

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 2021 г. в радиотелеметрическую сеть сейсмических станций Камчатского филиала (КФ) ФИЦ ЕГС РАН были добавлены три новые станции [1, 2]. В районе Северной группы вулканов были установлены станции UDINA и YKUG (рис. III.1) и с 30 сентября их данные стали использовать при обработке землетрясений. В районе Авачинской группы вулканов 25 октября была введена в эксплуатацию РТСС KZL (рис. III.2).

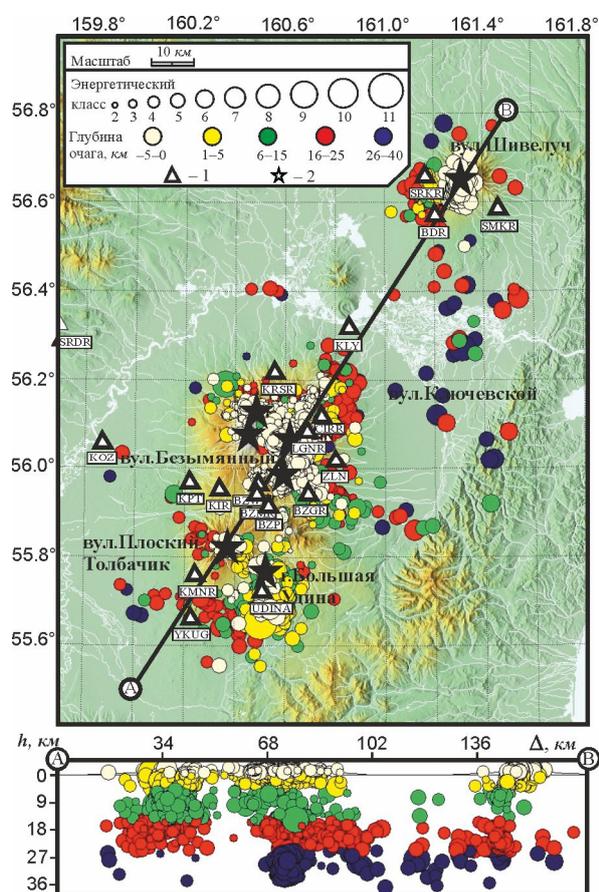


Рис. III.1. Карта эпицентров землетрясений в районе Северной группы вулканов в 2021 г., и проекция очагов на вертикальный разрез А–В: 1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан

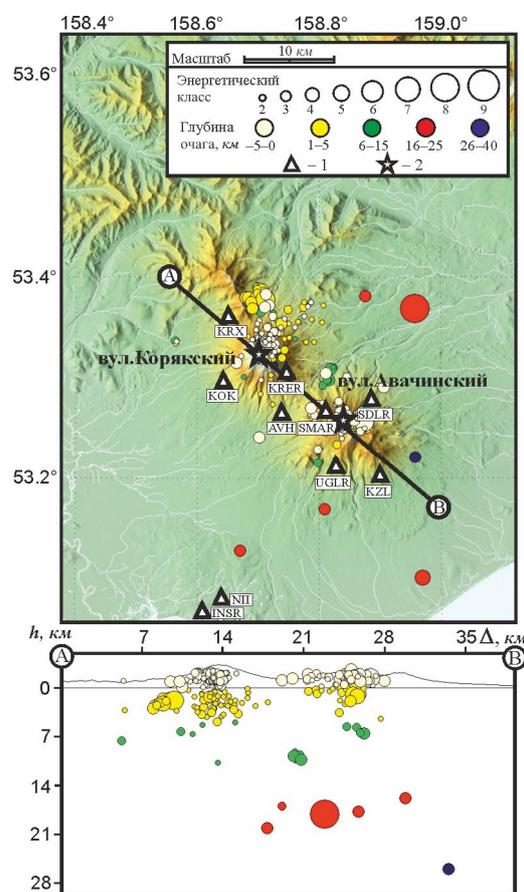


Рис. III.2. Карта эпицентров землетрясений в районе Авачинской группы вулканов в 2021 г., и проекция очагов на вертикальный разрез А–В: 1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан

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 вулканов Жупановский (рис. III.4) и Кизимен (рис. III.5). В табл. III.1 приведены сведения о вулканах, для которых проводился сейсмический мониторинг.

