

III. Результаты детального сейсмического мониторинга

Непрерывные наблюдения

Вулканы Камчатки

С.Л. Сеников, И.Н. Нуждина, Д.В. Чебров

КФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский

В 2023 г. радиотелеметрическая сеть сейсмических станций Камчатского филиала (КФ) ФИЦ ЕГС РАН в вулканических районах сохранилась без изменений по сравнению с 2022 г. [1, 2]. Сеть позволяла проводить сейсмический мониторинг вулканов Камчатки в режиме, близком к реальному времени, с разной степенью детальности. Наиболее детальные наблюдения проводились для Северной (вулканы Шивелуч, Ключевской, Безымянный, Крестовский, Ушковский и Плоский Толбачик, рис. III.1), Авачинской (вулканы Авачинский и Корякский, рис. III.2) и Мутновско-Гореловской (вулканы Мутновский и Горелый, рис. III.3) групп вулканов, а также для вулканов Жупановский (рис. III.4) и Кизимен (рис. III.5).

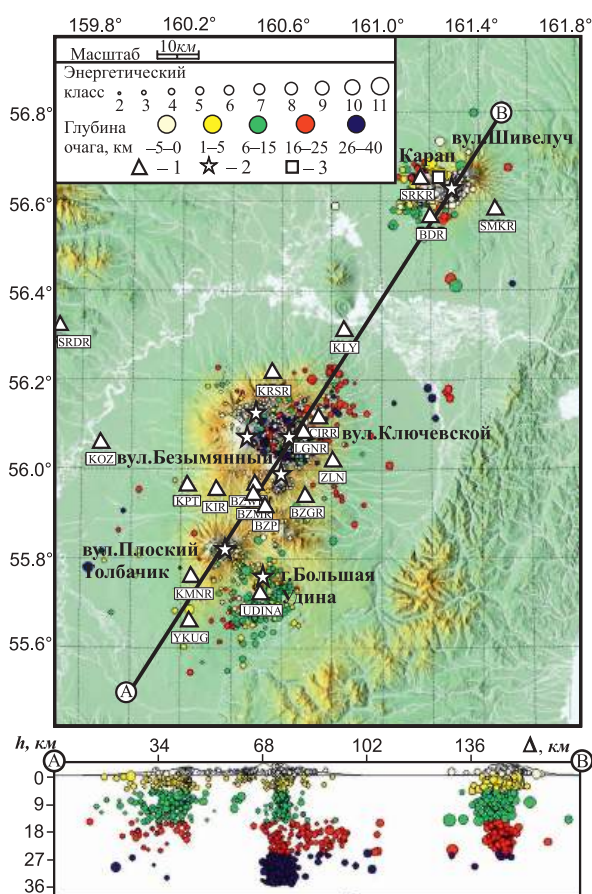


Рис. III.1. Карта эпицентров землетрясений в районе Северной группы вулканов в период с 16.10.2022 г. по 30.04.2023 г., и проекция очагов на вертикальный разрез А–В:
1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан;
3 – экструзия Каран

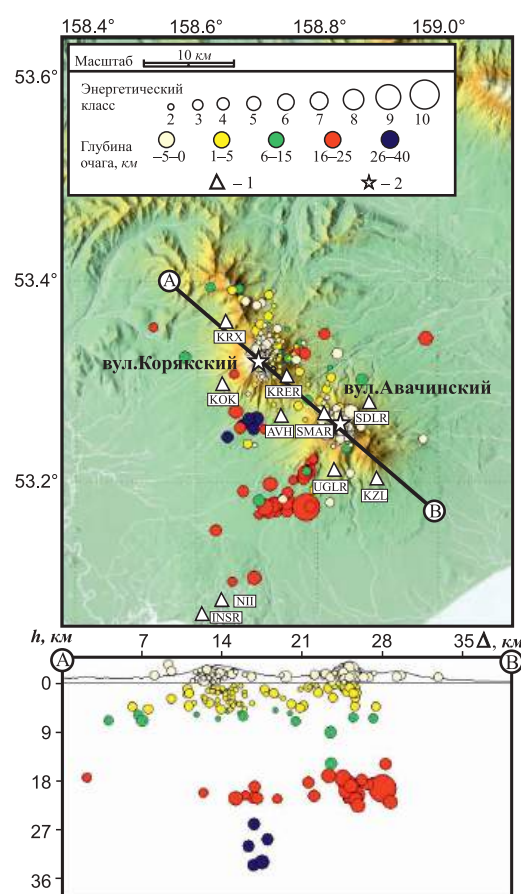


Рис. III.2. Карта эпицентров землетрясений в районе Авачинской группы вулканов в 2023 г., и проекция очагов на вертикальный разрез А–В:
1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан

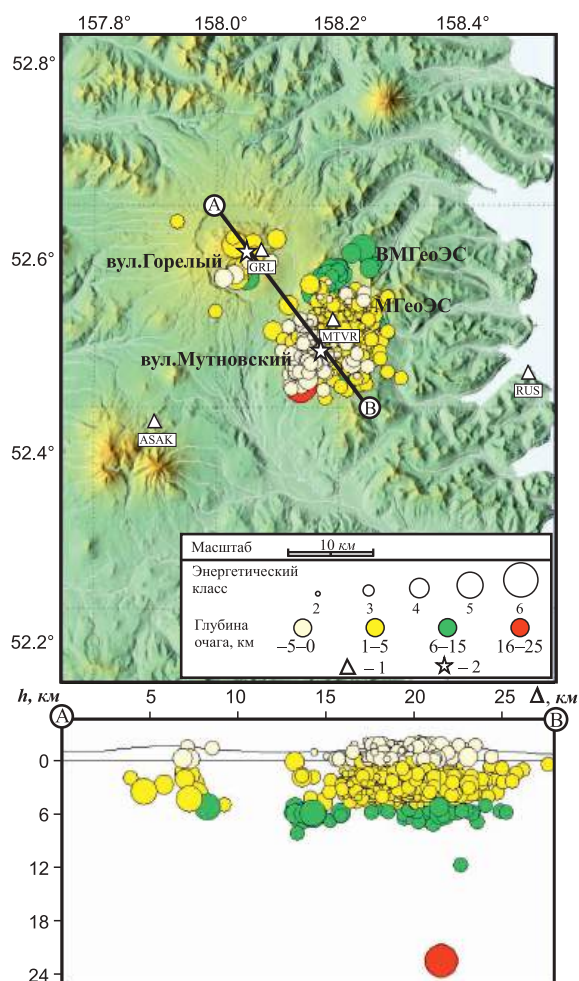


Рис. III.3. Карта эпицентров землетрясений в районе Мутновско-Гореловской группы вулканов в 2023 г., и проекция очагов на вертикальный разрез А–В:

1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан

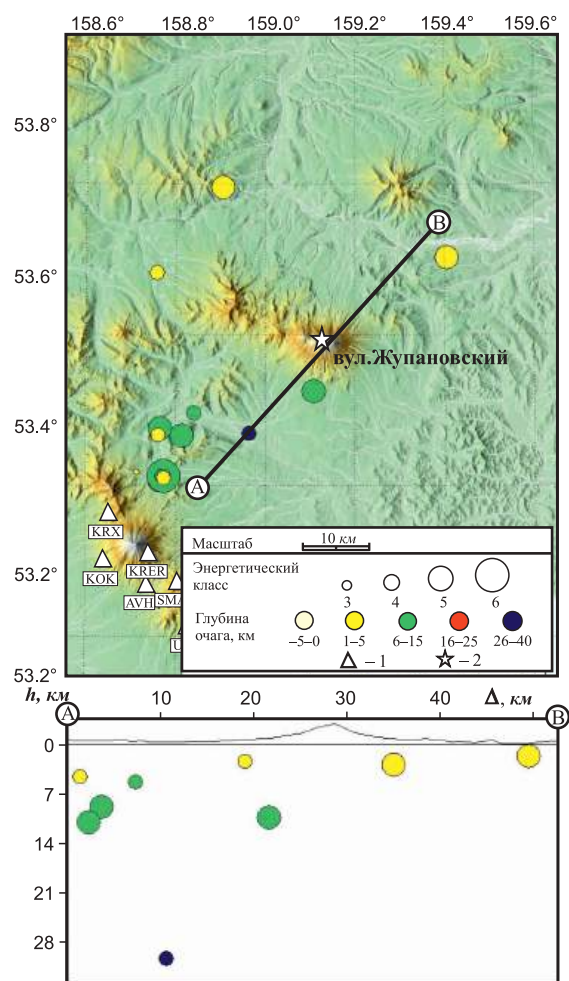


Рис. III.4. Карта эпицентров землетрясений в районе вулкана Жупановский в 2023 г., и проекция очагов на вертикальный разрез А–В:

1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан

В табл. III.1 приведены сведения о вулканах, для которых проводился сейсмический мониторинг.

Таблица III.1. Сведения о вулканах Камчатки, для которых проводился сейсмический мониторинг

Название вулкана	Координаты вершины		Абсолютная высота вершины, <i>м</i>	Диаметр кратера, <i>м</i>	Теоретический уровень надежной регистрации, <i>K</i> _{min}	Уровень надежной регистрации <i>K</i> _{пред} и угол наклона γ в 2023 г.
	φ , °N	λ , °E				ZMAP
Авачинская группа вулканов						
Авачинский	53.25	158.83	2741	350	3.0	2.4/0.59±0.03
Корякский	53.32	158.72	3456		3.0	1.8/0.84±0.04
Мутновско-Гореловская группа вулканов						
Горелый	52.55	158.03	1829		4.5	мало данных
Мутновский	52.45	158.20	2323		4.5	2.5/1.44±0.11
Северная группа вулканов						за период 16.10.2022 г. – 30.04.2023 г.
Шивелуч	56.63	161.32	2600		3.5	5.0/0.75±0.06
Безымянный	55.97	160.58	2869		3.0	2.5/1.02±0.05
Крестовский	56.12	160.50	4108		4.0	

Название вулкана	Координаты вершины		Абсолютная высота вершины, м	Диаметр кратера, м	Теоретический уровень надежной регистрации, K_{min}	Уровень надежной регистрации $K_{пред}$ и угол наклона γ в 2023 г.
	φ , °N	λ , °E				ZMAP
Ушковский	56.07	160.47	3943			3.0/0.76±0.08
Плоский Толбачик	55.82	160.37	3085	400	4.0	3.2/0.65±0.06
Ключевской	56.07	160.63	4750	700	3.0	для поверхностных – 3.4/0.66±0.02; для промежуточных – 3.4/0.58±0.04; для глубоких – 3.8/0.75±0.05
Остальные вулканы						
Кизимен	55.13	160.33	2375		4.5	мало данных
Жупановский	53.58	159.16	2923		4.9	мало данных
Карымский	54.05	159.43	1536	250	6.5	мало данных

