

Научные статьи

УДК 550.34+550.21

DOI: 10.31431/1816-5524-2022-1-53-12-23

*Посвящается памяти
д.ф.-м.н. П.П. Фирстова*

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ, ПРЕДВАРЯВШИЕ ЭКСПЛОЗИИ НА ВУЛКАНЕ КАРЫМСКИЙ (п-ов КАМЧАТКА) В ФЕВРАЛЕ 2019 ГОДА

© 2022 А.А. Шакирова

*Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН»,
Петропавловск-Камчатский, Россия, 683006;
e-mail: shaki@emsd.ru*

Поступила в редакцию 19.01.2022; после доработки 24.02.2022; принята в печать 27.03.2022

После непродолжительного затишья в феврале 2019 г. наблюдалась активизация вулкана Карымский (п-ов Камчатка, Россия). В течение месяца было зарегистрировано большое число умеренных по силе эксплозий, некоторые из которых предварялись длиннопериодными землетрясениями с определенной периодичностью и высокой степенью сходства волновых форм. Длительность мультиплетов, предварявших эксплозии, составляла от 4 до 70 минут. Рассмотрены особенности мультиплетов и выделены определенные закономерности сейсмичности. По мере развития мультиплета происходило уменьшение периода между землетрясениями. Амплитуда записей землетрясений либо увеличивалась, либо оставалась на том же уровне. Мультиплеты с наибольшей амплитудой записей землетрясений предваряли наиболее сильные эксплозии. Уменьшающийся период между землетрясениями, вероятнее всего, был вызван ускоряющимся подъемом магмы и повышающимся давлением газа в вулканическом канале. Прекращение генерации длиннопериодных землетрясений после эксплозии указывает на полный сброс давления в постройке вулкана.

Ключевые слова: вулкан, землетрясение, Карымский, сейсмичность, эксплозивное извержение, мультиплет.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия благодаря непрерывному мониторингу за активными вулканами их извержения удачно прогнозируются (Иванов, 2013; Салтыков, 2016; Сенюков, 2008; Bell et al., 2018). С годами расширяются представления о динамике магматических систем и о физических основах для интерпретации наблюдаемых вулканических явлений. Физические свойства магмы во время подъема и извержения претерпевают изменения из-за вариаций температуры и давления. Дегазация и охлаждение вызывают кристаллизацию и увеличение вязкости магмы, прочности и ее сжимаемости. Эти процессы при-

водят к геофизическим и феноменологическим эффектам, предшествующим и сопровождающим извержения (Butcher et al., 2020; Cayol et al., 2000).

Благодаря сейсмическому мониторингу в непосредственной близости от активных вулканов могут быть установлены корреляции между движением магмы, эруптивными явлениями и регистрируемой сейсмичностью (Bell et al., 2021; Iverson et al., 2006; Shakirova, Firstov, 2019; Thelen et al., 2010).

Ключевым моментом для вулканической сейсмологии было выделение различных типов землетрясений, характеризующих определенные физические процессы (Горшков, 1954а, 1954б; McNutt, 1996). Движение вулканических газов

и гидротермальных жидкостей сопровождается длиннопериодными землетрясениями (ДЗ), иногда такие землетрясения именуются низкочастотными (Chouet, 1996; Chouet et al., 1994; Neuberg, 2000). Позже был предложен альтернативный механизм генерации ДЗ, связанный с хрупкой деформацией (Neuberg et al., 2006). На основе изучения ДЗ, как правило, строятся прогнозы извержений вулканов (Сторчеус, 2007; Chouet, 1996; Frank et al., 2018; Haney et al., 2021; Varley et al., 2010a).

Вулкан Карымский (1536 м) находится в 125 км к северу от Петропавловска-Камчатского и является одним из активнейших вулканов полуострова Камчатка (рис. 1а, 1б). Он извергается с 1996 г. по настоящее время с небольшими перерывами в активности (Гордеев и др., 1998; Lopez et al., 2013) (рис. 1в). Такое непродолжительное сейсмическое затишье наблюдалось с октября 2018 г. по февраль 2019 г. (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>). С 15 февраля начали происходить эксплозии умеренной силы, что отмечено в фактографической базе данных «Активность вулканов Камчатки» Камчатского Филиала ФИЦ ЕГС РАН (<http://www.emsd.ru/~ssl/>

[monitoring/main.htm](http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm)). В феврале вынос пепла отмечался в основном до 2.0–3.5 км н.у.м. Пепловые облака отмечались на спутниковых снимках Токийским консультативным центром по вулканическому пеплу на расстоянии до 500 км от вулкана (VAAC Tokyo, <https://ds.data.jma.go.jp/svd/vaac/data/index.html>).

С 17 февраля на ближайшей к вулкану сейсмостанции «KRY» («Карымский») КФ ФИЦ ЕГС РАН (<https://www.emsd.ru/rtss/stations>) (рис. 1б) регистрировались серии длиннопериодных землетрясений (частота 3.5–5.5 Гц) — мультиплеты (вулканические землетрясения, характеризующиеся схожим признаком, в данном случае с однообразными волновыми формами), которые предвещали эксплозии (рис. 2). Особенностью этих землетрясений была почти постоянная периодичность их возникновения в начале мультиплета, с уменьшением временного периода между ними по мере приближения момента эксплозии. Также для периодичных сигналов в пределах мультиплета были характерны близкие волновые формы. После эксплозивного извержения периодические землетрясения переставали регистрироваться.

