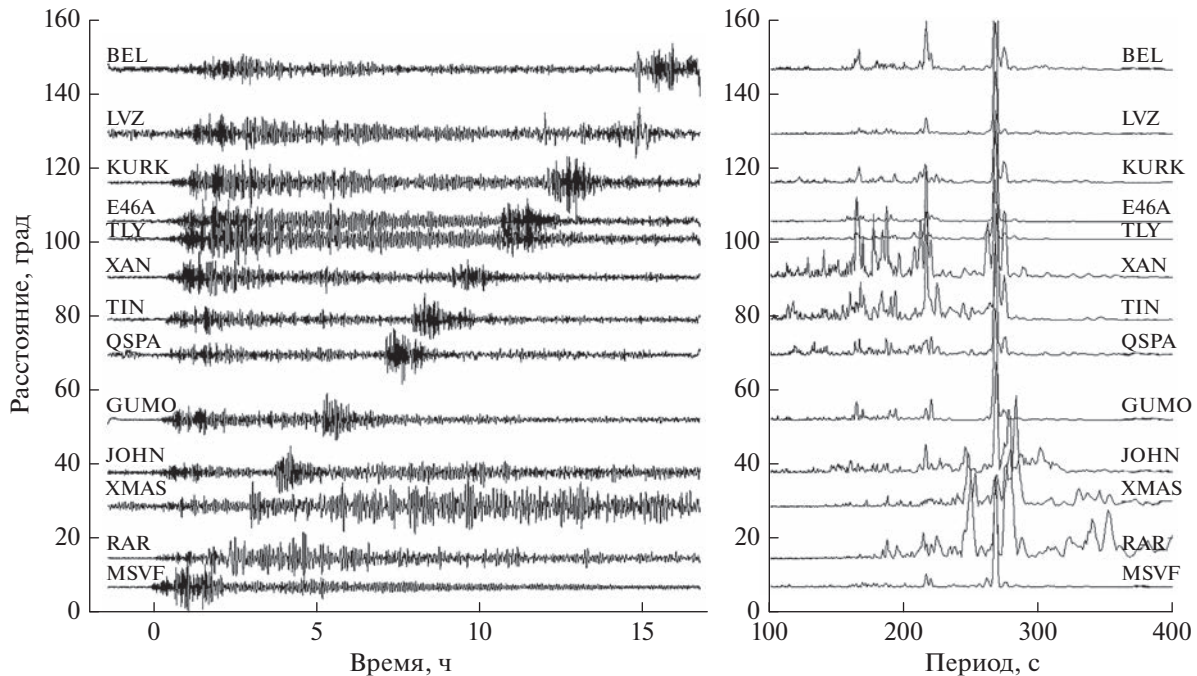


Рис. 5. Сейсмограммы на канале VHZ после фильтрации полосовым фильтром в диапазоне 100–2000 с и спектральные амплитуды для этих станций.

ная амплитуда на всех эпицентральных расстояниях имеет период 268 с. Также для всего набора данных выделен общий период колебаний 217 с. Спектральные компоненты с такими периодами отмечены в работе [Rowberry et al., 2022] как для анализируемого вулканического извержения, так и вулкана 1991 г. на Филиппинах. Спектральные максимумы с периодами 167 с наблюдаются только на расстояниях больше 50° , а несколько спектральных максимумов с периодами меньше 167 с на станциях XAN и TIN с, расположенных вблизи береговых линий континентов, вероятно, обусловлены локальными условиями.

На горизонтальных компонентах, как и на вертикальной компоненте, присутствует спектральный максимум с периодом 268 с (рис.6). Спектральный анализ фрагментов горизонтальных компонент сейсмограмм (рис.6 справа) демонстрирует и существенное отличие от спектров вертикальных компонент. На островных станциях в Тихом Океане (GUMO, JOHN, XMAS, RAR, MSVF) имеется четкий максимум с периодом 450 с и менее отчетливые с периодами 600–650 с.

