

## **Семейства землетрясений на вулкане Шивелуч в 2022-2024 гг.**

**Чемарёв А.С., Шакирова А.А.**

### **Earthquake families on Shiveluch volcano in 2022-2024**

**Chemarev A.S., Shakirova A.A.**

*Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский;*

*e-mail: andrew@emsd.ru*

10 апреля 2023 г. произошло сильнейшее за последние 60 лет извержение вулкана Шивелуч (Россия, п-ов Камчатка), а также активизация в районе старого экструзивного купола Каран, сопровождавшаяся высокой сейсмической активностью. На основе сходства волновых форм выделены семейства землетрясений, сопоставленные с вулканической активностью.

#### **Введение**

Вулкан Шивелуч – самый северный действующий вулкан полуострова Камчатка (Россия), расположен на удалении 450 км от г. Петропавловск-Камчатский. С момента плинианского извержения в 1964 г. с  $VEI=4$  [6] начался этап вулканической активности Молодого Шивелуча. По мере роста экструзивного купола в кратере Молодого Шивелуча раз-два в год происходили умеренные извержения, характеризующиеся  $VEI=1-3$  [2]. Однако 10 апреля 2023 г. произошло извержение с  $VEI\sim 4$ , в результате которого почти полностью был уничтожен экструзивный купол Молодого Шивелуча. Это второе извержение такой силы после катастрофического извержения 1964 г.

По мере прекращения выжимания купола Молодого Шивелуча после кульминационной фазы извержения, на западном склоне в Шивелуч начала регистрироваться сейсмическая активность в месте, где расположен старый эруптивный центр Каран. С Караном связано большинство голоценовых извержений, здесь сосредоточено множество лавовых куполов и коротких лавовых потоков [1]. В 2024 г. здесь появился новый экструзивный купол. Извержение 2023-2024 гг. можно считать уникальным, так как оно происходило из двух эруптивных центров, что не было зафиксировано за весь период наблюдения за вулканической активностью Шивелуча.

Извержение сопровождалось высокой сейсмической активностью с регистрацией как гибридных, так и длинопериодных землетрясений. На основе сходства волновых форм землетрясений выделялись их семейства, которые сопоставлялись с вулканической активностью.

#### **Исходные данные и методика**

В районе вулкана Шивелуч установлены три сейсмических станции (с/ст) КФ ФИЦ ЕГС РАН [3], каждая на удалении  $\sim 10$  км от Молодого Шивелуча, что позволяет локализовать землетрясения с минимальной магнитудой  $M_L=0.3$ . Каждая с/ст оборудована комплектом короткопериодной аппаратуры с диапазоном частот 0.5-20 Гц на базе сейсмометра CM-3 и включает в себя три канала (два ортогональных горизонтальных SHE и SHN и один вертикальный SHZ).

Исходными данными для выделения семейств землетрясений являлись суточные сейсмические записи с с/ст BDR, вертикальный канал SHZ. Эта станция была выбрана из-за ее ближайшего месторасположения относительно источников землетрясений и хорошего отношения сигнал/шум. 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.

Анализировались сейсмические данные за период 01.07.2022 – 12.11.2024 гг. Основной проблемой при анализе землетрясений в районе вулкана Шивелуч является их большое количество и обильная слабая сейсмичность, что затрудняет выделение

землетрясений алгоритмом STA/LTA. Поэтому поиск шаблонов проводился среди локализованных землетрясений, параметры которых взяты из ЕИССД КФ ФИЦ ЕГС РАН [4].

Выборка из каталога землетрясений производилась по параметрам: координаты в центре  $56.637^\circ$  с.ш.,  $161.311^\circ$  в.д., радиус 15 км, ограничение глубины до 40 км, временной интервал 07.2022-11.2024 гг. Выборка включает район эруптивного центра Каран с координатами  $56.617^\circ$  с.ш.,  $161.235^\circ$  в.д. и содержит 23 678 землетрясений с  $2 \leq K_s \leq 11.4$ . Эпицентры землетрясений разделялись по долготе  $161.28^\circ$  в.д. на принадлежность к району Молодого Шивелуча (правее  $161.28^\circ$  в.д.) и Карана (левее  $161.28^\circ$  в.д.).

Для анализа указывалось время вступления  $P$ -волны на выбранной  $s/st$ , а также длина землетрясения, которая должна включать часть сигнала с наибольшей амплитудой. Для землетрясений из района Молодого Шивелуча была выбрана длина сейсмической записи 28 с (период 01.07.2022 – 24.04.2023 гг., захватывает период после кульминационной фазы извержения), из района Карана – 15 с (период 01.04.2023 – 12.11.2024 гг.), затем строились матрицы подобия землетрясений, указывающие степень сходства волновых форм между собой [7, 8].