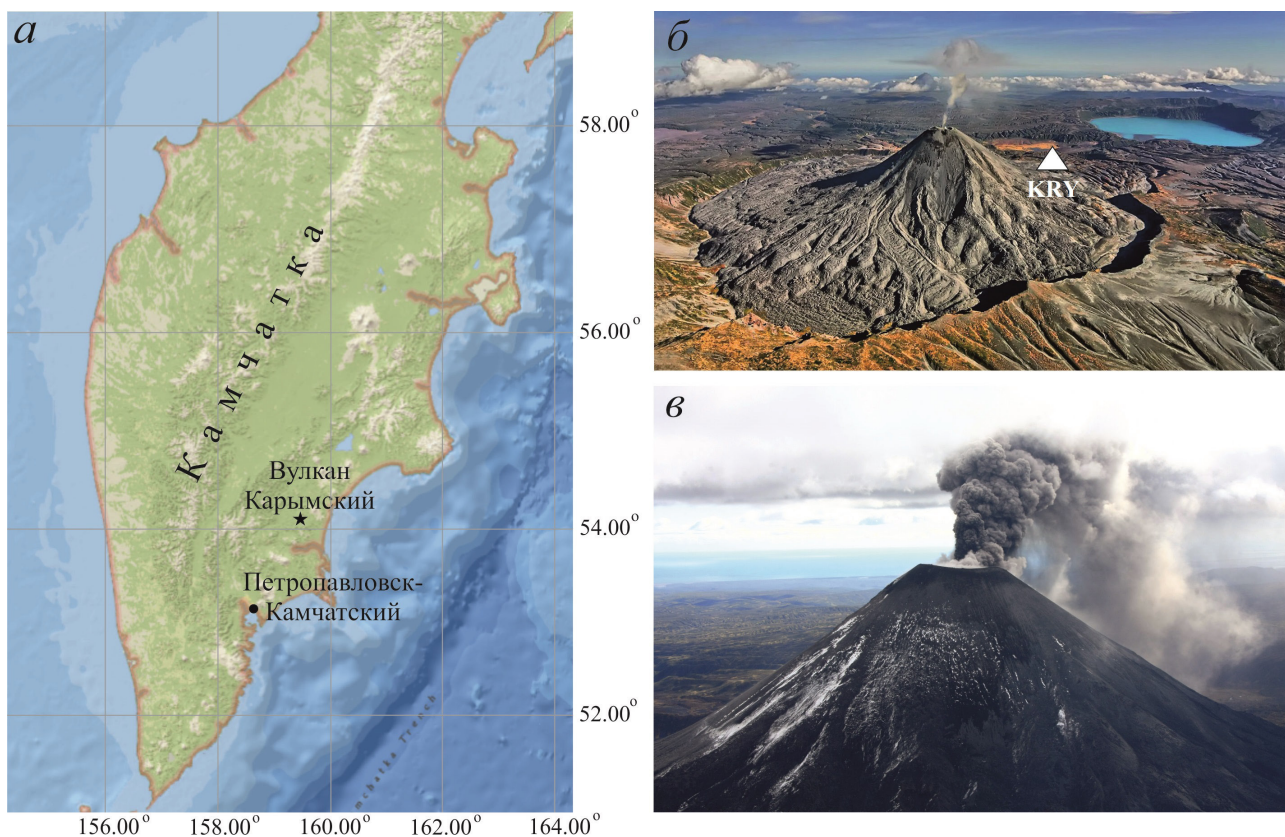


Рис. 1. Расположение вулкана Карымский на полуострове Камчатка (а), вулкан Карымский (<http://esgeo.ru>) (б), истечение пепла во время извержения Карымского вулкана 19 сентября 2012 г. (в) (фото А.А. Шакировой). Треугольник — сейсмическая станция «KRY» (<https://www.emsd.ru/rtss/stations>).

Fig. 1. Location of Karymsky volcano on the Kamchatka Peninsula (а), Karymsky volcano (<http://esgeo.ru>) (б), ash emissions during the eruption of Karymsky volcano on September 19, 2012 (в) (photo by A.A. Shakirova). Triangle — seismic station «KRY» (<https://www.emsd.ru/rtss/stations>).

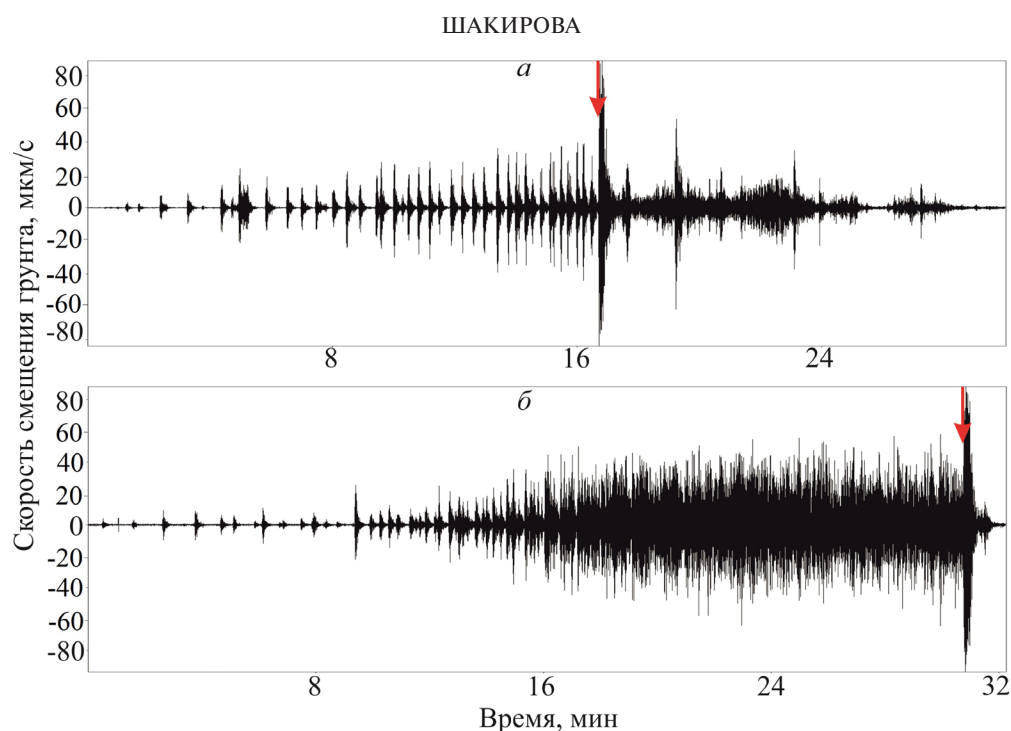


Рис. 2. Фрагмент сейсмической записи с/ст«KRY», канал SHE, 19 февраля 2019 г., начало отсчета времени соответствует 16:46:59 (а) и 23 февраля 2019 г., начало отсчета времени соответствует 5:24:01 (б). Стрелка указывает на момент эксплозии.

Fig. 2. Fragment of seismic record from seismic station «KRY», SHE channel, February 19, 2019, the time reference corresponds to 16:46:59 (a) and February 23, 2019, the time reference corresponds to 5:24:01 (b). The arrow indicates the moment of the explosion.

Мультиплеты землетрясений напоминают землетрясения режима «drumbeats» («барабанный бой»), сопровождавшие рост экструзивного купола на вулкане Сент-Хеленс (Iverson et al., 2006; Moran et al., 2008) и ряде других вулканов (Shakirova, Firstov, 2019), и движение вязкого лавового потока по склону вулкана Кизи-мен (Фирстов, Шакирова, 2019). Для режима «drumbeats» характерна следующая особенность: при увеличении временного периода между землетрясениями их амплитуда также увеличивается, что может быть объяснено увеличением силы разрушения, приводящей к тому, что скорость нагружения компенсируется менее частыми, но более сильными событиями (Bell et al., 2017).

Для сейсмической активизации вулкана Карымский в феврале 2019 г. была характерна иная зависимость — по мере развития мультиплета происходило увеличение или сохранение значений амплитуды сигналов при уменьшении временного интервала между ними. В настоящей работе рассматривается возможный механизм генерации этих землетрясений.

МЕТОДИКА

В районе вулкана Карымский функционирует единственная сейсмическая станция КФ ФИЦ ЕГС РАН «KRY», которая расположена

на удалении 1.5 км от вершины вулкана (рис. 1б) (Чебров В.Н. и др., 2013; Чебров Д.В. и др., 2020). На станции установлен сейсмоприемник СМ-3 с диапазоном измеряемых частот 0.5–100 Гц (Чебров и др., 2012).

Обработка записей сейсмических событий производилась с использованием интерактивной программы DIMAS (Дрознин, Дрознина, 2010), которая предназначена для детальной обработки и визуального анализа цифровых сейсмических сигналов, поступающих с сейсмических станций. Оценка спектральных характеристик проводилась с использованием программного пакета WinПОС, предназначенного для обработки сигналов, в котором строилась спектральная плотность мощности (СПМ) методом быстрого преобразования Фурье (WinПОС, 2010).

Для оценки схожести волновых форм землетрясений применялась программа «DrumCorr», основанная на кросс-корреляционном детекторе (Заболевкин и др., 2020). Выделение мультиплетов методом кросс-корреляции волновых форм широко распространено при анализе землетрясений, в том числе вулканических (Green, Neuberg, 2006; Matoza, Chouet, 2010; Stephens, Chouet, 2001). Считается, что если волновые формы землетрясений имеют высокие коэффициенты корреляции r , то они генерируются единым процессом и могут иметь общий неразрушающийся источник (Iverson et al., 2006; Moran et al., 2008).

Расчет коэффициентов корреляции производился по записям горизонтального канала SNE, который был выбран в силу лучшего отношения сигнал/шум. Параметры корреляции включают длину окна корреляции ~ 10 с — промежуточное значение между самыми длительными сигналами (около 15–18 с) и самыми короткими. Порог коэффициента корреляции был выбран $r_{\text{corr}} = 0.6$ по аналогии со значениями, выбранными при анализе землетрясений, сопровождавших рост экструзии на вулкане Унзен (Umakoshi et al., 2008), Суфриере Хиллс (Green, Neuberg, 2006) и Редаут (Stephens, Chouet, 2001). К записям применялся широкополосный фильтр 0.5–10 Гц.