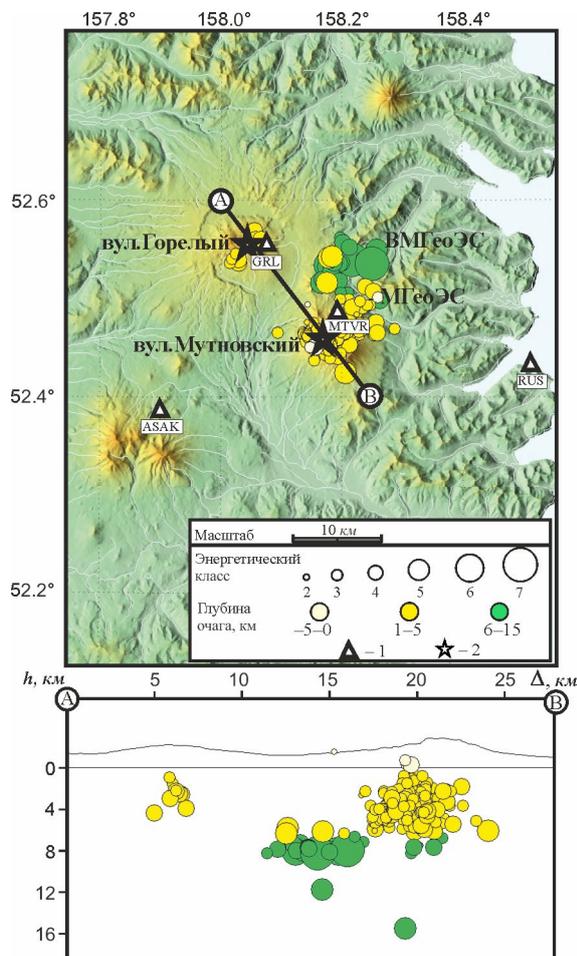


Рис. III.3. Карта эпицентров землетрясений в районе Мутновско-Гореловской группы вулканов в 2021 г., и проекция очагов на вертикальный разрез А-В:
1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан

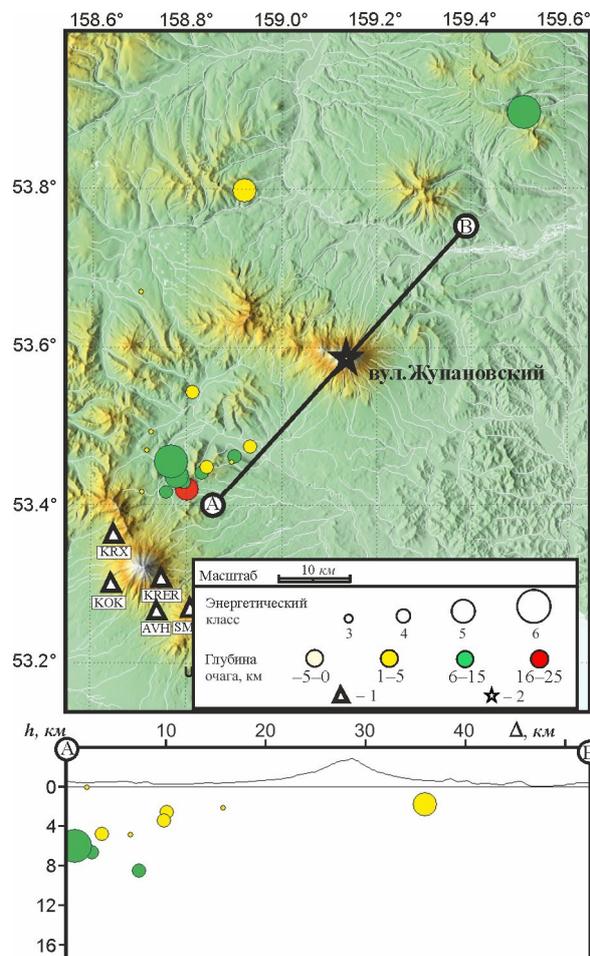


Рис. III.4. Карта эпицентров землетрясений в районе вулкана Жупановский в 2021 г., и проекция очагов на вертикальный разрез А-В:
1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан

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

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 2021 г.
	φ , °N	λ , °E				
Авачинская группа вулканов						
Авачинский	53.25	158.83	2741	350	3.0	2.4/0.7±0.04
Корякский	53.32	158.72	3456		3.0	1.6/0.62±0.03
Мутновско-Гореловская группа вулканов						
Горелый	52.55	158.03	1829		4.5	мало данных
Мутновский	52.45	158.20	2323		4.5	3.2/1.38±0.12
Северная группа вулканов						
Шивелуч	56.63	161.32	2600		3.5	4.7/0.99±0.05
Безымянный	55.97	160.58	2869		3.0	2.9/0.86±0.1
Крестовский	56.12	160.50	4108		4.0	3.0/0.46±0.22
Ушковский	56.07	160.47	3943			

Название вулкана	Координаты вершины		Абсолютная высота вершины, м	Диаметр кратера, м	Теоретический уровень надежной регистрации, K_{\min}	Уровень надежной регистрации $K_{\text{пред}}$ и угол наклона γ в 2021 г.
	φ , °N	λ , °E				ZMAP
Ключевской	56.07	160.63	4750	700	3.0	для поверхностных – 3.3/0.69±0.03; для промежуточных – мало данных; для глубоких два максимума, один основной – 3.8/0.36±0.07, один локальный – 5.3/1.03±0.11
Плоский Толбачик	55.82	160.37	3085	400	4.0	4.2/0.42±0.08
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

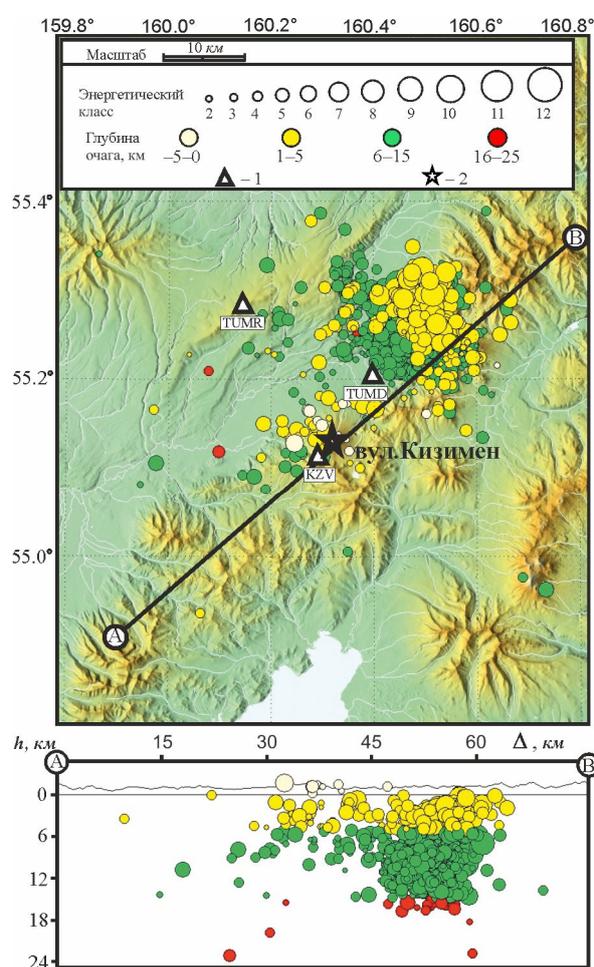


Рис. III.5. Карта эпицентров землетрясений в районе вулкана Кизимен в 2021 г., и проекция очагов на вертикальный разрез А–В: 1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан

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 фиксировать слабые локальные события этого вулкана, но не позволяет

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 2021 г. (координаты эпицентра, глубина, энергия) проводился по программе DIMAS [3]. Для лоцирования сейсмических событий Северной и Авачинской групп вулканов использовались локальные годографы [4], для вулканов Мутновский, Горелый, Жупановский, Кизимен, Карымский – одномерная скоростная модель Камчатского региона с возможностью поиска решений положений гипоцентров землетрясений выше уровня моря. Каталог для всех групп вулканов формировался в сетевой базе данных (<http://www.emsd.ru/ts/>) с задержкой не более суток и доступен по адресу: <http://www.emsd.ru/sdis/main.php> [1, 5].

Представительный класс и угол наклона графика повторяемости землетрясений определялись с помощью автоматической процедуры программы ZMAP [6].

определять их пространственное положение. Для таких событий производился только подсчет их количества. Для более сильных землетрясений (обычно с $K_s \geq 6.0$ [7]), зарегистрированных удаленными от вулкана станциями, определялись кинематические и динамические параметры, которые помещались в сетевую базу данных.