Выделение шаблонов из матриц подобия происходило согласно методике, описанной в [5, 7]. Для выделения землетрясений, принадлежащих одному семейству, брались суточные сейсмограммы, сейсмическая запись сопоставлялась с заданным шаблоном с применением детектора, основанного на взаимной корреляции сигналов. При выделении шаблонов и землетрясений, принадлежащих одному семейству, использовался коэффициент корреляции  $r_{corr} \geq 0.7$ .

## Результаты

Матрица подобия землетрясений из района Молодого Шивелуча включает в себя 17 652 землетрясений, из района Карана – 6 254 землетрясений. Из матриц подобия выделено 850 шаблонов: 830 для периода до извержения Молодого Шивелуча, 20 – из района Карана. Для рассмотрения преобладающих семейств в каждом из периодов вулканической активности для семейств из матрицы подобия был установлен порог числа землетрясений в семействе  $N \geq 10$ .

По всплескам количества землетрясений в сутки (рис. 1а) в районе Молодого Шивелуча 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. По всплескам количества землетрясений в сутки (рис. 1б) в районе старого эруптивного центра Каран выделено четыре временных периода: V – апрель – май 2023 г.; VI – январь – август 2024 г.; VII – апрель – май 2024 г. (этот период выделяется внутри VI периода); VIII – август – ноябрь 2024 г. (рис. 1б). Согласно выделению семейств землетрясений, активизация в районе Карана началась 10.04.2023 г. после кульминационной фазы извержения Молодого Шивелуча.

Сопоставляя среднесуточную максимальную амплитуду землетрясений  $\bar{A}$  (рис. 1а) с количеством землетрясений в сутки в семействах, связанных с выжиманием купола Молодого Шивелуча, прослеживается обратно пропорциональная зависимость: чем больше землетрясений в сутках, тем меньше  $\bar{A}$ , и наоборот. Среднесуточные максимальные амплитуды  $\bar{A}$  землетрясений при выжимании купола Новый Каран (рис. 1б) выше, чем  $\bar{A}$  при выжимании купола Молодого Шивелуча (рис. 1а). Закономерностей в зависимости числа землетрясений в сутках и  $\bar{A}$  при выжимании купола Каран не выделено.

Шаблоны всех выделенных семейств в районе Молодого Шивелуча расположены на глубинах от 0.9 до 1.3 км н.у.м. (рис. 2). Шаблоны всех выделенных

семейств района Каран произошли на глубинах от 1.8 км н.у.м до 25.6 км, первые семейства произошли на глубинах 2-4 км (рис. 2).

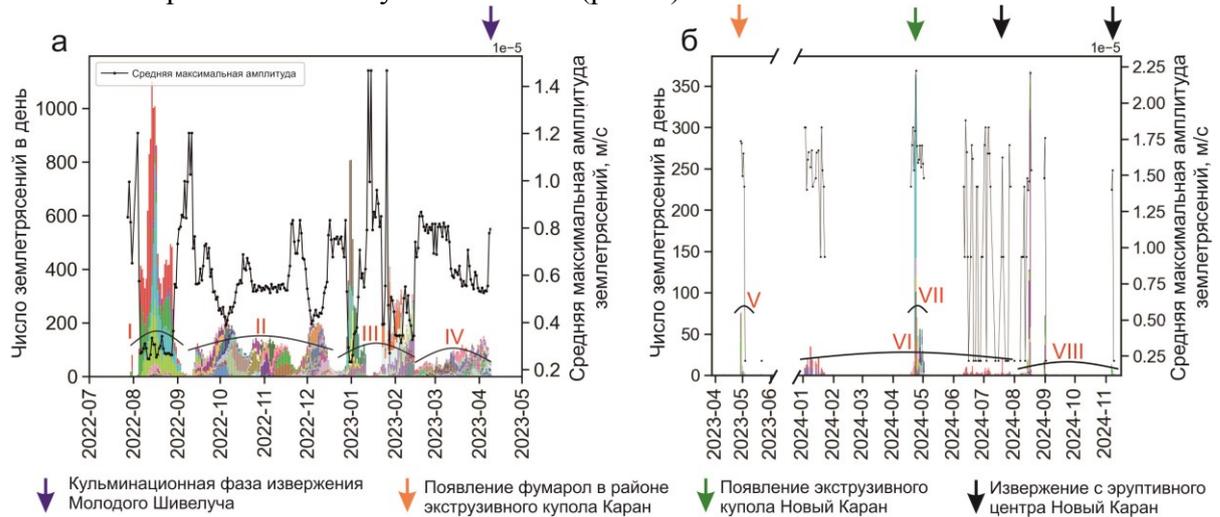


Рис. 1. Семейства длиннопериодных землетрясений, выделенные корреляционным детектором, с 01.07.2022 по 12.11.2024 гг.: количество землетрясений в сутках для 128 семейств землетрясений в районе Молодого Шивелуча и средняя максимальная амплитуда землетрясений в сутки (а); количество землетрясений в сутках для 20 семейств землетрясений в районе купола Каран и средняя максимальная амплитуда землетрясений в сутки (б). I-VIII – разбиение семейств землетрясений на периоды.