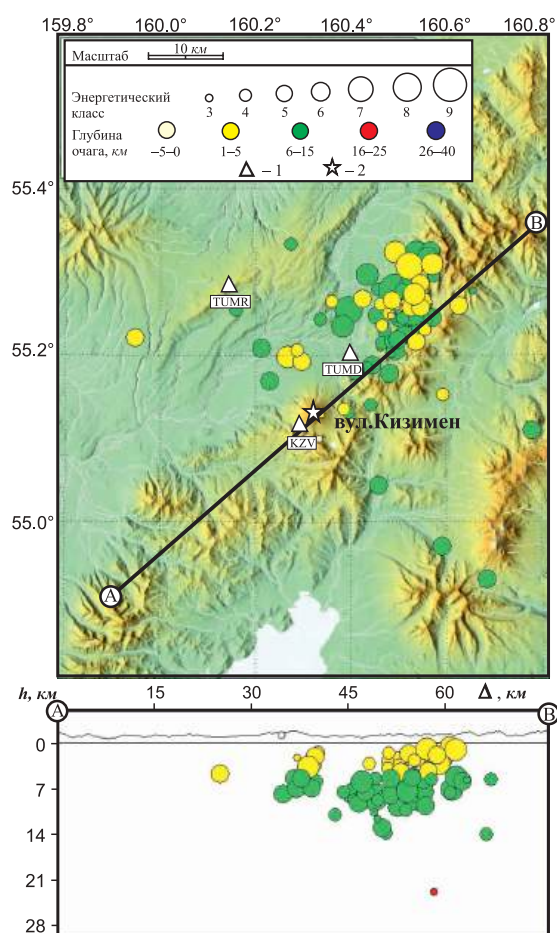


Рис. III.5. Карта эпицентров землетрясений в районе вулкана Кизимен в 2023 г., и проекция очагов на вертикальный разрез А–В:
1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан

В связи с мощной сейсмической подготовкой к катастрофическому извержению вулкана Шивелуч, которое произошло с 10 по 12 апреля 2023 г. [3], из всех землетрясений Северной группы вулканов удалось полностью обработать все события только за период с 16.10.2022 г. по 30.04.2023 года. Следует отметить, что каталог Северной группы в сборнике «Землетрясения России в 2022 году» [4] заканчивается датой 15.10.2022 г. также в связи с упомянутой высокой сейсмичностью Шивелуча [5]. За период с 01.05. по 31.12.2023 г. из зарегистрированных 13240 событий на момент написания статьи (октябрь 2024 г.) обработаны записи около 7650 землетрясений.

Теоретический уровень надежной регистрации K_{min} (табл. III.1) рассчитывался с помощью программы Kam_tst (автор – сотрудник КФ ФИЦ ЕГС РАН Д.В. Дроздин). Расчет параметров вулканических событий в 2023 г. (координаты эпицентра, глубина, энергия) проводился по программе DIMAS [6]. Для лоцирования сейсмических событий Северной и Авачинской групп вулканов использовались локальные годографы [7], для вулканов Мутновский, Горелый, Жупановский, Кизимен и Карымский – одномерная скоростная модель Камчатского региона с возможностью поиска решений положений гипоцентров землетрясений выше уровня моря.

Каталог для всех групп вулканов формировался в сетевой БД (<http://www.emsd.ru/ts/>) с задержкой не более суток и доступен по адресу: <http://www.emsd.ru/sdis/main.php> [1, 8]. Представительный класс и угол наклона графика повторяемости землетрясений определялись с помощью автоматической процедуры программы ZMAP [9]. Метод основан на оценке представительного класса по максимальному количеству землетрясений

в выборке и может применяться в случаях, когда количество событий $N \geq 50$. Вблизи вулкана Карымский установлена только одна станция, что дает возможность контролировать количество слабых локальных событий этого вулкана, но не позволяет определять их пространственное положение. Для таких событий производился только подсчет их количества. Относительно сильных землетрясений (обычно с $K_S \geq 6.0$ [10]), регистрируемых удаленными от вулкана станциями, в 2023 г. не зафиксировано.

Для каждого вулкана ежедневно выставлялся цветовой код опасности по сейсмическим, видео- и спутниковым наблюдениям и размещался в Интернете по адресу: <http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>. «Красный» код присваивался при очень высокой сейсмической активности и регистрации пепловых выбросов высотой больше или равной 8 км над уровнем моря (н.у.м.). «Оранжевый» код – при регистрации большого количества локальных землетрясений, пепловых выбросов на высоту до 8 км н.у.м. и (или) при фиксировании на вулкане лавовых потоков. «Желтый» код выставлялся, когда сейсмичность немного превышала фоновую, наблюдались слабые пепловые выбросы, высота которых не превышала 1 км над кратером вулкана, а также при наличии термальных аномалий по спутниковым данным или свечения по видеонаблюдениям.

Когда на вулкане сейсмическая и вулканическая активность не превышала фоновый уровень, выставлялся «зеленый» код опасности.

В электронный каталог Северной группы вулканов включены параметры 21471 события (рис. III.1, [11]), лоцированных в период с 16 октября 2022 г. по 30 апреля 2023 г. В очагах этих землетрясений было высвобождено суммарной сейсмической энергии $\Sigma E \sim 2.7 \cdot 10^{11}$ Дж. В 2023 г. в каталог землетрясений Авачинской группы включены параметры 381 события (рис. III.2, [11]), высвобожденная ими сейсмическая энергия составила $\Sigma E \sim 7.95 \cdot 10^9$ Дж, в каталог Мутновско-Гореловской группы (рис. III.3, [11]) – 1895 событий ($\Sigma E \sim 0.28 \cdot 10^7$ Дж). Каталоги землетрясений для районов вулканов Жупановский (рис. III.4, [11]) и Кизимен (рис. III.5, [11]) содержат соответственно параметры 16 событий ($\Sigma E \sim 0.77 \cdot 10^6$ Дж) и 89 событий ($\Sigma E \sim 0.64 \cdot 10^9$ Дж).

