

### III. Результаты детального сейсмического мониторинга

#### Непрерывные наблюдения

#### Вулканы Камчатки

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

КФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский

В 2020 г. радиотелеметрическая сеть сейсмических станций Камчатского филиала (КФ) ФИЦ ЕГС РАН сохранилась без изменений по сравнению с 2019 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 вулканов Жупановский (рис. III.4) и Кизимен (рис. III.5). В табл. III.1 приведены сведения о вулканах, для которых проводился сейсмический мониторинг.

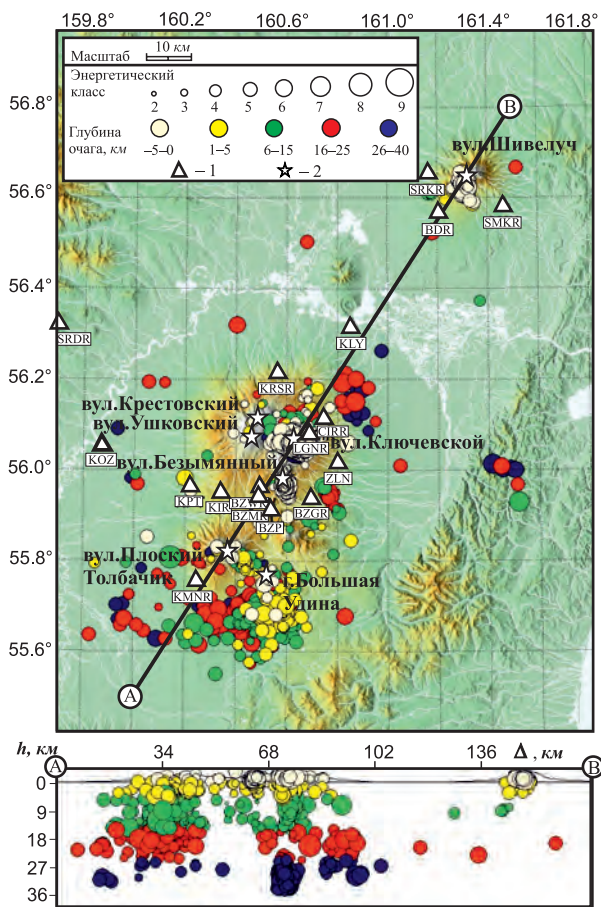


Рис. III.1. Карта эпицентров землетрясений в районе Северной группы вулканов в 2020 г. и проекция очагов на вертикальный разрез А-В: 1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан

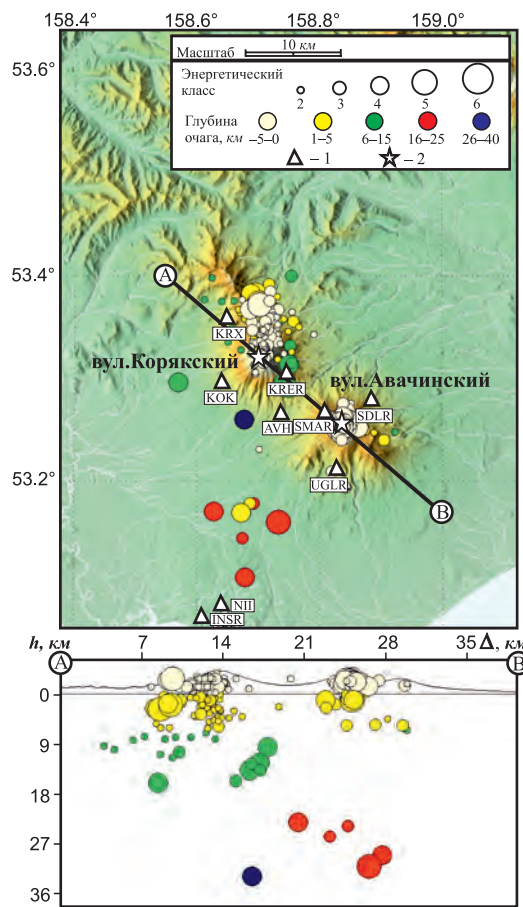


Рис. III.2. Карта эпицентров землетрясений в районе Авачинской группы вулканов в 2020 г. и проекция очагов на вертикальный разрез А-В: 1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан

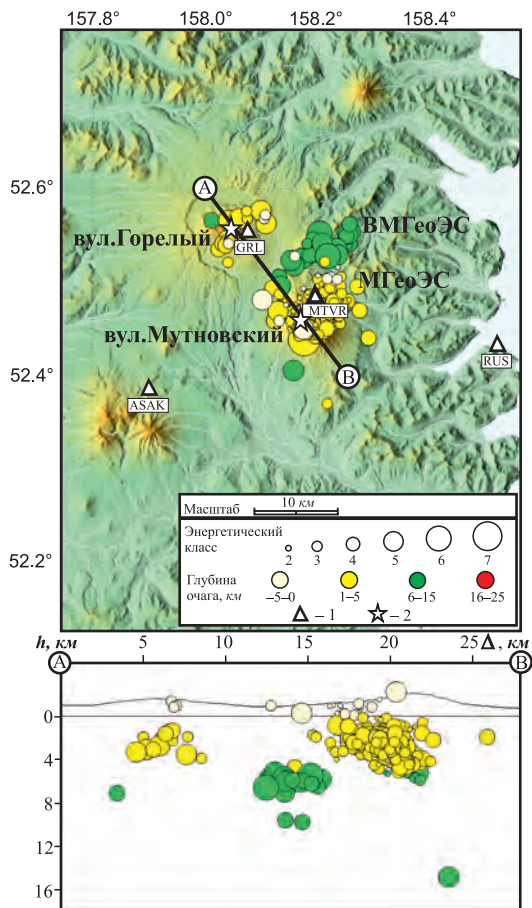


Рис. III.3. Карта эпицентров землетрясений в районе Мутновско-Гореловской группы вулканов в 2020 г. и проекция очагов на вертикальный разрез А–В:  
1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан

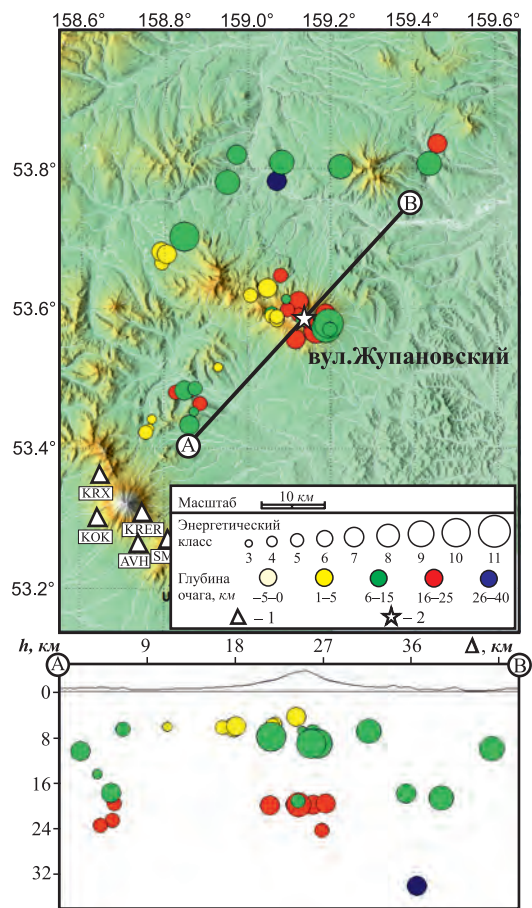


Рис. III.4. Карта эпицентров землетрясений в районе вулкана Жупановский в 2020 г. и проекция очагов на вертикальный разрез А–В:  
1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан

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 $K_{\text{пред}}$ и угол наклона $\gamma$ в 2020 г. ZMAP
	$\varphi$ , °N	$\lambda$ , °E				
Авачинская группа вулканов						
Авачинский	53.25	158.83	2741	350	3.0	2.2/0.67±0.03
Корякский	53.32	158.72	3456		3.0	1.9/0.65±0.03
Мутновско-Гореловская группа вулканов						
Горелый	52.55	158.03	1829		4.5	мало данных
Мутновский	52.45	158.20	2323		4.5	2.9/0.91±0.1
Северная группа вулканов						
Шивелуч	56.63	161.32	2600		3.5	4.7/0.56±0.07
Ключевской	56.07	160.63	4750	700	3.0	для поверхностных – 3.6/0.46±0.11; для промежуточных – 3.8/0.75±0.02; для глубоких – 3.8/0.99±0.08
Безымянный	55.97	160.58	2869		3.0	3.3/0.61±0.08

