

## СЕМЕЙСТВА ДЛИННОПЕРИОДНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ВУЛКАНЕ МОЛОДОЙ ШИВЕЛУЧ (РОССИЯ) В 2022–2023 ГОДАХ

©2024 А.А. Шакирова, А.С. Чемарёв

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

Поступила в редакцию 24.05.2024; после доработки 10.09.2024; принята в печать 25.09.2024

10 апреля 2023 г. произошло сильнейшее за последние 60 лет извержение вулкана Молодой Шивелуч (Россия, п-ов Камчатка). Извержению предшествовала длительная, с конца июля 2022 г., сейсмическая активность. Землетрясения в этот период были, в основном, длиннопериодными, происходили в районе выжимающегося экструзивного купола. В статье описано группирование землетрясений по схожести волновых форм, и проведено их сопоставление с активностью вулкана Молодой Шивелуч. Для периода монотонного, с постоянной скоростью, выжимания купола, когда в канале давление было постоянным, землетрясения группировались в продолжительные семейства. Для периода перед кульминационной фазой извержения характерно большее количество семейств, что интерпретировано как показатель нестабильности среды. Такое возрастание количества семейств землетрясений может указывать на приближение кульминационной фазы извержения вулкана Молодой Шивелуч.

*Ключевые слова:* вулкан Молодой Шивелуч, извержение, сейсмичность, длиннопериодное землетрясение.

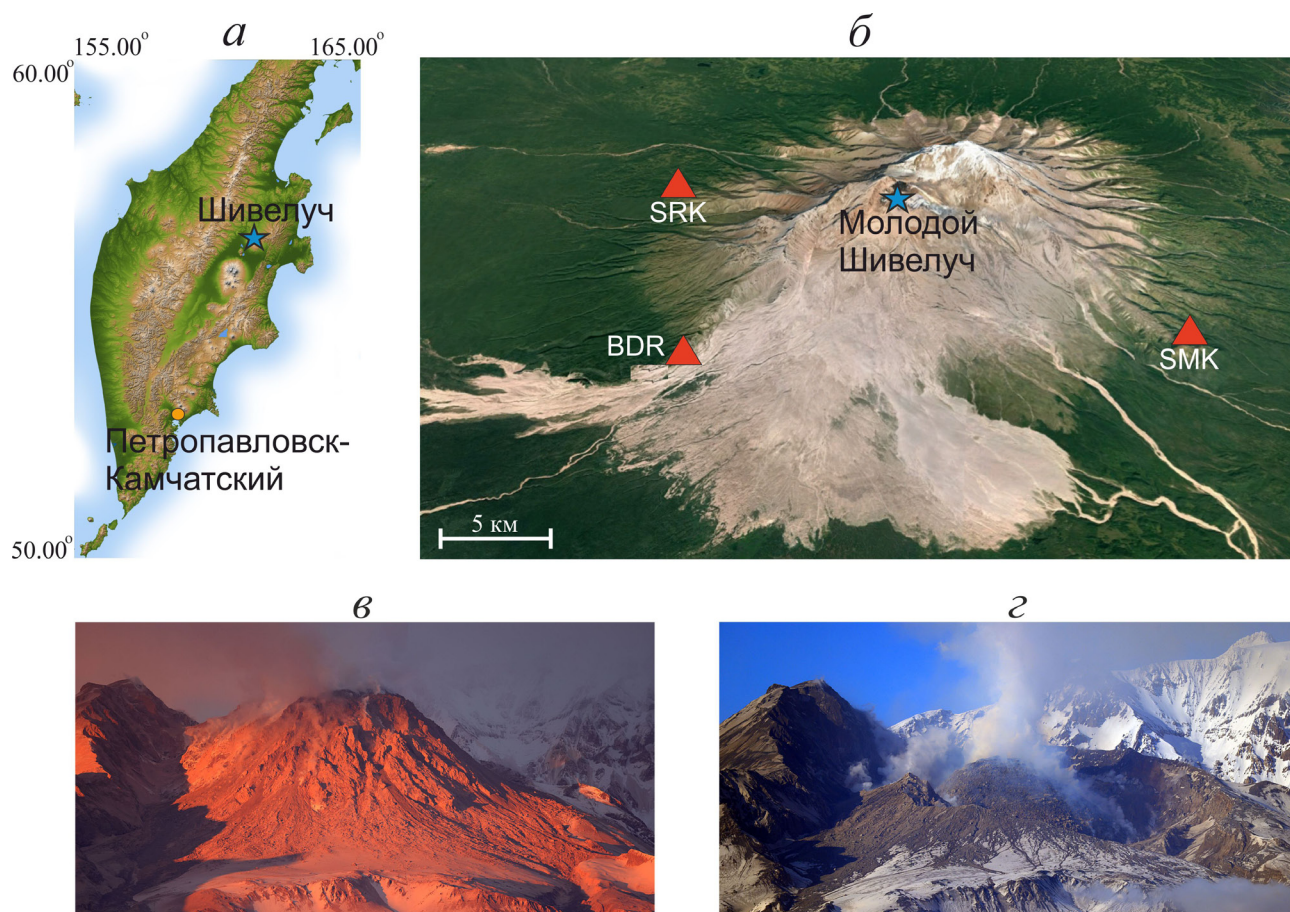
### ВВЕДЕНИЕ

Вулкан Шивелуч — самый северный действующий вулкан п-ва Камчатка (Россия), расположен на удалении 450 км от г. Петропавловск-Камчатский (рис. 1а). Вулканический массив Шивелуч состоит из позднеплейстоценового стратовулкана Старый Шивелуч и действующего с голоцена Молодого Шивелуча (Горбач, Портнягин, 2011). Катастрофические эксплозивные извержения Молодого Шивелуча случаются примерно раз в столетие. В XIX и XX веках такие извержения отмечались в 1856 и 1964 гг. (Богоявленская и др., 1985), а с 1980 г. непрерывно выжимается экструзивный купол (рис. 1б, 1в) (Горбач и др., 2016). Лавы Молодого Шивелуча представлены преимущественно магнезиальными андезитами и андезибазальтами (Горбач, Портнягин, 2011; Плечов и др., 2005). По мере роста экструзивного купола в кратере Молодого Шивелуча один-два раза в год происходят умеренные извержения, характеризующиеся вулканическим эксплозивным индексом VEI (Newhall, Self, 1982) равным 1–3, после чего

начинает расти новый экструзивный купол. Однако 10 апреля 2023 г. произошло извержение с VEI = 3–4 (Global..., 2024), в результате которого почти полностью был уничтожен экструзивный купол Молодого Шивелуча (рис. 1з).

Извержению 10 апреля 2023 г. предшествовала длительная сейсмическая подготовка, начавшаяся в конце июля 2022 г. (рис. 2а, 2б), за 10 месяцев до кульминационной фазы извержения. Большая часть землетрясений, зарегистрированных в районе Шивелуча в этот период — поверхностные, с глубинами  $-2 \leq H \leq 0.5$  км (рис. 2б). Пространственно они относятся к экструзивному куполу Молодого Шивелуча (рис. 2а).

Согласно классификации вулканических землетрясений (Chouet, 1996) по волновой форме и спектральному составу землетрясения, регистрируемые в районе экструзивного купола Молодого Шивелуча — длиннопериодные, их спектр находится в пределах частот  $f \approx 0.5–5$  Гц (рис. 3). Механизм генерации длиннопериодных землетрясений (ДЗ) объясняется движением жидкостей или газа (Neuberg et al., 1998, 2006).