Выделение землетрясений в мультиплеты выглядит следующим образом: эмпирически из серии землетрясений выбирался шаблон (рис. 3а), все землетрясения в пределах этой серии коррелировались с ним (рис. 3б). После применения кросс-корреляционного детектора формировался файл-отчет (рис. 3в), который содержал временную метку каждого землетрясения, соответствующий ему коэффициент корреляции r и амплитуду (A). Амплитуда и периоды (T) событий были сглажены с использованием скользящего среднего значения, рассчитанного для окон, содержащих 5 точек данных (мультиплеты № 1–7) и две точки (№ 8).

ОСОБЕННОСТИ МУЛЬТИПЛЕТОВ, ПРЕДВАРЯВШИХ ЭКСПЛОЗИИ

В период 17–23 февраля 2019 г. было выделено восемь мультиплетов землетрясений, предшествующих эксплозиям (табл. 1).

Длительность мультиплетов варьировалась от 4 до 70 минут. Амплитуда землетрясений менялась в пределах $0.99 \leq A \leq 55.26$ мкм/с. Частота возникновения землетрясений во времени в большинстве мультиплетов имела тенденцию к увеличению (т.е. уменьшался временной период между землетрясениями) по мере приближения эксплозии (отнесены к типу вулканической активности I (табл. 1)). В трех мультиплетах (№ 6–8) в результате увеличения количества землетрясений и, как следствие, их наложения друг на друга, возникало спазматическое дрожание, длительность которого составляла 4–14 минут, после которого происходила эксплозия (рис. 2б). Они отнесены к типу вулканической активности II (табл. 1).

По мере того, как временной период T между землетрясениями уменьшался, увеличение A наблюдалось не во всех мультиплетах.

В мультиплетах № 1, 2 (рис. 4а, 4б) T между землетрясениями уменьшался, значение $A_{\text{ср}}$ при этом сильно варьировалось. В № 4 (рис. 5а) $A_{\text{ср}}$ увеличивалась, а T очень варьировался. В № 5 (рис. 5б) A увеличилась в семь раз по сравнению с A землетрясений в начале мультиплета. В мультиплетах № 7, 8 (рис. 6) прослеживалась закономерность — при уменьшении T между землетрясениями их A возрастала.

От первого мультиплета к шестому $T_{\text{ср}}$ между землетрясениями уменьшалось со 100 до 17 с. В последних двух мультиплетах $T_{\text{ср}} = 44$ и 32 с. Продолжительность мультиплетов от первого к восьмому также сокращалась. Она составляла от более часа в самом начале активизации до 4–12 минут в последних трех мультиплетах.

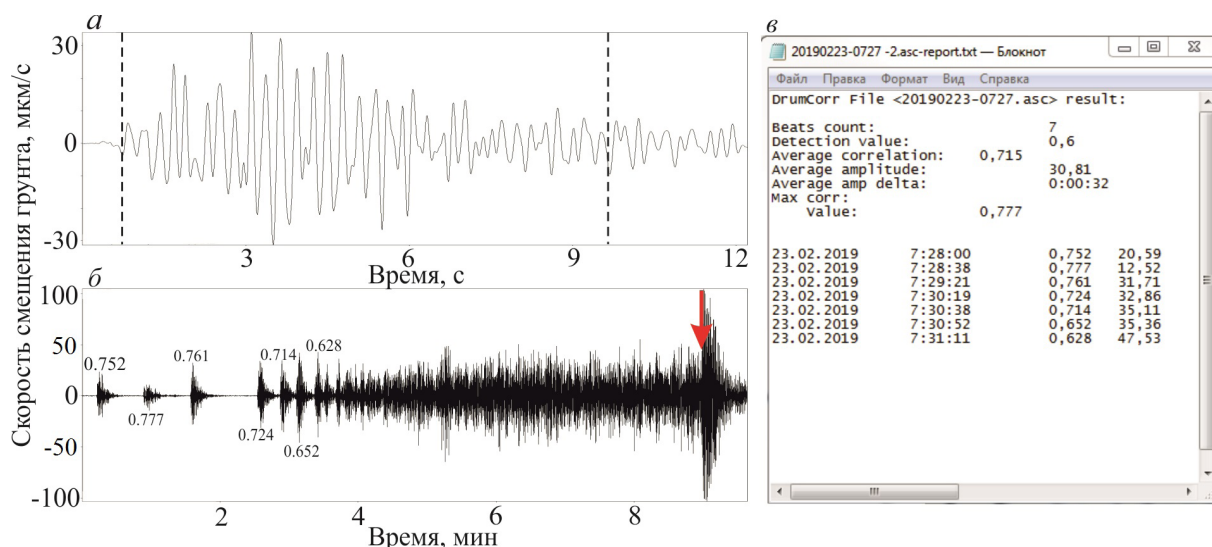


Рис. 3. Шаблон землетрясения мультиплета № 8 (23.02.2019г.), начало отсчета времени 07:30:19, длина шаблона выделена пунктирными линиями (а); серия землетрясений, предшествующая эксплозии, которая обозначена стрелкой (б); файл-отчет программы DrumCorr (в).

Fig. 3. Template earthquake of multiplet № 8 (February 23, 2019), time reference 07:30:19, the length of the template is marked with dotted lines (a); a series of earthquakes preceding the explosion, which is indicated by the arrow (b); DrumCorr report file (v).

Таблица 1. Мультиплеты землетрясений, зарегистрированные перед эксплозивными извержениями вулкана Карымский в феврале 2019 г.

Table 1. Earthquake multiplets recorded before explosions at Karymsky volcano in February 2019

№	ВА	Дата	t_1	t_2	t_3	T_{cp}	N	r	\bar{r}	A	A_{cp}	H
1	I	17.02	10:39	10:51	70	100	43	0.62-0.83	0.69	0.99-57.71	8.6	$\sim 3000 \pm 439$
2	I	18.02	21:53	22:28	55	86	27	0.60-0.87	0.7	1.25-27.54	10.3	$\sim 2700 \pm 349$
3	I	19.02	07:03	07:11	29	55	32	0.61-0.96	0.75	2-59.9	30.2	$\sim 3500 \pm 600$
4	I	21.02	06:02	06:06	27	24	68	0.61-0.98	0.74	1.83-55.26	18.3	$\sim 2400 \pm 300$
5	I	21.02	16:47	16:57	15	23	39	0.63-0.95	0.8	1.19-38.85	21.1	$\sim 2400 \pm 300$
6	II	21.02	21:46	21:47	4	17	27	0.63-0.99	0.78	9.34-28.31	20.5	$\sim 2400 \pm 300$
7	II	23.02	05:27	05:29	12	44	17	0.60-0.93	0.73	1.67-29.87	12.2	$\sim 2500 \pm 289$
8	II	23.02	07:28	07:30	4	32	7	0.63-0.78	0.71	12.5-47.5	30.8	$\sim 2600 \pm 319$

Примечание. ВА — тип вулканической активности; t_1 — время начала мультиплета; t_2 — время шаблона; t_3 — продолжительность мультиплета, мин; T_{cp} — средний временной период возникновения землетрясений, с; N — количество землетрясений в мультиплете; f — спектральная плотность мощности шаблонного землетрясения; r — диапазон коэффициентов корреляции в мультиплете; \bar{r} — средний коэффициент корреляции в мультиплете; A — диапазон амплитуд в мультиплете, мкм/с; A_{cp} — средняя амплитуда в мультиплете, мкм/с; H — высота эксплозии, м. н.у.м., согласно фактографической базе данных «Активность вулканов Камчатки» [<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>].

