

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 2019 г. радиотелеметрическая сеть сейсмических станций Камчатского филиала (КФ) ФИЦ ЕГС РАН [1, 2] сохранилась без изменений по сравнению с 2018 г. [3]. 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.

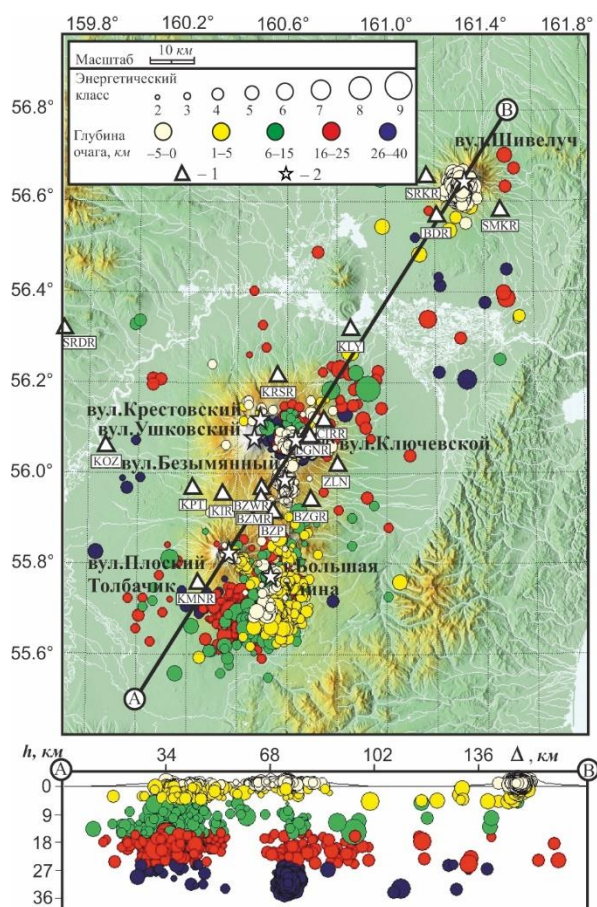


Рис. III.1. Карта эпицентров землетрясений в районе Северной группы вулканов в 2019 г., и проекция очагов на вертикальный разрез А-В: 1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан

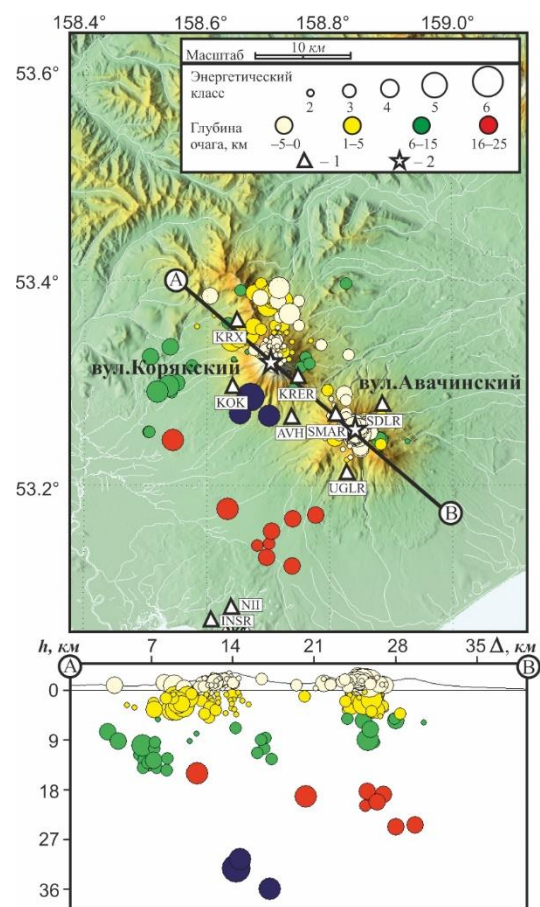


Рис. III.2. Карта эпицентров землетрясений в районе Авачинской группы вулканов в 2019 г., и проекция очагов на вертикальный разрез А-В: 1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан

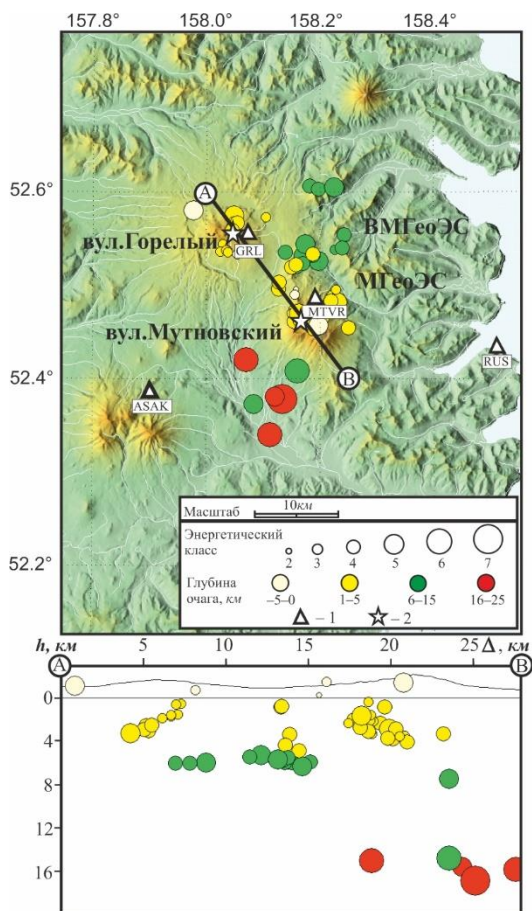


Рис. III.3. Карта эпицентров землетрясений в районе Мутновско-Гореловской группы вулканов в 2019 г., и проекция очагов на вертикальный разрез А-В:
1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан

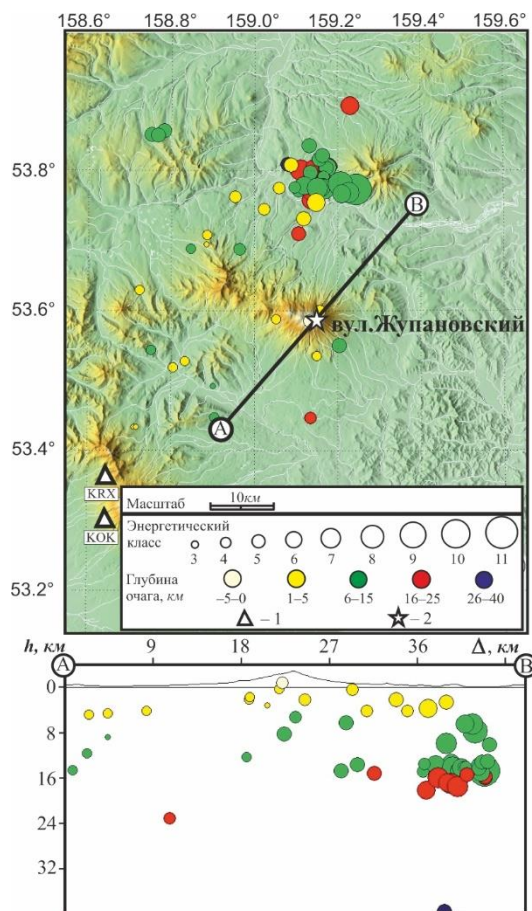


Рис. III.4. Карта эпицентров землетрясений в районе вулкана Жупановский в 2019 г., и проекция очагов на вертикальный разрез А-В:
1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан

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 γ в 2019 г. ZMAP
	φ , °N	λ , °E				
Авачинская группа вулканов						
Авачинский	53.25	158.83	2741	350	3.0	2.7/0.53±0.07
Корякский	53.32	158.72	3456		3.0	1.8/0.38±0.06
Мутновско-Гореловская группа вулканов						
Горелый	52.55	158.03	1829		4.5	мало данных
Мутновский	52.45	158.20	2323		4.5	мало данных
Северная группа вулканов						
Шивелуч	56.63	161.32	2600		3.5	5.3/1.25±0.08
Ключевской	56.07	160.63	4750	700	3.0	для поверхностных – 4.0/0.89±0.06; для глубоких – 4.0/0.75±0.09
Безымянный	55.97	160.58	2869		3.0	3.4/0.91±0.03
Крестовский	56.12	160.50	4108		4.0	мало данных
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 2019 г. ZMAP
	φ , °N	λ , °E				
Плоский Толбачик	55.82	160.37	3085	400	4.0	3.9/0.49±0.02
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

