

### III. Результаты детального сейсмического мониторинга

#### III.1. Непрерывные наблюдения

##### III.1.1. Вулканы Камчатки

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

В 2013 г. радиотелеметрическая сеть сейсмических станций [Чебров, Дроздин и др., 2013] Камчатского филиала Геофизической службы (КФ ГС) РАН 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 вулкана Кизимен (рис. III.4). В табл. III.1 приведены сведения о вулканах, для которых проводился сейсмический мониторинг.

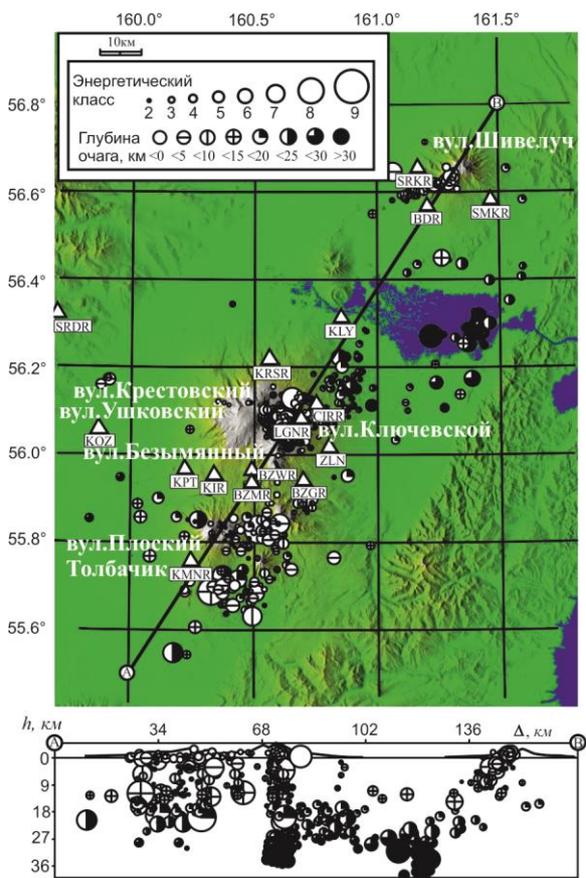


Рис. III.1. Карта эпицентров землетрясений в районе Северной группы вулканов в 2013 г. и проекция очагов на вертикальный разрез А–В

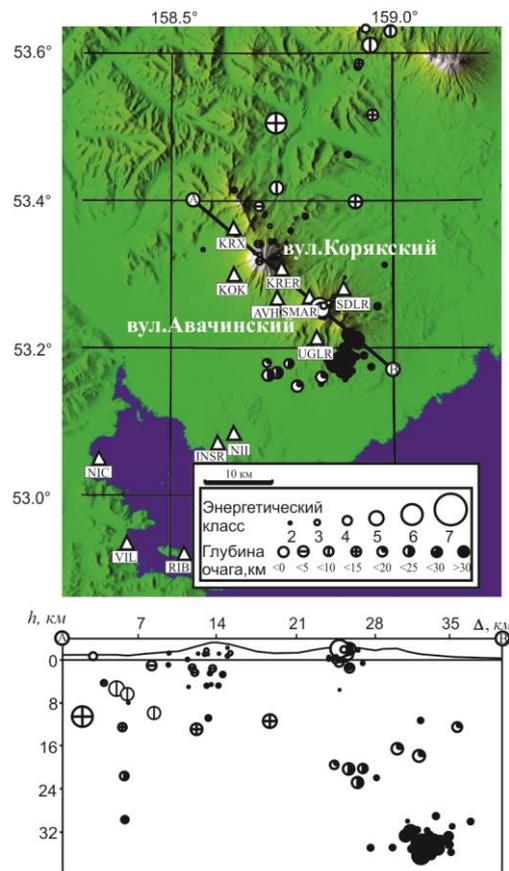


Рис. III.2. Карта эпицентров землетрясений в районе Авачинской группы вулканов в 2013 г. и проекция очагов на вертикальный разрез А–В