Note. VA is type of volcanic activity; t_1 is the start time of the multiplet; t_2 is the template time; t_3 is the duration of the multiplet, min; T_{av} is the average time period of earthquake occurrence, s; N is the number of earthquakes in the multiplet; f is the spectral power density of the template earthquake; r is the range of correlation coefficients in the multiplet; \bar{r} is the average correlation coefficient in the multiplet; A is the range of amplitudes in the multiplet, $\mu\text{m/s}$; A_{av} is the average amplitude in the multiplet, $\mu\text{m/s}$; H is the height of the explosion, a.s.l., according to the factographic database «Activity of volcanoes in Kamchatka» [<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>].

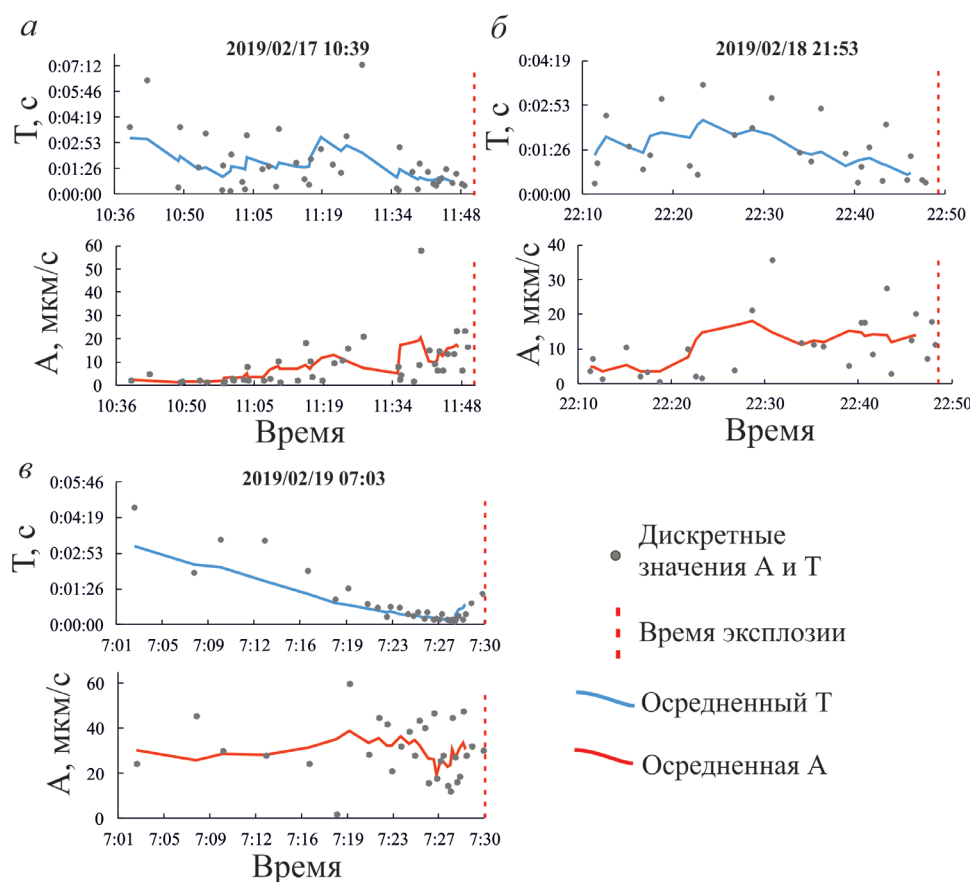


Рис. 4. Период между землетрясениями (с) и соответствующая амплитуда записи землетрясений (мкм/с) в мультиплетах № 1–3 (табл. 1).

Fig. 4. The period between earthquakes (с) and corresponding earthquake recording amplitude ($\mu\text{m/s}$) in multiplets № 1–3 from. See Table 1.

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

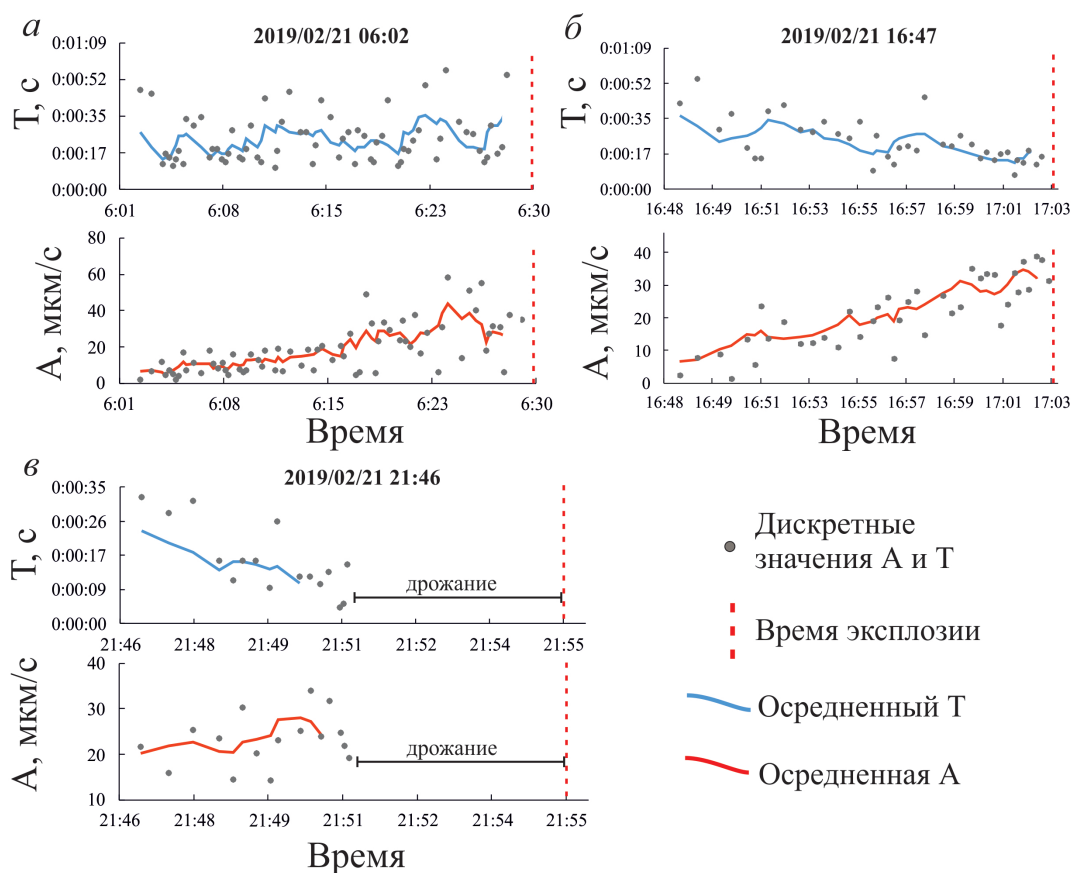


Рис. 5. Период между землетрясениями (с) и соответствующая амплитуда записи землетрясений (мкм/с) в мультиплетах № 4–6 (табл. 1).

Fig. 5. The period between earthquakes (с) and corresponding earthquake recording amplitude (μm/s) in multiplets № 4–6 from. See Table 1.