В печатные варианты каталогов землетрясений вулканических районов Камчатки помещены параметры: Северная группа вулканов – 63 землетрясения с $M \geq 2.0$ ($K_S \geq 7.6$) [12]; Авачинская группа вулканов – 21 землетрясение с $M \geq 0$ ($K_S \geq 4.6$) [13]; Мутновско-Гореловская группа вулканов – восемь землетрясений с $M \geq 0$ ($K_S \geq 4.6$) [14]; из районов вулкана Жупановский – семь землетрясений с $M \geq 0$ ($K_S \geq 4.6$) [15] и вулкана Кизимен – 29 землетрясений с $M \geq 1.0$ ($K_S \geq 6.1$) [16].

В исследуемый период высокая сейсмическая и вулканическая активность наблюдалась на вулканах Шивелуч, Ключевской, Безымянный, Горелый, Мутновский и Карымский.

Вулкан Шивелуч – самый северный действующий вулкан Камчатки – расположен в 45 км от поселка Ключи. Ближайшие радиотелеметрические станции (SRKR, SMKR и BDR) (рис. III.1) расположены на расстоянии 8.5–10.0 км от активного растущего купола вулкана [2]. В апреле–июне 2022 г. на вулкане Шивелуч наблюдалась миграция сейсмичности с глубины ~20 км к поверхности и с запада на восток (от экструзии Каран к активному куполу). С высокой вероятностью миграция сейсмичности сопровождала перемещение новой порции магмы в указанном выше направлении. Затем вся сейсмичность в течение почти 10 месяцев была сосредоточена в постройке вулкана в районе активного купола [3]. В исследуемый период наблюдалось продолжение роста сейсмической и вулканической активности растущего купола. С 16 октября 2022 г. по 30 апреля 2023 г. в радиусе 12 км от вулкана было лоцировано 15413 землетрясений в диапазоне глубин $(-3.0) \leq h \leq 26.4$ км и с энергетическим классом $2.0 \leq K_S \leq 11.4$ [11, 12], высвобождено сейсмической энергии $\Sigma E \sim 0.27 \cdot 10^{12}$ Дж. Представительный класс и угол наклона графика повторяемости землетрясений получились равными 5.0 и 0.75 ± 0.06 (табл. III.1).

Начиная с октября 2022 г., и до 10 апреля 2023 г. на вулкане регистрировалась высокая вулканическая активность. По видеонаблюдениям фиксировалась пепловая эмиссия до 7 км над уровнем моря, а в темное время суток – свечение купола и сход раскаленных лавин. На спутниковых снимках постоянно наблюдалась термальная аномалия, интенсивность которой увеличивалась. Все это свидетельствовало о присутствии горячего материала на поверхности и его подпитке магмой с глубины. В заключениях лаборатории исследований сейсмической и вулканической активности (ИСВА) КФ ФИЦ ЕГС РАН и Камчатского филиала Российского экспертного совета (КФ РЭС) (заключение № 941) в течение нескольких месяцев давались предупреждения о возможном сильном извержении. Самое мощное за последние годы эксплозивное извержение вулкана Шивелуч с высотой пепловых выбросов выше 8 км над уровнем моря произошло с 10 по 12 апреля 2023 года. По сейсмическим данным, пароксизмальное извержение началось 10 апреля в 12^h54^m, после чего выделены максимальные фазы в 17^h44^m, 18^h46^m и в 19^h14^m, когда были зарегистрированы сейсмические события, возможно, сопровождавшие пепловые выбросы до 20 км над уровнем моря. Для расчета высоты пепловых выбросов по сейсмическим данным использовалась процедура [17], встроенная в программу DIMAS [6], и программа ADAP [18], работающие в полуавтоматическом режиме. Максимальная фаза извержения произошла ночью, поэтому зарегистрировать ее по видеонаблюдениям было невозможно. По спутниковым данным, 10 апреля в 20^h30^m пепловое облако над вулканом достигло высоты 20 км над уровнем моря, шлейф распространялся сначала на запад, а затем облако стало смещаться на юг. Размер пеплового облака составил примерно 400×250 км (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>). Поселок Ключи был засыпан слоем пепла толщиной до 8 см. Примерно через неделю после извержения с выносом на поверхность большого количества магматического материала стало наблюдаться постепенное заглубление очагов локальных землетрясений. 29 апреля на глубине 2–3 км начался рой сильных землетрясений с $K_S=10-11$. Для событий этого роя характерна миграция очагов во времени от поверхности до глубины 20 км и смещение их в западном направлении. Такая миграция позволила предположить, что эти землетрясения сопровождали образование трещин в районе купола Каран и возможное «проседание» постройки Шивелуча (рис. III.1) [3]. Всего 29–30 апреля было лоцировано 1870 землетрясений с $2.3 \leq K_S \leq 11.4$ [11, 12]. Землетрясение с максимальным классом $K_S=11.4$ произошло 30 апреля в 14^h50^m на глубине $h=1.5$ км.

В исследуемый период самый высокий «красный» код опасности на вулкане составлялся 3 раза в период мощного эксплозивного извержения 10–12 апреля, высокий «оранжевый» – 190 раз, а «желтый» – 4 раза.

Вулкан Ключевской – самый высокий действующий вулкан Курило-Камчатской дуги – расположен в 32 км к юго-западу от пос. Ключи. Ближайшая станция LGNR установлена в 4 км от кратера [2].