Спектральный анализ с высоким разрешением по частоте не дает информации о временном положении возмущений с полученными периодами. В связи с этим были рассчитаны спектрально-временные диаграммы, которые имеют относительно низкое разрешение по частоте, но позволяют определить временную структуру сейсмического волнового поля. Для определения возможного ис-

точника медленных сейсмических возмущений были привлечены, во-первых, данные о вариациях акустических волн в атмосфере, зарегистрированные на сейсмических станциях, оборудованных датчиками давления. Особенности низкочастотных колебаний в медленных волнах, более детально видны на сейсмограммах вертикальной и горизонтальных компонент станции Джонстон (JOHN) на рис. 7.

Первая группа, отмеченная как P1, имеет более высокочастотный состав, чем вторая P2, и по времени вступления согласована с вступлением инфразвуковых возмущений (волна Лэмба) в атмосфере. Высокочастотные колебания в группе P1 поляризованы в вертикальной плоскости, с низким отношением вертикальной к горизонтальной осей поляризации. Кажущиеся скорости в группе P1 (табл. 3) относительно времени в очаге, измеренные на 5 станциях, лежат в диапазоне 0.28–0.37 км/с.

Другой тип колебаний P2. Колебания в P2 линейно поляризованы в горизонтальной плоскости с направлением, близким к направлению со станции на эпицентр. Для этого типа сейсмических возмущений скорость распространения составляет 0.21–0.26 км/с, что согласуется со скоростью гравитационных волн в гидросфере, для которых при глубине Тихого Океана в районе наблюдений 2000–5000 м из соотношения для скорости гравитационной волны $V \approx (gH)^{0.5}$ интервал возможных скоростей составляет $0.141 < V < 0.221$ км/с.

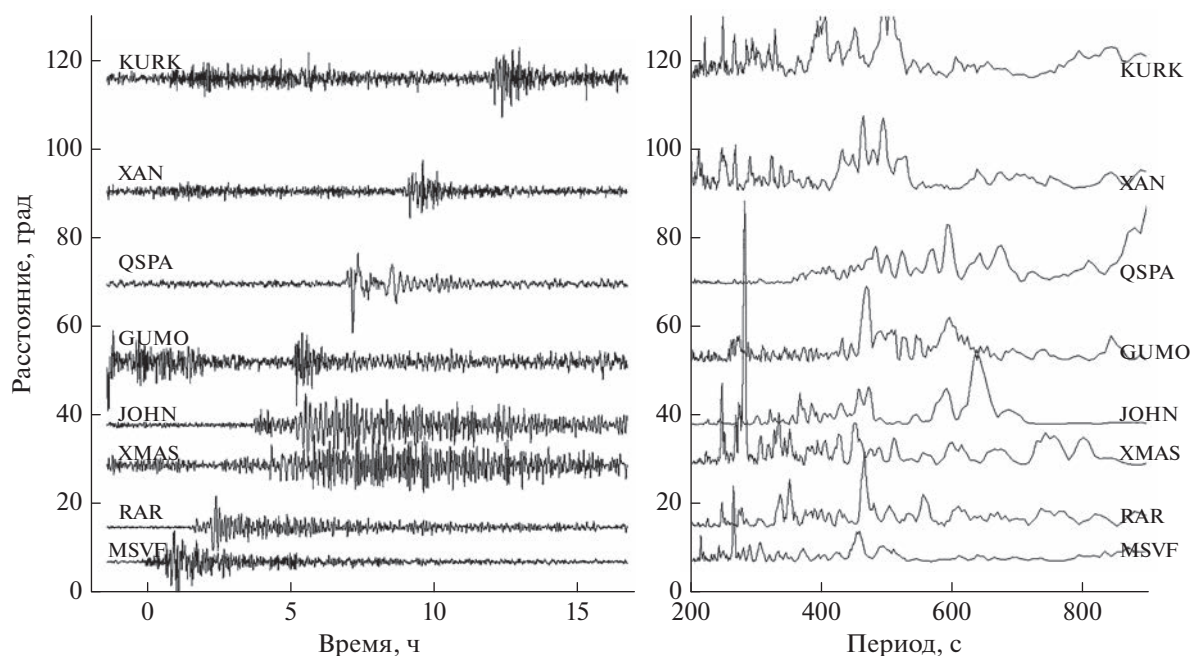


Рис. 6. Сейсмограммы на канале Vh1 (N-S) после фильтрации полосовым фильтром в диапазоне 100–2000 с и спектральные амплитуды для этих станций.