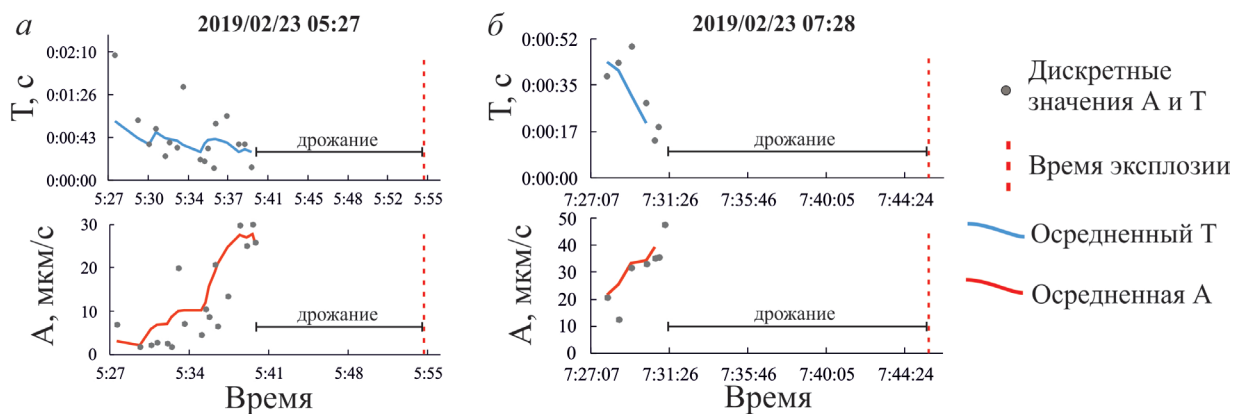


Рис. 6. Период между землетрясениями (с) и соответствующая амплитуда записи землетрясений (мкм/с) в мультиплетах № 7, 8 (табл. 1).

Fig. 6. The period between earthquakes (с) and corresponding earthquake recording amplitude (μm/s) in multiplets № 7, 8. See Table 1.

Землетрясения в пределах каждого мультиплета имели очень схожие волновые формы, коэффициенты корреляции в них составляли $0.6 \leq r \leq 0.99$ (табл. 1). В мультиплетах № 4–8 все землетрясения из выборки были помещены в мультиплет.

Коэффициенты корреляции рассчитывались по записям с количеством отсчетов $n \sim 1400$.

Распределение выборочного коэффициента корреляции при количестве отсчетов $n > 200$ оценивается по формуле (Кобзарь, 2006):

$$\sigma = \sqrt{(1 - r^2)/(n - 1)}, \quad (1)$$

где r — значение коэффициента корреляции.

Исходя из значений, распределение выборочного коэффициента корреляции $r \geq 0.6$, можно считать значимым (табл. 2).

Таблица 2. Распределение выборочного коэффициента корреляции при количестве отсчетов $n \sim 1400$.

Table 2. Distribution of the sample correlation coefficient for the number of readings $n \sim 1400$.

r	n	σ	2σ	3σ
0.6	1400	0.021	0.042	0.063

Примечание. r — коэффициент корреляции; n — количество отсчетов; σ — распределение коэффициента корреляции.

Note. r is the correlation coefficient; n is the number of readings; σ is the distribution of the correlation coefficient.

В начале активизации (мультиплеты № 1, 2) менее половины всех сгруппированных землетрясений имели $r > 0.7$. Начиная с мультиплета № 3 — более половины. В мультиплете № 4 89% землетрясений имели $r > 0.7$. r_{\max} в мультиплетах составлял 0.78–0.99.

С увеличением временного расстояния от землетрясения, взятого за шаблон, значения коэффициентов корреляции немного снижались, но находились в пределах значений $r > 0.6$. Такое систематическое изменение предполагает, что волновые формы постепенно эволюционировали, но исходный процесс для них был одинаков.

Шаблоны землетрясений (рис. 7) также были скоррелированы между собой и имели $0.5 < r < 0.6$, из чего следует, что механизм их генерации схож, но тем не менее, немного отличался от мультиплета к мультиплету.

СПЕКТРАЛЬНАЯ ПЛОТНОСТЬ МОЩНОСТИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Спектральные характеристики землетрясений анализировались по записям выбранных шаблонов землетрясений (рис. 7). Большая часть энергии всех землетрясений сосредоточена ниже 7.5 Гц (рис. 8). Для землетрясений, происходивших в начале сейсмической активизации (мультиплеты № 1, 2), были характерны пики на частотах $f=3.8$ и $f=4.3$ Гц. Начиная с 19 февраля, в СПМ произошел сдвиг в более высокочастотную область на $f=4.3$ и $f=5$ Гц. Такая СПМ была характерна и для землетрясений 21 февраля (4.5 и 5.1 Гц) с добавлением пика на $f=3.5$ Гц. В СПМ шаблонного землетрясения мультиплета № 7 выделялись пики $f=3.5, 4.5, 5.1$ и 5.5 Гц, в мультиплете № 8 более низкочастотные пики — $f=3.5$ и $f=4.1$ Гц.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для большинства мультиплетов землетрясений, зарегистрированных на вулкане Карымский в феврале 2019 г., выявлена следующая закономерность: по мере приближения к эксплозии временная частота регистрации землетрясений увеличивалась, а амплитуда оставалась на том же уровне, либо увеличивалась. Мультиплеты, в которых 4 землетрясения была выше (№ 1, 3), предвещали наиболее сильные эксплозии,

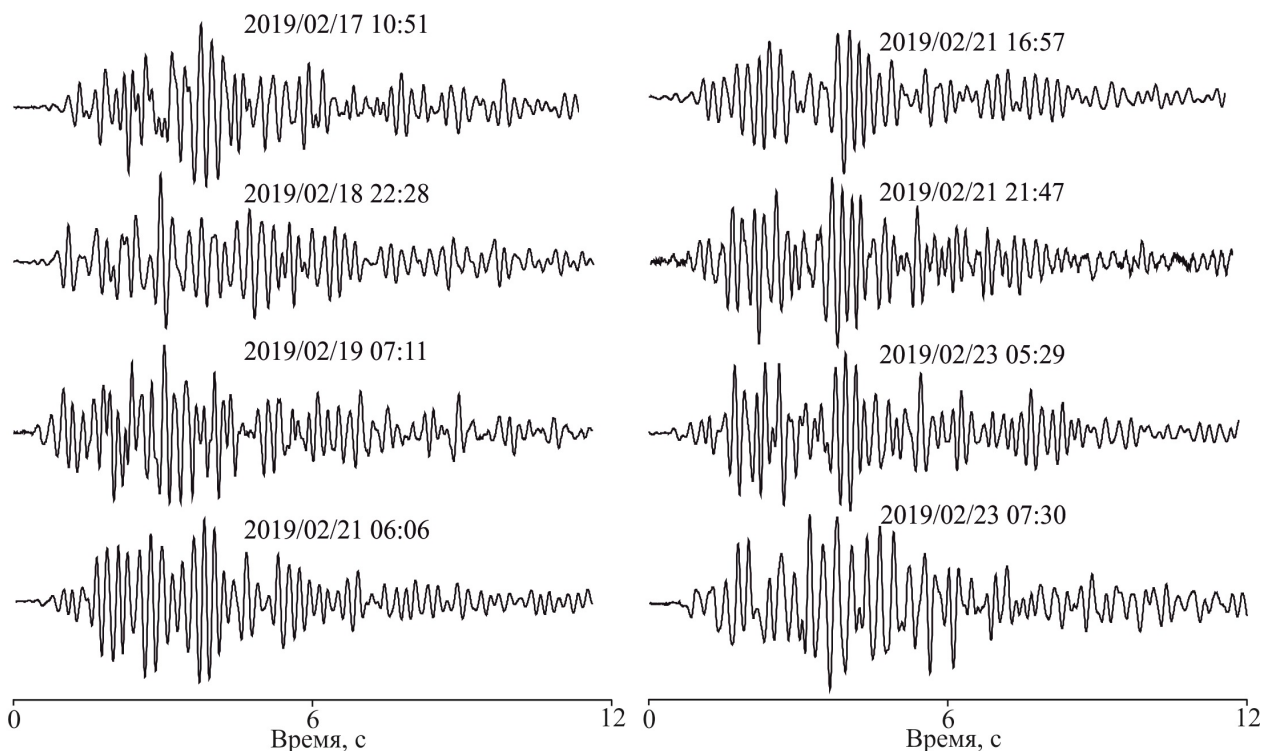


Рис. 7. Волновые формы шаблонов землетрясений.

Fig. 7. Wave forms of template earthquakes.