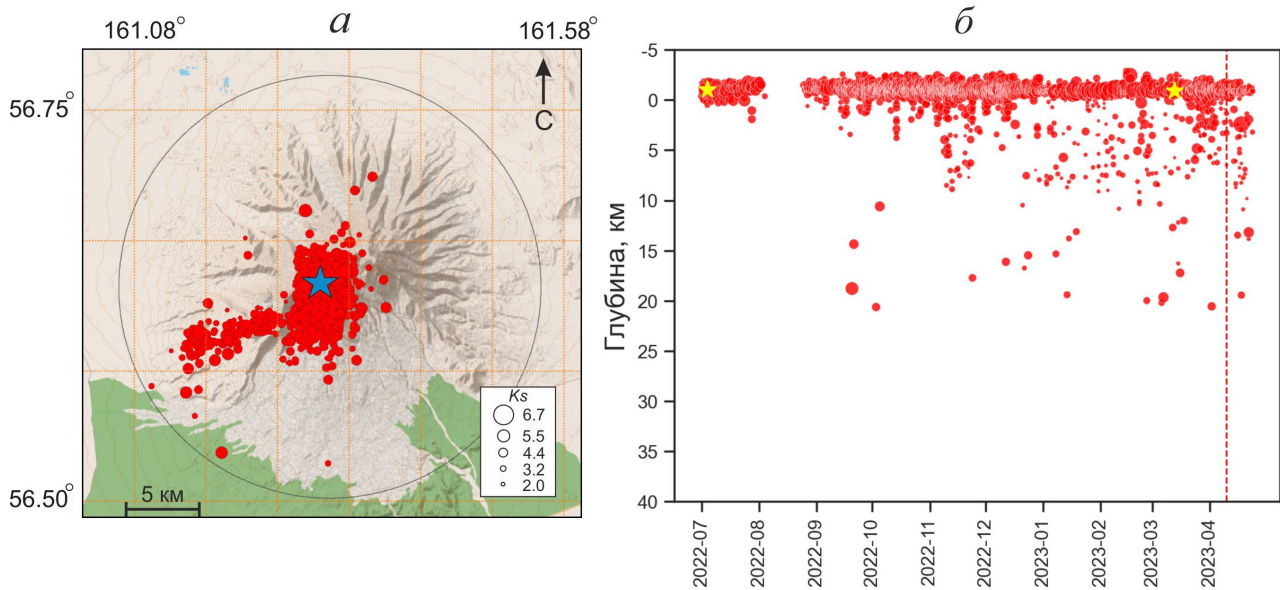
**Рис. 1.** Вулкан Молодой Шивелуч и сейсмические станции в его окрестности: расположение вулкана на п-ве Камчатка (а); сейсмические станции в районе вулканического массива Шивелуч (б) [<http://emsd.ru/rtss/stations>], звездочкой отмечен экструзивный купол Молодого Шивелуча; экструзивный купол до извержения 12 февраля 2023 г. (в) и после извержения 29 апреля 2023 г. (г), фото Ю. В. Демянчука.

**Fig. 1.** Young Shiveluch volcano and seismic stations in its vicinity: location of the volcano on the Kamchatka Peninsula (a); seismic stations in the area of the Shiveluch volcanic massif (б) [<http://emsd.ru/rtss/stations>], an asterisk marks the extrusive dome of Young Shiveluch; extrusive dome before the eruption on February 12, 2023 (в) and after the eruption on April 29, 2023 (г), photo by Yu. V. Demyanchuk.

Считается, что ДЗ происходят при высвобождении сейсмической энергии внутри или вблизи резонирующего тела (Chouet, 1988; Neuberg et al., 2000). Механизм, который запускает колебание стенок канала или трещин, может быть обусловлен переходными процессами, связанными с давлением, вызванным потоком вулканических газов с глубины (Chouet et al., 1994). Альтернативным механизмом являются небольшие фреатоматмические взрывы на глубине, возникающие в результате взаимодействия магмы и воды (Büttner, Zimanowski, 1998; Wohletz, 1986). Также предложен механизм, подразумевающий, что газ периодически высвобождается внутри экструзивного купола через трещины (Johnson, Lees, 2000).

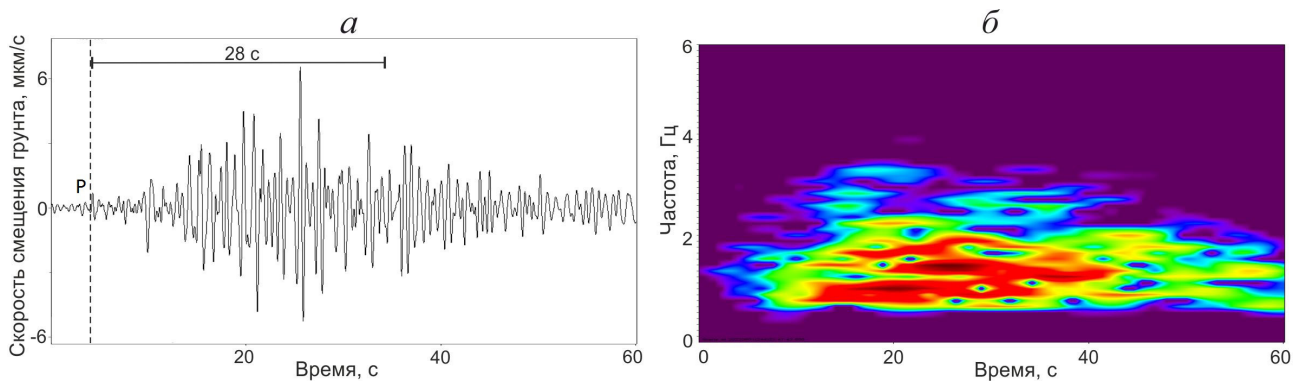
В некоторых случаях последовательности вулканических землетрясений группируются в семейства на основе сходства их волновой формы, что указывает на стабильный источник их гене-

рации (Cardaci et al., 1993; Green, Neuberg, 2006; Harrington et al., 2015; Thelen et al., 2011). Землетрясения с высоким коэффициентом корреляции (со значением коэффициента корреляции более 0.6) должны иметь схожий исходный процесс их генерации и проходить по идентичному пути до сейсмической станции, что указывает на общее местоположение источника таких землетрясений. Происхождение землетрясений со схожей волновой формой связывают с выжиманием и ростом экструзивного купола, на что было обращено особое внимание на вулкане Сент-Хеленс (округ Скамания, штат Вашингтон, США) (Iverson et al., 2006; Moran et al., 2008) и ряде других вулканов (Abramenkov et al., 2020; Miller et al., 1998; Shakirova, Firstov, 2019). По изменению в поведении семейств землетрясений предположительно можно оценивать меняющиеся условия в канале вулкана (Thelen et al., 2010). К примеру, на вулкане Редаут (Аляска, США)



**Рис. 2.** Землетрясения в районе вулкана Молодой Шивелуч за 18.09.2022 г. — 25.04.2023 г. из ЕИССД КФ ФИЦ ЕГС РАН: эпицентры землетрясений (*а*) и распределение землетрясений по глубине (*б*). Синей звездочкой отмечен экструзивный купол Молодого Шивелуча, желтыми — сильнейшие за исследуемый период землетрясения с  $K_s=6.7$ , красной пунктирной линией — время кульминационной фазы извержения.

**Fig. 2.** Earthquakes in the area of Young Shiveluch for September 18, 2022 — April 25, 2023 from the EISSD KBGS RAS: earthquake epicenters (*a*), distribution of earthquakes by depth (*b*). Blue asterisk marks the extrusive dome of Young Shiveluch, yellow — the strongest earthquakes with  $K_s=6.7$  during the study, red dotted line — time of the culmination phase of eruption.



**Рис. 3.** Длиннопериодное землетрясение, произошедшее 1.09.2022 г. в 23:47 в районе вулкана Молодой Шивелуч. Запись волновой формы землетрясения на с/ст BDR, начало времени записи 23:47:42 (*а*), пунктиром отмечено вступление Р-волны согласно ЕИССД; спектрограмма землетрясения (*б*).