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

В 2021 г. в электронный каталог землетрясений Северной группы вулканов включены параметры 7606 событий (рис. III.1, [8]), в очагах которых было высвобождено сейсмической энергии $\Sigma E \sim 5.75 \cdot 10^{10}$ Дж, в каталог Авачинской группы (рис. III.2, [8]) – 385 ($\Sigma E \sim 2.51 \cdot 10^9$ Дж), Мутновско-Гореловской группы (рис. III.3, [8]) – 295 ($\Sigma E \sim 1.34 \cdot 10^7$ Дж). Каталоги землетрясений для районов вулканов Жупановский (рис. III.4, [8]) и Кизимен (рис. III.5, [8]) содержат соответственно параметры 17 событий ($\Sigma E \sim 0.2 \cdot 10^7$ Дж) и 3397 событий ($\Sigma E \sim 1.02 \cdot 10^{12}$ Дж).

В печатные варианты каталогов землетрясений вулканических районов Камчатки помещены параметры: Северная группа вулканов – 29 землетрясений с $M \geq 1.5$ ($K_s \geq 6.8$) [9]; Авачинская группа вулканов – пять землетрясений с $M \geq 0$ ($K_s \geq 4.6$) [10]; Мутновско-Гореловская группа вулканов – 11 землетрясений с $M \geq 0$ ($K_s \geq 4.6$) [11]; вулкан Жупановский – четыре землетрясения с $M \geq 0.3$ ($K_s \geq 5.1$) [12] и вулкан Кизимен – 44 землетрясения с $M \geq 1.5$ ($K_s \geq 6.8$) [13].

В исследуемый период высокая сейсмическая и вулканическая активность наблюдалась на вулканах Шивелуч, Ключевской, 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 купола вулкана [2]. В 2021 г. продолжалось экстрезивно-эксплозивное извержение вулкана Шивелуч, связанное с ростом нового купола. Высокая сейсмическая и вулканическая активность наблюдалась в течение всего года. Извержение сопровождалось вулканическим дрожанием, газо-пепловыми выбросами с максимальной высотой 6 км над уровнем моря по сейсмическим данным, сходом пирокластических потоков и горячих лавин.

На протяжении всего года по спутниковым данным наблюдалась термальная аномалия на растущем куполе, свидетельствующая о присутствии на поверхности горячего магматического материала. Высокий «оранжевый» код опасности на вулкане в 2021 г. выставлялся 65 раз, «желтый» – 217 раз.

Из-за неустойчивой работы станций SRKR, SMKR и BDR в течение года локализовать землетрясения до уровня теоретического представительного класса $K_{\min} = 3.5$ не всегда было возможно. Всего в 2021 г. в радиусе 12 км от вулкана было лоцировано 2062 землетрясения с энергетическим классом $1.9 \leq K_s \leq 7.4$ в диапазоне глубин $2.2 \leq h^1 \leq 29$ км [8, 9], высвобождено сейсмической энергии $\Sigma E \sim 2.45 \cdot 10^8$ Дж.

¹ Для вулканических землетрясений глубина h (км) определяется от уровня моря: со знаком «+» – ниже уровня моря, со знаком «-» – над уровнем моря (н.у.м.).

Представительный класс и угол наклона графика повторяемости землетрясений получились равными 4.7 и 0.99 ± 0.05 (табл. III.1). Землетрясение с максимальным классом ($K_S=7.4$) зарегистрировано в постройке вулкана 17 июня в $18^h 26^m$ ($h=-0.5$ км) [8, 9].

