

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 2017 г. радиотелеметрическая сеть сейсмических станций Камчатского филиала (КФ) ФИЦ ЕГС РАН [1, 2] сохранилась без изменений по сравнению с 2016 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), Кизимен (рис. III.5) и Камбальный (рис. III.6). В табл. III.1 приведены сведения о вулканах, для которых проводился сейсмический мониторинг.

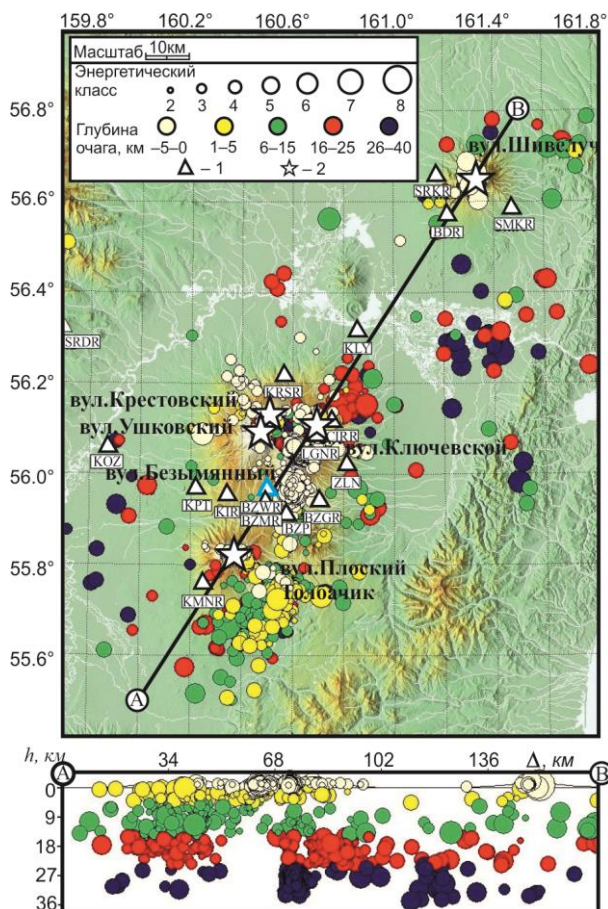


Рис. III.1. Карта эпицентров землетрясений в районе Северной группы вулканов в 2017 г. и проекция очагов на вертикальный разрез А–В: 1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан

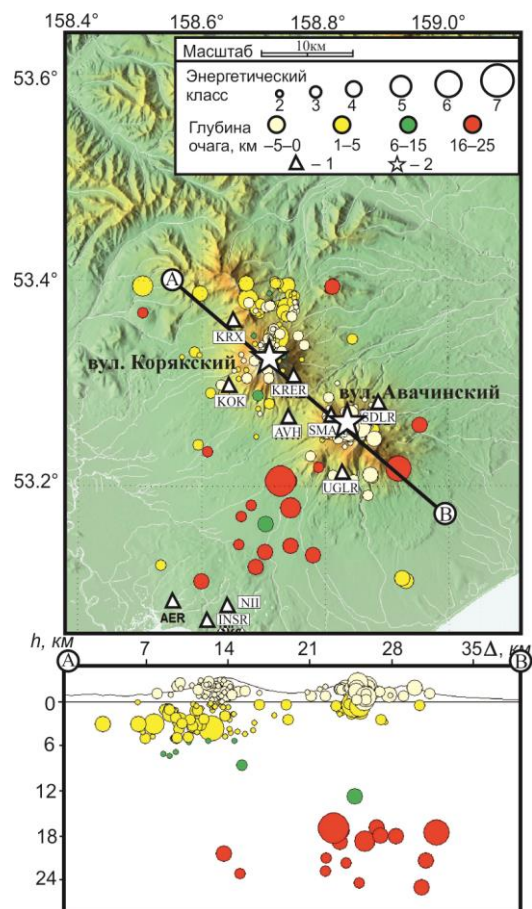


Рис. III.2. Карта эпицентров землетрясений в районе Авачинской группы вулканов в 2017 г. и проекция очагов на вертикальный разрез А–В: 1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан

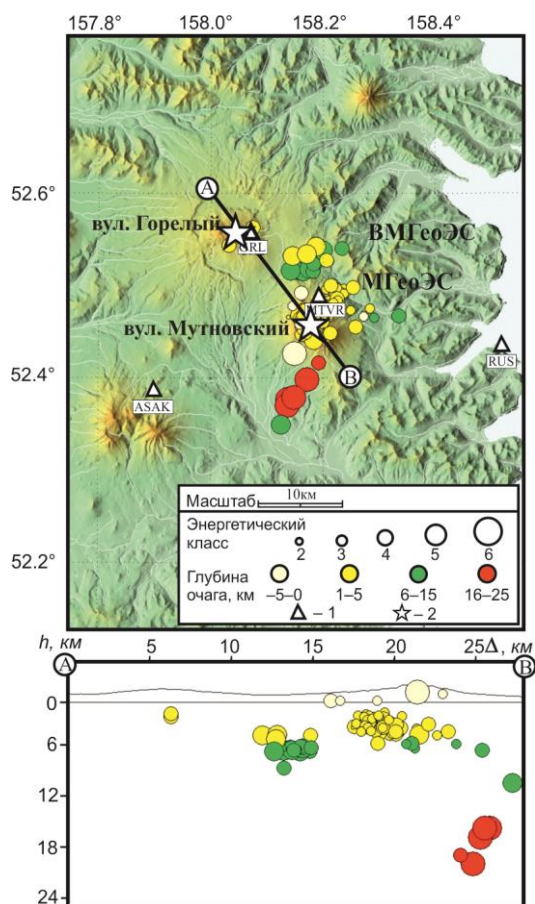


Рис. III.3. Карта эпицентров землетрясений в районе Мутновско-Гореловской группы вулканов в 2017 г. и проекция очагов на вертикальный разрез А-В:

1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан

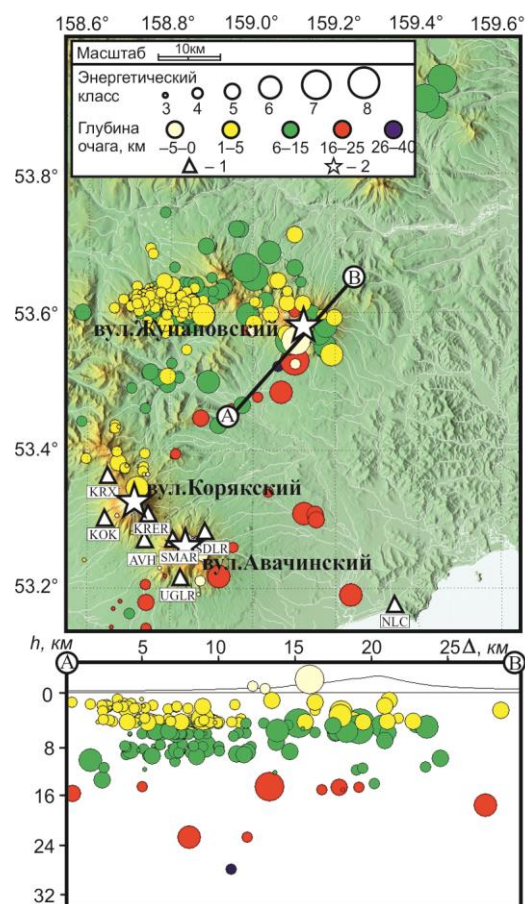


Рис. III.4. Карта эпицентров землетрясений в районе вулкана Жупановский в 2017 г. и проекция очагов на вертикальный разрез А-В:

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 2017 г.	
	φ , °N	λ , °E				ZMAP	Методика [4]
Авачинская группа вулканов							
Авачинский	53.25	158.83	2741	350	3.0	2.4/0.51±0.03	2.6/0.49±0.05
Корякский	53.32	158.72	3456		3.0	1.8/0.66±0.03	1.8/0.64±0.06
Мутновско-Гореловская группа вулканов							
Горелый	52.55	158.03	1829		4.5	мало данных	мало данных
Мутновский	52.45	158.20	2323		4.5	3.3/0.55±0.11	3.0/0.69±0.1
Северная группа вулканов							
Шивелуч	56.63	161.32	2600		3.5	мало данных	3.6/0.38±0.07
Ключевской	56.07	160.63	4750	700	3.0	для поверх-х 4.2/1.88±0.04, для глубоких 3.9/1.27±0.03	для поверх-х 4.6/2.17±0.16, для глубоких 4.5/1.47±0.11
Безымянный	55.97	160.58	2869		3.0	3.2/0.59±0.02	3.6/0.60±0.03
Крестовский	56.12	160.50	4108		4.0	3.5/0.78±0.05	3.4/0.93±0.15
Ушковский	56.07	160.47	3943				
Плоский Толбачик	55.82	160.37	3085	400	4.0	3.6/0.51±0.03	3.5/0.5±0.03

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 2017 г.	
	φ , °N	λ , °E				ZMAP	Методика [4]
Остальные вулканы							
Кизимен	55.13	160.33	2375		4.5	мало данных	2.6/0.25±0.04
Жупановский	53.58	159.16	2923		4.9	5.1/0.52±0.08	5.0/0.54±0.1
Карымский	54.05	159.43	1536	250	6.5	мало данных	мало данных
Камбальный	51.30	156.87	2156	800	6.5	6.2/0.49±0.04	6.1/0.49±0.08

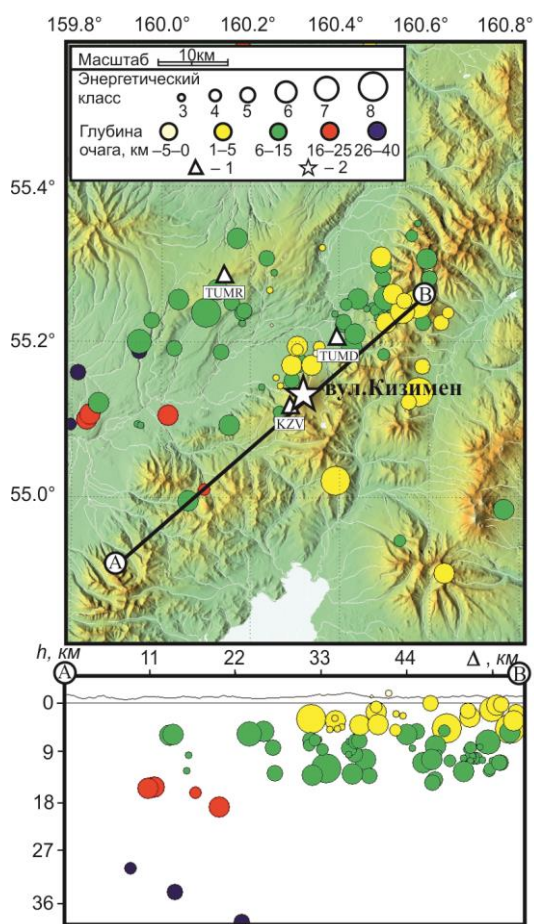


Рис. III.5. Карта эпицентров землетрясений в районе вулкана Кизимен в 2017 г. и проекция очагов на вертикальный разрез А–В:
1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан

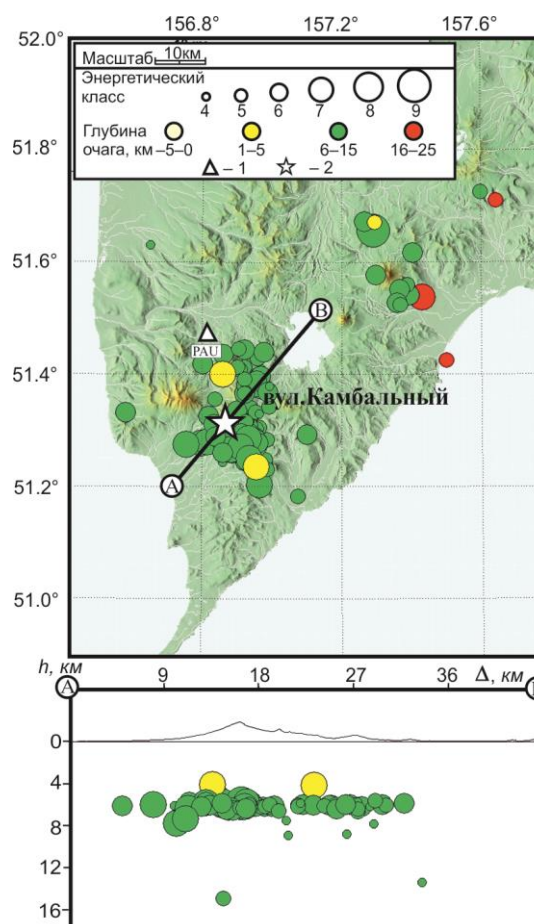


Рис. III.6. Карта эпицентров землетрясений в районе вулкана Камбальный в 2017 г. и проекция очагов на вертикальный разрез А–В:
1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан

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 2017 г. (координаты эпицентра, глубина, энергия) проводился сотрудниками лаборатории исследований сейсмической и вулканической активности (ИСВА) по программе «DIMAS» [5]. Для локации сейсмических событий Северной и Авачинской групп вулканов использовались локальные годографы [6], 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 в Интернете (<http://www.emsd.ru/sdis/main.php>).

Представительный класс и угол наклона графика повторяемости землетрясений определялись двумя методами (табл. III.1). Первый метод основан на оценке представительного класса по максимальному количеству землетрясений в выборке (программа ZMAP) [7] и может применяться в случаях, когда количество событий $N \geq 50$. Второй метод [4] основан на проверке гипотезы о соответствии рассматриваемой выборки закону повторяемости (экспоненциальному распределению) с заданным уровнем значимости (в данной работе принято $\alpha=0.30$).

Сейсмический мониторинг вулкана Камбальный проводился по ближайшей сейсмической станции «Паужетка» (PAU), расположенной в 22 км на север от вулкана (рис. III.6). Остальные станции удалены от этого вулкана на расстояние более 100 км. 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 $K_s \geq 6.0$ [8]), зарегистрированных удаленными от вулкана станциями, определялись кинематические и динамические параметры и 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 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 фиксации 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 наличие термальных аномалий по спутниковым данным. Когда на вулкане сейсмическая и вулканическая активность не превышала фоновый уровень, выставлялся «зеленый» код.

В 2017 г. в каталог Северной группы вулканов включено (рис. III.1, [9]) 4910 землетрясений, в очагах которых было высвобождено энергии $\Sigma E \sim 9.23 \cdot 10^8$ Дж, в каталог Авачинской группы (рис. III.2, [9]) – 295 ($\Sigma E \sim 2.09 \cdot 10^7$ Дж), Мутновско-Гореловской группы (рис. III.3, [9]) – 98 ($\Sigma E \sim 6.25 \cdot 10^6$ Дж). Каталоги землетрясений для районов вулканов Жупановский (рис. III.4, [9]), Кизимен (рис. III.5, [9]) и Камбальный (рис. III.6, [9]) содержат 270 ($\Sigma E \sim 6.37 \cdot 10^7$ Дж), 98 ($\Sigma E \sim 2.75 \cdot 10^9$ Дж) и 88 ($\Sigma E \sim 1.91 \cdot 10^9$ Дж) событий соответственно.

В печатные варианты каталогов землетрясений вулканических районов Камчатки помещено: Северная группа вулканов – 44 землетрясения с $M \geq 1.0$ [10]; Авачинская группа вулканов – 12 землетрясений с $M \geq 0$ [11]; Мутновско-Гореловская группа вулканов – 15 землетрясений с $M \geq 0$ [12]; вулкан Жупановский – 24 землетрясения с $M \geq 0.5$ [13]; вулкан Кизимен – 33 землетрясения с $M \geq 0.5$ [14]; вулкан Камбальный – 58 землетрясений с $M \geq 1.0$ [15].