Такая интерпретация поддерживается данными измерений датчиков давления станций DART 52406 ($\Delta = 24^\circ$) и 51425 ($\Delta = 10^\circ$), расположенных относительно близко от станций RAR (12°) и JOHN (37.5°). На станциях DART наблюдаются также два типа колебаний (рис 8), аналогичные приведенным выше сейсмограммам. Имеющиеся данные не позволяют провести прямое сравнение

вследствие различия в эпицентральных расстояниях и азимутах, но структура сейсмограмм и барограмм подобна. Наиболее отчетливо это видно из сейсмограмм станции RAR и барограммы станции 51425.

На записях удаленных станций DART также наблюдаются диспергирующие гравитационные волны, приходящие с запаздыванием в несколько

Таблица 3. Результат измерения времен пробега медленных волн t и кажущейся скорости V

Код станции	Фаза	Время вступления			t пробега, с	V , км/с	Расстояние, градус
		час	мин	с			
MSVF	P1	04	52	18.381	2253.4	0.281	6.7
	P2	05	02	40.573	2875.6	0.259	
RAR	P1	05	46	12.534	5487.3	0.296	14
	P2	06	24	56.942	7811	0.207	
JOHN	P1	07	56	52.515	12970	0.386	37.5
	P2	09	21	57.619	18090	0.226	
XMAS	P1	07	24	47.976	11402.9	0.278	28
	P2	08	26	40.917	20267.6	0.209	
GUMO	P1	09	23	00.497	18495	0.311	51
	P2	11	1	39.559	25254.6	0.228	