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 $\gamma$ в 2020 г.
	$\varphi$ , °N	$\lambda$ , °E				ZMAP
Крестовский	56.12	160.50	4108		4.0	мало данных
Ушковский	56.07	160.47	3943			
Плоский Толбачик	55.82	160.37	3085	400	4.0	3.8/0.45±0.07
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

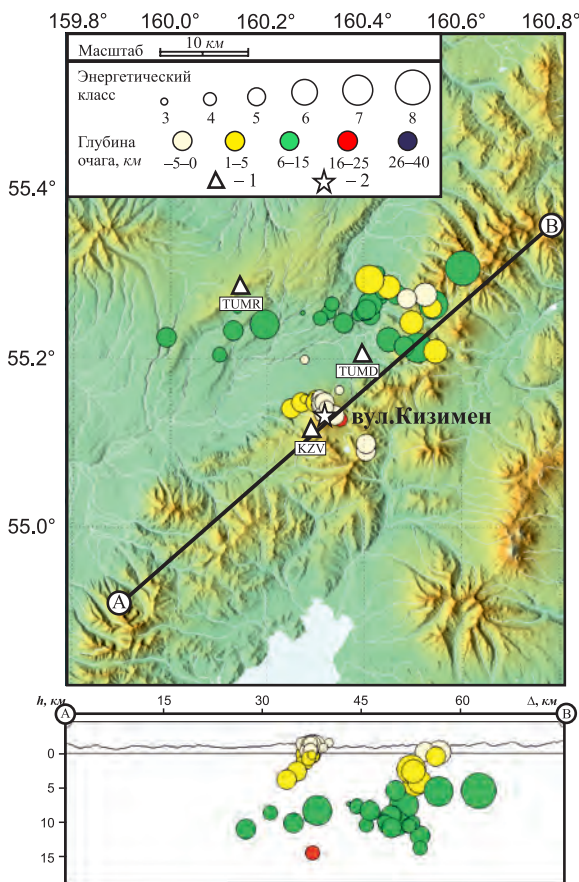


Рис. III.5. Карта эпицентров землетрясений в районе вулкана Кизимен в 2020 г. и проекция очагов на вертикальный разрез А–В: 1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан

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 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.

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 2020 г. (координаты эпицентра, глубина, энергия) проводился сотрудниками лаборатории исследований сейсмической и вулканической активности (ЛИСВА) 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].



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 2020 г. в электронный каталог землетрясений Северной группы вулканов включены параметры 3945 событий (рис. III.1, [8]), в очагах которых было высвобождено сейсмической энергии  $\Sigma E \sim 1.37 \cdot 10^9$  Дж, в каталог Авачинской группы (рис. III.2, [8]) – 337 ( $\Sigma E \sim 0.19 \cdot 10^7$  Дж), Мутновско-Гореловской группы (рис. III.3, [8]) – 498 ( $\Sigma E \sim 2.35 \cdot 10^7$  Дж). Каталоги землетрясений для районов вулканов Жупановский (рис. III.4, [8]), Кизимен (рис. III.5, [8]) и Карымский [8] содержат соответственно параметры 41 события ( $\Sigma EE \sim 5.15 \cdot 10^7$  Дж), 55 событий ( $\Sigma E \sim 1.23 \cdot 10^8$  Дж) и четырех событий ( $\Sigma EE \sim 5.03 \cdot 10^6$  Дж).

В печатные варианты каталогов землетрясений вулканических районов Камчатки помещены параметры: Северная группа вулканов – 31 землетрясение с  $M \geq 1.3$  ( $K_s \geq 6.5$ ) [9]; Авачинская группа вулканов – семь землетрясений с  $M \geq 0$  ( $K_s \geq 4.6$ ) [10]; Мутновско-Гореловская группа вулканов – 15 землетрясений с  $M \geq 0$  ( $K_s \geq 4.6$ ) [11]; вулкан Жупановский – 18 землетрясений с  $M \geq 0$  ( $K_s \geq 4.6$ ) [12]; вулкан Кизимен – 29 землетрясений с  $M \geq 0$  ( $K_s \geq 4.6$ ) [13]; вулкан Карымский – четыре землетрясения с  $M \geq 0.5$  ( $K_s \geq 5.4$ ) [14].