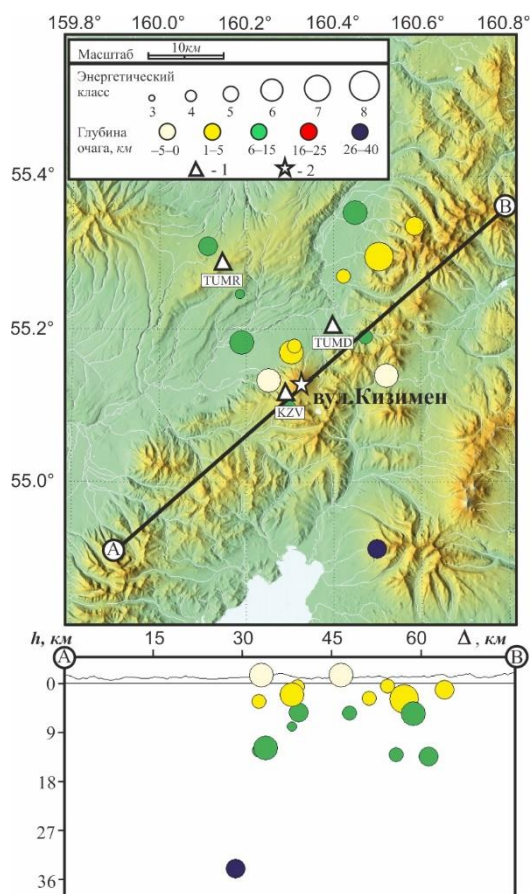


Рис. III.5. Карта эпицентров землетрясений в районе вулкана Кизимен в 2019 г., и проекция очагов на вертикальный разрез А–В:
1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан

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.

Для каждого вулкана ежедневно выставлялся цветовой код опасности по сейсмическим, видео и спутниковым наблюдениям и помещался в Интернет по адресу: <http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>. «Красный» код присваивался при очень

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 2019 г. (координаты эпицентра, глубина, энергия) проводился сотрудниками лаборатории исследований сейсмической и вулканической активности (ЛИСВА) по программе «DIMAS» [4]. Для локализации сейсмических событий Северной и Авачинской групп вулканов использовались локальные годографы [5], для вулканов Мутновский, Горелый, Жупановский, Кизимен, Карымский и Камбальный – 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/>) в режиме, близком к реальному времени, и доступен по адресу: <http://www.emsd.ru/sdis/main.php> в Интернете.

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

высокой сейсмической активности и регистрации пепловых выбросов высотой 8 км над уровнем моря (н.у.м.) и выше, «оранжевый» – 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 2019 г. в каталог Северной группы вулканов включено (рис. III.1, [8]) 20753 землетрясения, в очагах которых было высвобождено энергии $\Sigma E \sim 2.48 \cdot 10^{10}$ Дж, в каталог Авачинской группы (рис. III.2, [8]) – 433 ($\Sigma E \sim 0.73 \cdot 10^7$ Дж), Мутновско-Гореловской группы (рис. III.3, [8]) – 67 ($\Sigma E \sim 2.35 \cdot 10^7$ Дж). Каталоги землетрясений для районов вулканов Жупановский (рис. III.4, [8]) и Кизимен (рис. III.5, [8]) содержат 57 ($\Sigma E \sim 8.2 \cdot 10^{10}$ Дж) и 18 ($\Sigma E \sim 1.08 \cdot 10^8$ Дж) событий соответственно.

В печатные варианты каталогов землетрясений вулканических районов Камчатки помещены параметры: Северная группа вулканов – 22 землетрясения с $M \geq 1.8$ ($K_S \geq 7.3$) [9]; Авачинская группа вулканов – 16 землетрясений с $M \geq 0.3$ ($K_S \geq 5.0$) [10]; Мутновско-Гореловская группа вулканов – 15 землетрясений с $M \geq 0$ ($K_S \geq 4.6$) [11]; вулкан Жупановский – 17 землетрясений с $M \geq 1.3$ ($K_S \geq 6.6$) [12]; вулкан Кизимен – 16 землетрясений с $M \geq 0$ ($K_S \geq 4.6$) [13].

В исследуемый период высокая сейсмическая и вулканическая активность наблюдалась на вулканах Шивелуч, Безымянный, Ключевской, Плоский Толбачик, Авачинский 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 [1, 2]. В 2019 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, мощными газо-пепловыми выбросами с максимальной высотой 10 км над уровнем моря, 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 2019 г. выставлялся 18 раз, «оранжевый» – 198, «желтый» – 145 раз.

В исследуемый период в радиусе 12 км от вулкана было лоцировано 13425 землетрясений с классом $2.0 \leq K_S \leq 8.1$ в диапазоне глубин $-2.5 \leq h^1 \leq 16.3$ км [8, 9], высвобождено сейсмической энергии $\Sigma E \sim 3.88 \cdot 10^9$ Дж. Представительный класс и угол наклона графика повторяемости землетрясений показаны в табл. III.1. Землетрясение с максимальным классом ($K_S = 8.1$) произошло 9 февраля в 08^h52^m в постройке вулкана ($h = -0.3$ км) [8, 9]. Большие значения наклона графика повторяемости $\gamma = 1.25 \pm 0.08$ (табл. III.1) землетрясений связаны с магматическими процессами.