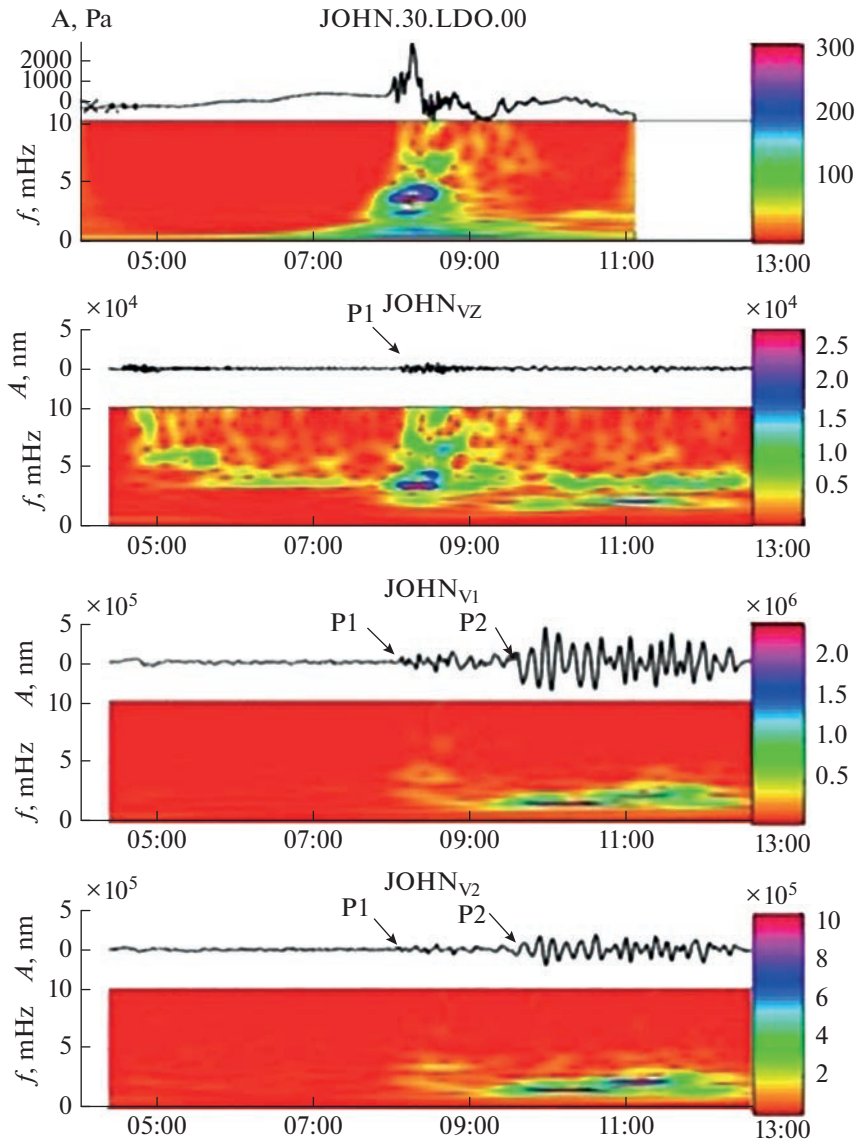


Рис. 7. Последовательно сверху вниз – барограмма и соответствующая ей спектрально-временная диаграмма, а также сейсмограммы (Z, E-W, N-S компоненты) и их спектрально-временные диаграммы на сейсмической станции Джонстон (JOHN). На оси абсцисс – время UTC 15.01.2022 г.

часов после прохождения акустических волн в атмосфере [Nosov et al., 2022].

3. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Прежде чем перейти к обсуждению полученных результатов приведем краткое описание процессов, связанных с извержением вулкана, данного в обзоре [Bebbington, Marzocchi, 2011]. По мере остывания магмы в камере образуются кристаллы, а летучие соединения, захваченные в оставшемся расплаве, растворяются, образуя пузырьки. Когда давление в камере приближается к критическому значению, богатая летучими веще-

ствами магма в верхней части камеры начинает прорывать крышу камеры с помощью листовидных интрузий, некоторые из которых могут выйти на поверхность при извержении вулкана. События, приводящие к извержению, проявляются как эпизоды вулканических волнений, характеризующиеся роями землетрясений, деформацией грунта и возбуждением гидротермальной системы, поскольку магма нагревает подземные воды в верхней части коры. Вулканические системы, которые эволюционировали до критического состояния, наиболее восприимчивы к небольшим возмущениям, вызванным отдаленным землетрясением.