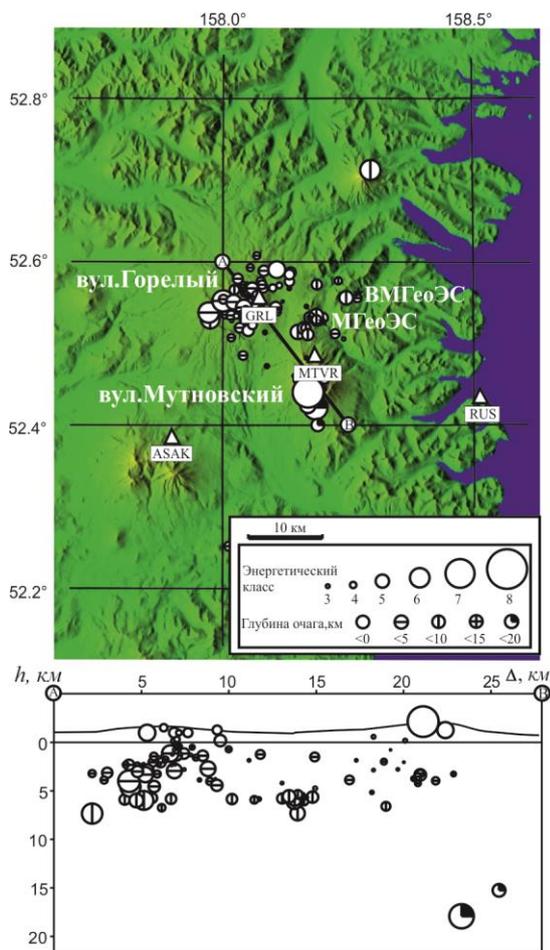


Рис. III.3. Карта эпицентров землетрясений в районе Мутновско-Гореловской группы вулканов в 2013 г. и проекция очагов на вертикальный разрез А–В

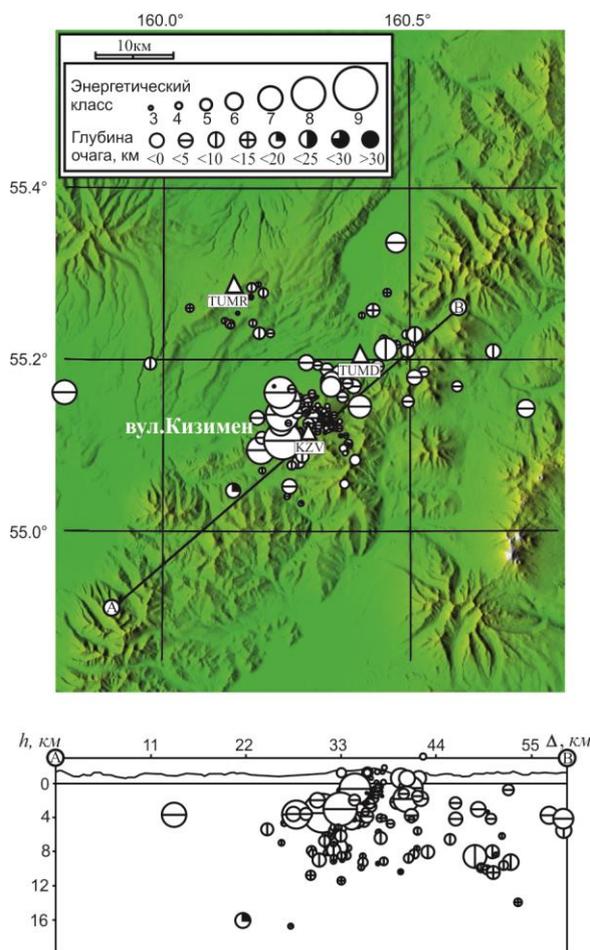


Рис. III.4. Карта эпицентров землетрясений в районе вулкана Кизимен в 2013 г. и проекция очагов на вертикальный разрез А–В

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
Карымский	54.05	159.43	1536	250	6.5

