

### III. Результаты детального сейсмического мониторинга

#### Непрерывные наблюдения

#### Вулканы Камчатки

С.Л. Сеньюков, И.Н. Нуждина, В.Н. Чебров

Камчатский филиал ГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский

В 2014 г. радиотелеметрическая сеть сейсмических станций Камчатского филиала (КФ) ГС РАН не изменилась, по сравнению с 2011–2013 гг. [1], и 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), Мутновско-Гореловской (вулканы Мутновский и Горелый, рис. III.3) групп вулканов и вулканов Жупановский (рис. III.4) и Кизимен (рис. III.5). В табл. III.1 приведены сведения о вулканах, для которых проводился сейсмический мониторинг.

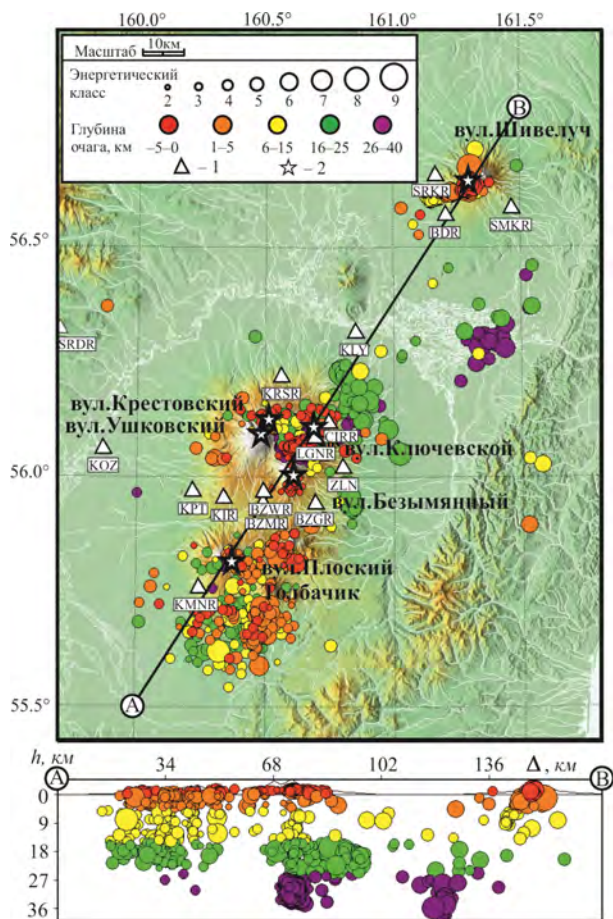


Рис. III.1. Карта эпицентров землетрясений в районе Северной группы вулканов в 2014 г. и проекция очагов на вертикальный разрез А–В: 1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан

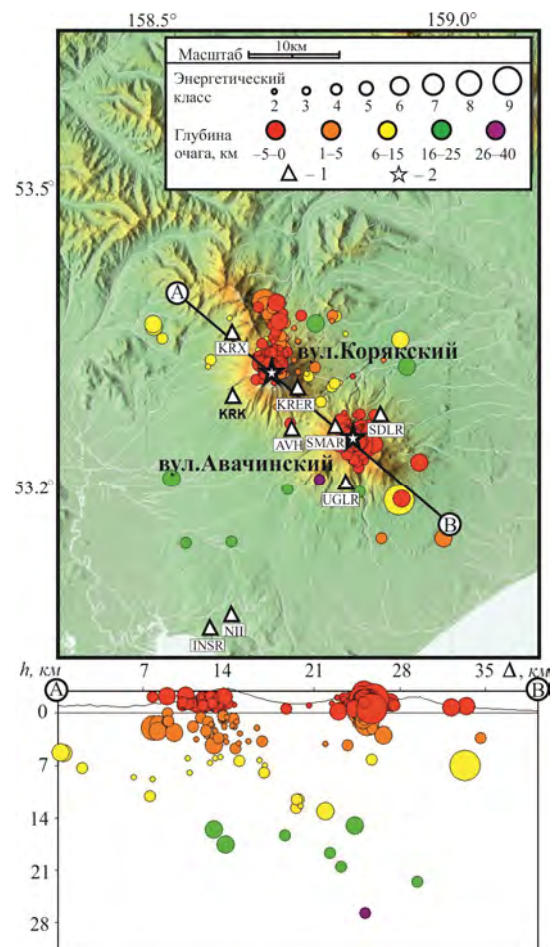


Рис. III.2. Карта эпицентров землетрясений в районе Авачинской группы вулканов в 2014 г. и проекция очагов на вертикальный разрез А–В: 1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан