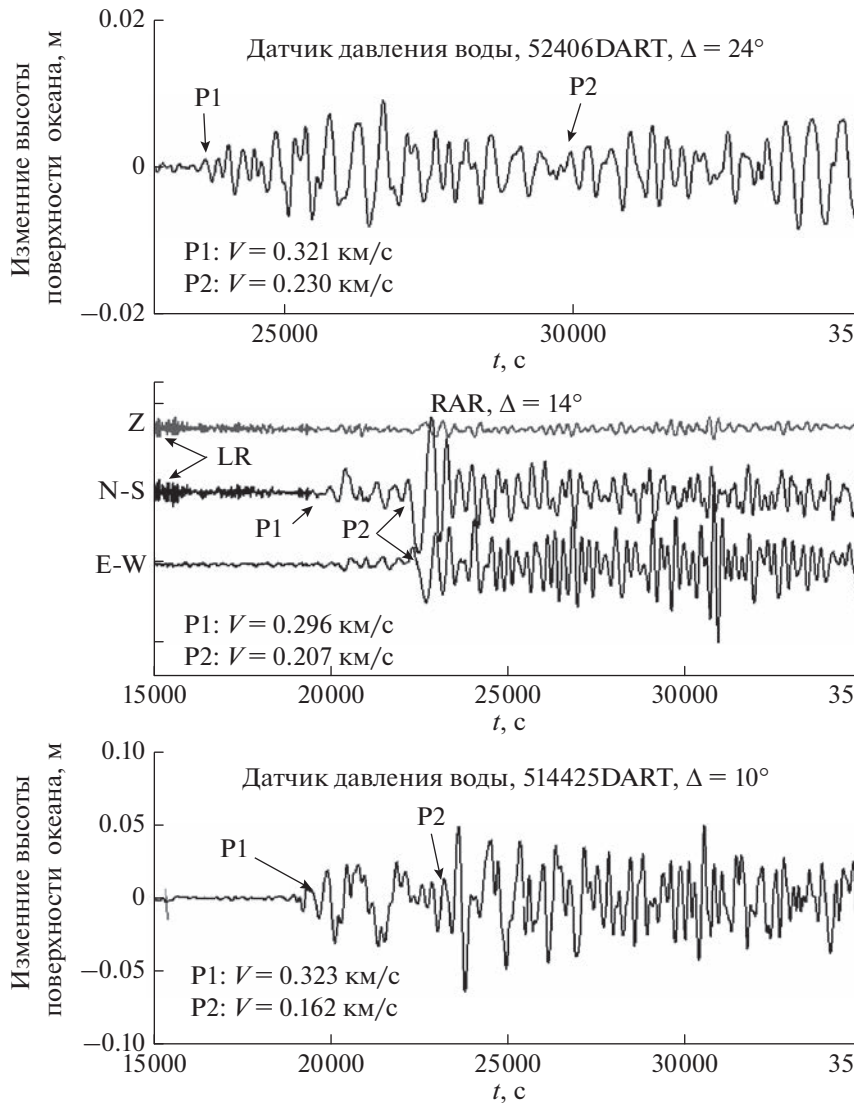


Рис. 8. Сравнение сейсмограмм на станции RAR и барограмм на станциях 51425 и 52406 сети наблюдений DART. Значения кажущейся скорости по сейсмограммам и барограммам приведены на каждом из рисунков.

В рассматриваемом нами случае локальной сейсмичности извержению предшествовал рой из 17 землетрясений в окрестности эпицентра (рис. 1), а следующие за ним землетрясения образовывали более плотный рой, сгруппированный вблизи эпицентра извержения. Однако такая пространственно-временная корреляция между сейсмическими и вулканическими событиями не обязательно подразумевает причинно-следственную связь. Два одновременных события могут быть результатом общего третьего процесса или произойти случайно. В частности, нельзя исключить влияния изменений напряженно-деформированного состояния среды, обусловленных погружением Тихоокеанской плиты под Австралийскую со скоростью 74 мм/год, и последствий, связанных с мощным землетрясением 2006 г. с магниту-

дой $M = 8$, имевшем место на расстоянии около 30 км от эпицентра извержения. И это единственное, что следует из пространственного распределения землетрясений. Тем не менее, изучение возможных пространственных и временных корреляций является необходимым первым шагом в раскрытии потенциальной причинно-следственной связи.

Другой аспект полученных результатов – возможная связь между сейсмическими возмущениями в твердой среде и инфразвуковыми волнами в атмосфере и гравитационными волнами в гидросфере. На это указывают временные, частотные и поляризационные характеристики сейсмического возмущения, отмеченного как P1, и барометрических данных, приведенных в разделе 2.3. Возможные три механизма связи акустических

волн в атмосфере с сейсмическими возмущениями рассматривались, например, в работе [Shved et al., 2011]. Во-первых, изменение плотности атмосферы приводит к воздействию на маятник сейсмометра силы Архимеда. Однако этот фактор должен в основном влиять на вертикальную составляющую сейсмических колебаний что не наблюдается на сейсмограммах — амплитуда колебаний на горизонтальных компонентах в 3 раза больше амплитуды вертикальной компоненты. Более того, маятники современных сейсмометров находятся в герметическом корпусе и, следовательно, не должны быть подвержены влиянию внешнего фактора. Во-вторых, движущийся фронт акустической волны может приводить к наклонам поверхности, на которой размещен сейсмоприемник, и в-третьих, возможно влияние силы ньютоновского притяжения, обусловленного изменением силы тяжести [Швед и др., 2020].

Что касается связи сейсмических возмущений P_2 с возмущениями в гидросфере, то возможно они обусловлены, например, заплеском волны цунами на побережье, где расположены сейсмометры, который будет приводить к наклону сейсмометра. Однако отсутствие возмущений на вертикальной компоненте делает этот механизм маловероятным. Возможно, это связано с вращательным движением, возникающим при взаимодействии гравитационной волны и островов, на которых наблюдаются сейсмические вступления P_2 .

Основные выводы.