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 январе продолжалось вершинное эффузивно-эксплозивное извержение, начавшееся 4 октября 2020 г., с излиянием лавового потока по юго-восточному склону. Пепловый выброс с максимальной высотой 10 км над уровнем моря наблюдался 24 января. Извержение резко завершилось 7 февраля, а через десять дней (18 февраля) впервые за 30 лет был зафиксирован новый «несубтерминальный» побочный прорыв на расстоянии $\sim 3.5-4.0$ км от кратера. Впоследствии прорыв был назван именем Г.С. Горшкова. Это побочное извержение стало первым в истории наблюдений КФ ФИЦ ЕГС РАН с 1996 г. и не было спрогнозировано в режиме реального времени. Ретроспективное изучение сейсмичности в этот период показало резкое (в 16 раз) уменьшение средней амплитуды дрожания 7 февраля, что позволило зарегистрировать рой поверхностных землетрясений под центральным кратером. С 7 по 8 февраля было лоцировано 128 землетрясений с $2.9 \leq K_S \leq 7.4$ ($-1.9 \leq h^1 \leq 3.8$ км) [8, 9], при этом эпицентры некоторых событий были смещены в северо-западном направлении от вершины. В дальнейшем до 18 февраля уже большая часть эпицентров землетрясений сместилась в северо-западном направлении от вершины, хотя значение смещений в большинстве случаев не превышало точности локации этих событий в плане. Зона распределения эпицентров землетрясений примерно совпала с местом нового побочного извержения, свечение от которого впервые было отмечено 18 февраля [10]. В 2021 г. для вулкана выставлялись повышенные коды опасности: два раза – «красный», 58 – «оранжевый», 73 – «желтый». Извержение вулкана сопровождалось высокой сейсмической активностью, связанной с притоком мантийных магм в промежуточный магматический очаг на глубинах $h=20-35$ км и дальнейшим их подъемом в постройку вулкана. 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. В радиусе 7 км от вулкана и диапазоне глубин от кратера до 40 км лоцировано 4198 землетрясений с $\Sigma E \sim 0.8 \cdot 10^9$ Дж (рис. III.1, [8, 9]). Практически вся сейсмичность в 2021 г. была сосредоточена в верхнем (3018 событий) и нижнем (1138 событий) слоях, в промежуточном слое лоцировано всего 42 землетрясения. Представительный класс и угол наклона графика повторяемости землетрясений для каждого слоя показаны в табл. III.1. Для глубоких землетрясений представлено два значения этих параметров. Во время извержения из-за высокого уровня непрерывного вулканического дрожания обработать записи слабых землетрясений было невозможно, что привело к повышению представительного класса $K_{пред}$ и угла наклона γ в этот период. Землетрясение с максимальным классом ($K_S=8.4$) произошло 9 февраля в $11^h 12^m$ на глубине $h=19.2$ км под постройкой вулкана [8, 9].

Вулкан Безымянный. Ближайшая телеметрическая станция VZMR, расположенная в 7 км от кратера, позволяла регистрировать землетрясения с $K_S \geq 2.9$. В 2021 г. в радиусе 6 км от вулкана было лоцировано 282 землетрясения с классом $1.6 \leq K_S \leq 5.1$ в диапазоне глубин $-2.7 \leq h \leq 15.2$ км [8, 9] с суммарной энергией $\Sigma E \sim 0.1 \cdot 10^7$ Дж.

В 2021 г. для вулкана Безымянный «желтый» код опасности выставлялся 105 раз, из них 29 – при повышенной сейсмичности, в остальных 76 случаях – при фиксировании свечения, сопровождающего непрерывное экструзивное извержение растущего купола. Во время извержения Ключевского вулкана, сопровождавшегося мощным вулканическим дрожанием, корректный сейсмический мониторинг Безымянного был невозможен. В эти периоды для вулкана выставлялся «белый» код (36 раз). Землетрясение

с максимальным классом $K_s=5.1$ произошло 16 октября в 22^h51^m в постройке вулкана ($h=-1.0$ км) [8, 9].

В 2021 г. на вулкане Безымянный зафиксировано три случая повышения уровня сейсмичности до значений, позволяющих произвести прогноз по методу «СОУС'09» [11]. Формулировки прогнозов приводятся в заключениях КФ РЭС № 844 от 16 июля, № 846 от 30 июля и № 863 от 26 ноября. Данные прогнозы следует признать не оправдавшимися, поскольку извержений с лавовыми потоками или эксплозивных извержений с подъемом пепла на высоту более 5 км не происходило.

Вулкан Плоский Толбачик. Ближайшая телеметрическая станция KMNR [2] расположена в 10 км от кратера вулкана. В 2021 г. в окружности радиусом 20 км, включающей вышеназванный вулкан, Толбачинский дол и потухшие вулканы Большая Удина и Малая Удина, было лоцировано 495 землетрясений с $2.3 \leq K_s \leq 10.6$ в диапазоне глубин от кратера до 28 км ниже уровня моря, $\Sigma E \sim 5.54 \cdot 10^{10}$ Дж [8, 9]. Землетрясение с максимальным классом $K_s=10.6$ произошло 24 января в 13^h49^m на глубине 0.3 км в районе реки Толуд.