**Fig. 3.** The long-period earthquake on September 1, 2022 at 23:47 in the area of Young Shiveluch volcano. Recorded earthquake waveform at BDR station, beginning of recording time is 23:47:42 (*a*), dotted line marks P-wave arrival according to EISSD; earthquake spectrogram (*b*).

в течение 18 часов перед сильным извержением в семействах землетрясений произошла медленная эволюция волновых волн ДЗ, что указывает на мигрирующий или физически изменяющийся источник их генерации (Stephens, Chouet, 2001).

В настоящем исследовании рассматриваются землетрясения, произошедшие в районе вулкана Шивелуч в 2022–2023 гг., предварявшие и сопровождавшие пароксизмальное извержение 10 апреля 2023 г. Землетрясения группируются в семейства на основе взаимной корреляции волновых форм сигналов, которые сопоставляются

с изменениями в вулканической активности с целью более точного прогноза времени кульминационной фазы извержений вулканов с лавами андезитового состава.

## МЕТОДИКА

В районе вулкана Шивелуч установлены три сейсмических станции (с/ст) Камчатского филиала (КФ) ФИЦ ЕГС РАН (Чебров и др., 2020), каждая на удалении ~10 км от кратера Молодого Шивелуча (рис. 1б). Сейсмостанции

оборудованы комплектами короткопериодной аппаратуры с частотным диапазоном 0.5–20 Гц на базе сейсмометра СМ–3 и включают в себя три канала (два ортогональных горизонтальных и один вертикальный). Данные оцифровываются с частотой 200 Гц и доступны в режиме реального времени (Чебров и др., 2013).

Исходными данными для выделения семейств землетрясений являлись суточные сейсмические записи с/ст BDR («Байдарная») [<http://emsd.ru/rtss/stations>] за период 1 июля 2022 г. — 24 апреля 2023 г. (рис. 1б). Эта станция была выбрана из-за ее стабильной работы на протяжении сейсмической активизации Шивелуча, вертикальный канал SHZ выбран из-за лучшего отношения сигнал/шум, по сравнению с горизонтальными каналами.

Для получения откалиброванных сейсмограмм из сигнала удалялся отклик прибора и коэффициент усиления цифрового преобразователя. Сейсмограммы фильтровались в полосе частот 0.5–10 Гц. Отсутствие сайт-эффекта (локальных эффектов в районе сейсмостанции) на станции BDR проверялось корреляцией сигналов на двух других с/ст в районе вулкана Шивелуч (рис. 1б).

Сейсмические записи обрабатывались с помощью библиотеки ObsPy, предназначенной для обработки данных и метаданных сейсмических сигналов на основе языка программирования Python (Krischer et al., 2015). Выделение семейств землетрясений основано на взаимной корреляции сигналов, записанных с/ст. Для применения корреляционного детектора необходимо было найти шаблон — землетрясение с наибольшим средним коэффициентом корреляции с другими землетрясениями (Petersen, 2007; Shakirova, Chemarev, 2023). Основной проблемой при анализе землетрясений из района вулкана Шивелуч является их большое количество и обильная слабая сейсмичность, поэтому поиск шаблонов проводился среди локализованных землетрясений, параметры которых взяты из единой информационной системы сейсмологических данных (ЕИССД) КФ ФИЦ ЕГС РАН (Чеброва и др., 2020).

Район исследования включает постройку вулкана Шивелуч с координатами в центре 56.637° с.ш., 161.311° з.д. радиусом 15 км с ограничением глубины до 40 км. Выборка из каталога содержит 17243 землетрясения с энергетическим классом по классификации С.А. Федотова (Федотов, 1972)  $2 \leq K_s \leq 6.7$  (рис. 2а, 2б). Для анализа исследователю необходимо знать время вступления Р-волны на выбранной с/ст, а также длительность сейсмической записи, которая должна включать часть сигнала с наибольшей амплитудой. Для ДЗ эмпирически

выбрана длина сейсмической записи 28 с (рис. 3). Из 17243 проанализированных землетрясений 17162 имеют времена вступлений Р-волн на с/ст BDR. Заданная длина сейсмической записи 28 с (рис. 3а).

Сначала нами была построена матрица подобия землетрясений, указывающая степень сходства волновых форм между собой (Petersen, 2007; Shakirova, Chemarev, 2023). Теоретически сила связи между событиями считается средней при коэффициенте корреляции  $r = 0.5–0.7$  и высокой при  $r = 0.7–0.9$ . Выше 0.9 связь очень высокая. Два временных ряда без корреляции дают коэффициент 0. После построения матрицы взаимной корреляции происходит выделение шаблонов. Из матрицы выбирается землетрясение с наибольшим средним коэффициентом корреляции, оно считается первым шаблоном, и все землетрясения, превышающие заданный порог корреляции  $r$  с этим шаблоном, считаются первым семейством. Выбор  $r$  основан на исследованиях, проведенных для сейсмических активизаций таких вулканов, как Суфриер-Хиллз (о. Монтсеррат, Великобритания) (Green, Neuberg, 2006), где  $r = 0.7$ ; Редаут,  $r = 0.68$  (Stephens, Chouet, 2001); Унзен (о. Кюсю, Япония),  $r = 0.9$  (Umakoshi et al., 2008) и Сангай (Анды, Эквадор),  $r = 0.5$  (Hidalgo et al., 2022). Нами эмпирически установлен порог корреляции  $r = 0.7$ , как и при изучении сейсмической активизации вулкана Кизимен (Россия, п-ов Камчатка) (Shakirova, Chemarev, 2023).

После выбора первого семейства из матрицы взаимной корреляции удаляются строки и столбцы, соответствующие этим событиям, среди остальных событий ищется второй шаблон. Этот процесс продолжается до тех пор, пока в матрице есть строки/столбцы с  $r \geq 0.7$ . В результате получаем набор шаблонов.

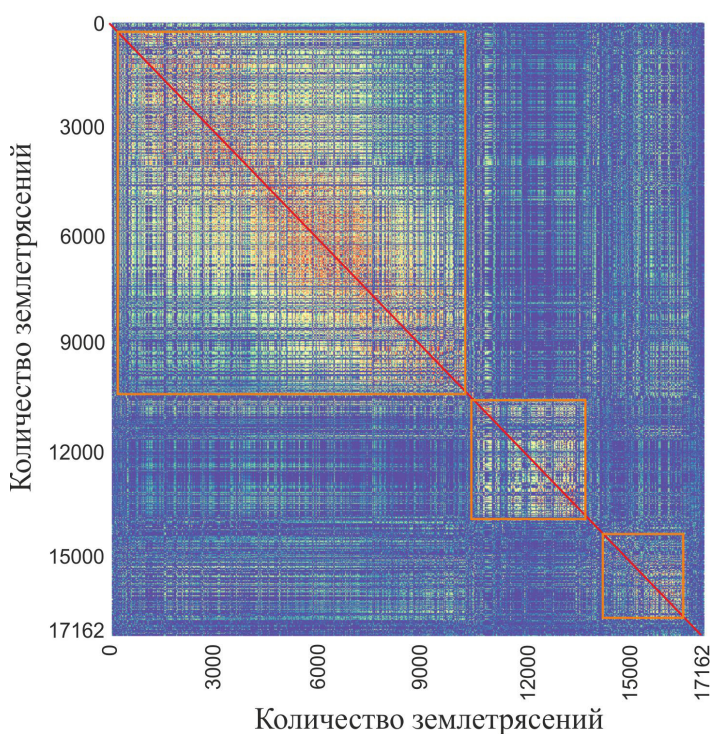
Далее, чтобы выделить все землетрясения, принадлежащие одному семейству, берутся суточные сейсмограммы, сейсмическая запись сопоставляется с заданным шаблоном с применением детектора, основанного на взаимной корреляции сигналов (Krischer et al., 2015) с  $r \geq 0.7$ . В итоге получается набор семейств землетрясений. В каждом семействе для каждого землетрясения известны время сейсмической записи, соответствующий коэффициент корреляции  $r \geq 0.7$  относительно выбранного шаблона и максимальная амплитуда сигнала  $A$  (мкм/с).