В период с 16 октября 2022 г. по 30 апреля 2023 г. на Ключевском вулкане наблюдалась фоновая сейсмическая активность. В радиусе 7 км от вулкана и диапазоне глубин от кратера до 40 км ниже уровня моря было лоцировано 4904 землетрясения с $\Sigma E \sim 0.18 \cdot 10^9$ Дж (рис. III.1, [11, 12]). Все землетрясения, как и в предыдущие годы, условно разделены по глубине на три слоя: поверхностные, лоцированные в диапазоне глубин от –5 до +5 км, промежуточные – от +5 до +20 км и глубокие – от +20 до +35 км. Практически вся сейсмичность в исследуемый период была сосредоточена в нижнем слое (4356 событий), что свидетельствует о притоке мантийных магм в промежуточный магматический очаг на глубине $h=20-35$ км. В верхнем слое было лоцировано 380 землетрясений, а в промежуточном – 168. Землетрясение с максимальным классом $K_S=7.3$ произошло 1 марта 2023 г. в 22^h47^m под постройкой вулкана на глубине $h=9$ км [11, 12].

Представительный класс и угол наклона графика повторяемости землетрясений для каждого слоя показаны в табл. III.1.

В течение исследуемого периода на Ключевском вулкане наблюдалась фоновая вулканическая активность. «Желтый» код опасности выставлялся всего 10 раз, когда была зарегистрирована сейсмичность выше фоновой и (или) наблюдалось свечение над кратером в темное время суток.

Вулкан Безымянный. Ближайшая телеметрическая станция BZMR, расположенная в 7 км от кратера, позволяла регистрировать землетрясения с $K_S \geq 2.9$. В период с 16 октября 2022 г. по 30 апреля 2023 г. в радиусе 6 км от вулкана было лоцировано 427 землетрясений с $1.6 \leq K_S \leq 4.8$ в диапазоне глубин $(-2.1) \leq h \leq 2.5$ км [11, 12] с суммарной энергией $\Sigma E \sim 0.5 \cdot 10^6$ Дж. Землетрясения с максимальным классом ($K_S = 4.8$) произошли в постройке вулкана в 2023 г. 6 апреля в 20^h42^m ($h = -1.0$ км) и 7 апреля в 07^h04^m ($h = -1.6$ км) [11, 12]. Представительный класс и угол наклона графика повторяемости землетрясений получились равными 2.5 и 1.02 ± 0.05 (табл. III.1).

В исследуемый период на вулкане Безымянный произошли два эксплозивных извержения: 23 октября 2022 г. и 7 апреля 2023 г. («красный» код опасности). Первое извержение произошло практически без предварительной сейсмической подготовки. 22 октября были зарегистрированы поверхностные сейсмические события, сопровождавшие сход горячих обломочных лавин по юго-восточному склону вулкана (видеоданные). По сейсмическим данным, пароксизмальная фаза эксплозивного извержения с высотой пепловых выбросов выше 7 км над уровнем моря произошла 23 октября в 11^h56^m и продолжалась ~108 мин. По видеоданным, с 12^h00^m до 14^h00^m наблюдались пепловые выбросы ~7 км над уровнем моря, мощный пепловый шлейф, распространявшийся на северо-восток от вулкана, и сход пирокластических потоков по склону.

Сейсмическая подготовка перед вторым извержением проходила по обычному сценарию. В конце марта 2023 г. стал наблюдаться рост сейсмической и вулканической активности вулкана. В соответствии с алгоритмом прогноза [19], 3 апреля в КФ РЭС было передано заключение о возможном извержении вулкана с высотой пепловых выбросов от 6 до 15 км над уровнем моря в ближайшие 30 суток. Уточнение времени начала извержения на период с 7 по 21 апреля было сделано 7 апреля. Также была уточнена вероятность извержения с 71 до 80%. По сейсмическим данным, пароксизмальная фаза извержения с высотой пепловых выбросов до 10 км над уровнем моря произошла 7 апреля в 05^h34^m и продолжалась ~16 мин. По данным видеонаблюдений, высота пепловой колонны составила 10 км над уровнем моря. После пароксизмальной фазы извержения сейсмическая и вулканическая активность вулкана Безымянный оставалась высокой до конца апреля, что может свидетельствовать об изменении эруптивного режима [20]. Изменения проявились в том, что если для периода 2000–2021 гг. были характерны извержения в виде отдельных эксплозий продолжительностью от 20 мин. до трех суток с высотой эруптивных облаков от 6 до 15 км, после которых наблюдались продолжительные периоды покоя, то после извержения 7 апреля 2023 г. фиксировалась практически непрекращающаяся слабая пепловая эмиссия до третьей декады марта 2023 года.

Высокий «оранжевый» код опасности на вулкане в исследуемый период выставлялся 27 раз, «желтый» – 41 раз.

Вулкан Плоский Толбачик. Ближайшая телеметрическая станция KMNR [2] расположена в 10 км от кратера вулкана. С 16 октября 2022 г. по 30 апреля 2023 г. в окружности радиусом 20 км, включающей вулкан Плоский Толбачик, Толбачинский дол и потухшие вулканы Большая Удина и Малая Удина, было лоцировано 371 землетрясение с $2.0 \leq K_S \leq 6.9$ в диапазоне глубин $(-2.0) \leq h \leq 29.0$ км [11, 12] с $\Sigma E \sim 0.27 \cdot 10^8$ Дж. Землетрясения с максимальным классом $K_S = 6.9$ произошли 4 декабря 2022 г. в 17^h46^m

под постройкой вулкана Большая Удина ($h=10.3$ км) и 9 января 2023 г. в 01^h36^m на глубине 1.2 км в районе Южного прорыва 1976 г. [11, 12]. Представительный класс и угол наклона графика повторяемости землетрясений получились равными 3.2 и 0.65 ± 0.06 (табл. III.1).

В исследуемый период на вулкане Плоский Толбачик в основном наблюдалась фоновая сейсмическая и вулканическая активность. «Желтый» код опасности выставлялся 10 раз, когда в районе вулкана регистрировалась повышенная сейсмичность.