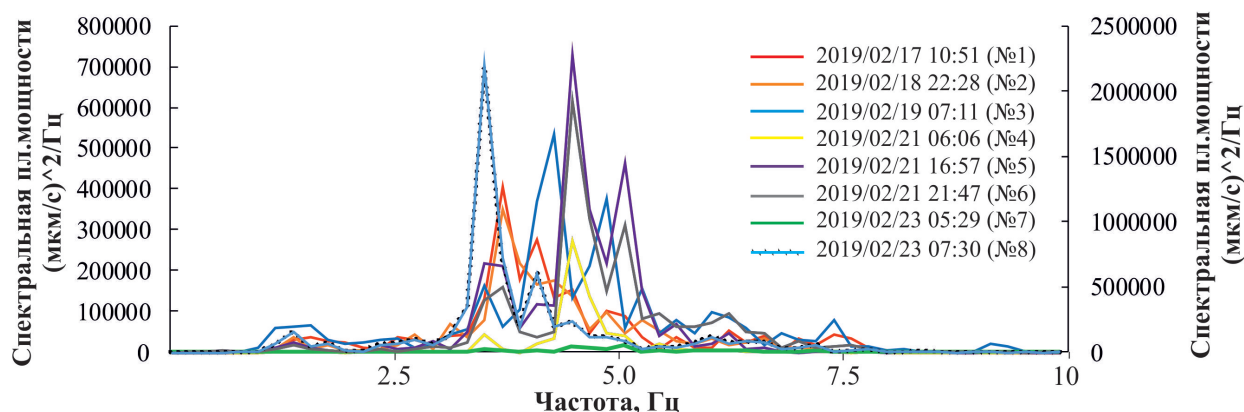


Рис. 8. Спектральная плотность мощности шаблонов мультиплетов № 1–8 (табл. 1).

Fig. 8. Spectral power density of templates of multiplets № 1–8 from Table 1.

достигшие высот 3–3.5 км н.у.м., согласно базе «Активность вулканов Камчатки» (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>). При этом высота, а значит и энергия выброса, не зависели от длительности предшествующего ей мультиплета. После эксплозии землетрясения на с/ст «KRY» не регистрировались. Землетрясения, зарегистрированные перед эксплозиями Карымского вулкана, имели типичную волновую форму для длиннопериодных, без четких вступлений Р- и S-волн с пиками на частотах $f=3.5-5.5$ Гц.

Ранее, во время извержений вулкана Карымский, регистрировались периодические сигналы (сигналы, которые происходят точно через фиксированный промежуток времени — период, и имеют близкие амплитуды). К примеру, с 1996 по 1999 гг., регистрировались эксплозивные извержения каждые 5–15 мин (Gordeev et al., 1998; Johnson et al., 1998). Также на Карымском вулкане наблюдались периодические сейсмические сигналы, связанные с «пыхтением» (chugging) (Lees et al., 2004). В этом случае пульсирующая последовательность землетрясений возникала после эксплозии с частотой от 0.7 до 1.5 с. Выделялась корреляция амплитуды и временного интервала между импульсами — чем дольше была пауза, тем больше энергии выделялось. Для объяснения природы возникновения «пыхтения» была предложена следующая модель (Lees et al., 2004). После эксплозии возникал эффект проседания, который перекрывал поток газа, и он попадал в так называемые приповерхностные карманы. Когда газ находил пути выхода через сужающийся канал, происходило «пыхтение».

Еще одной выделенной вулканической активностью, характерной для Карымского вулкана, является пульсирующая дегазация, что отмечалось в 2011 г. (Lopez et al., 2013). Средняя продолжительность землетрясений составляла 1.5 минуты, а период между дегазацией составлял 2.9 минуты.

Квазипериодические сигналы, предварявшие эксплозии на вулкане Карымский, ранее не были зарегистрированы ближайшей с/ст «KRY». Зарегистрированные в 2019 г. сигналы были достаточно слабыми, а так как в районе вулкана функционирует всего одна с/ст, то точные местоположения землетрясений не известны. По мнению автора, механизм, ответственный за генерацию длиннопериодных землетрясений и эксплозий в феврале 2019 г., является общим. На это указывает тот факт, что после эксплозии длиннопериодные землетрясения прекращали регистрироваться с/ст «KRY».

Увеличивающаяся временная частота землетрясений перед эксплозиями была зарегистрирована на вулкане Тунгурауа (Эквадор) в 2015 г. (Bell et al., 2018). Сигналы были зарегистрированы во время эпизода небольшой взрывной активности и выброса пепла без излияния лавы. Предположительно, такие землетрясения являлись результатом газового потока и быстрой разгерметизации вулканического канала, контролируемой разрушением, вызванным сдвигом на контакте восходящей магмы и вмещающих пород. Также подобная феноменология была отмечена во время активизации вулкана Колима (Мексика) в 2005 г. (Varley et al., 2010a, 2010b). Было установлено, что эксплозия происходила спустя ~6 часов после начала регистрации мультиплета. Модель, описывающая возникновение более сильных землетрясений по мере развития мультиплета, связана с увеличивающейся скоростью подъема магматического материала.

Как для землетрясений, зарегистрированных на Карымском вулкане, так и для землетрясений во время активизаций вулканов Тунгурауа и Колима, были характерны высокие коэффициенты корреляции волновых форм (Bell et al., 2018; Varley et al., 2010a), что предполагает тесно связанный механизм возбуждения, для которого характерны незначительные отклонения от условий, близких к равновесным. Очевидно,

что местоположение сейсмического источника оставалось стабильным во времени, на это указывали небольшие изменения в волновых формах. В работе (Green, Neuberg, 2006) было установлено, что очаги квазирегулярных землетрясений с подобными волновыми формами, зарегистрированные на вулкане Суфриере Хиллс, могли находиться в объеме нескольких сотен метров или даже меньше.

Механизм генерации периодических землетрясений на вулкане Карымский в феврале 2019 г., по мнению автора, связан с увеличением скорости подъема магматического материала. Ускоряющийся подъем магмы вызывал повышающееся давление газа в вулканическом канале. Прекращение генерации длиннопериодных землетрясений после эксплозии указывает на полный сброс давления в постройке вулкана. Если уменьшающиеся временные периоды между землетрясениями вызваны изменением скорости повышения давления газа, то переход отдельных землетрясений в дрожание может указывать на более постоянное газовое истечение (Chouet et al., 1994). Так как продолжительность мультиплетов от первого к восьмому сокращалась, это может означать, что со временем канал становился более прочищенным, а путь для выхода газа более свободным.

Для длиннопериодных землетрясений большая часть энергии сосредоточена ниже 6 Гц. На вулкане Колима землетрясения характеризовались пиком на частоте $f=2.6$ Гц (Varley et al., 2010a). Для землетрясений, зарегистрированных на вулкане Тунгурауа, характерным пиком был $f=3$ Гц (Bell et al., 2017). Землетрясения, зарегистрированные перед эксплозиями Карымского вулкана, имели типичную волновую форму для длиннопериодных, без четких вступлений Р- и S-волн с пиками на частотах $f=3.5-5.5$ Гц. Согласно эталонным сейсмическим сигналам для вулкана Карымский и сопутствующим им вулканическим событиям, длиннопериодные землетрясения по частотным составляющим ближе к пепловым выбросам (Кожевникова, 2007). Выбросы, наблюдавшиеся с 28 ноября по 8 декабря 2008 г., характеризовались сейсмическим сигналом с преобладающей частотой 1–1.5 Гц, которая по мере развития события увеличивалась до 3.5–5.0 Гц.

Изучение ускоряющихся последовательностей землетрясений представляет возможность как для лучшего понимания физических процессов, которые контролируют приближение извержения, так и для более надежных прогнозов извержения. Мультиплеты квазипериодических землетрясений могут служить фактором, указывающим на приближающееся эксплозивное извержение вулкана Карымский.