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 [1, 2]. В 2019 г. для вулкана Ключевской выставлялся повышенный код опасности: 21 раз – «оранжевый», 47 – «желтый». В исследуемый период

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

на Ключевском вулкане наблюдалась высокая сейсмическая активность. В радиусе 7 км от вулкана и диапазоне глубин от кратера до 40 км ниже уровня моря было лоцировано 5835 землетрясений с $\Sigma E \sim 0.4 \cdot 10^9$ Дж (рис. III.1, [8, 9]). 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 2019 г. была сосредоточена в нижнем слое (5472 события). В верхнем слое лоцировано 357 землетрясений, а в промежуточном – всего 12. Землетрясения с максимальным классом ($K_S=6.3$) произошли под постройкой вулкана на глубине $29.7 \leq h \leq 31.2$ в октябре: 05.10. в $20^{\text{h}}28^{\text{m}}$, 23.10. в $23^{\text{h}}17^{\text{m}}$ и 26.10. в $01^{\text{h}}29^{\text{m}}$ [8, 9].

На вулкане *Безымянный* в 2019 г. зафиксировано два пароксизмальных эксплозивных извержения 20 января и 15 марта с высотой пепловых выбросов до 15 км над уровнем моря.

По данным сейсмического мониторинга ЛИСВА, 15 января 2019 г. начал регистрироваться рой поверхностных землетрясений под вулканом Безымянный. С 15 по 19 января наблюдался постепенный рост суммарного количества и суммарной энергии лоцированных землетрясений [8, 9], а также рост температуры термальной аномалии в районе купола до $T_{\text{аном}} - T_{\text{фон}} = 32^\circ\text{C}$ (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>).

19 января в $22^{\text{h}}40^{\text{m}}$ сотрудники ЛИСВА, используя алгоритм прогноза эксплозивных извержений вулкана Безымянный [14], передали в КФ РЭС заключение со следующей формулировкой: «Начало возможного извержения (71% вероятность) – с 19 января по 19 февраля 2019 г. Масштаб извержения – эксплозивное извержение с высотой пепловых выбросов от 6 до 15 км над уровнем моря 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».

По сейсмическим данным, пароксизмальная фаза извержения началась 20 января в $16^{\text{h}}06^{\text{m}}$ и продолжалась 17 минут. Оценка высоты пеплового выброса по интенсивности сейсмического сигнала составила 9.5 ± 2 км н.у.м. [15]. По видео данным высота пеплового столба достигла 15 км н.у.м. По спутниковым данным пепловый шлейф распространился в северо-западном направлении на расстояние более 400 км. КФ РЭС дал следующую оценку этому событию: «По сейсмическим данным и видео наблюдениям КФ ФИЦ ЕГС РАН пароксизмальное извержение вулкана Безымянный с высотой пеплового выброса 15 км над уровнем моря зафиксировано 20 января 2019 г. в $16^{\text{h}}06^{\text{m}}$. Извержение вулкана соответствует прогнозу ЛИСВАКФ ФИЦ ЕГС РАН (Сенюков С.Л. и др., от 20.01.2019 г.)».

Следующая сейсмическая активизация в районе вулкана Безымянный началась 9 марта 2019 года. С 9 по 14 марта наблюдался постепенный рост суммарного количества и суммарной энергии лоцированных землетрясений, а также рост температуры термальной аномалии до $T_{\text{аном}} - T_{\text{фон}} = 30^\circ\text{C}$ (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>).

14 марта в $05^{\text{h}}00^{\text{m}}$ сотрудники ЛИСВА, используя алгоритм прогноза эксплозивных извержений вулкана Безымянный [14], передали в КФ РЭС заключение со следующей формулировкой: «Начало возможного извержения (71% вероятность) – с 14 марта по 14 апреля 2019 года. Масштаб извержения – эксплозивное извержение с высотой пепловых выбросов от 6 до 15 км над уровнем моря 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».

Сотрудники лаборатории сейсмического мониторинга (ЛСМ) КФ ФИЦ ЕГС РАН по методике «СОУС'09» [16] передали в КФ РЭС заключение с формулировкой:

«Наблюдаемый уровень сейсмичности вулкана Безымянный характерен для процесса подготовки к извержению. Вероятность извержения в 50 раз выше, чем вероятность извержения в отсутствие предвестника».

14 марта в 22^h00^m сотрудники ЛИСВА в своем еженедельном заключении об активности вулканов Камчатки передали в МЧС Камчатского края и КФ РЭС следующую информацию: «Вулкан Безымянный. С 15 до 22 марта ожидается вершинное эксплозивное извержение. Для авиации – возможны пепловые выбросы до 15 км н.у.м. Для населения – не рекомендуется посещение вулкана в радиусе 20 км от вершины. Возможен сход пирокластических потоков протяженностью до 5 км в восточном секторе».