Корреляционная функция измеряет сходство волновой формы сигнала, что подразумевает, что сейсмические волны перемещаются по идентичной траектории. При этом амплитуды событий могут различаться, это указывает на то, что источник, генерирующий землетрясения, не обязательно постоянной силы.

## ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Из матрицы подобия землетрясений, построенной для ДЗ из ЕИССД с 1 июля 2022 г. по 24 апреля 2023 г., по записям с/ст BDR (рис. 4), выделено 830 шаблонов, группируемых в три периода (условно выделены квадратами на матрице): конец июля — конец декабря 2022 г. (первый квадрат), конец декабря 2022 г. — середина февраля 2023 г. (второй квадрат) и середина февраля — 10 апреля 2023 г. (третий квадрат).

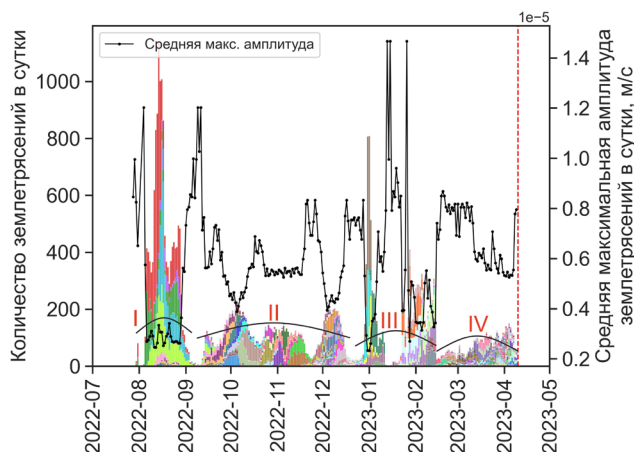
Нами эмпирически был выбран порог числа землетрясений в семействе  $N \geq 10$ , в результате осталось 128 семейств, и, соответственно 128 шаблонов, для которых по суточным записям корреляционным детектором были выделены итоговые семейства землетрясений.



**Рис. 4.** Матрица подобия 17162 землетрясений, зарегистрированных в районе вулкана Молодой Шивелуч с 1 июля 2022 г. по 24 апреля 2023 г., и выбранных из ЕИССД. Значения по диагонали представляют собой автокорреляцию землетрясения с самим собой; точки, близкие к диагонали, обозначают события, происходящие близко друг к другу во времени; точки, находящиеся дальше от диагонали разделены более длительными временными интервалами.

**Рис. 5.** Семейства землетрясений, выделенные корреляционным детектором, с 1 июля 2022 г. по 24 апреля 2023 г.: количество землетрясений в сутках для всех 128 семейств (цветная гистограмма) и средняя максимальная амплитуда землетрясений в сутки. Красная пунктирная линия — кульминационная фаза извержения. I–IV — разбиение семейств землетрясений на временные периоды.

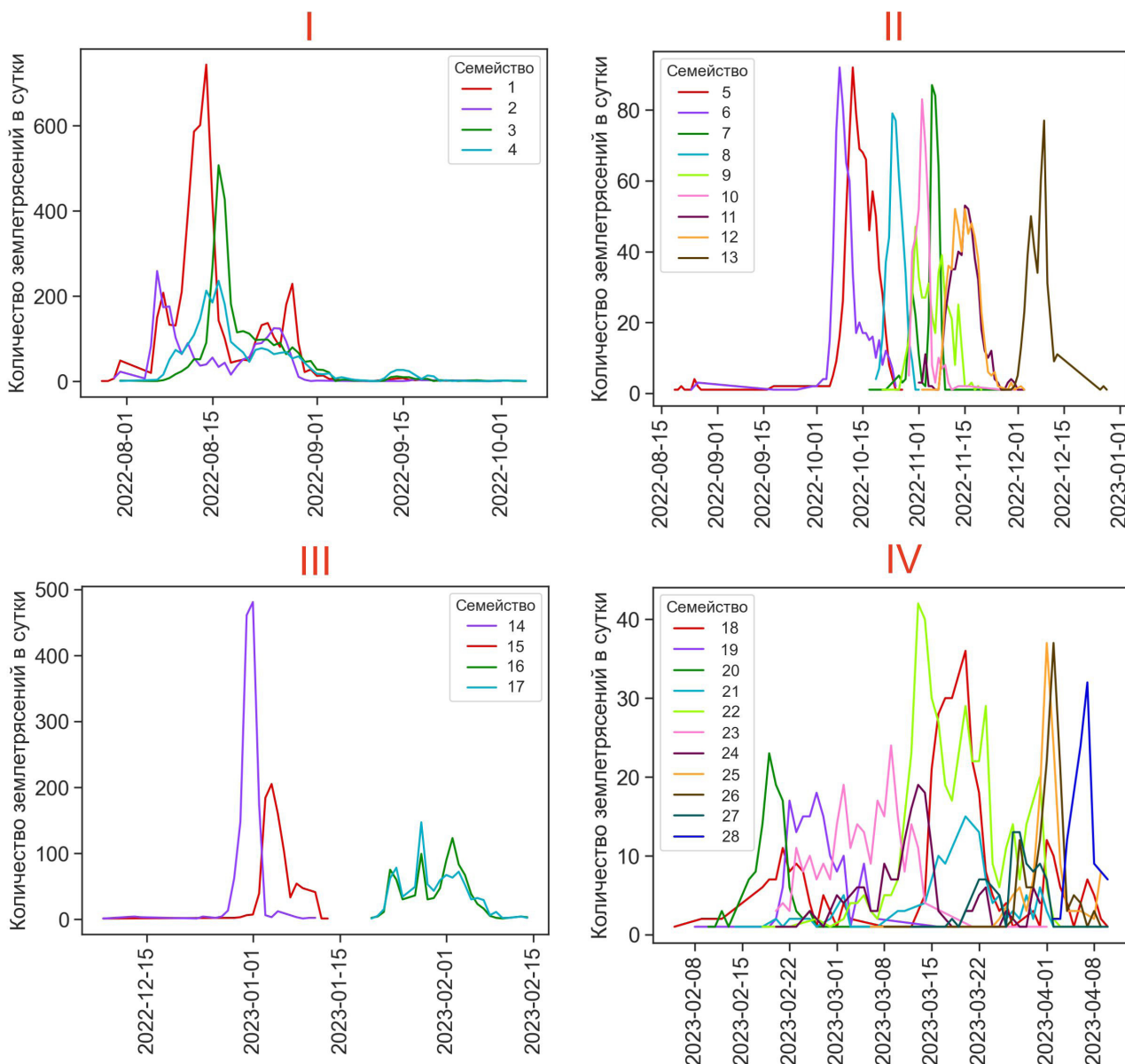
**Fig. 5.** Earthquake families identified by the correlation detector from July 1, 2022 to April 24, 2023: number of earthquakes per day for all 128 families (color histogram) and average maximum amplitude of earthquakes per day. The red dotted line is the culmination phase of the eruption. I–IV — division of earthquake families into periods.



По всплескам количества землетрясений в сутки (рис. 5) выделено четыре временных периода: I — конец июля — начало сентября 2022 г.; II — сентябрь — конец декабря 2022 г.; III — конец декабря 2022 г. — середина февраля 2023 г.; IV — середина февраля — 10 апреля 2023 г. Они совпадают с периодами, выделенными на матрице взаимной корреляции, I и II периоды — первый квадрат. Сопоставляя среднюю максимальную амплитуду землетрясений в сутках  $\bar{A}$  (рис. 5) с количеством землетрясений в сутки прослеживается обратно пропорциональная зависимость. Чем больше землетрясений в сутках, тем меньше  $\bar{A}$ , и наоборот.