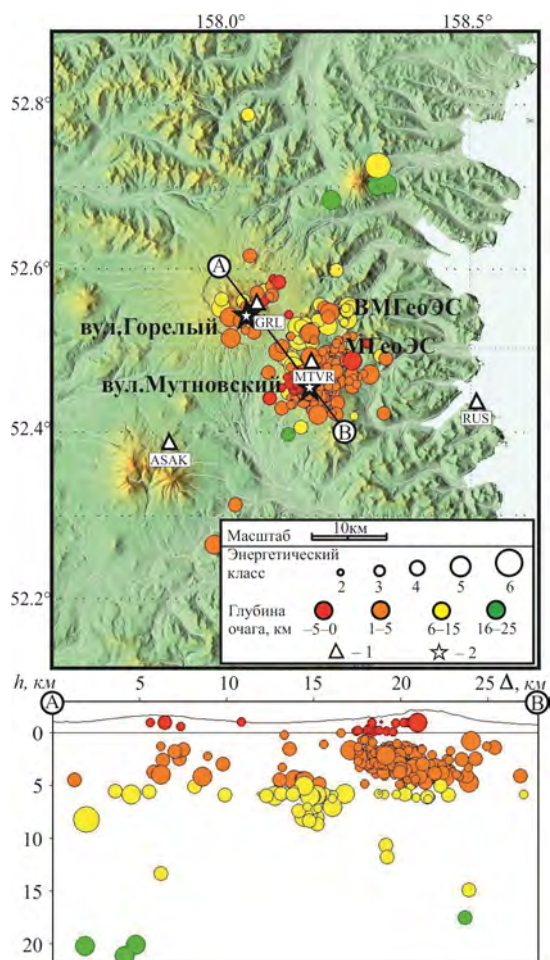


Рис. III.3. Карта эпицентров землетрясений в районе Мутновско-Гореловской группы вулканов в 2014 г. и проекция очагов на вертикальный разрез А–В:  
1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан

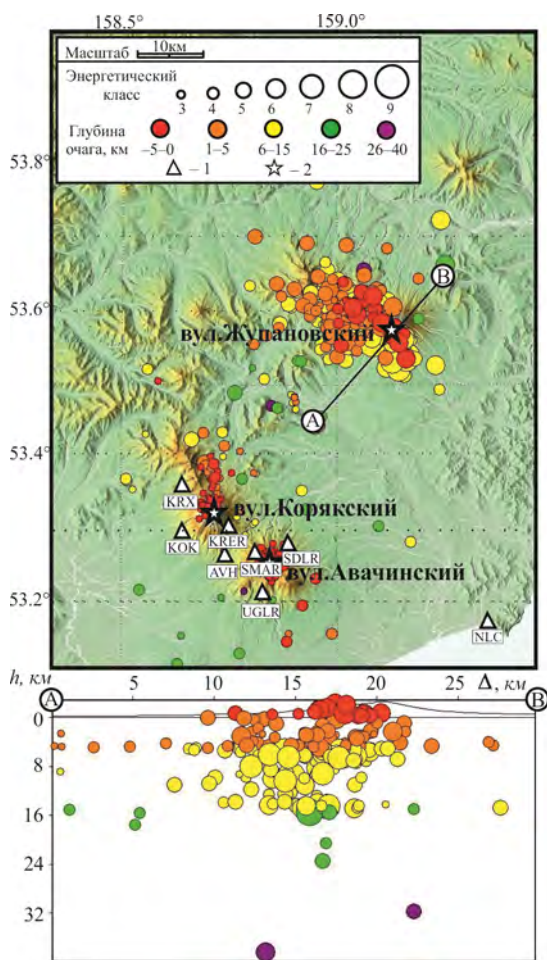
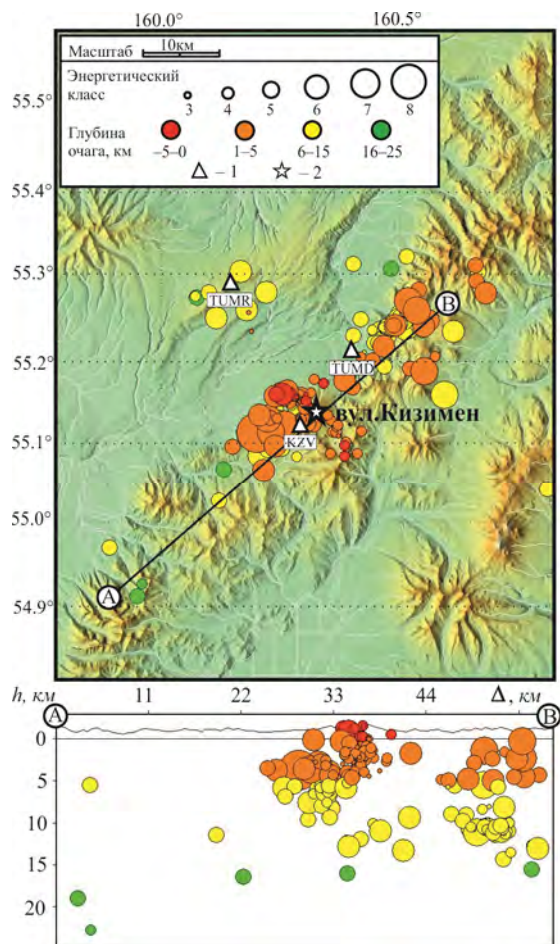