15 марта в 01^h35^m КФ РЭС полностью поддержал прогноз ЛИСВА и передал его в МЧС и в правительственные органы Камчатского края. МЧС провело оповещение населения близ расположенных населенных пунктов о возможной опасности.

Как и в предшествующем случае, по сейсмическим данным пароксизмальная фаза извержения началась ночью 15 марта в 17^h11^m и продолжалась 50 мин (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>). Оценка высоты пеплового выброса по интенсивности сейсмического сигнала составила 16 км н.у.м. [15]. По видео данным высота пеплового столба достигла 15 км н.у.м. По спутниковым данным пепловый шлейф распространился в восточном направлении на расстояние более 500 км.

КФ РЭС дал следующую оценку по прогнозам извержений вулкана Безымянный: оба эксплозивных извержения были успешно спрогнозированы сотрудниками ЛИСВА с использованием алгоритма прогноза [14] без пропусков и ложных тревог. По методу «СОУС'09» [16] дано предупреждение для извержения 15 марта.

В 2019 г. для вулкана Безымянный повышенный код опасности выставлялся 165 раз: 2 – «красный», 8 – «оранжевый»; 155 – «желтый». Землетрясение с максимальным классом $K_S=5.6$ произошло 20 января в 04^h09^m в постройке вулкана ($h=-1.1$ км) [8, 9]. Всего в 2019 г. в радиусе 6 км от вулкана и диапазоне глубин от вершины нового купола до 3 км ниже уровня моря было лоцировано 207 землетрясений с $1.6 \leq K_S \leq 5.6$ [8, 9], выделившаяся суммарная энергия которых составила $\Sigma E \sim 1.87 \cdot 10^6$ Дж. Представительный класс получился равным $K_{пред}=3.4$ при угле наклона графика повторяемости $\gamma=0.91 \pm 0.03$.

Вулкан Плоский Толбачик. Ближайшая телеметрическая станция KMNR [1, 2] расположена в 10 км от кратера вулкана. В 2019 г. в окружности радиусом 20 км, включающей вышеназванный вулкан, Толбачинский дол и потухшие вулканы Большая Удина и Малая Удина, было лоцировано 988 землетрясений с $2.5 \leq K_S \leq 10.1$ в диапазоне глубин от кратера до 30 км ниже уровня моря [8, 9]. Землетрясение с максимальным классом $K_S=10.1$ произошло 6 февраля в 19^h57^m на глубине 18.7 км в районе реки Толуд. Выделенная сейсмическая энергия в локализованных очагах землетрясений составила $\Sigma E \sim 1.41 \cdot 10^{10}$ Дж, $K_{пред}=3.9$, угол наклона совпадает со значением региональных тектонических землетрясений $\gamma=0.49 \pm 0.03$ (табл. III.1).

В течение года на вулкане Плоский Толбачик в основном наблюдалась фоновая сейсмическая и вулканическая активность. «Желтый» код опасности выставлялся 59 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]).

На вулканах **Крестовский и Ушковский** в 2019 г. наблюдалась фоновая сейсмичность. Всего в радиусе 10.1 км от вулканов и диапазоне глубин $-1.6 \leq h \leq 31.1$ км было лоцировано 29 землетрясений с $2.3 \leq K_S \leq 6.0$ ($\Sigma E \sim 1.06 \cdot 10^6$ Дж) [8, 9]. Максимальный класс $K_S=6.0$ зарегистрирован 5 июня в 03^h44^m на глубине $h=9.2$ 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. Отличительной особенностью 2019 г. стало свечение на западной части кромки кратера вулкана Авачинский, которое впервые было замечено на камере видео наблюдений 2 декабря 2019 года. Это свечение вызвало обоснованную тревогу среди ученых и населения г. Петропавловска-Камчатского. Внимательное изучение архива снимков позволило обнаружить, что первое слабое свечение в 2019 г. в западной части кратера появилось еще 27 октября. Изучение сейсмичности показало, что количество и энергия лоцированных событий начали увеличиваться в ноябре (рис. III.6), хотя их класс не превышал $K_S \leq 6.0$. Согласно принятой в ЛИСВА шкале, такой уровень сейсмичности соответствует «нормальному» фоновому.