Рассмотрим наиболее крупные семейства землетрясений (в которых число землетрясений составляет 50% от общего количества землетрясений в периоде) (рис. 6). Согласно выделению

## СЕМЕЙСТВА ДЛИННОПЕРИОДНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ



**Рис. 6.** Количество землетрясений в сутки в преобладающих семействах в четырех временных периодах (I–IV) в 2022–2023 гг.

**Fig. 6.** Number of earthquakes per day in the dominant families in four time periods (I–IV) in 2022–2023.

семейств длиннопериодных землетрясений, очередная сейсмическая активизация в районе выжимающегося экстрезивного купола Молодого Шивелуча началась 28 июля 2022 г. С этого времени и до 5 октября по числу землетрясений выделены четыре самых крупных семейства, каждое содержит более 2000 землетрясений со схожей волновой формой с  $r \geq 0.7$  (таблица, № 1–4). Такие крупные семейства наблюдались только в начале активизации в I периоде (рис. 6), когда одновременно работало четыре источника генерации землетрясений без доминирующей волновой формы. Длительность этих семейств составляет от 63 до 66 дней, хотя основная часть схожих землетрясений выделялась до 5 сентября, что может означать, что источники, генерирующие землетрясения,

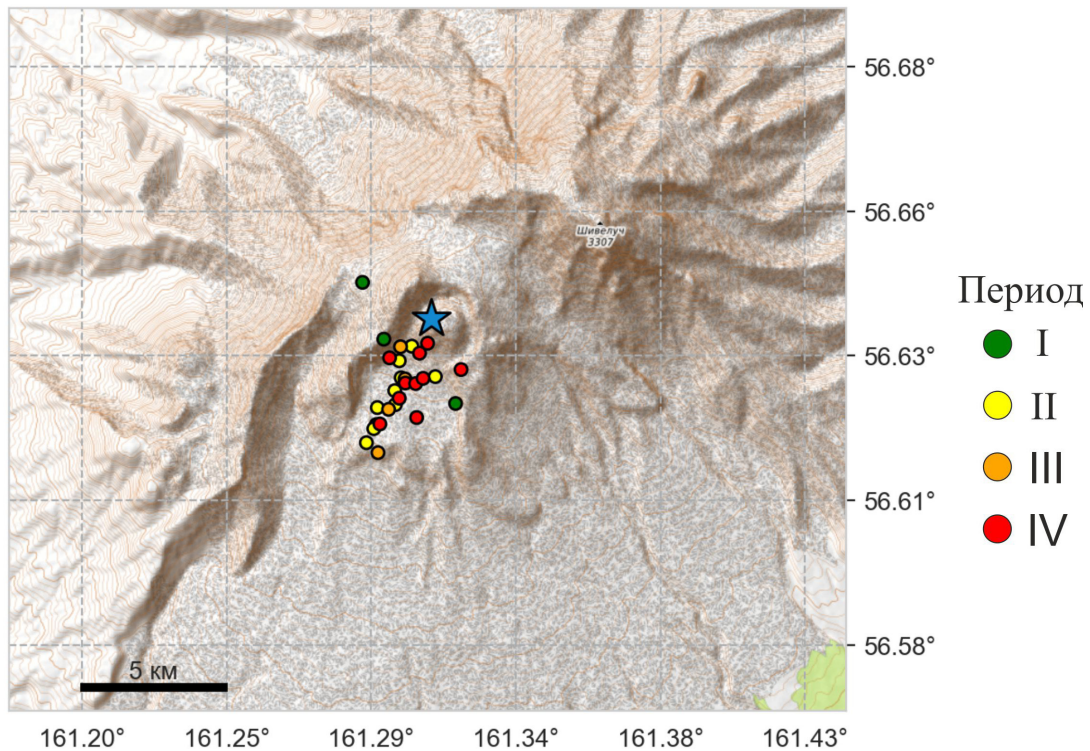
оставались стабильными на протяжении одного месяца, затем, постепенно, перестали работать. Шаблоны этих семейств расположены в районе экстрезивного купола на глубинах от 0.864 до 1.251 км над у.м. (таблица, рис. 7).

Во II периоде на протяжении двух месяцев выделено 9 преобладающих семейств, максимальное число землетрясений в двух — 820 и 647 (таблица, № 5 и № 6), в остальных от 375 до 542. Основная активизация в семействах произошла 1 октября (рис. 6). Особенностью II периода было преимущественное доминирование одной волновой формы: когда число сейсмических событий в доминирующей группе уменьшалось, количество землетрясений в следующей группе начинало возрастать.

Семейства землетрясений, выделенные корреляционным детектором в районе экструзивного купола Молодой Шивелуч в 2022–2023 гг.

Earthquake families identified by the correlation detector in the area of the Young Shiveluch extrusive dome in 2022–2023.

Период семейств землетрясений	№ семейства	Дата начала	Дата окончания	Шаблон	Количество землетрясений в семействе, шт.	Дни	Глубина, км над у.м.
I	1	28.07.2022	29.09.2022	2022-09-03 05:47:23	5278	63	1.105
I	2	31.07.2022	05.10.2022	2022-09-01 23:47:46	2953	66	1.251
I	3	31.07.2022	05.10.2022	2022-09-05 02:26:48	2519	66	0.864
I	4	30.07.2022	01.10.2022	2022-08-30 08:30:26	2132	63	1.095
II	5	19.08.2022	27.10.2022	2022-10-14 03:26:19	820	69	1.028
II	6	24.08.2022	25.10.2022	2022-10-09 09:06:04	647	62	1.447
III	14	08.12.2022	13.01.2023	2023-01-04 23:18:41	930	36	0.901
III	15	08.12.2022	11.01.2023	2023-01-01 08:21:50	1399	34	0.920
III	16	20.01.2023	14.02.2023	2023-02-02 14:45:16	885	25	0.821
III	17	20.01.2023	14.02.2023	2023-02-01 23:14:24	921	25	0.916
IV	18	05.02.2023	10.04.2023	2023-03-16 07:27:32	380	64	0.931



**Рис. 7.** Эпицентры землетрясений, являющихся шаблонами семейств. Звездочкой отмечен экструзивный купол Молодого Шивелуча.

**Fig. 7.** Epicenters of earthquakes that are templates of families. The asterisk marks the extrusive dome of Young Shiveluch.

В III периоде, вероятно, произошли изменения в характере выжимания экструзивного купола. Выделены четыре крупных семейства с числом землетрясений 885–1399 (таблица, рис. 6), каждое семейство длительностью месяц. В декабре 2022 г. — январе 2023 г. доминировали две волновые формы, сменяющие друг друга (семейства № 14, 15). Ускорение процессов, вызванных выжиманием экструзивного купола, могло произойти 31 декабря 2022 г. — 7 января 2023 г., на этом временном отрезке выделена большая часть землетрясений в семействах.

По-видимому, условия возбуждения вулканических землетрясений меняются из-за ускорения и замедления роста экструзивного купола. Рост экструзии определяется рядом причин. С одной стороны, он обусловлен массовой скоростью подъема магмы по каналу, а с другой стороны зависит от влияния термодинамических условий на вязкость магмы. Эти два фактора способствуют установлению постоянства давления в канале, что прослеживается в выделении крупных семейств землетрясений и плавной эволюции волновых форм.

Наличие одной-двух доминирующих волновых форм, по нашему мнению, может указывать на то, что в этот период времени работали два основных источника, связанных либо с открытием-закрытием трещины и заполнением ее флюидом или газом (Bell et al., 2017; Buurman, West, 2010; Sumiejski et al., 2009), или с трением, вызванным выжиманием блоков экструзивного купола (Iverson et al., 2006). Затем, с 20 января по 14 февраля, доминировало два других семейства (№ 16, 17), количество событий в пределах обоих было практически одинаковым со схожей тенденцией всплесков (рис. 6, период III).