1. Приведенные в работе результаты анализа сейсмичности в районе вулкана Хунга указывают на корреляционную связь между активизацией сейсмичности после извержения вулкана. Однако нельзя утверждать о причинно-следственной связи между предшествующими землетрясениями и извержением.

2. Экспериментальные данные о физических полях в атмосфере, гидросфере и твердой Земле указывают на их взаимодействие — сейсмические приборы зарегистрировали возмущения с периодами 268 с, наведенные инфразвуковыми волнами (волна Лэмба) в атмосфере, а возмущения с периодами 400–600 с на горизонтальных компонентах, по-видимому, связаны с взаимодействием островных территорий с гравитационными волнами в гидросфере.

3. Простые эмпирические закономерности, используемые в сейсмологии для определения магнитуды M_s , излученной при извержении сейсмической энергии E_s , скалярного сейсмического момента M_0 или энергии источника, возбуждавшего волны Рэлея, а также высоты волн цунами могут быть использованы для оперативной оценки опасности цунами при вулканическом извержении.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках Госзадания № 122040400015-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Рыбнов Ю.С., Спивак А.А. Геофизические эффекты извержения вулкана Тонга-Хунг-Ха-апай 15.01.2022 г. // Докл. РАН. 2022. Т. 504. № 2. С. 156–162.
- Буллен К.Е. Введение в теоретическую сейсмологию. М.: изд-во Мир. 1966. 400 с.
- Ванек И., Затопек А., Карник В., Кондорская К.В., Ризниченко Ю.В., Саваренский Е.Ф., Кейлис-Борок В.И. Интерференционные поверхностные волны. Изд-во АН СССР. 1960.
- Лыскова Е.Л. Глубокофокусные землетрясения // Вопросы геофизики. Вып. 47. 2014. С. 62–74.
- Носов М.А. Введение в теорию волн цунами. М.: Янус-К. 2019. 170 с. ISBN 978-5-8037-0773-8.
- Соловьев С.Л., Шебалин Н.В. Стандартизация шкалы магнитуд // Изв. АН СССР. Сер. Геофиз. 1962. № 2. С. 153–158.
- Швед Г.М., Новиков С.С., Гаврилов Н.М. Поиск проявлений атмосферных волн в одновременных совмещенных барометрических и гравиметрических измерениях Известия РАН // Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 1. С. 55–65.
- Шебалин Н.В. Очаги сильных землетрясений на территории СССР. М.: Наука. 1974. 53 с.
- Sawi T.M., Manga M. Revisiting short-term earthquake triggered volcanism // Bull. Volcanol. 2018. V. 80. P. 57.
- An C., Cai C., Zheng Y., Meng L., Liu P. Theoretical solution and applications of ocean bottom pressure induced by seismic seafloor motion // Geophysical Research Letters/2017. 44. <https://doi.org/10.1002/2017GL075137>
- Bassin C., Laske G., Masters G. The current limits of resolution for surface wave tomography in North America // EOS. 2000. V. 81. P. F897.
- Bebbington M.S., Marzocchi W. Stochastic models for earthquake triggering of volcanic eruptions // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. P. B05204.
- Duncombe J. The surprising reach of Tonga's giant atmospheric waves // EOS. 2022. V. 103. <https://doi.org/10.1029/2022EO220050>
- Eggert S., Walter T.R. Volcanic activity before and after large tectonic earthquakes: Observations and statistical significance // Tectonophysics. 2009. V. 471. P. 14–26. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2008.10.003>
- Gilles Seropian, Kennedy B.M., Walter T.R., Ichihara M., Jolly A.D. A review framework of how earthquakes trigger volcanic eruptions // Nature Communication. 2021. V. 12. P. 1004. <https://doi.org/10.1038/s4467-021-21166-8>
- Gusman A.R., Roger J. Hunga Tonga – Hunga Ha'apai volcano-induced sea level oscillations and tsunami simulations. GNS Science webpage. 2022. Accessed at <https://doi.org/10.21420/DYKJ-RK41>
- International Seismological Centre, On-line Bulletin. 2022. <https://doi.org/10.31905/D808B830>