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

Вулкан Шивелуч – самый северный действующий вулкан Камчатки, расположен в 45 км от пос. 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 2017 г. продолжалось экструзивно-эксплозивное извержение вулкана Шивелуч, связанное с ростом нового купола. Извержение сопровождалось вулканическим дрожанием, мощными газо-пепловыми выбросами с высотой до 12 км над уровнем моря, сходом пирокластических потоков и горячих лавин. В течение 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 2017 г. выставлялся 14 раз, «оранжевый» – 194 раза, «желтый» – 69 раз.

Из-за неустойчивой работы станций SRKR, SMKR и BDR в течение практически всего года, в радиусе 12 км от вулкана было локализовано всего 35 землетрясений с классом $2.5 \leq K_s \leq 6.9$ в диапазоне глубин $-2.0 \leq h \leq 34.8$ км [9, 10], высвобождено сейсмической энергии $\Sigma E \sim 3.39 \cdot 10^8$ Дж. Для корректного определения представительного класса и угла наклона графика повторяемости землетрясений с помощью автоматической процедуры программы ZMAP такого количества событий недостаточно. Землетрясение с максимальным классом ($K_s=8.5$) произошло 19 июля в 08^h19^m в постройке вулкана ($h=-0.7$ км).

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 2017 г. на Ключевском вулкане в течение всего года с перерывами наблюдалось вершинное эксплозивное извержение. Извержение сопровождалось пепловыми выбросами с максимальной высотой 8 км над уровнем моря и редкими свечениями над кратером (три раза). В 2017 г. для вулкана Ключевской выставлялся повышенный код опасности: четыре раза – «красный»; 56 – «оранжевый»; 134 – «желтый». В исследуемый период в радиусе 7 км от вулкана Ключевской и диапазоне глубин от кратера до 40 км ниже уровня моря было локализовано 3048 землетрясений с $\Sigma E \sim 5.37 \cdot 10^7$ Дж (рис. III.1, [9, 10]). Все землетрясения, как и в предыдущие годы, условно разделены по глубине на три слоя: поверхностные, локализованные 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 2017 г. была сосредоточена в верхнем (1744 события) и нижнем (1296 событий) слоях. Большие значения наклона графика повторяемости (табл. III.1) для поверхностных и глубоких землетрясений связаны с магматическими процессами. В промежуточном слое было локализовано всего восемь землетрясений.

На вулкане **Безымянный** в 2017 г. было зафиксировано три эксплозивных извержения с высотой пепловых выбросов от 10 до 15 км над уровнем моря (9 марта – 10 км, 16 июня – 12 км и 20 декабря – 15 км) и один случай выжимания вязкого лавового потока на растущем куполе в период с 5 по 12 февраля 2017 г. [16, 17].

15, 21, 24 и 26 января были зарегистрированы единичные поверхностные землетрясения из района вулкана Безымянный, а с 29 января по 5 февраля непрерывно наблюдалась повышенная сейсмичность. В это время было локализовано 67 землетрясений с $2.5 \leq K_s \leq 4.1$ [9]. При этом разница температур земной поверхности в месте аномалии и окружающей среды (фона) оставалась в пределах обычных значений ($T_{ан}-T_{ф}$) $\leq 20^\circ\text{C}$ [18] и резко выросла 5 февраля, достигнув значения 50°C . После этого сейсмичность упала до фоновой, а контроль температурной аномалии был невозможен из-за плохих погодных условий. В следующий раз вулкан открылся 11 февраля и значение разницы температур составило $\sim 40^\circ\text{C}$. 12 февраля на спутниковом снимке MSI (SENTINEL-2A) были измерены параметры лавового потока: длина – 550 м, ширина – до 120 м, мощность – несколько метров и площадь – около 0.06 км^2 [17]. После этого температура упала до обычных значений. На данный эпизод 26 января 2017 г. в КФ РЭС был передан прогноз по методике «СОУС'09» [19], в котором утверждалось, что вероятность извержения (без указания типа и масштабов прогнозируемого события) в ближайшие десять дней превышает среднемноголетнее значение в 5 раз. Прогноз был обновлен и продлен 3 февраля 2017 г., и вероятность извержения на ближайшие десять дней выросла до значения 0.28, что превышает среднемноголетнее значение в 7 раз [19].

С 18 по 25 февраля на вулкане Безымянный наблюдалось сейсмическое затишье, а в конце февраля сейсмичность начала повышаться. С 5 по 9 марта 2017 г. в районе

постройки вулкана резко увеличилось количество землетрясений и их энергия. За этот период времени было локализовано более 100 событий, максимальный класс которых составил 5.5. На основании исследований сейсмической подготовки предыдущих извержений вулкана, подобный скачок сейсмической активности предшествует сильному эксплозивному извержению со временем упреждения до 30 дней с вероятностью 70% [18]. Поэтому 9 марта 2017 г. в 02^h00^m в КФ РЭС был подан прогноз извержения: с 9 марта по 9 апреля 2017 г. ожидается эксплозивное извержение вулкана Безымянный с высотой пепловых выбросов от 6 до 15 км над уровнем моря. Прогноз по методике «СОУС'09» был передан в КФ РЭС 6 марта 2017 г. в следующей формулировке: вероятность извержения вулкана Безымянный составляет 0.26 на ближайшие десять дней, что превышает среднемноголетнее значение в 6 раз.