В IV периоде (рис. 6) было выделено 11 семейств, по числу землетрясений все они небольшие (114–380 землетрясений). Последнее землетрясение из семейств произошло 10 апреля, незадолго до кульминационной фазы извержения, начавшейся в 12:54 UTC. В этом периоде не выделено доминирующей волновой формы, что говорит о том, что после активизации в III периоде магматическое вещество подступило близко к поверхности, его активному газообразованию препятствовала затвердевшая экструзивная пробка. В IV периоде выделено множество семейств землетрясений, что, по нашему мнению, свидетельствует об активном растрескивании в большем объеме экструзивного купола из-за внедряющейся магмы. В результате чего 10 апреля 2023 г. произошло извержение Молодого Шивелуча, в ходе которого экструзивный купол был практически полностью уничтожен.

Шаблоны всех семейств землетрясений расположены в районе выжимающегося экс-

трузивного купола Молодого Шивелуча (рис. 7). Несмотря на то, что в районе Шивелуча функционируют три сейсмических станции (рис. 1а), отсутствие детального скоростного разреза, а также отсутствие четких вступлений волн для этого типа землетрясений не дает достаточно точно локализовывать их положение. Средняя ошибка в определении глубины очагов землетрясений в ЕИССД с района Шивелуча в 2022–2023 гг. составила  $\sigma_h = 0.5$  км, а максимальная  $\sigma_h = 5.3$  км получена для поверхностных землетрясений в периоды, когда выходила из строя одна с/ст в районе вулкана. Ошибка в определении координат очагов землетрясений в 2022–2023 гг. составила  $\sigma_{\phi,\lambda} = 1$  км, максимальная  $\sigma_{\phi,\lambda} = 5.5$  км. Поэтому отследить перемещение источников семейств землетрясений не предоставляется возможным.

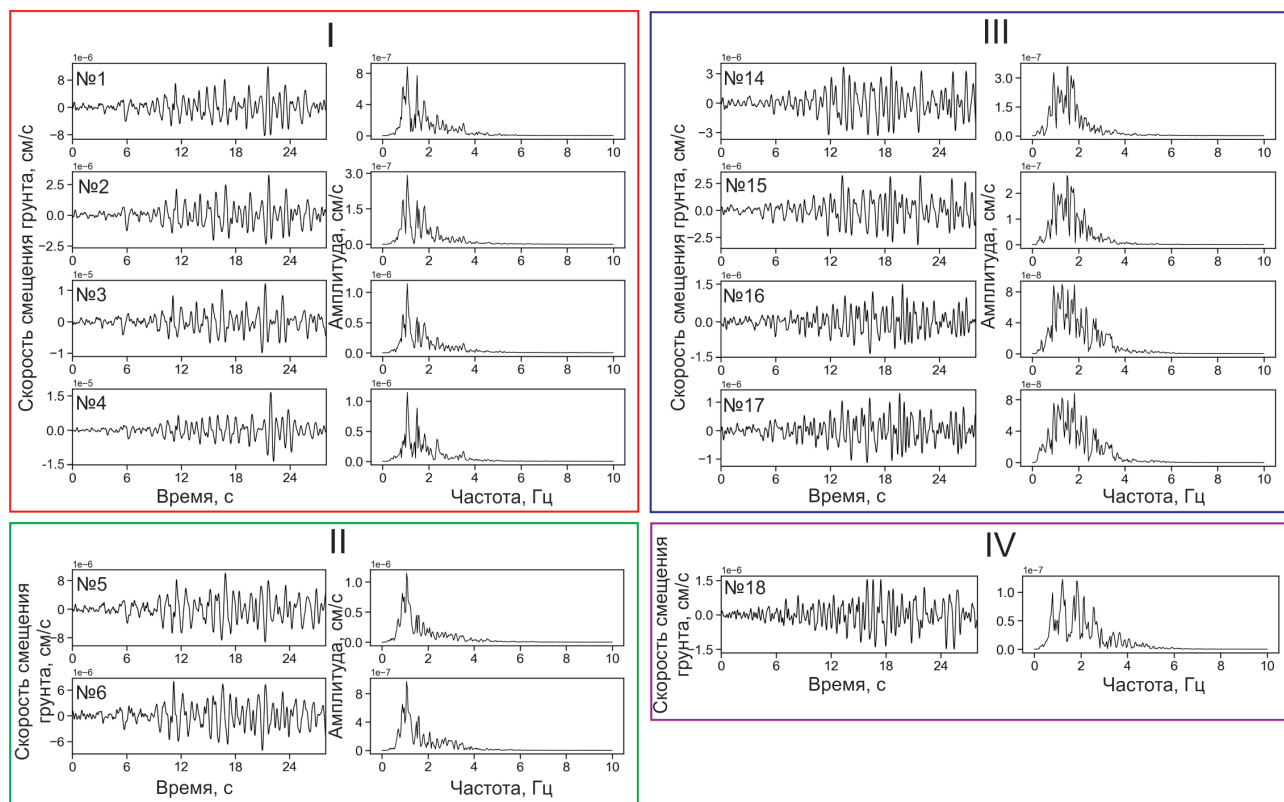
По нашим предположениям, продолжительные семейства землетрясений (в которых время между первым и последним событием наибольшее) на вулкане Молодой Шивелуч выделялись во время монотонного выжимания купола с постоянной скоростью, когда в канале устанавливалось постоянное давление, что наблюдалось также при извержении в. Сент-Хеленс и в. Безымянный (п-ов Камчатка, Россия) (Thelen et al., 2011).

В IV периоде перед кульминационной фазой извержения выделено множество семейств, но не выделено ни крупного, ни доминирующего, что может характеризовать среду в этот период как нестабильную.

При извержениях в. Сент-Хеленс и в. Безымянный (Thelen et al., 2011) было обнаружено, что перед эксплозиями число сейсмических событий в семействах снижалось, а средние амплитуды землетрясений увеличивались. Обратная зависимость амплитуд от числа землетрясений отмечена и для семейств, выделенных на в. Шивелуч в 2022–2023 гг.

Отличительной особенностью землетрясений, группируемых в семейства, является то, что после кульминационной фазы извержения семейства не выделялись, несмотря на то, что количество землетрясений в постройке вулкана после извержения оставалось почти на том же уровне, что и до.

По спектральному составу землетрясения относятся к длиннопериодным. Амплитудный спектр лежит в диапазоне частот  $f = 0.5–4$  Гц (рис. 8). Длиннопериодные землетрясения связаны с процессом, вызванным повышающимся давлением в частично закупоренном канале (Buurman et al., 2013; White et al., 1998), что, по всей видимости, является наиболее вероятным объяснением появления семейств землетрясений перед кульминационной фазой извержения на в. Шивелуч 10 апреля 2023 г. Эти землетрясения



**Рис. 8.** Волновые формы шаблонов семейств землетрясений и их амплитудные спектры. I–IV — временные периоды.

**Fig. 8.** Waveform patterns of earthquake families and their amplitude spectra. I–IV — time periods.

расположены в ограниченном числе структур (трещины, разломы) в районе магмоподводящего канала и экструзивного купола Молодого Шивелуча. Скорость продвижения лавового материала и скорость дегазации косвенно подтверждается обратной зависимостью амплитуд землетрясений относительно их числа. Когда выжимание экструзивного купола происходит монотонно, с более-менее постоянной скоростью, выделяются более крупные семейства землетрясений, на длительном временном участке может преобладать одна волновая форма. Схожесть волновых форм в этот момент можно объяснить единым путем, по которому газ находит пути выхода. Если лавовый материал начинает продвигаться к дневной поверхности с большей скоростью, газу приходится искать новые пути выхода, в связи с чем одновременно выделяются несколько семейств землетрясений.