В исследуемый период высокая сейсмическая и вулканическая активность наблюдалась на вулканах Шивелуч, Ключевской, Безымянный, Плоский Толбачик, 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 км от активного купола вулкана [2]. В 2020 г. продолжалось экструзивно-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 10 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. Самый высокий «красный» код опасности на вулкане в 2020 г. выставлялся два раза, «оранжевый» – 22 раза, «желтый» – 310 раз.

В период с января по октябрь из-за отсутствия данных со станции SRKR локализовать землетрясения с  $K_s < 4.0$  было невозможно. Всего в 2020 г. радиусе 12 км от вулкана было лоцировано 165 землетрясений с классом  $3.3 \leq K_s \leq 6.7$  в диапазоне глубин  $2.0 \leq h^1 \leq 9.3$  км [8, 9], высвобождено сейсмической энергии  $\Sigma E \sim 5.8 \cdot 10^7$  Дж. Представительный класс и угол наклона графика повторяемости землетрясений показаны

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

в табл. III.1. Землетрясения с максимальным классом ( $K_S=6.7$ ) зарегистрированы в постройке вулкана 18 ноября в  $21^h18^m$  ( $h=-0.9$  км) и 22 декабря в  $00^h31^m$  ( $h=-0.5$  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 течение всего 2020 г., за исключением периода август-сентябрь, на Ключевском вулкане наблюдалось вершинное эксплозивно-эффузивное извержение с пепловыми выбросами высотой до 10 км н.у.м. и излиянием лавовых потоков. В исследуемый период для вулкана выставлялись повышенные коды опасности: пять раз – «красный», 187 раз – «оранжевый», 109 раз – «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 2828 землетрясений с  $\Sigma E \sim 0.5 \cdot 10^9$  Дж (рис. III.1, [8, 9]). Практически вся сейсмичность в 2020 г. была сосредоточена в верхнем (1723 события) и нижнем (921 событие) слоях, в промежуточном слое лоцировано всего 184 землетрясения. Представительный класс и угол наклона графика повторяемости землетрясений для каждого слоя показаны в табл. III.1. Землетрясение с максимальным классом ( $K_S=8.1$ ) произошло в постройке вулкана на глубине  $h=2.6$  км 16 сентября в  $09^h04^m$  [8, 9].

На вулкане **Безымянный** 21 октября 2020 г. произошло мощное эксплозивное извержение с высотой пеплового выброса 10 км н.у.м.

По данным сейсмического мониторинга ЛИСВА, на вулкане Безымянный с 6 сентября стали регистрироваться поверхностные события. Наблюдался постепенный рост суммарного количества и суммарной энергии лоцированных землетрясений [8, 9]. В то же время такой предвестник как температура термальной аномалии не проявился перед этим извержением по спутниковым данным. Начиная с 1 сентября и до 21 октября, по данным Аляскинской вулканологической обсерватории (АВО) (обработка снимков сотрудниками ЛИСВА), температура термальной аномалии превысила пороговое значение ( $T_{ан}-T_{фон}$ )= $20.0^\circ\text{C}$  только один раз – 21 сентября ( $T_{ан}-T_{фон}$ ) $\geq 22.7^\circ\text{C}$  [15].

Первое прогнозное заключение о возможности извержения было сформулировано и передано в Камчатский филиал Российского экспертного совета (КФ РЭС) 10 сентября сотрудниками лаборатории сейсмического мониторинга (ЛСМ) КФ ФИЦ ЕГС РАН на основе наблюдений за статистически обоснованным уровнем сейсмичности [16]. Согласно заключению от 10 сентября, вероятность извержения в ближайшую неделю составляла  $P=0.13$ . По мере поступления новых данных авторы продлевали прогноз, еженедельно уточнялась вероятность извержения на следующие семь дней. В заключении от 18 сентября эта вероятность составляла  $P=0.16$ , 25 сентября –  $P=0.27$ , 2 октября –  $P=0.33$ , 9 октября –  $P=0.36$ , 16 октября –  $P=0.64$ .