Видеокамера, установленная на месте сейсмостанции BZGR (рис. III.1), начала фиксировать отдельные эксплозии 9 марта 2017 г. в 02^h50^m. Первый пепловый выброс был автоматически выделен программой ADAP [20] в 03^h03^m с оценкой высоты эруптивного облака в 5.6 км н.у.м. После достижения эруптивного облака высоты 6 км н.у.м. (оценка ADAP, $H=7.7$ км н.у.м.) в 03^h09^m, было отправлено первое сообщение о начале извержения в соответствии с регламентом. Через 10 мин, когда высота пепловой колонны достигла 10 км н.у.м., было сделано второе оповещение. По данным Токуо VAAC (http://ds.data.jma.go.jp/svd/vaac/data/vaac_list.html, спутник HIMAWARY-8) эруптивный шлейф от вулкана Безымянный впервые был зафиксирован 9 марта в 03^h42^m и продолжал наблюдаться до 12^h00^m 10 марта. Распространяясь в север–северо-западном направлении, он наблюдался на расстоянии >1500 км.

Следующая сейсмическая активизация вулкана началась 5 июня и постепенно нарастала вплоть до извержения 16 июня. За это время было локализовано более 350 землетрясений с $2.5 \leq K_s \leq 5.8$ [9, 10]. По данным видео наблюдений сход «горячих» каменных лавин и свечение купола начали фиксироваться с 10 июня. При этом разница температур земной поверхности в месте аномалии и окружающей среды (фона) оставалась в пределах обычных значений и немного выросла накануне извержения 15 июня, достигнув значения 21°C. По наблюдаемым параметрам 11 июня 2017 г. в 04^h00^m в КФ РЭС был передан прогноз извержения: с 11 июня по 11 июля 2017 г. ожидается эксплозивное извержение вулкана Безымянный с высотой пепловых выбросов от 6 до 15 км над уровнем моря. Время начала извержения и его вероятность были уточнены 15 июня – в течение следующих семи суток с вероятностью 90%. Заключение по методике «СОУС'09» [19] было передано в КФ РЭС 16 июня в следующей формулировке: вероятность извержения вулкана Безымянный составляет 0.65 на ближайшие семь дней, что превышает среднемноголетнее значение в 20 раз. При этом вероятность извержения по сравнению с вероятностью при отсутствии предвестника возросла в 350 раз. По сейсмическим данным, извержение произошло 16 июня с 04^h53^m до 05^h06^m. По видео данным в это время наблюдалось пароксизмальное извержение с высотой пеплового столба до 12 км над уровнем моря, шлейф распространялся на восток. После извержения и вплоть до следующего в темное время суток наблюдалось свечение купола.

Следующее эксплозивное извержение произошло 20 декабря в 03^h39^m, когда по сейсмическим данным было зарегистрировано поверхностное событие продолжительностью 20 мин, сопровождавшее газо-пепловый выброс ~11.5 км над уровнем моря (высота определена автоматической программой ADAP [20]). Видео наблюдения зафиксировали в это время эксплозивное извержение с высотой пепловой колонны до 15 км над уровнем моря. По спутниковым данным, пепловый шлейф протянулся на север на сотни километров. Сейсмическая активизация перед этим извержением началась 14 декабря. До извержения 20 декабря было локализовано более 370 землетрясений с $2.5 \leq K_s \leq 6.9$ [9, 10]. При этом до 18 декабря были определены параметры для 75 событий. Как и в предыдущих случаях, подобный скачок сейсмической активности мог

предшествовать сильному эксплозивному извержению со временем упреждения до 30 дней с вероятностью 70% [18]. Поэтому 18 декабря 2017 г. в 00^h00^m в КФ РЭС был подан прогноз извержения: с 18 декабря 2017 г. до 18 января 2018 г. ожидается эксплозивное извержение вулкана Безымянный с высотой пепловых выбросов от 6 до 15 км над уровнем моря. Время начала извержения и его вероятность были уточнены 20 декабря – в течение следующих семи суток с вероятностью 90%. Заключение по методике «СОУС'09» было передано в КФ РЭС 18 декабря 2017 г. в следующей формулировке: вероятность извержения возросла по сравнению с фоновой в 20 раз, а по сравнению с вероятностью при отсутствии предвестника (она же – контрастность) – в 300 раз.

В 2017 г. для вулкана Безымянный повышенный код опасности выставлялся 138 раз: 3 – «красный», 8 – «оранжевый»; 127 – «желтый». Землетрясение с максимальным классом $K_s=6.9$ произошло 19 декабря в 22^h41^m в постройке вулкана. Всего в 2017 г. в радиусе 6 км от вулкана и диапазоне глубин от вершины нового купола до 8.2 км ниже уровня моря было локализовано 1237 землетрясений с $1.5 \leq K_s \leq 6.9$ [9, 10], выделившаяся суммарная энергия которых составила $\Sigma E \sim 7.52 \cdot 10^7$ Дж. Представительный класс получился равным $K_{\text{пред}}=3.2$ при угле наклона графика повторяемости $\gamma=0.59 \pm 0.02$.