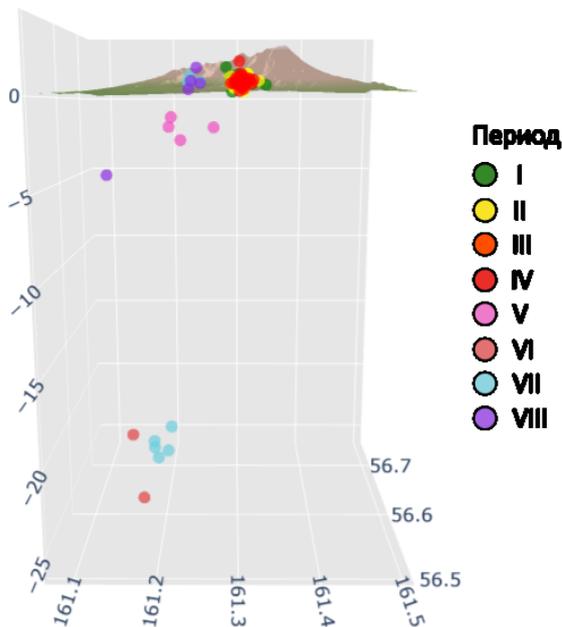


Рис. 2. Гипоцентры шаблонов семейств землетрясений из района вулкана Шивелуч.

Несмотря на то, что в районе вулкана функционируют три сейсмических станции, отсутствие детального скоростного разреза, а также отсутствие четких вступлений волн для длиннопериодных землетрясений не дает достаточно точно локализовать их положение и отследить перемещение источников семейств землетрясений [5].

### Обсуждение результатов

Анализ волновых форм землетрясений из района вулкана Шивелуч в 2022-2024 гг. позволил выделить семейства, связанные как с выжиманием экструзивного купола Молодого Шивелуча, так и с активизацией трещин в районе старого эруптивного центра Карана, расположенного к западу от Молодого Шивелуча, а также с выжиманием экструзивного купола Новый Каран и с его извержениями.

В сейсмической активизации, предшествовавшей извержению Молодого Шивелуча, выделены продолжительные семейства длиннопериодных землетрясений (в которых время между первым и последним событием наибольшее) (периоды I-III, рис. 1а). Они, вероятно, выделялись во время монотонного выжимания экструзии с постоянной скоростью, когда в канале устанавливалось постоянное давление и происходила пассивная дегазация. В последнем периоде перед кульминационной фазой извержения Молодого Шивелуча выделено 11 семейств (рис. 1а, период IV). Последнее землетрясение из семейств произошло 10 апреля, незадолго до кульминационной фазы извержения, начавшейся в 12:54 UTC. Отсутствие доминирующей волновой формы в этом периоде может свидетельствовать о нестабильности среды, вызванной подступающим к поверхности магматическим веществом, и начале периода предэруптивной дегазации.

С конца апреля 2023 г. регистрировались землетрясения в районе экструзии Каран. Период V (апрель-май 2023 г.) соответствует времени реактивации старых трещин и появления фумарол в районе Карана, это подтверждается регистрацией в этот период более высокочастотных гибридных землетрясений с небольших глубин  $H=1-4$  км (рис. 2). VI период характеризует реактивацию глубинных разломов, так как источники землетрясений были стабильны в январе, а затем спустя полгода – в июне-июле 2024 г. Видимое проявление глубинных активизаций отразилось в появлении лавового материала на поверхности. Появление экструзивного купола Новый Каран (VII период) произошло спустя 4 месяца после выделения семейств длиннопериодных землетрясений в январе 2024 г. (VI период), его извержение 17-18.08.2024 г. произошло после глубинной активизации в июне-июле (конец VI периода).

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00604-25) 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» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).

### Список литературы

1. Горбач Н.В., Портнягин М.В. Геологическое строение и петрология лавового комплекса вулкана Молодой Шивелуч (Камчатка) // Петрология. 2011. Т. 19. № 2. С. 140-172.
2. Горбач Н.В., Портнягин М.В., Философова 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.
3. Чебров В.Н., Дроздин Д.В., Кугаенко Ю.А. и др. Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 18-40. <https://doi.org/10.7868/S0203030613010021>
4. Чеброва А.Ю., Чемарёв А.С., Матвеев Е.А., Чебров Д.В. 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>
5. Шакирова А.А., Чемарёв А.С. Семейства длиннопериодных землетрясений на вулкане Молодой Шивелуч (Россия) в 2022-2023 годах // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2024. № 3. Вып. 63. С. 62-73. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2024-3-63-62-73>
6. 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. Iss. C2. P. 1231-1238. <https://doi.org/10.1029/JC087iC02p01231>
7. Petersen T. Swarms of repeating long-period earthquakes at Shishaldin Volcano, Alaska, 2001–2004 // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2007. V. 166. P. 177-192.
8. 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>