Стоит отметить, что исследовать извержение Карымского вулкана сложно из-за его относительно удаленного местоположения. Поэтому дистанционное изучение поведения эксплозивных извержений и закономерностей сейсмичности, предвещающих их, является актуальной задачей для усовершенствования мониторинга и прогнозирования его извержений.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-01471-22) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Список литературы

- Гордеев Е.И., Дрознин Д.В., Касахара М. и др. Сейсмические явления, связанные с извержениями вулканов в Карымском вулканическом центре в 1996 г. // Вулканология и сейсмология. 1998. № 2. С. 28–48 [Gordeev E.I., Droznin D.V., Kasahara M. et al. Seismic events associated with the 1996 volcanic eruptions in the Karymsky volcanic center // Volcanology and Seismology. 1998. V. 19. P. 713–735].
- Горшков Г.С. Сейсмические наблюдения в 1949 г. // Бюллетень вулканологических станций. 1954а. № 21. С. 19–39 [Gorshkov G.S. Seismic observations in 1949 // Byulleten vulkanologicheskikh stanciy. 1954а. № 21. P. 19–39 (in Russian)].
- Горшков Г.С. Вулканическое дрожание, связанное с прорывом кратера Былинкиной // Бюллетень вулканологических станций. 1954б. № 23. С. 33–37 [Gorshkov G.S. Volcanic tremor associated with the breakthrough of the crater Bylinkina // Byulleten vulkanologicheskikh stanciy. 1954б. № 23. P. 33–37 (in Russian)].
- Дрознин Д.В., Дрознина С.Я. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46, № 3. С. 22–34 [Droznin D.V., Droznina S.Ya. Interactive DIMAS program for processing seismic signals // Seismic instruments. 2011. V. 47. P. 215–224].
- Заводевкин И.А., Шакирова А.А., Фирстов П.П. Выделение землетрясений с близкими волновыми формами и магнитудой в потоке сейсмических событий (программа DRUMCORR) // Геология, геоэкология, эволюционная география: Коллективная монография. Т. XIX / Под ред. Е.М. Нестерова, В.А. Снытко. СПб.: Издво РГПУ им. А.И. Герцена. 2020. С. 68–72 [Zavodevkin I.A., Shakirova A.A., Firsov P.P. Identification of earthquakes with similar waveforms and magnitudes in the flow of seismic events (DRUMCORR program) // Geologiya, geoekologiya, evolyucionnaya geografiya: Kollektivnaya monografiya. V. XIX / Pod red. E.M. Nesterova, V.A. Snytko. SPb.: Izdvo RGPU im. A.I. Gercena. 2020. P. 68–72 (in Russian)].
- Иванов В.В. Средне- и краткосрочные прогнозы извержений вулканов на Камчатке (1956–2012 гг.)

- // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013. № 2(22). С. 98–119 [Ivanov V.V. Mid- and short-term forecasts of volcanic eruptions in Kamchatka (1956–2012) // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2013. № 2(22). P. 98–119 (in Russian)].
- Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 816 с. [Kobzar A.I. Applied mathematical statistics. For engineers and scientists. M.: FIZMATLIT, 2006. 816 p. (in Russian)].
- Кожевникова Т.Ю. Электронная база эталонов сейсмических сигналов и сопутствующих им вулканических событий для вулкана Карымский // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России: в 2 томах. Труды региональной научно-технической конференции. Т. 2 / Отв. ред. к.т.н. В.Н. Чебров и к.ф.-м.н. В.А. Салтыков. Петропавловск-Камчатский. 11–17 ноября 2007, г. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. С. 171–175 [Kozhevnikova T.Yu. Electronic database of standards of seismic signals and accompanying volcanic events for the Karymsky volcano // Geofizichesky monitoring i problemy seismicheskoy bezopasnosti Dalnego Vostoka Rossii: v 2 tomakh. Trudy regionalnoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii. V. 2 / Otв. red. k.t.n. V.N. Chebrov i k.f.-m.n. V.A. Saltykov. Petropavlovsk-Kamchatsky. 11–17 noyabrya 2007 g. Petropavlovsk-Kamchatsky: GS RAN, 2008. P. 171–175 (in Russian)].
- Салтыков В.А. Формализованная методика прогноза извержения вулкана Безымянный (Камчатка) на основе статистической оценки уровня сейсмичности / Геофизические исследования. 2016. Т. 17. №3. С. 45–59. <http://dx.doi.org/10.21455/gr2016.3-4> [Saltykov V.A. Formalized technique of Bezmyanny volcano (Kamchatka) eruption forecasting based on the statistical estimation of seismicity level // Geophysical research. 2016. V. 17. № 3. P. 45–59 (in Russian)].
- Сенюков С.Л. Результаты применения алгоритма прогноза извержений вулкана Безымянный в 2004–2007 гг. в режиме реального времени // Труды региональной научно-технической конференции. Т. 2 / Отв. ред. к.т.н. В.Н. Чебров и к.ф.-м.н. В.А. Салтыков. Петропавловск-Камчатский, 11–17 ноября 2007 г. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. С. 59–63 [Senyukov S.L. Results of applying the Bezmyanny volcano eruptions prediction algorithm in 2004–2007 in real time // Trudy regionalnoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii. V. 2 / Otв. red. k.t.n. V.N. Chebrov i k.f.-m.n. V.A. Saltykov. Petropavlovsk-Kamchatsky. 11–17 noyabrya 2007 g. Petropavlovsk-Kamchatsky: GS RAN, 2008. P. 59–63 (in Russian)].
- Сторчеус А.В. Рой длиннопериодных вулканических землетрясений, предвалявших извержение Карымского вулкана в 1996 г. // Материалы ежегодной конференции, посвященной дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2007. С. 75–82 [Storcheus A.V. A swarm of long-period volcanic earthquakes that preceded the eruption of the Karymsky volcano in 1996 // Materialy ezhegodnoy konferencii, posvyashchennoy dnyu vulkanologa. Petropavlovsk-Kamchatsky: IVis DVO RAN, 2007. P. 75–82 (in Russian)].
- Фирстов П.П., Шакирова А.А. Сейсмический режим «drumbeats», предваляющий и сопровождающий извержения андезитовых и дацитовых вулканов и его особенности (обзор) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2019. № 3. Вып. 43. С. 75–88. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-3-43-75-88> [Firstov P.P., Shakirova A.A. Seismic mode «drumbeats»: promoting and supporting eruption of andesitic and dacitic volcanoes and their features (overview) // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2019. № 3(43). P. 75–88 (in Russian)].
- Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Кугаенко Ю.А. и др. Детальные сейсмологические наблюдения на Камчатке. Современное состояние (2011 г.) // Сейсмологические и геофизические исследования на Камчатке. К 50-летию детальных сейсмологических наблюдений. Петропавловск-Камчатский: Холд. Комп. «Новая книга». 2012. Глава 2. С. 36–66 [Chebrov V.N., Droznin D.V., Kugaenko Yu.A. et al. Detailed seismological observations in Kamchatka. Current state (2011) // Seismologicheskie i geofizicheskie issledovaniya na Kamchatke. K 50-letiyu detalnyh seismologicheskikh nablyudeny. Petropavlovsk-Kamchatsky: Hold. Komp. «Novaya kniga». 2012. Glava 2. P. 36–66 (in Russian)].
- Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Кугаенко Ю.А. и др. Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 18–40 [Chebrov V.N., Droznin D.V., Kugaenko Y.A. et al. The system of detailed seismological observations in Kamchatka in 2011 // Journal of Volcanology and Seismology. 2013. V. 7. Iss. 1. P. 16–36 (in Russian)].
- Чебров Д.В., Дрознина С.Я., Сеньюков С.Л. и др. Результаты сейсмического мониторинга различных регионов России. Камчатка и Командорские острова // Землетрясения России в 2018 году. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН. 2020. С. 71–80 [Chebrov D.V., Droznina S.Ya., Senyukov S.L. et al. Results of seismic monitoring of various regions of Russia. Kamchatka and the Commander Islands // Zemletryaseniya Rossii v 2018 godu. Obninsk: FIC EGS RAN. 2020. P. 71–80 (in Russian)].
- Bell A., Hernandez S., Gaunt H. et al. The rise and fall of periodic ‘drumbeat’ seismicity at Tungurahua volcano, Ecuador // Earth and Planetary Science Letters. 2017. V. 475. P. 58–70. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2017.07.030>
- Bell A., Naylor M., Hernandez S. et al. Volcanic Eruption Forecasts From Accelerating Rates of Drumbeat Long-Period Earthquakes // Geophysical Research Letters. 2018. V. 45. P. 1339–1348. <https://doi.org/10.1002/2017GL076429>
- Bell A., Hernandez S., Christopher La Femina P. et al. Uplift and Seismicity Driven by Magmatic Inflation at Sierra Negra Volcano, Galápagos Islands // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2021. V. 126. P. 1–18. <https://doi.org/10.1029/2021JB022244>
- Butcher S., Bell A.F., Hernandez S. et al. Drumbeat LP «Aftershocks» to a Failed Explosive Eruption at Tungurahua Volcano, Ecuador // Geophysical Research Letters. 2020. V. 47. P. 1–10. <https://doi.org/10.1029/2020GL088301>
- Cayol V., Dieterich J., Okamura T., Miklius A. High Magma Storage Rates Before the 1983 Eruption of Kilauea,