Расчет параметров вулканических событий в 2013 г. (координаты эпицентра, глубина, энергия) проводился программой «DIMAS» [Дроздин, Дроздина, 2010]. Для Северной и Авачинской групп вулканов использовались локальные годографы [Сенюков, 2006], для вулканов Мутновский, Горелый, Кизимен и Карымский – одномерная скоростная модель Камчатского региона с возможностью поиска решений положений гипочентров землетрясений выше уровня моря. Каталог для всех групп вулканов формируется в сетевой базе данных в режиме, близком к реальному времени, и доступен в Интернете [<http://www.emsd.ru/ts/>].

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  $K_S \geq 6.0$  [Федотов, 1972]), зарегистрированных удаленными от вулкана станциями, определяются кинематические и динамические параметры и помещаются в сетевую базу.

В 2013 г. в каталог Северной группы вулканов вошло 4390 землетрясений, суммарная выделившаяся энергия которых составила  $\Sigma E = \sim 1.702 \cdot 10^9$  Дж, в каталог Авачинской группы – 224 землетрясения ( $\Sigma E = \sim 4.27 \cdot 10^6$  Дж), Мутновско-Гореловской – 112 ( $\Sigma E = \sim 3.09 \cdot 10^7$  Дж). Каталог землетрясений из района вулкана Кизимен содержит 197 землетрясений ( $\Sigma E = \sim 7.04 \cdot 10^8$  Дж).

В исследуемый период высокая сейсмическая активность наблюдалась на вулканах Ключевской, Шивелуч, Толбачик 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 кратера вулкана [Чебров и др., 2013].

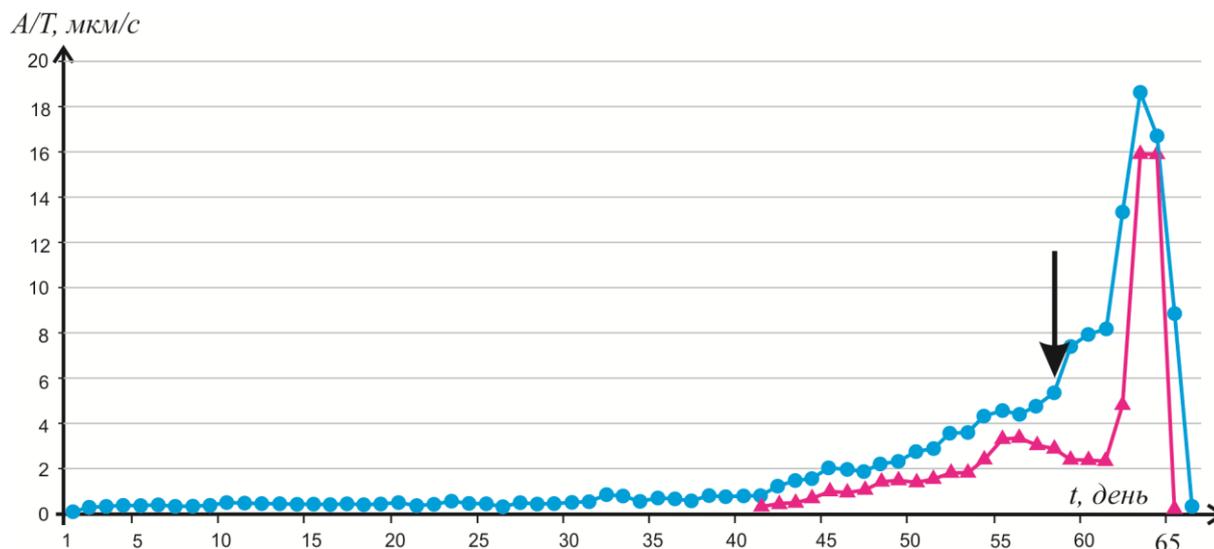
В 2013 г. продолжалось извержение вулкана Шивелуч, связанное с ростом нового купола. Извержение сопровождалось вулканическим дрожанием, газо-пепловыми выбросами, сходом пирокластических потоков и горячих лавин. В течение всего года по спутниковым данным наблюдалась термальная аномалия на растущем куполе, свидетельствующая о присутствии на поверхности горячего магматического материала. Сейсмическая активность вулкана Шивелуч, по сравнению с 2012 г., была высокой. В радиусе 12 км от вулкана было локализовано 1336 землетрясений, суммарная сейсмическая энергия которых составила  $\Sigma E = \sim 1.07 \cdot 10^8$  Дж. Представительный класс землетрясений, определенный с помощью автоматической процедуры программы ZMAP [Weimer, 2001], получился равным  $K_{пред} = 4.0$  при угле наклона графика повторяемости  $\gamma = 0.95 \pm 0.02$ .