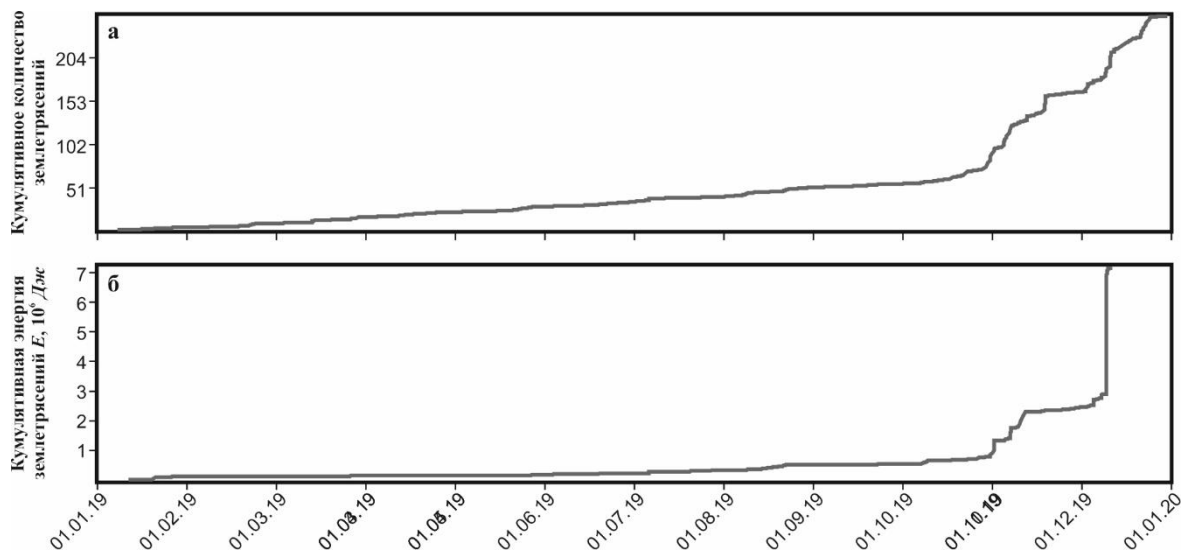


Рис. III.6. Графики кумулятивного количества землетрясений (а) и их энергии (б), лоцированных в 2019 г. в радиусе 8 км от вершины Авачинского вулкана

На основании отмеченного роста сейсмичности и увеличения интенсивности свечения КФ РЭС составил заключение № 751 от 3 декабря 2019 г. о повышенной вероятности эксплозивного извержения вулкана Авачинский в течение ближайшего месяца. Рост сейсмичности и интенсивности свечения достиг максимума 8–10 декабря в 2019 г. (рис. III.7), после этого наблюдалось постепенное снижение активности вулкана. Повышенный код активности вулкана «желтый» выставлялся 26 раз, из них только два раза – по сейсмическим данным (9 и 10 декабря), в остальных случаях он определялся наличием свечения по видео наблюдениям. 17 января 2020 г. КФ РЭС снял тревогу о возможности извержения. Следует отметить, что сезонное (ноябрь–декабрь) увеличение сейсмичности Авачинского вулкана было отмечено еще раньше в работах В.И. Горельчик по наблюдениям за 1964–1970 гг. [17]. Также важно добавить, что новая камера с высоким разрешением и режимом регистрации «день-ночь» была установлена 5 апреля 2017 года. Ретроспективный просмотр архива всех снимков с этой камеры позволил обнаружить очень слабое свечение на западной части кромки кратера Авачинского вулкана в ноябре–декабре 2017 года. Возможно, это связано с резким температурным контрастом в это время года. Свечение приурочено к западной части трещины, пересекающей лавовую пробку и верхнюю кромку кратера с запада на восток.

В 2019 г. в радиусе 8 км от Авачинского вулкана и диапазоне глубин от кратера до 25 км (рис. III.2) было лоцировано 286 землетрясений $1.6 \leq K_S \leq 6.3$ ($\Sigma E \sim 5.28 \cdot 10^6$ Дж), для которых $K_{\text{пред}} = 2.7$, $\gamma = 0.53 \pm 0.07$ (табл. III.1). Максимальный класс $K_S = 6.3$ зарегистрирован 9 декабря в 14^h54^m в постройке вулкана ($h = -1.2$ км) [8, 10].



Рис. III.7. Свечение на западной части кромки кратера Авачинского вулкана 8 декабря 2019 г.

В радиусе 9 км от Корякского вулкана в 2019 г. были определены кинематические и динамические характеристики для 126 землетрясений ($1.6 \leq K_S \leq 5.6$, $-3.1 \leq h \leq 36.0$ км, $\Sigma E \sim 1.51 \cdot 10^6$ Дж, $K_{\text{пред}}=1.8$, $\gamma=0.38 \pm 0.06$). Землетрясение с $K_S=5.6$ произошло 17 ноября в 21^h41^m под постройкой вулкана ($h=32.2$ км) [8, 10].