В течение года на вулкане Плоский Толбачик в основном наблюдалась фоновая сейсмическая и вулканическая активность. «Желтый» код опасности выставлялся 31 раз, когда в районе вулкана регистрировалась повышенная сейсмичность. В основном она наблюдалась в районе реки Толуд и потухших вулканов Большая Удина и Малая Удина, которые расположены, соответственно, примерно в 12 и 16 км на юго-запад от кратера вулкана Плоский Толбачик (рис. III.1, [8, 9]). «Белый» код выставлялся 27 раз, когда корректный сейсмический мониторинг был невозможен из-за извержения Ключевского вулкана.

На вулканах **Крестовский и Ушковский** в 2021 г. наблюдалась фоновая сейсмичность. В радиусе 10.1 км от вулканов и в диапазоне глубин $-1.8 \leq h \leq 31.3$ км было лоцировано 154 землетрясения с $2.0 \leq K_s \leq 8.8$ ($\Sigma E \sim 0.63 \cdot 10^9$ Дж) [8, 9]. Максимальный класс $K_s=8.8$ зарегистрирован 4 ноября в 03^h23^m на глубине $h=14.7$ км под постройкой вулкана Крестовский.

Вулканы Корякский и Авачинский расположены в 25–30 км от городов Петропавловска-Камчатского и Елизово и поэтому представляют наибольшую потенциальную угрозу для населения. В 2021 г. в каталог Авачинской группы вулканов включены параметры 385 землетрясений (с $1.6 \leq K_s \leq 9.4$, $-2.6 \leq h \leq 26.0$ км), выделившаяся суммарная энергия которых составила $\Sigma E \sim 2.5 \cdot 10^9$ Дж [8, 12].

В 2021 г. в радиусе 8 км от Авачинского вулкана (рис. III.2) было лоцировано 202 землетрясения с $1.6 \leq K_s \leq 5.9$ ($-2.6 \leq h \leq 26.0$ км; $\Sigma E \sim 1.35 \cdot 10^6$ Дж). Максимальный класс $K_s=5.9$ зарегистрирован 27 февраля в 04^h45^m в постройке вулкана ($h=-1.4$ км) [8, 12]. Повышенный «желтый» код опасности для вулкана Авачинский выставлялся только один раз по сейсмическим данным.

В радиусе 9 км от Корякского вулкана в 2021 г. были определены кинематические и динамические характеристики для 166 землетрясений ($1.6 \leq K_s \leq 5.6$, $\Sigma E \sim 0.55 \cdot 10^6$ Дж). Землетрясение с $K_s=5.6$ произошло 12 февраля в 11^h45^m под постройкой вулкана ($h=1.8$ км) [8, 12]. 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 2021 г. в каталог Мутновско-Гореловской группы включены параметры 295 землетрясений $1.9 \leq K_s \leq 6.8$ с суммарной энергией $\Sigma E \sim 1.3 \cdot 10^7$ Дж.

Землетрясение с максимальным классом ($K_S=6.8$) произошло на глубине $h=5.9$ км вне зоны вулканов 21 августа в 11^h15^m [8, 13]. Ближайшая к Мутновскому вулкану сейсмическая станция МТВР [2] расположена в 3 км от активного кратера. С 1 января по 12 мая данные с РТСС не поступали. В радиусе 8 км от вершины вулкана Мутновский было лоцировано 255 землетрясений ($1.9 \leq K_S \leq 5.3$, $-1.1 \leq h \leq 11.6$ км) [8, 13]. Максимальный класс землетрясения ($K_S=5.3$) был зарегистрирован под постройкой вулкана ($h=5.9$ км) 21 августа в 11^h12^m [8, 13]. Представительный класс и угол наклона графика повторяемости землетрясений показаны в табл. III.1. В 2021 г. на Мутновском вулкане наблюдалась повышенная сейсмичность. В течение года станцией МТВР регистрировались спазматическое вулканическое дрожание и слабые локальные поверхностные сейсмические события от вулкана. «Желтый» код опасности для вулкана выставлялся 129 раз, из них только три по спутниковым данным, остальные – при повышенной сейсмичности.