4 октября сотрудники ЛИСВА, используя алгоритм прогноза эксплозивных извержений вулкана Безымянный [15], передали в КФ РЭС заключение со следующей формулировкой: «Начало возможного извержения (71% вероятность) – с 4 октября по 4 ноября 2020 года. Масштаб извержения – эксплозивное извержение с высотой пепловых выбросов от 6 до 15 км н.у.м. с возможным сходом пирокластического потока (несколько километров). Длительность извержения – от нескольких часов до нескольких суток. Ожидается возможное выпадение пепла (несколько миллиметров) в близлежащих населенных пунктах (Ключи, Козыревск, Усть-Камчатск) в зависимости

от направления ветра». Это заключение в срочном порядке было рассмотрено на внеочередном заседании КФ РЭС, по результатам которого о готовящемся извержении вулкана Безымянный были оповещены ГУ МЧС России по Камчатскому краю и другие организации согласно списка рассылки. МЧС провело оповещение населения близ расположенных населенных пунктов о возможной опасности, в дальнейшем предупреждение было опубликовано в СМИ.

Отметим, что 20 октября в 04<sup>h</sup>00<sup>m</sup> (в 16<sup>h</sup>00<sup>m</sup> местного времени) после значительного увеличения количества землетрясений 4-го типа [15] сотрудники ЛИСВА уточнили возможное время начала извержения на период с 20 по 30 октября с вероятностью 90%.

По сейсмическим и видео данным, пароксизмальная фаза извержения началась 21 октября в 20<sup>h</sup>22<sup>m</sup> (22 октября в 08<sup>h</sup>22<sup>m</sup> местного времени) и продолжалась около часа. Эксплозивное извержение было зафиксировано только одной видеосистемой из четырех камер наблюдений из-за плохих метеоусловий. Пепловая колонна от взрыва поднялась выше верхней границы видеокадра на высоту более 8 км н.у.м. Оценка высоты пеплового выброса по интенсивности сейсмического сигнала программой ADAP составила  $10 \pm 2$  км н.у.м. [17]. По спутниковым данным, пепловое облако достигло высоты 10 км н.у.м. и распространилось в форме дуги от пос. Тигиль на северо-западе через пос. Усть-Камчатск на востоке и до мыса Шипунский на юге. Срочное сообщение об эксплозивном извержении было передано дежурным сотрудником ЛИСВА через 10 мин после его начала согласно регламенту.

По заключению КФ РЭС, извержение вулкана Безымянный 21 октября 2020 г. соответствовало прогнозу по методике статистической оценки уровня сейсмичности (В.А. Салтыков, ЛСМ, заключение от 10.09.2020 г., последнее уточнение 15.10.2020 г.) и прогнозу по алгоритму прогноза эксплозивных извержений вулкана Безымянный [15] (С.Л. Сенюков, ЛИСВА, заключение от 04.10.2020 г., уточнение – 20.10.2020 г.).

В 2020 г. для вулкана Безымянный повышенные коды опасности выставлялись 98 раз: один – «красный», один – «оранжевый», 96 – «желтый». Во время извержения Ключевского вулкана, сопровождавшегося мощным вулканическим дрожанием, корректный сейсмический мониторинг Безымянного был невозможен. В эти периоды для вулкана выставлялся «белый» код (133 раза). Землетрясение с максимальным классом  $K_s=6.1$  произошло 20 октября в 22<sup>h</sup>25<sup>m</sup> в постройке вулкана ( $h=-0.9$  км) [8, 9]. Всего в 2020 г. в радиусе 6 км от вулкана и диапазоне глубин от вершины до 3 км ниже уровня моря было лоцировано 481 землетрясение с  $1.6 \leq K_s \leq 6.1$  [8, 9] с суммарной энергией  $\Sigma E \sim 1.29 \cdot 10^7$  Дж.

**Вулкан Плоский Толбачик.** Ближайшая телеметрическая станция KMNR [2] расположена в 10 км от кратера вулкана. В 2020 г. в окружности радиусом 20 км, включающей вышеназванный вулкан, Толбачинский дол и потухшие вулканы Большая Удина и Малая Удина, было лоцировано 333 землетрясения с  $2.6 \leq K_s \leq 8.6$  в диапазоне глубин от кратера до 30.5 км ниже уровня моря,  $\Sigma E \sim 6.87 \cdot 10^8$  Дж [8, 9]. Землетрясение с максимальным классом  $K_s=8.6$  произошло 24 ноября в 16<sup>h</sup>19<sup>m</sup> на глубине 5.3 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 135 раз, когда корректный сейсмический мониторинг был невозможен из-за извержения Ключевского вулкана.