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 2019 г. в каталог Мутновско-Гореловской группы включено всего 67 землетрясений $1.7 \leq K_S \leq 7.3$, выделившаяся суммарная энергия которых составила $\Sigma E \sim 2.35 \cdot 10^7$ Дж. Землетрясение с $K_S=7.3$ произошло 31 декабря в 15^h29^m на глубине $h=16.9$ км вне зон вулканов [8, 11]. Ближайшая к вулкану Мутновский сейсмическая станция МТВР [1, 2] расположена в 3 км от активного кратера. С 8 января по 19 апреля данные со станции были недоступны. В радиусе 8 км от вершины вулкана Мутновский было лоцировано 31 землетрясение ($1.7 \leq K_S \leq 5.9$, $-1.4 \leq h \leq 14.8$ км) [8, 11]. Землетрясение с максимальным классом ($K_S=5.9$) произошло на глубине $h=14.8$ км под постройкой Мутновского вулкана 17 июня в 12^h45^m [8, 11].

Ближайшая к вулкану Горелый станция GRL [1, 2] расположена в 4 км от кратера. В течение года станцией регистрировалось спазматическое вулканическое дрожание и слабые локальные поверхностные сейсмические события от вулкана. В период с 25 августа по 17 ноября количество локальных событий резко увеличилось, максимальное ($N=1171$) было зарегистрировано 29 августа. В радиусе 7 км от вершины вулкана Горелый в 2019 г. было локализовано всего 14 землетрясений [8, 11]. Землетрясение с максимальным классом ($K_S=5.0$) произошло 7 апреля в 00^h17^m в постройке вулкана Горелый ($h=-1.1$ км).

В 2019 г. из-за повышенной сейсмичности «желтый» код выставлялся на вулкане Горелый 133 раза, на вулкане Мутновский – 15 раз. 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 2019 г. сейсмический мониторинг проводился по удаленным станциям [1, 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 30 землетрясений ($\Sigma E \sim 8.2 \cdot 10^{10}$ Дж) с $K_S \leq 10.9$ в диапазоне глубин $2.7 \leq h \leq 39.5$ км [8, 12]. Практически вся сейсмичность была сосредоточена вне зоны вулкана и только четыре землетрясения – в радиусе 20 км от его вершины ($5.8 \leq K_S \leq 7.4$, $3.7 \leq h \leq 18.2$ км, $\Sigma E \sim 3.77 \cdot 10^7$ Дж). Землетрясение с максимальным классом ($K_S=10.9$) произошло 1 апреля в 07^h10^m на глубине 14.7 км в районе горы Жупановские Востряки [8, 12].

В 2019 г. из-за повышенной сейсмической активности вулкану 7 раз присваивался «желтый» код опасности, в остальное время наблюдалась фоновая сейсмичность. Вулканическая активность проявлялась только в виде фумарольной деятельности.

Вулкан Карымский в 2019 г. продолжал извергаться. Ближайшая станция КП расположена на юго-восточном склоне в 1.5 км от кратера [1, 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 радиусе 10 км от вулкана землетрясений не было зарегистрировано. Поэтому все основные выводы о деятельности вулкана сделаны по данным одной станции – КП.

На рис. III.8 показано количество зарегистрированных поверхностных землетрясений ($2 < K_S < 6$), большинство из которых – взрывы в кратере. Гистограмма наглядно показывает периоды усиления и спада активности вулкана. Во время активизации регистрировались события, сопровождавшие газо-пепловые выбросы высотой до 5400 м над кратером (4 августа). В 2019 г. для вулкана Карымский повышенный код опасности выставлялся 228 раз: 94 – «оранжевый», 134 – «желтый».

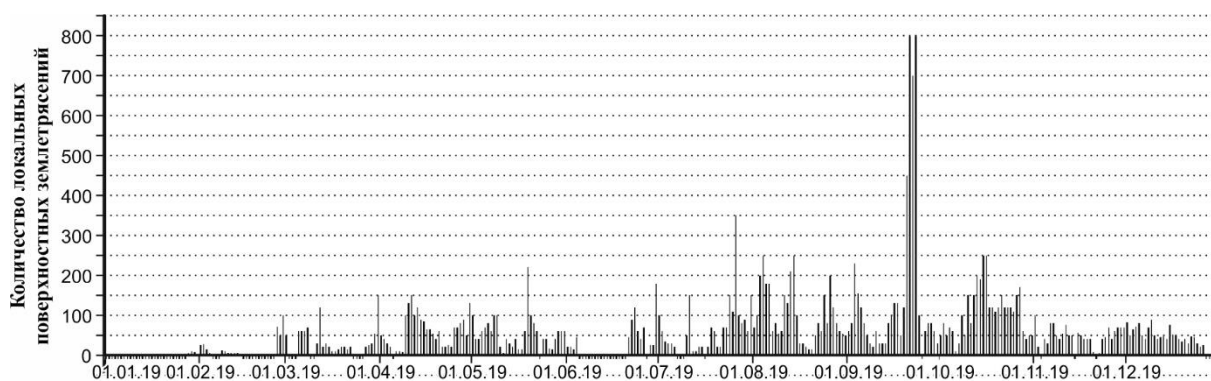


Рис. III.8. Сейсмичность вулкана Карымский в 2019 г. по данным сейсмостанции КП.