Рис. III.4. Карта эпицентров землетрясений в районе вулкана Жупановский в 2014 г. и проекция очагов на вертикальный разрез А–В:  
1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан

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

Название вулкана	Координаты вершины		Абсолютная высота вершины, м	Диаметр кратера, м	Уровень надежной регистрации, $K_{\min}$
	φ, °N	λ, °E			
Авачинская группа вулканов					
Авачинский	53.25	158.83	2741	350	3.0
Корякский	53.32	158.72	3456		3.0
Мутновско-Гореловская группа вулканов					
Горелый	52.55	158.03	1829		4.5
Мутновский	52.45	158.20	2323		4.5
Северная группа вулканов					
Шивелуч	56.63	161.32	2600		3.5
Ключевской	56.07	160.63	4750	700	3.0
Безымянный	55.97	160.58	2869		3.0
Крестовский	56.12	160.50	4108		4.0
Ушковский	56.07	160.47	3943		4.0
Плоский Толбачик	55.82	160.37	3085	400	4.0
Остальные вулканы					
Кизимен	55.13	160.33	2375		4.5
Жупановский	53.58	159.16	2923		4.9
Карымский	54.05	159.43	1536	250	6.5



**Рис. III.5. Карта эпицентров землетрясений в районе вулкана Кизимен в 2014 г. и проекция очагов на вертикальный разрез А–В:**  
1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан

ленными от вулкана станциями, определяются кинематические и динамические параметры и помещаются в сетевую базу.

В 2014 г. в каталог Северной группы вулканов (рис. III.1) включены параметры 4986 землетрясений, суммарная высвобожденная энергия которых составила  $\Sigma E \sim 2.389 \cdot 10^9$  Дж, в каталог Авачинской группы (рис. III.2) – 488 ( $\Sigma E \sim 5.519 \cdot 10^6$  Дж), Мутновско-Гореловской группы (рис. III.3) – 461 ( $\Sigma E \sim 4.874 \cdot 10^6$  Дж). Каталоги землетрясений для районов вулканов Жупановский (рис. III.4) и Кизимен (рис. III.5) содержат 222 ( $\Sigma E \sim 5.26 \cdot 10^8$  Дж) и 216 ( $\Sigma E \sim 4.03 \cdot 10^8$  Дж) землетрясений соответственно [6].

В исследуемый период высокая сейсмическая активность наблюдалась на вулканах Ключевской, Шивелуч, Плоский Толбачик, Жупановский и Карымский.

**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].

В 2014 г. продолжалось экструзивно-эксплозивное извержение вулкана Шивелуч, связанное с ростом нового купола. Извержение сопровождалось вулканическим дрожанием, мощными газо-пепловыми выбросами, 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.