Сильнейшие извержения Шивелуча происходили в 1854 г. (Богоявленская и др., 1985), в 1964 г. (Токарев, 1967) и в 2023 г. Разница между ними составляет 110 и 59 лет, что не позволяет рассуждать о периодичности таких событий. Извержения Шивелуча в 1964 г. и 2023 г. подкреплены сейсмическими наблюдениями, сравним эти сейсмические активизации и выделим ряд различий.

Сейсмическая активизация перед извержением 12 ноября 1964 г. длилась 10.5 месяцев (Токарев, 1967). Эпицентры всех землетрясений роя лежали в пределах постройки вулкана Молодой Шивелуч, очаги преобладающего большинства землетрясений располагались на глубинах  $< 5$  км, а в начальный период перед извержением происходили землетрясения с глубиной очага до 10 км. Эти землетрясения — вулканотектонические, с четкими вступлениями Р- и S-волн, они вызваны внедрением магмы под вулканическую постройку и в верхнюю часть выводного канала под старыми куполами. В течение месяца перед извержением регистрировались землетрясения с  $8 \leq K_s \leq 13$ . 12 ноября, непосредственно перед извержением, произошло пять землетрясений с  $K_s = 11–12$ , ощущавшихся в пос. Ключи и Козыревск силой в 3–4 балла и сопровождавшихся подземным гулом. Механизмы очагов трех сильнейших вулканических землетрясений вулкана Молодой Шивелуч (11 ноября 1964 г. в 13:17, 17:28, 19:07 UTC) близок к сдвиговому типу разрыва и аналогичен механизму очага тектонических землетрясений Камчатки (Zobin, 1971).

Извержение Молодого Шивелуча 10 апреля 2023 г., согласно выделению семейств землетрясений, сопровождалось сейсмической активизацией на протяжении 9 месяцев. Преимущественно

регистрировались длиннопериодные землетрясения с глубин  $-2 \leq H \leq 0.5$  км, природа таких землетрясений связана с движением жидкости или газа. Сильных землетрясений, как в 1964 г., не происходило, признаков приближающейся кульминационной фазы извержения не было. Максимальные энергетические классы землетрясений, зарегистрированных с июля 2022 г. по 10 апреля 2023 г., составили  $K_s = 6.5-6.7$ , последнее произошло 13 марта 2023 г.

Как видим, два катастрофических извержения Шивелуча имеют различные сейсмические предвестники, до сих пор не выделено закономерностей в развитии сейсмического процесса, предвещающего его извержение и факторов, указывающих на приближение кульминационной фазы извержения. Поэтому прогноз извержения вулкана Шивелуч — непростая задача. Выделение семейств землетрясений может приблизить нас к более точному прогнозу времени кульминационной фазы извержений вулканов с андезитовыми и дацитовыми лавами и оказаться перспективным методом при анализе сейсмичности, предвещающей извержения вулкана Шивелуч.

## ВЫВОДЫ

Землетрясения, на которых построен анализ в данном исследовании, относятся к длиннопериодным, очаги этих землетрясений локализованы в районе активно выжимающегося экструзивного купола вулкана Молодой Шивелуч и связаны с процессом повышающегося давления в частично закупоренном канале.

По волновым формам с с/ст BDR, установленной в районе вулканического массива Шивелуч, на основе взаимной корреляции сигналов, выделены семейства землетрясений, связанные с выжиманием экструзивного купола Молодого Шивелуча.

Анализ динамики развития семейств позволил предположить, что продолжительные семейства землетрясений (в которых время между первым и последним событием наибольшее) выделялись во время монотонного выжимания купола с постоянной скоростью, когда в канале устанавливалось постоянное давление. Выделение большого числа семейств перед кульминационной фазой извержения без доминирующей волновой формы может характеризовать среду в этот период как нестабильную. Ожидается, что ретроспективные исследования извержений вулкана Шивелуч позволят выявить особенности появления семейств землетрясений, что приблизит нас к более точному прогнозу времени кульминационной фазы извержений вулканов с вязкими лавами.

Исследование выполнено при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00682-24) с использованием данных с УНУ (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).

## Список литературы [References]

- Богоявленская Г.Е., Брайцева О.А., Мелекесцев И.В. и др.* Катастрофические извержения типа направленных взрывов на вулканах Сент-Хеленс, Безымянный, Шивелуч // Вулканология и сейсмология. 1985. № 2. С. 3–26 [*Bogoyavlenskaya G.E., Braitseva O.A., Melekestsev I.V. et al.* Catastrophic eruptions of the Directed-Blast type at Mount St. Helens, Bezymianny and Shiveluch volcanoes // *Volcanology and Seismology*. 1988. V. 7. № 2. P. 155–187].
- Горбач Н.В., Портнягин М.В.* Геологическое строение и петрология лавового комплекса вулкана Молодой Шивелуч, Камчатка // Петрология. 2011. Т. 19. № 2. С. 140–172 [*Gorbach N.V., Portnyagin M.V.* Geologicheskoe stroenie i petrologiya lavovogo kompleksa vulkana Molodoy Shiveluch, Kamchatka // *Petrologiya*. 2011. V. 19. № 2. P. 140–172].
- Горбач Н.В., Портнягин М.В., Филоsofova Т.М.* Динамика роста экструзивного купола и вариации химического и минералогического составов андезитов вулкана Молодой Шивелуч в 2001–2013 гг. // Вулканология и сейсмология. 2016. № 6. С. 37–61. <https://doi.org/10.7868/S0203030616060031> [*Gorbach N.V., Portnyagin M.V., Filosofova T.M.* Dynamics of extrusive dome growth and variations in chemical and mineralogical composition of Young Shiveluch andesites in 2001–2013 // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2016. V. 10. P. 360–381. <https://doi.org/10.1134/S0742046316060038>].
- Плечов П.Ю., Пузанков М.Ю., Дирксен О.В. и др.* Причины роста экструзивного купола вулкана Шивелуч // Происхождение магматических пород. Материалы международного (X всероссийского) петрографического совещания (г. Апатиты, 20 – 22 июня 2005 г.). 2005. Т. 2. С. 94–97 [*Plekhov P.YU., Puzankov M.YU., Dirksen O.V. et al.* Prichiny rosta ekstruzivnogo kupola vulkana Shiveluch // *Proiskhozhdenie magmaticheskikh porod. Materialy mezhdunarodnogo (X vserossijskogo) petrograficheskogo soveshchaniya (g. Apatity, 20–22 iyunya 2005 g.)*. 2005. T. 2. P. 94–97].
- Токарев П.И.* Гигантское извержение вулкана Шивелуч 12 ноября 1964 г. и его предвестники // Известия АН СССР. Серия Физика Земли. 1967. № 9. С. 11–22. [*Tokarev P.I.* Gigantskoe izverzhenie vulkana Shiveluch 12 noyabrya 1964 g. i ego predvestniki // *Izvestiya AN SSSR. Seriya Fizika Zemli*. 1967. № 9. P. 11–22].
- Федотов С.А.* Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 117 с. [*Fedotov S.A.* Energeticheskaya klassifikaciya Kurilo-Kamchatskih zemletryasenij i problema magnitud. Moscow: Nauka, 1972. 117 p].
- Чебров В.Н., Дроздин Д.В., Кугаенко Ю.А. и др.* Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмо-