Ближайшая к вулкану Горелый станция GRL [2] расположена в 4 км от кратера. В 2021 г. на вулкане Горелый наблюдалась фоновая сейсмичность. В радиусе 7 км от вершины вулкана Горелый было локализовано всего девять землетрясений [8, 12]. Землетрясение с максимальным классом ($K_S=4.3$) произошло 13 августа в 22^h20^m под постройкой вулкана ($h=1.7$ км). Для вулкана Горелый «желтый» код опасности выставлялся 20 раз из-за повышенного уровня сейсмичности, когда количество слабых локальных сейсмических событий превышало $N > 50$ в сутки.

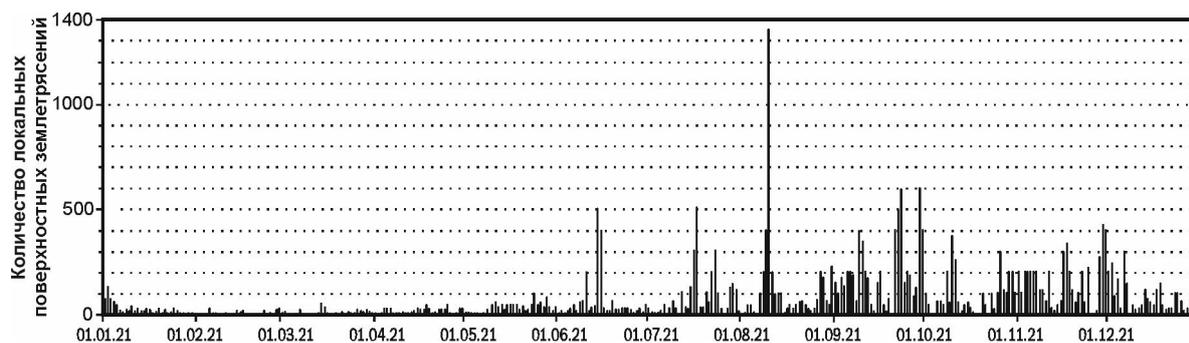
Вулканическая активность Мутновско-Гореловской группы вулканов проявлялась только в виде фумарольной деятельности.

Вулкан Жупановский расположен в ~ 70 км к север–северо-востоку от Петропавловска-Камчатского. Вулкан относится к юго-восточному вулканическому поясу Камчатки. В 2021 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 Жупановского вулкана ($\varphi=53.40–53.90^\circ\text{N}$, $\lambda=158.70–159.65^\circ\text{E}$) было лоцировано 17 землетрясений ($\Sigma E \sim 0.2 \cdot 10^7$ Дж) с $3.0 \leq K_S \leq 6.1$ в диапазоне глубин $0.1 \leq h \leq 16.7$ км [8, 14], из них только одно – в радиусе 20 км от его вершины. Землетрясение с максимальным классом ($K_S=6.1$) произошло 10 августа в 11^h21^m на глубине 5.0 км вне зоны вулкана [8, 14].

В 2021 г. из-за повышенной сейсмической активности вулкану два раза присваивался «желтый» код опасности, в остальное время наблюдалась фоновая сейсмичность. Вулканическая активность проявлялась только в виде фумарольной деятельности.

Вулкан Карымский в 2021 г. продолжал извергаться. Ближайшая станция КИ 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 ($\varphi=53.9–54.4^\circ\text{N}$, $\lambda=159.2–159.8^\circ\text{E}$) не было лоцировано ни одного землетрясения. Все основные выводы о деятельности вулкана сделаны по данным одной станции КИ.

В 2021 г. продолжалось 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. Гистограмма наглядно показывает периоды усиления и спада активности вулкана. Во время активизации регистрировались события, сопровождавшие газопепловые выбросы высотой до 6500 м над кратером (3 ноября). В 2021 г. для вулкана Карымский повышенные коды опасности выставлялись 214 раз: один раз – «красный», 143 – «оранжевый» и 70 – «желтый».