В 2014 г. в радиусе 12 км от вулкана и диапазоне глубин от вершины нового купола до 14 км ниже уровня моря было локализовано 462 землетрясения, высвобождено

Расчет параметров вулканических событий в 2014 г. (координаты эпицентра, глубина, энергия) проводился по программе «DIMAS» [2]. Для локации сейсмических событий Северной и Авачинской групп вулканов использовались локальные годографы [3], для вулканов Мутновский, Горелый, Жупановский, Кизимен и Карымский – одномерная скоростная модель Камчатского региона с возможностью поиска решений положений гипоцентров землетрясений выше уровня моря. Каталог для всех групп вулканов формируется в сетевой базе данных в режиме, близком к реальному времени, и доступен в Интернете по адресу: <http://www.emsd.ru/ts/>.

Представительный класс и угол наклона графика повторяемости землетрясений определялись в пакете программ ZMAP [4].

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 ведется только подсчет их количества. Для более сильных землетрясений (обычно с  $K_S \geq 6.0$  [5]), зарегистрированных уда-

сейсмической энергии  $\Sigma E \sim 4.37 \cdot 10^8$  Дж. Землетрясение с максимальным классом ( $K_S=8.6$ ) произошло 15 октября в 02<sup>h</sup>16<sup>m</sup> под постройкой вулкана на глубине 1.2 км. Представительный класс землетрясений получился равным  $K_{\text{пред}}=4.0$  при угле наклона графика повторяемости  $\gamma=0.78 \pm 0.06$ .

**Вулкан Ключевской** – самый высокий действующий вулкан Курило-Камчатской дуги, расположен в 32 км к юго-западу от пос. Ключи. Ближайшая радиотелеметрическая станция LGNR установлена в 4 км от кратера [1]. В январе-феврале 2014 г. вершинное эксплозивно-эффузивное извержение вулкана, начавшееся в августе 2013 г., постепенно завершилось. В исследуемый период в радиусе 7 км от вулкана Ключевской и диапазоне глубин от кратера до 40 км ниже уровня моря было локализовано 3934 землетрясения (рис. III.1) с общей энергией  $\Sigma E \sim 1.96 \cdot 10^8$  Дж. 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. В 2014 г. практически вся сейсмичность была сосредоточена на глубине 20–35 км (3722 события), где генерируется множество длиннопериодных землетрясений, в образовании которых активную роль играет магматический расплав. Были определены представительный класс  $K_{\text{пред}}$  и угол наклона  $\gamma$  для событий верхнего и нижнего слоев. Для глубоких землетрясений  $K_{\text{пред}}=4.3$  при  $\gamma=1.29 \pm 0.09$ , для поверхностных (181 событие) –  $K_{\text{пред}}=4.0$  при  $\gamma=1.66 \pm 0.08$ . В промежуточном слое было локализовано всего 31 землетрясение.

На вулкане **Безымянный** в 2014 г. наблюдалась слабая сейсмичность и извержений не зафиксировано. В радиусе 6 км от вулкана было локализовано всего 27 землетрясений с  $2.1 \leq K_S \leq 4.3$ ,  $\Sigma E \sim 0.52 \cdot 10^5$  Дж.

**Вулкан Плоский Толбачик** – ближайшая телеметрическая станция KMNR расположена в 10 км от кратера вулкана. В 2014 г. в окружности радиусом 20 км, включающей вышеназванный вулкан и Толбачинский дол, было локализовано 316 землетрясений, диапазон глубин – от кратера до 27.1 км ниже уровня моря. Землетрясение с максимальным классом  $K_S=8.2$  произошло 24 августа в 23<sup>h</sup>36<sup>m</sup> на глубине 7.9 км. Выделившаяся в очагах сейсмических событий энергия составила  $\Sigma E \sim 1.93 \cdot 10^8$  Дж,  $K_{\text{пред}}=3.6$ , угол наклона графика повторяемости близок значению для региональных тектонических землетрясений  $\gamma=0.64 \pm 0.04$ .

**Вулканы Корякский и Авачинский** расположены в 25–30 км от городов Петропавловска-Камчатского и Елизово, поэтому представляют наибольшую потенциальную угрозу для населения. В 2014 г. вулканы были спокойны, и их сейсмичность не превышала обычный «нормальный фоновый» уровень.