На вулканах *Крестовский* и *Ушковский* в 2020 г. наблюдалась фоновая сейсмичность. В радиусе 10.1 км от вулканов и диапазоне глубин  $-2.7 \leq h \leq 25.0$  км было локализовано 11 землетрясений с  $3.0 \leq K_s \leq 5.0$  ( $\Sigma E \sim 0.14 \cdot 10^6$  Дж) [8, 9]. Максимальный класс  $K_s=5.0$  зарегистрирован 2 марта в 06<sup>h</sup>26<sup>m</sup> на глубине  $h=10.4$  км под постройкой вулкана Крестовский.

*Вулканы Корякский* и *Авачинский* расположены в 25–30 км от городов Петропавловск-Камчатский и Елизово и поэтому представляют наибольшую потенциальную угрозу для населения. В 2020 г. в каталог Авачинской группы вулканов включены параметры 337 землетрясений (с  $1.6 \leq K_s \leq 6.0$ ,  $-2.8 \leq h \leq 25.6$  км), выделившаяся суммарная энергия которых составила  $\Sigma E \sim 1.9 \cdot 10^6$  Дж [8, 10].

В 2020 г. для вулкана Авачинский повышенный «желтый» код опасности выставлялся 32 раза, из них только один – по сейсмическим данным, в остальных случаях из-за свечения западной части кромки кратера, наблюдавшегося с января по март.

В 2020 г. в радиусе 8 км от Авачинского вулкана и диапазоне глубин от 0 до 6 км (рис. III.2) было локализовано 177 землетрясений  $1.6 \leq K_s \leq 6.0$  ( $\Sigma E \sim 1.35 \cdot 10^6$  Дж). Максимальный класс  $K_s=6.0$  зарегистрирован 23 августа в 00<sup>h</sup>27<sup>m</sup> в постройке вулкана ( $h=-1.2$  км) [8, 10].

В радиусе 9 км от Корякского вулкана в 2020 г. были определены кинематические и динамические характеристики для 148 землетрясений ( $1.6 \leq K_s \leq 4.9$ ,  $\Sigma E \sim 0.26 \cdot 10^6$  Дж). Землетрясение с  $K_s=4.9$  произошло 8 июля в 19<sup>h</sup>24<sup>m</sup> под постройкой вулкана ( $h=2.1$  км) [8, 10]. 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 Петропавловск-Камчатского. В районе Мутновско-Гореловской группы вулканов находятся Мутновская и Верхне-Мутновская геотермальные электростанции (МгеоЭС и ВМгеоЭС соответственно на рис. III.3). В 2020 г. в каталог Мутновско-Гореловской группы включены параметры 498 землетрясений  $1.6 \leq K_s \leq 6.8$  с суммарной энергией  $\Sigma E \sim 1.0 \cdot 10^7$  Дж. Ближайшая к вулкану Мутновский сейсмическая станция МТВР [2] расположена в 3 км от активного кратера. В радиусе 8 км от вершины вулкана Мутновский было локализовано 441 землетрясение ( $1.6 \leq K_s \leq 6.8$ ,  $-2.2 \leq h \leq 14.8$  км) [8, 11]. Землетрясение с максимальным классом ( $K_s=6.8$ ) произошло на глубине  $h=4.3$  км под постройкой Мутновского вулкана 11 мая в 11<sup>h</sup>36<sup>m</sup> [8, 11]. Представительный класс и угол наклона графика повторяемости землетрясений показаны в табл. III.1. В 2020 г. на вулкане Мутновский наблюдалась повышенная сейсмичность. В течение года станцией МТВР регистрировались спазматическое вулканическое дрожание и слабые локальные поверхностные сейсмические события от вулкана. «Желтый» код опасности выставлялся 240 раз.

Ближайшая к вулкану Горелый станция GRL [2] расположена в 4 км от кратера. В 2020 г. на вулкане Горелый наблюдалась фоновая сейсмичность. В радиусе 8 км от вершины вулкана Горелый было локализовано всего 20 землетрясений [8, 11]. Землетрясение с максимальным классом ( $K_s=5.3$ ) произошло 9 марта в 18<sup>h</sup>54<sup>m</sup> под постройкой вулкана ( $h=0.1$  км).