На вулканах **Крестовский** и **Ушковский** с 16 октября 2022 г. по 30 апреля 2023 г. наблюдалась фоновая сейсмичность. В радиусе 10.1 км от вулканов было лоцировано 129 землетрясений с $2.1 \leq K_S \leq 5.8$ ($\Sigma E \sim 0.13 \cdot 10^7$ Дж) в диапазоне глубин $(-2.0) \leq h \leq 33.8$ км [11, 12]. Максимальный класс $K_S=5.8$ зарегистрирован 17 марта 2023 г. в 12^h22^m на глубине $h=30.9$ км под постройкой вулкана Ушковский.

Вулканы Корякский и Авачинский расположены в 25–30 км от Петропавловска-Камчатского и Елизово и поэтому представляют наибольшую потенциальную угрозу для населения. В 2023 г. в каталог Авачинской группы вулканов включены параметры 381 землетрясения с $1.6 \leq K_S \leq 9.9$, $(-3.4) \leq h \leq 33.5$ км, выделившаяся суммарная энергия которых составила $\Sigma E \sim 0.79 \cdot 10^{10}$ Дж [11, 13].

В радиусе 8 км от Авачинского вулкана (рис. III.2) было лоцировано 193 землетрясения с $1.6 \leq K_S \leq 5.4$ ($(-2.7) \leq h \leq 22.8$ км; $\Sigma E \sim 1.3 \cdot 10^6$ Дж). Максимальный класс $K_S=5.4$ зарегистрирован 29 октября в 22^h35^m в постройке вулкана ($h=-1.2$ км) [11, 13].

В радиусе 9 км от Корякского вулкана были определены параметры для 164 землетрясений ($1.6 \leq K_S \leq 4.8$, $(-3.4) \leq h \leq 33.0$ км; $\Sigma E \sim 0.15 \cdot 10^6$ Дж). Самое сильное землетрясение с $K_S=4.8$ произошло 12 июня в 04^h12^m под постройкой вулкана ($h=33.0$ км) [11, 13]. Представительный класс и угол наклона графика повторяемости землетрясений Авачинской группы вулканов показаны в табл. III.1. В течение всего исследуемого периода на Корякском вулкане наблюдалась фоновая сейсмическая и вулканическая активность.

Вулканы Горелый и Мутновский расположены в 70 км к югу от Петропавловска-Камчатского. В районе Мутновско-Гореловской группы вулканов находятся Мутновская и Верхне-Мутновская геотермальные электростанции (МгеоЭС и ВМгеоЭС соответственно на рис. III.3). В 2023 г. в каталог Мутновско-Гореловской группы включены параметры 1895 землетрясений $1.6 \leq K_S \leq 6.0$ с суммарной энергией $\Sigma E \sim 0.28 \cdot 10^7$ Дж. Землетрясение с максимальным классом ($K_S=6.0$) произошло на глубине $h=22$ км под постройкой вулкана Мутновский 21 ноября в 05^h05^m [11, 14].

Ближайшая к Мутновскому вулкану сейсмическая станция MTVR [2] расположена в 3 км от активного кратера. В радиусе 8 км от вершины вулкана Мутновский было лоцировано 1788 землетрясений ($1.6 \leq K_S \leq 6.0$) в диапазоне глубин $(-1.9) \leq h \leq 22.2$ км [11, 14]. Представительный класс и угол наклона графика повторяемости землетрясений показаны в табл. III.1. В 2023 г. на Мутновском вулкане наблюдалась повышенная сейсмичность. В течение года станцией MTVR регистрировались спазматическое вулканическое дрожание и слабые локальные поверхностные сейсмические события от вулкана. 14 сентября в 15^h44^m было зарегистрировано поверхностное сейсмическое событие продолжительностью ~ 30 мин., возможно сопровождавшее фреатическое извержение вулкана или сход каменной лавины. «Желтый» код опасности для вулкана выставлялся 242 раза, из них только три – по спутниковым данным, остальные – при повышенной сейсмичности. «Белый» код выставлялся 20 раз, когда данные с РТСС не поступали.

Ближайшая к вулкану Горелый станция GRL [2] расположена в 4 км от кратера. В 2023 г. в радиусе 7 км от вершины вулкана Горелый было лоцировано всего 16 землетрясений [11, 14]. Землетрясение с максимальным классом ($K_S=5.1$) произошло 13 июня

в 23^h28^m под постройкой вулкана ($h=1.6$ км). Для вулкана Горелый «желтый» код опасности выставлялся весь 2023 г. из-за повышенного уровня сейсмичности, когда количество слабых локальных сейсмических событий превышало $N>50$ в сутки.

Вулканическая активность Мутновско-Гореловской группы вулканов проявлялась только в виде фумарольной деятельности.

Вулкан Жупановский расположен в ~ 70 км к северо-северо-востоку от Петропавловска-Камчатского. Вулкан относится к юго-восточному вулканическому поясу Камчатки. В 2023 г. сейсмический мониторинг проводился по удаленным станциям [2], ближайшие из которых (SDLR, KRER, KRX) расположены в районе Авачинской группы вулканов в 38–40 км от Жупановского вулкана (рис. III.4). Всего в исследуемый период в районе этого вулкана ($\varphi=53.40\text{--}53.90^\circ\text{N}$, $\lambda=158.70\text{--}159.65^\circ\text{E}$) было лоцировано 16 землетрясений ($\Sigma E \sim 0.77 \cdot 10^6$ Дж) с $3.1 \leq K_S \leq 5.6$ на глубинах $1.7 \leq h \leq 30.5$ км [11, 15], из них два – в радиусе 20 км от его вершины. Землетрясение с максимальным классом $K_S=5.6$ произошло 29 сентября в 00^h44^m на глубине $h=6.6$ км вне зоны вулкана [11, 15].