В радиусе 8 км от Авачинского вулкана и диапазоне глубин от кратера до 26.8 км (рис. III.2) было локализовано 266 землетрясений ( $\Sigma E \sim 0.35 \cdot 10^7$  Дж), для которых  $K_{\text{пред}}=2.5$ ,  $\gamma=0.57 \pm 0.06$ . Максимальный класс  $K_S=6.0$  зарегистрирован 29 декабря в 14<sup>h</sup>22<sup>m</sup> в постройке вулкана.

В радиусе 9 км от Корякского вулкана были определены кинематические и динамические характеристики для 175 землетрясений ( $1.6 \leq K_S \leq 4.9$ ,  $-5.0 \leq h \leq 5.0$  км,  $\Sigma E \sim 0.2 \cdot 10^6$  Дж),  $K_{\text{пред}}=2.2$  при  $\gamma=0.79 \pm 0.03$ .

**Вулканы Горелый и Мутновский** расположены в 70 км к югу от г. Петропавловск-Камчатского. В районе Мутновско-Гореловской группы вулканов находятся Мутновская (МгеоЭС) и Верхне-Мутновская (ВМгеоЭС) геотермальные электростанции (рис. III.3). Ближайшая к вулкану Мутновский сейсмическая станция MTVR [1] расположена в 3 км от активного кратера. В 2014 г. практически вся сейсмичность Мутновско-Гореловской группы была сосредоточена в окружности радиусом 7 км от вершины вулкана. В этой окружности было локализовано 373 землетрясения ( $\Sigma E \sim 0.17 \cdot 10^7$  Дж) в диапазоне глубин  $0.9 \leq h \leq 17.6$  км,  $K_{\text{пред}}=2.8$ ,  $\gamma=0.92 \pm 0.09$ .

Ближайшая к вулкану Горелый станция GRL [1] расположена в 4 км от кратера. В радиусе 7 км от вулкана Горелый было локализовано всего 21 землетрясение с  $2.6 \leq K_S \leq 5.0$ .

В 2014 г. вулканическая активность на вулканах Горелый и Мутновский наблюдалась только в виде фумарольной деятельности.

**Вулкан Жупановский** расположен в юго-восточном вулканическом поясе Камчатки и представляет собой восточную часть Дзензур-Жупановского вулканического хребта, образованную четырьмя слившимися конусами стратовулканов. После 56-летнего периода фумарольной деятельности 23 октября 2013 г. началось извержение вулкана с образования трещины и новой фумаролы, из которой в течение двух суток извергались пепел и газ (рис. III.6). Сейсмический мониторинг проводился по удаленным станциям, ближайшие из которых (SDL, KRE, KRX) расположены в 38–40 км от него в районе Авачинской группы вулканов (рис. III.4). В радиусе 20 км от вершины вулкана было локализовано 222 землетрясения ( $2.6 \leq K_S \leq 8.4$ ) во всем диапазоне глубин земной коры ( $-2.3 \leq h \leq 38.4$ ). Выделенная в очагах суммарная сейсмическая энергия составила  $\Sigma E \sim 5.26 \cdot 10^8$  Дж. Землетрясение с максимальным классом ( $K_S = 8.4$ ) произошло 29 января 08<sup>h</sup>22<sup>m</sup> на глубине 9.6 км под постройкой вулкана. Представительный класс землетрясений для района Жупановского вулкана в 2014 г.  $K_{\text{пред}} = 4.3$  при  $\gamma = 0.46 \pm 0.06$ .



*Рис. III.6. Извержение вулкана Жупановский 23.10.2014 г.  
Фото В. Гарбузова*

8 апреля 2014 г. возобновились газо-пепловые выбросы. Эксплозивное извержение хорошо совпало с апрельской сейсмической активизацией. В дальнейшем, до конца года, можно отметить усиление силы и частоты эксплозий. К сожалению, землетрясения более низкого энергетического уровня, сопровождавшие подготовку и извержение Жупановского вулкана, локализовать было невозможно из-за удаленности станций.