Вулкан Плоский Толбачик. Ближайшая телеметрическая станция KMNR [1, 2] расположена в 10 км от кратера вулкана. В 2017 г. в окружности радиусом 20 км, включающей вышеназванный вулкан, Толбачинский дол и потухшие вулканы Большая Удина и Малая Удина, было локализовано 290 землетрясений с $2.2 \leq K_s \leq 8.2$ в диапазоне глубин от кратера до 32 км ниже уровня моря [9, 10]. Землетрясение с максимальным классом $K_s=8.2$ произошло 3 февраля в 00^h08^m на глубине 14.8 км. Выделенная сейсмическая энергия локализованных землетрясений составила $\Sigma E \sim 2.44 \cdot 10^8$ Дж, $K_{\text{пред}}=3.6$, угол наклона совпадает со значением региональных тектонических землетрясений $\gamma=0.51 \pm 0.03$.

В течение года на вулкане Плоский Толбачик в основном наблюдалась «фоновая» сейсмическая и вулканическая активность. И только 16 раз, когда в районе вулкана регистрировалась повышенная сейсмичность, выставлялся «желтый» код. Из них в семи случаях, начиная с октября 2017 г., повышенная сейсмичность наблюдалась в районе потухших вулканов Большая Удина и Малая Удина, которые расположены примерно в 12 и 16 км на юго-запад от кратера вулкана Плоский Толбачик соответственно. Детальные данные этой активизации представлены в [21].

На вулканах **Крестовский и Ушковский** в 2017 г. наблюдалась фоновая сейсмичность. Всего в радиусе 10.1 км от вулканов и диапазоне глубин $-2.9 \leq h \leq 23$ км было локализовано 50 землетрясений с $2.3 \leq K_s \leq 6.6$ ($\Sigma E \sim 4.51 \cdot 10^6$ Дж) [9, 10]. Максимальный класс $K_s=6.6$ зарегистрирован 18 октября в 04^h21^m на глубине $h=-0.5$ 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 2017 г. вулканы были спокойны, их сейсмичность не превышала нормальный, фоновый уровень.

В радиусе 8 км от Авачинского вулкана и диапазоне глубин от кратера до 25 км (рис. III.2) было локализовано 120 землетрясений ($\Sigma E \sim 4.02 \cdot 10^6$ Дж), для которых $K_{\text{пред}}=2.4$, $\gamma=0.51 \pm 0.03$. Максимальный класс $K_s=6.4$ зарегистрирован 9 мая в 12^h17^m под постройкой вулкана ($h=17.3$ км) [9, 11].

В радиусе 9 км от Корякского вулкана были определены кинематические и динамические характеристики для 151 землетрясения ($1.6 \leq K_s \leq 5.8$, $-2.9 \leq h \leq 8.4$ км, $\Sigma E \sim 7.71 \cdot 10^5$ Дж, $K_{\text{пред}}=1.8$, $\gamma=0.66 \pm 0.03$). Землетрясение с $K_s=7.0$ произошло 8 сентября в 04^h09^m под постройкой вулкана ($h=3.5$ км) [9, 11].

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). Ближайшая к вулкану Мутновский сейсмическая станция МТВР [1, 2] расположена в 3 км от активного кратера. В 2017 г. в каталог Мутновско-Гореловской группы включено 98 землетрясений, выделившаяся суммарная энергия которых составила $\Sigma E \sim 6.25 \cdot 10^6$ Дж. Большая часть сейсмичности была сосредоточена в районе вулкана Мутновский, в радиусе 8 км от его вершины было локализовано 64 землетрясения ($2.0 \leq K_s \leq 5.6$, $-1.2 \leq h \leq 19.7$ км) [9, 12]. Землетрясение с максимальным классом ($K_s = 5.6$) произошло на глубине $h = -1.2$ км под постройкой Мутновского вулкана 23 сентября в 00^h57^m.

Ближайшая к вулкану Горелый станция GRL [1, 2] расположена в 4 км от кратера. В течение всего года станцией регистрировалось спазматическое вулканическое дрожание и слабые локальные поверхностные сейсмические события от вулкана. В радиусе 7 км от вершины вулкана Горелый в 2017 г. было локализовано всего два землетрясения с K_s , равным 3.6 и 4.3 [9, 12].

В 2017 г. из-за повышенной сейсмичности «желтый» код выставлялся на вулкане Горелый 261 раз, на вулкане Мутновский – 68 раз.

В 2017 г. 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 2017 г. сейсмический мониторинг проводился по удаленным станциям [1, 2], ближайшие из которых (SDL, KRE, KRX) расположены от Жупановского вулкана в 38–40 км в районе Авачинской группы вулканов (рис. III.4). Всего в исследуемый период в районе Жупановского вулкана ($\varphi = 53.40\text{--}53.90^\circ\text{N}$, $\lambda = 158.70\text{--}159.65^\circ\text{E}$) было локализовано 270 землетрясений ($\Sigma E \sim 6.37 \cdot 10^7$ Дж) с $K_s \leq 7.3$ в диапазоне глубин $2.0 \leq h \leq 39.7$ км, из них 70 – в радиусе 20 км от вершины вулкана ($\Sigma E \sim 5.58 \cdot 10^7$ Дж). Землетрясение с максимальным классом ($K_s = 7.3$) произошло 07 мая в 19^h11^m на глубине 5.8 км под постройкой вулкана [9, 13].