- Kanamori H.* The energy release in great earthquakes // *J. Geoph. Res.* 1977. V. 82. P. 2981–2987.
- Komatitsch D., Ritsema J., Tromp J.* The spectral-element method, Beowulf computing, and global seismology // *Science.* 2002. V. 298(5599). P. 1737–1742. <https://doi.org/10.1126/science.1076024>
- Komatitsch Z., Xie E., Bozdağ E., Sales de Andrade D. Peter, Liu Q., Tromp J.* Anelastic sensitivity kernels with parsimonious storage for adjoint tomography and full waveform inversion // *Geophys J. Int.* 2016. V. 206(3). P. 1467–1478. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw224>
- Matoza R.S., Fee D., Assink J.D. et al.* Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption // *Tonga Science.* 2022. V. 377(6601). P. 95–100. <https://doi.org/10.1126/science.abo7063>.
- Nosov M., Sementsov K., Kolesov S., Pryadun V.* Volcanogenic tsunami on January 15, 2022: insights from deep-ocean measurements. European Geosciences Union General Assembly. 2022. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-13591>
- Pjli P., Shapiro N.* Rapid characterization of large volcanic eruption: measuring the impulse of the Hunga Nonga explosion from teleseismic waves // *Geophysical Research Letters.* 2022. V. 49. № 8. P. e2022GL098123. <https://doi.org/10.1029/2022GL098123>
- Rowberry M., Gunn J.* Atmospheric pressure anomalies at the British Cave Science Centre triggered by catastrophic volcanic eruption in Tonga on 15 January 2022 *Cave and Karst Science.* V. 49. № 1. (2022). 14–18 Transactions of the British Cave Research Association.
- Shved G.M., Karpova N.V., Petrova L.N., Orlov E.G., Ermolenko S.I.* Steady-frequency waves at intradiurnal periods from simultaneous co-located microbarometer and seismometer measurements: a case study // *Ann. Geophys.* 2011. V. 29. P. 1153–1167. www.ann-geophys.net/29/1153/2011/doi:10.5194/angeo-29-1153-2011
- Yuen D.A., Scruggs M.A., Frank J., Spera F.J., Zheng Y., Hu H., McNutt S.R., Thompson G., Mandli K., Keller B.R., Weig 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 Research Advances.* 2022. V. 2. <https://doi.org/10.1016/j.eqrea.2022.100134>

Seismic Phenomena Associated with the Eruption of a Volcano in the Area of the Tonga Archipelago on January 15, 2022

V. M. Ovtchinnikov^{a,*} and O. A. Usoltseva^{a,**}

^a*Institute of Geosphere Dynamics named after Academician M.A. Sadovsky Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334 Russia*

*e-mail: ovtch1@yandex.ru

**e-mail: kriukova@mail.ru

The study of changes in the seismic process associated with the eruption and the assessment of the energy parameters and structure of the wave field from seismic data is the subject of this work. Three types of disturbances are distinguished in the structure of the wave field. First of all, these are Rayleigh surface waves with an average oscillation period of 23 s, well traceable at distances up to 100 degrees. The group velocity of Rayleigh waves is 3.6–3.8 km/s. The magnitude calculated from them at stations mainly with oceanic propagation paths is $M_s = 5.52 \pm 0.18$, and the corresponding seismic energy was on the order of $E_c = (1-7) \times 10^{15}$ J, and the scalar seismic moment $M_0 = 2.4 \times 10^{17}$ J. Two other types of oscillations were detected on seismic channels with a frequency band from 0.0003 to 0.1 Hz of the stations. For the first, the apparent velocity of propagation of the disturbance lies in the range of 0.28–0.37 km/s with a characteristic period of 268 s. This type of disturbance is associated with the gravitational response of the seismometer to an acoustic disturbance in the atmosphere. For the second type of seismic disturbances, the propagation velocity is 0.21–0.28 km/s with characteristic periods of 450 s on the horizontal components of seismic receivers. This type of seismic disturbance is probably caused by the interaction of the gravitational wave in the hydrosphere with the coast of the islands on which the seismic stations are located.

Keywords: seismic Rayleigh waves, scalar seismic moment, seismic energy, infrasound waves in the atmosphere, gravitational waves in the hydrosphere