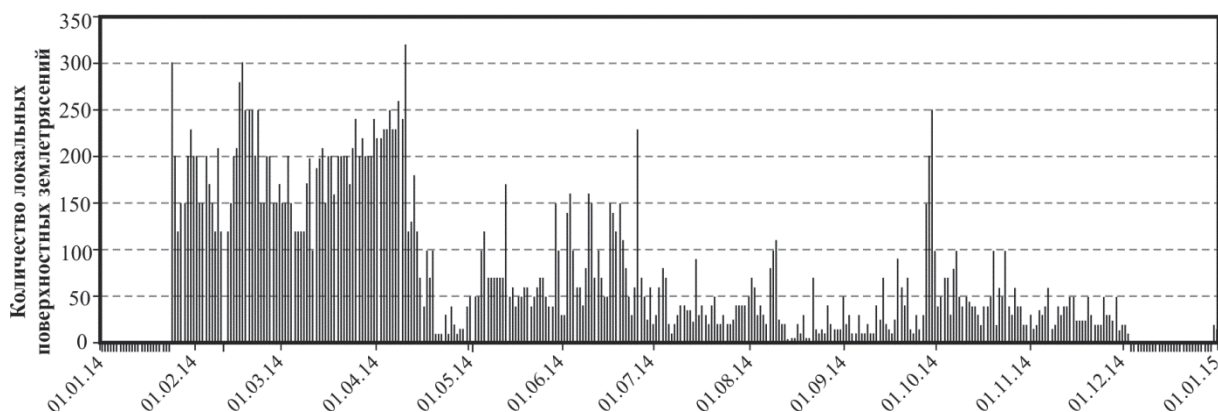
**Вулкан Кизимен** по отношению к другим вулканам Камчатки занимает обособленное положение на западном склоне южной части хребта Тумрок. Это единственный действующий вулкан, расположенный на сочленении грабена Центральной Камчатской депрессии с горстом Восточного хребта. Ближайшая радиотелеметрическая станция KZV расположена на юго-западном склоне вулкана в 2.5 км от вершины (рис. III.5) [1].

В 2014 г. в районе вулкана Кизимен наблюдалась слабая сейсмичность, было локализовано всего 216 землетрясений, суммарная выделившаяся энергия которых составила  $\Sigma E \sim 4.03 \cdot 10^8 \text{ Дж}$ . Землетрясение с максимальным классом  $K_S=8.5$  произошло на глубине 3.8 км под постройкой вулкана 3 марта в 01<sup>h</sup>06<sup>m</sup>. Для землетрясений ( $N=136$ ), локализованных в радиусе 15 км от вулкана, были определены  $K_{\text{пред}}=4.0$  и  $\gamma=0.46 \pm 0.01$ .

В 2014 г. на вулкане Кизимен наблюдалась вулканическая активность только в виде фумарольной деятельности.

**Вулкан Карымский** в 2014 г. продолжал извергаться. Ближайшая станция КИ расположена на юго-восточном склоне в 1.5 км от кратера [1]. 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  $K \geq 6.0$ . В исследуемый период в радиусе 10 км от вулкана таких землетрясений зарегистрировано не было. Поэтому все основные выводы о деятельности вулкана сделаны по данным одной станции – КИ.

На рис. III.7 показано количество локальных ( $2 < K_S < 6$ ) поверхностных землетрясений, 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 4500 м над кратером.



**Рис. III.7. Сейсмичность вулкана Карымский в 2014 г. по данным сейсмостанции КИ.**  
Значение меньше «0» означает отсутствие данных

На вулканах **Крестовский** и **Ушковский** в 2014 г. наблюдалась «нормальная фоновая» сейсмичность.

### 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. Дрознин Д.В., Дрознина С.Я. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Сейсмические приборы. – М.: ИФЗ РАН, 2010. – Т. 46, №3 – С. 22–34.
3. Сеньюков С.Л. Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений в 2000–2004 гг. // Вулканология и сейсмология. – 2006. – № 3. – С. 68–78.
4. Weimer S. A software package to analyze seismicity: ZMAP // Seism. Res. Lett. – 2001. – Vol. 72. – P. 373–382.
5. Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. – М.: Наука, 1972. – 117 с.
6. Part\_IV-2014. 12\_Volcano-regions-of-Kamchatka\_2014.xls // Землетрясения России в 2014 году. – Обнинск: ГС РАН, 2016. – Приложение на CD-ROM.