В 2023 г. на Жупановском вулкане наблюдалась фоновая сейсмичность. Вулканическая активность проявлялась только в виде фумарольной деятельности.

Вулкан Карымский в 2023 г. продолжал извергаться. Ближайшая станция КП расположена на юго-восточном склоне в 1.5 км от кратера [2]. Другие радиотелеметрические станции расположены на расстоянии свыше 100 км и могут обеспечить надежное определение параметров землетрясений по трем станциям с занесением в каталог только с $K_S \geq 6.0$. В исследуемый период в районе Карымского вулкана ($\varphi=53.9\text{--}54.4^\circ\text{N}$, $\lambda=159.2\text{--}159.8^\circ\text{E}$) не было лоцировано ни одного землетрясения. Все основные выводы о деятельности вулкана сделаны по данным одной станции КП.

В 2023 г. продолжалось умеренное, а временами сильное эксплозивное извержение в центральном кратере. На рис. III.6 показано количество зарегистрированных поверхностных сейсмических событий ($2 < K_S < 6$) в районе вулкана Карымский, большинство из которых – взрывы в кратере. Данные со станции КП стали поступать только с июня. Гистограмма наглядно показывает периоды усиления и спада активности вулкана.

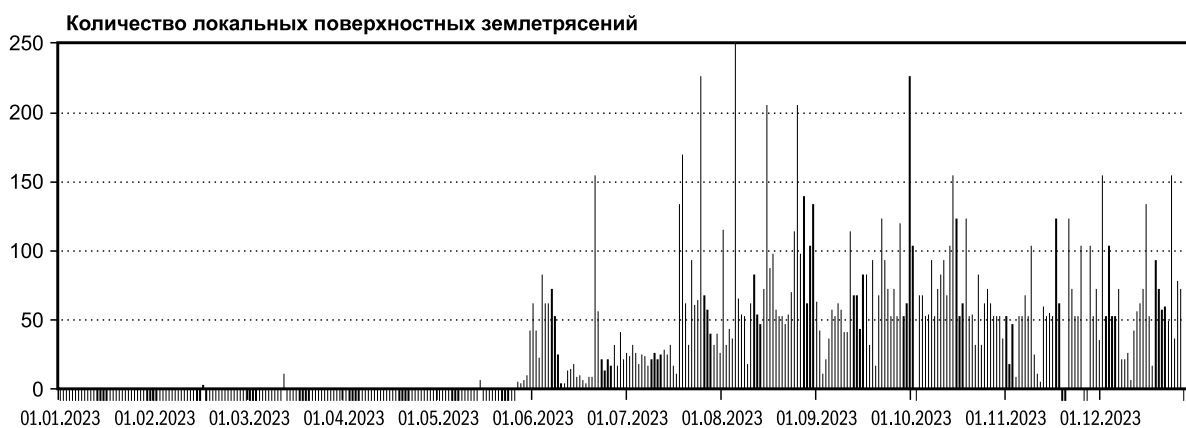


Рис. III.6. Сейсмичность вулкана Карымский в 2023 г.
по данным сейсмостанции КП.

Значение меньше «0» означает отсутствие данных

С июня и до конца года наблюдалось умеренное эксплозивное извержение, сопровождавшееся повышенной сейсмической активностью. По сейсмическим и спутниковым данным, эксплозивные извержения с высотой пепловых выбросов $\sim 3\text{--}4$ км н.у.м. произошли 12 июня, 18 и 30 августа, 12 и 19 октября.

В 2023 г. для вулкана Карымский повышенные коды опасности выставлялись 125 раз: 11 – «оранжевый» и 114 – «желтый». При отсутствии данных 176 раз выставлялся «белый» код.

Вулкан Кизимен по отношению к другим вулканам Камчатки занимает обособленное положение на западном склоне южной части хребта Тумрок. Это единственный действующий вулкан, расположенный на сочленении грабена Центральной Камчатской депрессии с горстом Восточного хребта. Ближайшая радиотелеметрическая станция KZV расположена на юго-западном склоне вулкана в 2.5 км от вершины (рис. III.5) [2]. Из-за зашумленности каналов РТСС KZV в течение всего года слабые землетрясения лоцировать было невозможно. В 2023 г. в районе вулкана Кизимен ($\varphi=54.90-55.54^\circ\text{N}$, $\lambda=159.82-160.80^\circ\text{E}$) в диапазоне глубин $(-1.1)\leq h\leq 23.0$ км было лоцировано всего 89 землетрясений с $3.7\leq K_S\leq 8.6$ ($\Sigma E\sim 0.64\cdot 10^9$ Дж), из них в радиусе 15 км от вершины вулкана Кизимен – только 22 события ($1.8\leq K_S\leq 7.1$) [11, 16]. Практически вся сейсмичность приурочена к району Щапинской гидротермальной системы. Максимальный класс землетрясения $K_S=8.6$ зарегистрирован 21 марта в 22^h22^m на глубине $h=7.1$ км [11, 16].

В 2023 г. на вулкане Кизимен вулканическая активность проявлялась только в виде фумарольной деятельности.