- Hawaii // Science. 2000. V. 288. № 5475. P. 2343–2346. <https://doi.org/10.1126/science.288.5475.2343>
- Chouet B.A., Page R.A., Stephens C.D. et al.* Precursor swarms of long-period events at Redoubt volcano (1989–1990), Alaska: their origin and use as a forecasting tool // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 1994. V. 62. № 1–4. P. 95–135.
- Chouet B.A.* Long-period volcano seismicity: its source and use in eruption forecasting // Nature. 1996. V. 380. P. 309–316.
- Frank W., Shapiro N., Gusev A.* Progressive reactivation of the volcanic plumbing system beneath Tolbachik volcano (Kamchatka, Russia) revealed by long-period seismicity // Earth and Planetary Science Letters. 2018. V. 493. № 1. P. 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.04.018>
- Green D.N., Neuberg J.* Waveform classification of volcanic low-frequency earthquake swarms and its implication at Soufriere Hills Volcano, Montserrat // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2006. V. 153. № 1–2. P. 51–63.
- Haney M., Buurman H., Holtkamp S. et al.* Monochromatic Long-Period Seismicity Prior to the 2012 Earthquake Swarm at Little Sitkin Volcano, Alaska // Frontiers in Earth Science. 2021. V. 9. P. 1–13. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.689651>
- Johnson J.B., Lees J.M., Gordeev E.I.* Degassing Explosions at Karymsky Volcano, Kamchatka // Geophysical Research Letters. 1998. V. 25. № 21. P. 3999–4002.
- Iverson M.R., Dzurisin D., Gardner C.A. et al.* Dynamics of seismogenic volcanic extrusion at Mount St Helens in 2004–2005 // Nature. 2006. V. 444. P. 439–443. <https://doi.org/10.1038/nature05322>
- Lees J.M., Gordeev E.I., Ripepe M.* Explosions and periodic tremor at Karymsky volcano, Kamchatka, Russia // Geophysical Journal International. 2004. V. 158. Iss. 3. P. 1151–1167. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02239.x>
- Lopez T., Fee D., Prata F., Dehn J.* Characterization and interpretation of volcanic activity at Karymsky Volcano, Kamchatka, Russia, using observations of infrasound, volcanic emissions, and thermal imagery // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2013. V. 14. № 12. P. 5106–5127. <https://doi.org/10.1002/2013GC004817>
- Matoza R.S., Chouet B.A.* Subevents of long-period seismicity: Implications for hydrothermal dynamics during the 2004–2008 eruption of Mount St. Helens // Journal of Geophysical Research. 2010. V. 115. Iss. B12. P. 1–26. <https://doi.org/10.1029/2010JB007839>
- McNutt S.R.* Seismic monitoring and eruption forecasting of volcanoes: A review of the state-of-the-art and case histories. Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards, Eds. R. Scarpa and R. Tilling. Springer-Verlag, Berlin New York, 1996. P. 99–146.
- Moran S.C., Malone S.D., Qamar A.I. et al.* Seismicity associated with renewed Dome-Building at Mount St. Helens, 2004–2005 // A Volcano Rekindled: The Renewed Eruption of Mount St. Helens, 2004–2006. U.S. Geological Survey Professional Paper, 2008. Ch. 2. P. 27–60.
- Neuberg J.* Characteristics and causes of shallow seismicity in andesite volcanoes // Philosophical Transactions of the Royal Society. 2000. V. 358. № 1770. P. 1533–1546.
- Neuberg J.W., Tuffen H., Collier L. et al.* The trigger mechanism of low-frequency earthquakes on Montserrat // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2006. V. 153. № 1–2. P. 37–50. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2005.08.008>
- Shakirova A., Firstov P.* Observation of the seismic mode «drumbeats» on volcanoes of the world and Kizimen volcano (Russia) // E3S Web Conf. 2019. V. 127. P. 1–6. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912703004>
- Stephens C.D., Chouet B.A.* Evolution of the December 14, 1989 precursory long-period event swarm at Redoubt Volcano, Alaska // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2001. V. 109. № 1–3. P. 133–148.
- Thelen W., West M., Senyukov S.* Seismic characterization of the fall 2007 eruptive sequence at Bezymianny Volcano, Russia // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2010. V. 194. № 4. P. 201–213. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.05.010>
- Umakoshi K., Takamura N., Shinzato N. et al.* Seismicity associated with the 1991–1995 dome growth at Unzen Volcano, Japan // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2008. V. 175. Iss. 1–2. P. 91–99. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.03.030>
- Varley N., Arámbula-Mendoza R., Reyes-Dávila G. et al.* Generation of Vulcanian activity and long-period seismicity at Volcán de Colima, Mexico // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2010a. V. 198. № 1–2. P. 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.08.009>
- Varley N., Arámbula-Mendoza R., Reyes-Dávila G. et al.* Long-period seismicity during magma movement at Volcan de Colima // Bulletin of Volcanology. 2010b. V. 72. P. 1093–1107. <https://doi.org/10.1007/s00445-010-0390-7>
- WinПОС пакет обработки сигналов: руководство программиста. Мытищи: НПП «Мера». 2010. 80 с. (WinPOS Signal Processing Package: Programmer's Guide. Mytishchi: NPP «Mera». 2010. 80 p.).

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ
**SEISMIC EFFECTS AHEAD OF KARYMSKY VOLCANO (KAMCHATKA)
EXPLOSIONS IN FEBRUARY 2019**

A.A. Shakirova

*Kamchatka Branch of the Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 683006; e-mail: shaki@emsd.ru*

Received January 19, 2022; revised February 24, 2022; accepted March 27, 2022

After a short period of quiescence, in February 2019, Karymsky volcano (Kamchatka Peninsula, Russia) became active. During the month, a large number of moderate explosions were recorded, some of which were preceded with some periodicity by long-period earthquakes with a high degree of similarity of waveforms. The duration of the multiplet events that preceded the explosions ranged from 4 to 70 minutes. The period between earthquakes decreased as the multiplets developed. The amplitude of earthquake records either increased or remained at the same level. The multiplets with higher amplitude of earthquake records preceded the strongest eruptions. The decreasing period between earthquakes is most likely related to the acceleration of magma ascent and an increase in gas pressure in the volcanic channel. If this is true, the absence of long-period earthquakes after the eruption marks a complete release of gas pressure in the volcanic edifice.

Keywords: Karymsky volcano, explosion, seismicity, earthquake multiplets.