В 2017 г. продолжалось извержение Жупановского вулкана, сопровождавшееся пепловыми выбросами до 10 км над уровнем моря. «Оранжевый» код опасности в исследуемый период присваивался вулкану два раза и «желтый» – 33 раза. Все извержения, зарегистрированные по сейсмическим данным, подтверждены видео и (или) спутниковыми наблюдениями.

Вулкан Карымский в 2017 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.7 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 3000 м над кратером. В 2017 г. для вулкана Карымский повышенный код опасности выставлялся 117 раз: 49 – «оранжевый»; 68 – «желтый».

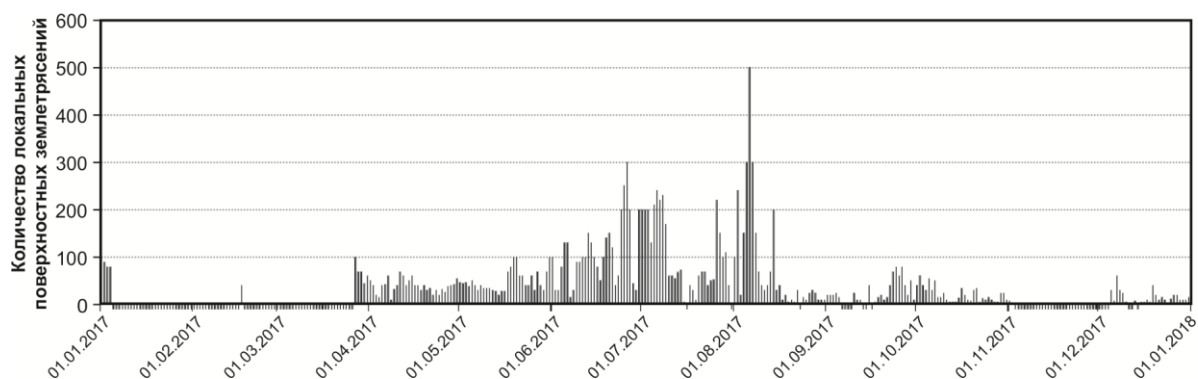


Рис. III.7. Сейсмичность вулкана Карымский в 2017 г. по данным сейсмостанции КИ.
Значение меньше «0» означает отсутствие данных

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) [1, 2]. В 2017 г. в районе вулкана Кизимен ($\varphi=54.90-55.54^\circ\text{N}$, $\lambda=159.82-160.80^\circ\text{E}$) было локализовано 98 землетрясений с суммарной энергией $\Sigma E \sim 2.75 \cdot 10^9$ Дж. Из них 32 события ($2.3 \leq K_s \leq 7.5$, $-1.6 \leq h \leq 14.4$ км) произошли в радиусе 20 км от вершины вулкана [9, 14]. Суммарная энергия землетрясений составила $\Sigma E \sim 3.87 \cdot 10^7$ Дж. Землетрясение с максимальным классом $K_s=9.4$ ($h=5.9$ км) произошло вне зоны вулкана 7 мая в 19^h11^m.

В 2017 г. на вулкане Кизимен наблюдалась вулканическая активность только в виде фумарольной деятельности и сейсмичность не превышала фоновую.

Вулкан Камбальный является самым южным вулканом Южно-Камчатской вулканической зоны, расположен на юге Камбального хребта (рис. III.6). Это действующий конусовидный стратовулкан с абсолютной высотой 2156 м, на склонах которого имеется пять шлаковых конусов голоценового возраста. В историческое время извержений отмечено не было, вулканическая активность проявлялась только в виде фумарольной деятельности [22]. Ближайшая сейсмическая станция «Паужетка» (PAU) находится в 22 км на север от вулкана. Остальные станции удалены на 100 км и более: «Северо-Курильск» (SKR) в ~101 км на юго-запад; «Ходутка» (KDT) – 116 км на северо-восток. Расчетный уровень надежной регистрации землетрясений в районе вулкана Камбальный составляет $K_{\min}=6.5$.

Сейсмическая активизация в районе вулкана началась с серии слабых землетрясений 22 марта с 19^h40^m до 20^h12^m. Количество землетрясений и их интенсивность возрастали с каждым часом. По сейсмическим данным, эксплозивное извержение началось 24 марта в 12^h22^m, когда на станции «Паужетка» было зарегистрировано поверхностное событие, возможно сопровождавшее газо-пепловый выброс. По данным государственного инспектора Кроноцкого заповедника Виктора Митринюка, находившегося на кордоне «Прибрежный» в ~18 км на юго-запад от подножия вулкана, пепловые выбросы на высоту 3–6 км над уровнем моря наблюдались в течение семи суток, начиная с 21^h50^m 24 марта (рис. III.8). Все эти дни на спутниковых снимках, предоставляемых Аляскинской вулканологической обсерваторией, наблюдались пепловые шлейфы от извержения вулкана протяженностью до 1700 км и отдельные пепловые облака. 29 марта уровень сейсмичности снизился, и извержение постепенно прекратилось. Последнее пепловое облако над вулканом по спутниковым наблюдениям было зафиксировано 9 апреля.

По данным комплексного мониторинга, в 2017 г. вулкану Камбальный девять раз присваивался «оранжевый» код опасности и 18 раз – «желтый».