Литература

1. Чебров Д.В., Тихонов С.А., Дроздин Д.В., Дроздина С.Я., Матвеев Е.А., Митюшкина С.В., Салтыков В.А., Сеньюков С.Л., Серафимова Ю.К., Сергеев В.А., Яцук В.В. Система сейсмического мониторинга и прогнозирования на Камчатке и ее развитие. Основные результаты наблюдений в 2016–2020 гг. // Российский сейсмологический журнал. – 2021. – Т. 3, № 3. – С. 28–49. – DOI: 10.35540/2686-7907.2021.3.02. – EDN: RUYRWU
2. Чебров Д.В., Дроздина С.Я., Сеньюков С.Л., Шевченко Ю.В., Митюшкина С.В. Результаты сейсмического мониторинга различных регионов России. Камчатка и Командорские острова // Землетрясения России в 2023 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2025. – С. 84–96.
3. Сеньюков С.Л., Нужи́дина И.Н., Дроздина С.Я., Кожевникова Т.Ю., Назарова З.А., Соболевская О.В. Предварительные результаты исследования сейсмичности в районе вулкана Шивелуч в 2022–2023 гг. // Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов [Электронный ресурс]: Труды Девятой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Петропавловск-Камчатский, 24–30 сентября 2023 г. / Отв. ред. Д.В. Чебров. – Петропавловск-Камчатский: КФ ФИЦ ЕГС РАН, 2023. – С. 188–192. – URL: <https://emsd.ru/files/conf2023/collection2023.pdf>, свободный.
4. 2022-ER_App20_Volcano-regions-of-Kamchatka.xlsx [Электронный ресурс]: Список приложений для ежегодника «Землетрясения России в 2022 году» // Землетрясения России [сайт]. – [Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2024]. Систем. требования: MS Excel, Open Office. – URL: http://www.gsras.ru/zr/app_22.html, свободный.
5. Сеньюков С.Л., Нужи́дина И.Н., Чебров Д.В. Вулканы Камчатки // Землетрясения России в 2022 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2024. – С. 110–119. – EDN: BBDZXC
6. Дроздин Д.В., Дроздина С.Я. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Сейсмические приборы. – М.: ИФЗ РАН, 2010. – Т. 46, № 3. – С. 22–34. – EDN: NEAXOZ
7. Сеньюков С.Л. Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений в 2000–2004 гг. // Вулканология и сейсмология. – 2006. – № 3. – С. 68–78. – EDN: HTUGWF
8. 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. – DOI: 10.21455/gr2020.3-5. – EDN: QQHRZU
9. Wiemer S. A software package to analyze seismicity: ZMAP // Seismological Research Letters. – 2001. – V. 72, N 3. – P. 373–382. – DOI: 10.1785/gssrl.72.3.373
10. Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. – М.: Наука, 1972. – 117 с.

11. 2023-ER_App19_Volcano-regions-of-Kamchatka.xlsx [Электронный ресурс]: Список приложений для ежегодника «Землетрясения России в 2023 году» // Землетрясения России [сайт]. – [Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2025]. Систем. требования: MS Excel, Open Office. – URL: http://www.gsras.ru/zr/app_23.html, свободный.

12. Нуждина И.Н. (отв. сост.); Алехина Т.М., Должикова А.Н., Соболевская О.В., Фролова Т.Ю., Назарова З.А., Дрознина С.Я. Каталоги землетрясений по различным регионам России. Вулканические районы Камчатки. Северная группа вулканов // Землетрясения России в 2023 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2025. – С. 193–194.

13. Нуждина И.Н. (отв. сост.); Назарова З.А., Кожевникова Т.Ю., Соболевская О.В. Каталоги землетрясений по различным регионам России. Вулканические районы Камчатки. Авачинская группа вулканов // Землетрясения России в 2023 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2025. – С. 194–195.

14. Нуждина И.Н. (отв. сост.); Назарова З.А., Кожевникова Т.Ю., Соболевская О.В. Каталоги землетрясений по различным регионам России. Вулканические районы Камчатки. Мутновско-Гореловская группа вулканов // Землетрясения России в 2023 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2025. – С. 195.

15. Нуждина И.Н. (отв. сост.); Соболевская О.В., Назарова З.А., Кожевникова Т.Ю. Каталоги землетрясений по различным регионам России. Вулканические районы Камчатки. Вулкан Жупановский // Землетрясения России в 2023 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2025. – С. 196.

16. Нуждина И.Н. (отв. сост.); Кожевникова Т.Ю., Назарова З.А., Толокнова С.Л., Соболевская О.В. Каталоги землетрясений по различным регионам России. Вулканические районы Камчатки. Вулкан Кизимен // Землетрясения России в 2023 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2025. – С. 196–197.

17. Senyukov S.L., Droznina S.Ya., Kozhevnikova T.Yu. Experience of the detection of ash plume and estimation its height using local seismicity for Kamchatka volcanoes during 2003-2011 (Kamchatka Peninsula, Russia) // Complex monitoring of volcanic activity: methods and results. – New York: Nova Science Publishers, Inc., 2013. – P. 35–52.

18. Близнецов В.Е., Сеньюков С.Л. Программа ADAP для автоматического выделения пепловых выбросов и расчета их высоты по сейсмологическим данным // Сейсмические приборы. – 2015. – Т. 51, № 1. – С. 46–59. – EDN: TPFCRB

19. Сеньюков С.Л. Прогноз извержений вулканов Ключевской и Безымянный на Камчатке. – Saarbrücken: LAP LAMBERTS Academic Publishing, 2013. – 144 с.

20. Сеньюков С.Л., Нуждина И.Н., Дрознина С.Я., Кожевникова Т.Ю., Назарова З.А., Соболевская О.В. Особенности сейсмичности вулкана Безымянный в 2022–2023 гг. // Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов [Электронный ресурс]: Труды Девятой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Петропавловск-Камчатский, 24–30 сентября 2023 г. / Отв. ред. Д.В. Чебров. – Петропавловск-Камчатский: КФ ФИЦ ЕГС РАН, 2023. – С. 183–187. – URL: <https://emsd.ru/files/conf2023/collection2023.pdf>, свободный.