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

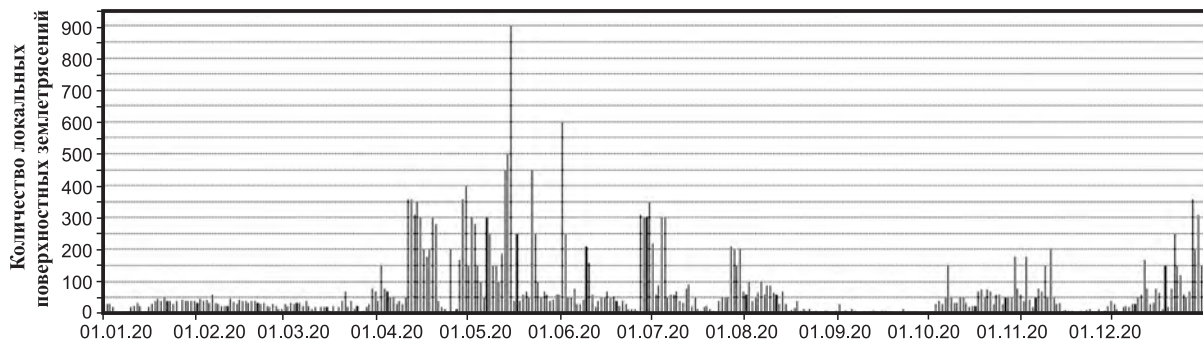
*Вулкан Жупановский* расположен в ~70 км к север–северо-востоку от Петропавловск-Камчатского. Вулкан относится к юго-восточному вулканическому поясу Камчатки. В 2020 г. сейсмический мониторинг проводился по удаленным станциям ближайшим из которых (SDLR, KRER, KRX) расположены в районе Авачинской группы вулканов в 38–40 км от Жупановского вулкана (рис. III.4). Всего в исследу-

период в районе Жупановского вулкана ( $\varphi=53.40-53.90^{\circ}\text{N}$ ,  $\lambda=158.70-159.65^{\circ}\text{E}$ ) было лоцировано 41 землетрясение ( $\Sigma E \sim 5.15 \cdot 10^7 \text{ Дж}$ ) с  $2.6 \leq K_s \leq 7.3$  в диапазоне глубин  $3.5 \leq h \leq 26.5 \text{ км}$  [8, 12], из них 20 – в радиусе 20 км от его вершины ( $3.0 \leq K_s \leq 7.3$ ,  $3.5 \leq h \leq 18.9 \text{ км}$ ,  $\Sigma E \sim 3.68 \cdot 10^7 \text{ Дж}$ ). Землетрясение с максимальным классом ( $K_s=7.3$ ) произошло 1 марта в 15<sup>h</sup>59<sup>m</sup> на глубине 7.2 км [8, 12].

В 2020 г. из-за повышенной сейсмической активности вулкану 14 раз присваивался «желтый» код опасности, в остальное время наблюдалась фоновая сейсмичность. Вулканическая активность проявлялась только в виде фумарольной деятельности.

**Вулкан Карымский** в 2020 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 ( $\varphi=53.9-54.4^{\circ}\text{N}$ ,  $\lambda=159.2-159.8^{\circ}\text{E}$ ) в диапазоне глубин от вершины до 40 км было лоцировано четыре землетрясения ( $5.4 \leq K_s \leq 6.6$ ,  $\Sigma E \sim 5.03 \cdot 10^6 \text{ Дж}$ ,  $6.8 \leq h \leq 15.0 \text{ км}$ ) [8, 13]. Все основные выводы о деятельности вулкана сделаны по данным одной станции – КИ.

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 5500 м над кратером (9 декабря). В 2020 г. для вулкана Карымский повышенные коды опасности выставлялись 168 раз: 97 – «оранжевый», 89 – «желтый».