**Рис. III.8. Пепловый шлейф от извержения вулкана Камбальный 25.03.2017 г.
Фото В. Митрююка**

В 2017 г. в радиусе 16 км от вулкана было локализовано 84 землетрясения с $5.0 \leq K_s \leq 8.6$ [9, 15], из них 82 события – во время сейсмической и вулканической активизации в марте 2017 года. Гипоцентры землетрясений определены в диапазоне глубин $h=4-15$ км. Средняя ошибка локации для них составила 11 км в плане и 5 км по глубине. Землетрясение с максимальным классом $K_s=8.6$ зарегистрировано перед извержением вулкана 24 марта в 00^h03^m на глубине $h=5.9$ км под постройкой вулкана.

Литература

1. Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Кугаенко Ю.А., Левина В.И., Сеньюков С.Л., Сергеев В.А., Шевченко Ю.В., Ящук 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 2017 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – С. 69–78.
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 2016 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – С. 65–72.
4. Салтыков В.А. О проблеме оценки пространственно-временных особенностей представительности каталога землетрясений Камчатки // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XIII Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – С. 237–242.
5. Дрознин Д.В., Дрознина С.Я. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Сейсмические приборы. – М.: ИФЗ РАН, 2010. – Т. 46, № 3. – С. 22–34.
6. Сеньюков С.Л. Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений в 2000–2004 гг. // Вулканология и сейсмология. – 2006. – № 3. – С. 68–78.
7. Weimer S. A software package to analyze seismicity: ZMAP // Seism. Res. Lett. – 2001. – Vol. 72. – P. 373–382.
8. Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. – М.: Наука, 1972. – 117 с.
9. Part_IV-2017. 12_Volcano-regions-of-Kamchatka_2017.xls // Землетрясения России в 2017 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – Приложение на CD-ROM.

10. Нуждина И.Н. (отв. сост.); Напылова Н.А., Напылова О.А., Кожевникова Т.Ю., Толокнова С.Л., Соболевская О.В., Назарова З.А. Каталоги землетрясений по различным регионам России. Вулканические районы Камчатки. Северная группа вулканов // Землетрясения России в 2017 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – С. 180.
11. Нуждина И.Н. (отв. сост.); Кожевникова Т.Ю., Толокнова С.Л., Назарова З.А., Соболевская О.В. Каталоги землетрясений по различным регионам России. Вулканические районы Камчатки. Авачинская группа вулканов // Землетрясения России в 2017 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – С. 181.
12. Нуждина И.Н. (отв. сост.); Толокнова С.Л., Кожевникова Т.Ю., Соболевская О.В., Назарова З.А. Каталоги землетрясений по различным регионам России. Вулканические районы Камчатки. Мутновско-Гореловская группа вулканов // Землетрясения России в 2017 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – С. 182.
13. Нуждина И.Н. (отв. сост.); Кожевникова Т.Ю., Соболевская О.В., Толокнова С.Л., Назарова З.А. Каталоги землетрясений по различным регионам России. Вулканические районы Камчатки. Вулкан Жупановский // Землетрясения России в 2017 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – С. 182.
14. Нуждина И.Н. (отв. сост.); Толокнова С.Л., Кожевникова Т.Ю., Назарова З.А., Соболевская О.В., Напылова Н.А. Каталоги землетрясений по различным регионам России. Вулканические районы Камчатки. Вулкан Кизимен // Землетрясения России в 2017 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – С. 183.
15. Нуждина И.Н. (отв. сост.); Назарова З.А., Напылова Н.А., Напылова О.А., Кожевникова Т.Ю. Каталоги землетрясений по различным регионам России. Вулканические районы Камчатки. Вулкан Камбальный // Землетрясения России в 2017 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – С. 184–185.
16. Чебров Д.В., Фирстов П.П., Сеньюков С.Л., Близнецов В.Е., Воропаев П.В., Гарбузова В.Т., Дроздина С.Я., Кожевникова Т.Ю., Кугаенко Ю.А., Назарова З.А., Нуждина И.Н., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К., Сероветников С.С., Соболевская О.В. Активность вулкана Безымянный (Камчатка) в 2016–2017 гг. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2017. – № 1 (33). – С. 5–11.
17. Гирина О.А., Мельников Д.В., Демянчук Ю.В., Маневич А.Г. Извержение вулкана Безымянный в 2016–2017 гг. по данным KVERT // Вулканизм и связанные с ним процессы. XX ежегодная научная конференция, посвященная дню вулканолога. Материалы конференции. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2017. – С. 14–17.
18. Сеньюков С.Л. Прогноз извержений вулканов Ключевской и Безымянный на Камчатке // Saarbrücken: LAP LAMBERTS Academic Publishing. – 2013. – 144 с.
19. Салтыков В.А. Формализованная методика прогноза извержений вулкана Безымянный (Камчатка) на основе статистической оценки уровня сейсмичности // Геофизические исследования. – 2016. – № 3. – С. 45–59.
20. 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.
21. Салтыков В.А., Воропаев П.В., Кугаенко Ю.А., Чебров Д.В. Удинская сейсмическая активизация 2017–2018 гг. // Вестник КРАУНЦ. – 2018. – № 1, вып. 37. – С. 5–7.
22. Действующие вулканы Камчатки. В 2-х т. // Под ред. С.А. Федотова и Ю.П. Масуренкова. Т. 2. – М.: Наука, 1991. – 415 с.