- гия. 2013. № 1. С. 18–18. <https://doi.org/10.7868/S0203030613010021> [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. P. 16–36. <https://doi.org/10.1134/S0742046313010028>].
- 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. Rezul'taty sejsmicheskogo monitoringa razlichnykh regionov Rossii. Kamchatka i Komandorskie ostrova // Zemletryaseniya Rossii v 2018 godu. Obninsk: FIC EGS RAN. 2020. P. 71–80].
- Чеброва А.Ю., Чемарёв А.С., Матвеев Е.А. и др. Единая информационная система сейсмологических данных в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН: принципы организации, основные элементы, ключевые функции // Геофизические исследования. 2020. Т. 21. № 3. С. 66–91. <https://doi.org/10.21455/gr2020.3-5> [Chebrova A.Y., Chemarev A.S., Matveenko E.A. et al. Seismological data information system in Kamchatka branch of GS RAS: Organization principles, main elements and key functions. Geophysical Research. 2020. V. 21. P. 66–91].
- Abramnikov S., Shapiro N.M., Koulakov I. et al. Clustering of long-period earthquakes beneath Gorely Volcano (Kamchatka) during a degassing episode in 2013 // Geosciences. 2020. V. 10. № 6. P. 1–18. <https://doi.org/10.3390/geosciences10060230>
- Bell A.F., Hernandez S., Gaunt H.E. 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.
- Buttner R., Zimanowski B. Physics of thermohydraulic explosions // Physical Review. 1998. V. 57. № 5. P. 5726–5729. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.57.5726>
- Buurman H., West M.E. Seismic Precursors to Volcanic Explosions during the 2006 Eruption of Augustine Volcano // U.S. Geological Survey Professional Paper. 2010. V. 1769. Ch. 2. P. 41–57.
- Buurman H., West M.E., Thompson G. The seismicity of the 2009 Redoubt eruption // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2013. V. 259. P. 16–30. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.04.024>
- Cardaci C., Falsaperla S., Gasperini P. et al. Cross-correlation analysis of seismic and volcanic data at Mt Etna volcano, Italy // Bulletin of volcanology. 1993. V. 55. № 57. P. 596–603.
- Chouet B. Resonance of a fluid-driven crack: Radiation properties and implications for the source of long-period events and harmonic tremor // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1988. V. 93. № B5. P. 4375–4400.
- Chouet B.A. Long-period volcano seismicity: its source and use in eruption forecasting // Nature. 1996. V. 380. P. 309–316.
- Chouet B.A., Page R.A., Stephens C.D. et al. Precursory 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.
- Green D.N., Neuberg J. Waveform classification of volcanic low-frequency earthquake swarms and its implication at Soufrière Hills Volcano, Montserrat // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2006. V. 153 № 1–2. P. 51–63. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2005.08.003>
- Global volcanism program, 2024. [Database] Volcanoes of the world. V. 5.1.7. Distributed by Smithsonian Institution, compiled by Venzke E. <https://doi.org/10.5479/si.GVP.VOTW5-2023.5.1>
- Harrington R.M., Kwiatak G., Moran S.C. Self-similar rupture implied by scaling properties of volcanic earthquakes occurring during the 2004–2008 eruption of Mount St. Helens, Washington // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2015. V. 120. № 7. P. 4966–4982. <https://doi.org/10.1002/2014JB011744>
- Hidalgo S., Vasconez F.J., Battaglia J. et al. Sangay volcano (Ecuador): the opening of two new vents, a drumbeat seismic sequence and a new lava flow in late 2021 // Volcanica. 2022. V. 5. № 2. P. 295–311. <https://doi.org/10.30909/vol.05.02.295311f>
- Iverson M.R., Dzurisin D., Gardner C.A. et al. Dynamics of seismogenetic volcanic extrusion at Mount St Helens in 2004–2005 // Nature. 2006. V. 444. P. 439–443. <https://doi.org/10.1038/nature05322>
- Johnson J.B., Lees J.M. Plugs and chugs—seismic and acoustic observations of degassing explosions at Karymsky, Russia and Sangay, Ecuador // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2000. V. 101. № 1–2. P. 67–82. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(00\)00164-5](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(00)00164-5)
- Krischer L., Megies T., Barsch R. et al. ObsPy: a bridge for seismology into the scientific Python ecosystem // Computer Science Discoveries. 2015. V. 8. № 1. P. 1–17. <https://doi.org/10.1088/1749-4699/8/1/014003>
- Miller A.D., Stewart R.C., White R.A. et al. Seismicity associated with dome growth and collapse at the Soufriere Hills Volcano, Montserrat // Geophysical research letters. 1998. V. 25. № 18. P. 3401–3404.
- 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.W., Bartie B., Luckett R. et al. Results from the broadband seismic network on Montserrat // Geophysical Research Letters. 1998. V. 25. № 19. P. 3661–3664.
- Neuberg J., Luckett R., Baptie B. et al. Models of tremor and low-frequency earthquake swarms on Montserrat // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2000. V. 101. № 1–2. P. 83–104. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(00\)00169-4](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(00)00169-4)
- 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>
- Newhall C.G., Self S. The volcanic explosivity index [VEI] an estimate of explosive magnitude for historical volcanism // Journal of Geophysical Research.

- Oceans. 1982. V. 87. № C2. P. 1231–1238. <https://doi.org/10.1029/JC087iC02p01231>
- Petersen T.* Swarms of repeating long-period earthquakes at Shishaldin Volcano, Alaska, 2001–2004 // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2007. V.166. P. 177–192.
- Shakirova A., Firstov P.* Observation of the seismic mode «drumbeats» on volcanoes of the world and Kizimen volcano (Russia) // *E3S Web of Conferences.* 2019. V. 127. P. 1–6. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912703004>
- Shakirova A., Chemarev A.* Multiplets of low-frequency earthquakes during the eruption of the Kizimen volcano in 2011–2012, Russia // *Journal of Volcanology and Geothermal Research.* 2023. V. 438. P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107805>
- 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. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(00\)00308-5](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(00)00308-5)
- Sumiejski L., Thurber C., DeShon H.R.* Location of eruption-related earthquake clusters at Augustine Volcano, Alaska, using station-pair differential times // *Geophysical Journal International.* 2009. V. 176. P. 1017–1022.
- 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>
- Thelen W., Malone S., West M.* Multiplets: Their behavior and utility at dacitic and andesitic volcanic centers // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth.* 2011. V. 116. P. 1–16. <https://doi.org/10.1029/2010JB007924>
- 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. № 1–2. P. 91–99. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.03.030>
- White R.A., Miller A.D., Lynch L. et al.* Observations of hybrid seismic events at Soufriere Hills Volcano, Montserrat: July 1995 to September 1996 // *Geophysical Research Letters.* 1998. V. 25. № 19. P. 3657–3660. <https://doi.org/10.1029/98GL02427>
- Wohletz K.H.* Explosive magma-water interactions: Thermodynamics, explosion mechanisms, and field studies // *Bulletin of Volcanology.* 1986. V. 48. P. 245–264.
- Zobin V.M.* Mechanism of volcanic earthquakes of the Shiveluch volcano, Kamchatka // *Bulletin Volcanologique.* 1971. V. 35. P. 225–229. <https://doi.org/10.1007/BF02596819>

## FAMILIES OF LONG-PERIOD EARTHQUAKES AT THE YOUNG SHIVELUCH VOLCANO (RUSSIA) IN 2022–2023

**A.A. Shakirova, A.S. Chemaryov**

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

Received May 24, 2024; revised September 10, 2024; accepted September 25, 2024

On April 10, 2023, the strongest eruption of the Young Shiveluch volcano ( Russia, Kamchatka Peninsula) in the last 60 years occurred. The eruption was preceded by a long seismic activity since the end of July 2022. Earthquakes during this period were mainly long-period, occurring in the area of the extruding extrusive dome. The paper describes the grouping of earthquakes into families according to the similarity of waveforms, and their comparison with the activity of the Young Shiveluch volcano. For the period of monotonic, with a constant rate, dome extrusion, when the pressure in the channel was constant, earthquakes were grouped into long-term families. The period before the culmination phase is characterized by a greater number of families, which is interpreted as an indicator of instability of the environment. Such an increase in the number of earthquake families allows us to predict more accurately the beginning of the culmintion phase of eruptions of andesitic Young Shiveluch volcano.

*Keywords: Young Shiveluch volcano, eruption, seismicity, long-period earthquake.*