**Рис. III.6. Сейсмичность вулкана Карымский в 2020 г. по данным сейсмостанции КИ.**

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 2020 г. в районе вулкана Кизимен ( $\varphi=54.90-55.54^{\circ}\text{N}$ ,  $\lambda=159.82-160.80^{\circ}\text{E}$ ) было лоцировано всего 55 землетрясений с суммарной энергией  $\Sigma E \sim 1.23 \cdot 10^8 \text{ Дж}$ , из них 29 событий произошло в радиусе 20 км от вершины вулкана ( $2.4 \leq K_s \leq 7.0$ ,  $1.5 \leq h \leq 15.1 \text{ км}$ ) [8, 14]. Суммарная энергия землетрясений составила  $\Sigma E \sim 0.12 \cdot 10^8 \text{ Дж}$ . Землетрясение с максимальным классом  $K_s=7.8$  ( $h=5.7 \text{ км}$ ) произошло вне зоны вулкана 23 июня в 11<sup>h</sup>02<sup>m</sup> [8, 14].

В 2020 г. на вулкане Кизимен наблюдалась вулканическая активность только в виде фумарольной деятельности, и сейсмичность не превышала фоновую.



## Литература

1. Чебров Д.В., Тихонов С.А., Дроздин Д.В., Дроздина С.Я., Матвеев Е.А., Митюшкина С.В., Салтыков В.А., Сениюков 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.
2. Чебров Д.В., Дроздина С.Я., Сениюков С.Л., Шевченко Ю.В., Митюшкина С.В. Результаты сейсмического мониторинга различных регионов России. Камчатка и Командорские острова // Землетрясения России в 2020 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022. – С. 73–84.
3. Дроздин Д.В., Дроздина С.Я. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Сейсмические приборы. – М.: ИФЗ РАН, 2010. – Т. 46, № 3. – С. 22–34.
4. Сениюков С.Л. Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений в 2000–2004 гг. // Вулканология и сейсмология. – 2006. – № 3. – С. 68–78.
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.
6. Weimer S. A software package to analyze seismicity: ZMAP // Seismological Research Letters. – 2001. – Vol. 72. – P. 373–382.
7. Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. – М.: Наука, 1972. – 117 с.
8. 2020-ER\_App19\_Volcano-regions-of-Kamchatka.xls [Электронный ресурс]: Список приложений для ежегодника «Землетрясения России в 2020 году» // Землетрясения России [сайт]. – [Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022]. Систем. требования: MS Excel, Open Office. – URL: [http://www.gsras.ru/zr/app\\_20.html](http://www.gsras.ru/zr/app_20.html), свободный.
9. Нуждина И.Н. (отв. сост.); Напылова Н.А., Должикова А.Н., Кожевникова Т.Ю., Назарова З.А., Соболевская О.В., Напылова О.А. Каталоги землетрясений по различным регионам России. Вулканические районы Камчатки. Северная группа вулканов // Землетрясения России в 2020 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022. – С. 164.
10. Нуждина И.Н. (отв. сост.); Кожевникова Т.Ю., Назарова З.А., Толокнова С.Л. Каталоги землетрясений по различным регионам России. Вулканические районы Камчатки. Авачинская группа вулканов // Землетрясения России в 2020 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022. – С. 165.
11. Нуждина И.Н. (отв. сост.); Кожевникова Т.Ю., Назарова З.А., Толокнова С.Л. Каталоги землетрясений по различным регионам России. Вулканические районы Камчатки. Мутновско-Гореловская группа вулканов // Землетрясения России в 2020 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022. – С. 165.
12. Нуждина И.Н. (отв. сост.); Кожевникова Т.Ю., Назарова З.А., Толокнова С.Л. Каталоги землетрясений по различным регионам России. Вулканические районы Камчатки. Вулкан Жупановский // Землетрясения России в 2020 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022. – С. 166.
13. Нуждина И.Н. (отв. сост.); Назарова З.А., Кожевникова Т.Ю., Толокнова С.Л., Соболевская О.В. Каталоги землетрясений по различным регионам России. Вулканические районы Камчатки. Вулкан Кизимен // Землетрясения России в 2020 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022. – С. 167.
14. Нуждина И.Н. (отв. сост.); Назарова З.А., Должикова А.Н. Каталоги землетрясений по различным регионам России. Вулканические районы Камчатки. Вулкан Карымский // Землетрясения России в 2020 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022. – С. 168.
15. Сениюков С.Л. Прогноз извержений вулканов Ключевской и Безымянный на Камчатке. – Saarbrücken: LAP LAMBERTS Academic Publishing, 2013. – 144 с.
16. Салтыков В.А. Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. – 2011. – № 2. – С. 53–59.
17. Близнецов В.Е., Сениюков 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.