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) [1, 2]. С октября 2017 г. станция не работает, поэтому локализовать слабую сейсмичность ($K_S \leq 4.0$) не было возможности. В 2019 г. в районе вулкана Кизимен ($\varphi=54.90-55.54^{\circ}\text{N}$, $\lambda=159.82-160.80^{\circ}\text{E}$) было лоцировано всего 18 землетрясений с суммарной энергией $\Sigma E \sim 1.08 \cdot 10^8$ Дж, из них восемь событий произошли в радиусе 20 км от вершины вулкана ($4.5 \leq K_S \leq 7.2$, $-1.5 \leq h \leq 12.4$ км) [8, 13]. Суммарная энергия землетрясений составила $\Sigma E \sim 0.4 \cdot 10^8$ Дж. Землетрясение с максимальным классом $K_S=7.7$ ($h=2.9$ км) произошло вне зоны вулкана 9 января в 08^h56^m.

В 2019 г. на вулкане Кизимен наблюдалась вулканическая активность только в виде фумарольной деятельности, и сейсмичность не превышала фоновую.

Литература

1. Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Кугаенко Ю.А., Левина В.И., Сеньюков С.Л., Сергеев В.А., Шевченко Ю.В., Яцук В.В. Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 году // Вулканология и сейсмология. – 2013. – № 1. – С. 18–40.
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 2019 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. – С. 73–82.
3. 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 2018 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – С. 71–81.
4. Дрознин Д.В., Дрознина С.Я. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Сейсмические приборы. – М.: ИФЗ РАН, 2010. – Т. 46, № 3. – С. 22–34.
5. Сеньюков С.Л. Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений в 2000–2004 гг. // Вулканология и сейсмология. – 2006. – № 3. – С. 68–78.
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. Part_IV-2019. 12_Volcano-regions-of-Kamchatka_2019.xls // Землетрясения России в 2019 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. – Приложение на CD-ROM.
9. Нуждина И.Н. (отв. сост.); Навылова Н.А., Навылова О.А., Кожевникова Т.Ю., Должикова А.Н., Соболевская О.В., Толокнова С.Л. Каталоги землетрясений по различным регионам России. Вулканические районы Камчатки. Северная группа вулканов // Землетрясения России в 2019 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. – С. 173.
10. Нуждина И.Н. (отв. сост.); Толокнова С.Л., Назарова З.А., Кожевникова Т.Ю., Соболевская О.В. Каталоги землетрясений по различным регионам России. Вулканические районы Камчатки. Авачинская группа вулканов // Землетрясения России в 2019 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. – С. 174.
11. Нуждина И.Н. (отв. сост.); Толокнова С.Л., Кожевникова Т.Ю., Назарова З.А., Соболевская О.В. Каталоги землетрясений по различным регионам России. Вулканические районы Камчатки. Мутновско-Гореловская группа вулканов // Землетрясения России в 2019 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. – С. 174.
12. Нуждина И.Н. (отв. сост.); Назарова З.А., Кожевникова Т.Ю., Толокнова С.Л., Должикова А.Н. Каталоги землетрясений по различным регионам России. Вулканические районы Камчатки. Вулкан Жупановский // Землетрясения России в 2019 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. – С. 175.
13. Нуждина И.Н. (отв. сост.); Кожевникова Т.Ю., Назарова З.А., Соболевская О.В., Толокнова С.Л., Должикова А.Н. Каталоги землетрясений по различным регионам России. Вулканические районы Камчатки. Вулкан Кизимен // Землетрясения России в 2019 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. – С. 176.
14. Сеньюков С.Л. Прогноз извержений вулканов Ключевской и Безымянный на Камчатке. – Saarbrücken: LAP LAMBERTS Academic Publishing, 2013. – 144 с.
15. Senyukov S.L., Droznina S.Ya., Kozhevnikova T.Yu. Experience of the detection of ash plume and estimation its height using local seismicity for Kamchatkan 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.
16. Салтыков В.А. Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. – 2011. – № 2. – С. 53–59.
17. Горельчик В.И. О регистрации слабых вулканических землетрясений в районе Авачинского вулкана // Бюллетень вулканологических станций. – 1978. – № 54. – С. 9–11.