**Рис. III.6. Сейсмичность вулкана Карымский в 2021 г.
по данным сейсмостанции КП.**

Значение меньше «0» означает отсутствие данных

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]. В 2021 г. в районе вулкана Кизимен ($\varphi=54.90-55.54^{\circ}\text{N}$, $\lambda=159.82-160.80^{\circ}\text{E}$) было локализовано 3397 землетрясений с суммарной энергией $\Sigma E \sim 1.02 \cdot 10^{12}$ Дж, из них в радиусе 20 км от вершины вулкана Кизимен произошло всего 247 событий ($1.8 \leq K_s \leq 7.1$, $1.7 \leq h \leq 23.2$ км, $\Sigma E \sim 0.48 \cdot 10^8$ Дж) [8, 15]. Практически вся сейсмичность приурочена к району Шапинской гидротермальной системы. Максимальный класс землетрясения ($K_s=12.0$, $h=8.7$ км) зарегистрирован 19 марта в 03^h16^m [8, 15].

В 2021 г. на вулкане Кизимен пять раз выставлялся «желтый» код опасности, когда сейсмичность превысила фоновый уровень. Вулканическая активность проявлялась только в виде фумарольной деятельности.

Литература

1. Чебров Д.В., Тихонов С.А., Дрознин Д.В., Дрознина 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., Дрознина С.Я., Сеньюков С.Л., Шевченко Ю.В., Митюшкина С.В. Результаты сейсмического мониторинга различных регионов России. Камчатка и Командорские острова // Землетрясения России в 2021 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2023. – С. 76–87.
3. Дрознин Д.В., Дрознина С.Я. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Сейсмические приборы. – М.: ИФЗ РАН, 2010. – Т. 46, № 3. – С. 22–34. – EDN: NEAXOZ
4. Сеньюков С.Л. Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений в 2000–2004 гг. // Вулканология и сейсмология. – 2006. – № 3. – С. 68–78. – EDN: HTUGWF
5. 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
6. 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
7. Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. – М.: Наука, 1972. – 117 с.
8. 2021-ER_App19_Volcano-regions-of-Kamchatka.xls [Электронный ресурс]: Список приложений для ежегодника «Землетрясения России в 2021 году» // Землетрясения России [сайт]. –

[Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2023]. Систем. требования: MS Excel, Open Office. – URL: http://www.gsras.ru/zr/app_21.html, свободный.

9. *Нуждина И.Н. (отв. сост.); Должикова А.Н., Соболевская О.В., Кожевникова Т.Ю., Толочкова С.Л., Дрознина С.Я., Назарова З.А.* Каталоги землетрясений по различным регионам России. Вулканические районы Камчатки. Северная группа вулканов // Землетрясения России в 2021 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2023. – С. 184.

10. *Сенюков С.Л., Нуждина И.Н., Дрознин Д.В., Дрознина С.Я., Кожевникова Т.Ю., Назарова З.А., Соболевская О.В.* Сейсмичность вулкана Ключевской в 2021 г. в связи с побочным прорывом имени Г.С. Горшкова // Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов [Электронный ресурс] : Труды Восьмой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Петропавловск-Камчатский, 26 сентября–2 октября 2021 г. / Отв. ред. Д.В. Чебров. – Петропавловск-Камчатский: КФ ФИЦ ЕГС РАН, 2021. – С. 228–235. DOI: 10.35540/903258-451.2021.8.42. – EDN: CLLYAI

11. *Салтыков В.А.* Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. – 2011. – № 2. – С. 53–59. – EDN: NSYPHR

12. *Нуждина И.Н. (отв. сост.); Кожевникова Т.Ю., Толочкова С.Л., Назарова З.А.* Каталоги землетрясений по различным регионам России. Вулканические районы Камчатки. Авачинская группа вулканов // Землетрясения России в 2021 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2023. – С. 185.

13. *Нуждина И.Н. (отв. сост.); Кожевникова Т.Ю., Назарова З.А., Толочкова С.Л.* Каталоги землетрясений по различным регионам России. Вулканические районы Камчатки. Мутновско-Гореловская группа вулканов // Землетрясения России в 2021 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2023. – С. 185.

14. *Нуждина И.Н. (отв. сост.); Толочкова С.Л., Должикова А.Н., Кожевникова Т.Ю., Назарова З.А.* Каталоги землетрясений по различным регионам России. Вулканические районы Камчатки. Вулкан Жупановский // Землетрясения России в 2021 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2023. – С. 186.

15. *Нуждина И.Н. (отв. сост.); Кожевникова Т.Ю., Назарова З.А., Толочкова С.Л., Соболевская О.В.* Каталоги землетрясений по различным регионам России. Вулканические районы Камчатки. Вулкан Кизимен // Землетрясения России в 2021 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2023. – С. 186.