**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 [Чебров и др., 2013]. В 2013 г. вершинное эксплозивно-эффузивное извержение вулкана началось 25 августа. 15 октября было зарегистрировано резкое увеличение амплитуды вулканического дрожания. Это послужило основанием для подачи в КФ РЭС прогноза развития извержения вулкана Ключевской до пароксизмального в следующие 30 дней. С 15 по 20 октября наблюдалось постепенное нарастание мощного извержения, закончившегося пароксизмом с выбросом раскаленного материала в виде пирокластического потока на северо-западный склон вулкана. В этот период амплитуда вулканического дрожания по станции CIRR достигала 312.44 мкм/с. В период максимальной фазы извержения были зафиксированы: 1) пепловая колонна высотой до 12 км над уровнем моря (рис. III.5) и выпадение пепла в ближайших поселках мощностью до нескольких миллиметров; 2) сход лавовых потоков из кратера в юго-западном секторе протяженностью несколько

километров; 3) грязевой поток от таяния ледника размыл дорогу в 55 км от вершины вулкана. Амплитуда дрожания резко упала 21 октября. Подобное извержение произошло 1 октября 1994 г. [Озеров и др., 1996]. Наблюдается удивительное сходство между параметрами дрожания 1994 и 2013 гг., что может свидетельствовать о совпадении масштабов этих извержений (рис. III.6). Надо отметить, что во время извержений Ключевского вулкана, произошедших в период 1994–2013 гг., амплитуда вулканического дрожания не превышала 2.1 мкм/с.



**Рис. III.5. Фотография пепловой эмиссии из кратера вулкана Ключевской 15 октября 2013 г. в 11<sup>h</sup>19<sup>m</sup> местного времени.**  
Фото Ю.В. Демянчука, ИВиС ДВО РАН



**Рис. III.6. Графики амплитуды вулканического дрожания по станции KRSR для извержений с 8 сентября по 2 октября 1994 г. (синие кружки) и с 16 августа по 21 октября 2013 г. (красные треугольники).**  
Стрелкой показана дата прогноза – 15 октября 2013 г.

В 2013 г. в радиусе 7 км от вулкана Ключевской и диапазоне глубин от кратера до 40 км ниже уровня моря было локализовано 2734 землетрясения,  $\Sigma E \sim 6.68 \cdot 10^8$  Дж. Все землетрясения, как и в предыдущие годы, условно разделены по глубине на три группы: поверхностные (локализованные в диапазоне глубин от -5 до +5 км), промежуточные (от +5 до +20 км) и глубокие (от +20 до +35 км). В 2013 г. практически вся сейсмичность была сосредоточена на глубине 20–35 км (2125 событий), где генерируется множество длиннопериодных землетрясений, в образовании которых активную роль играет магматический расплав. С помощью программы ZMAP были определены представительный класс  $K_{\text{пред}}$  и угол наклона  $\gamma$  для событий каждой группы. Для глубоких землетрясений  $K_{\text{пред}}=4.9$  при  $\gamma=2.27 \pm 0.16$ , для поверхностных (471 событие) –  $K_{\text{пред}}=4.1$  при  $\gamma=0.86 \pm 0.09$ . В промежуточном слое было локализовано всего 138 землетрясений с представительным классом  $K_{\text{пред}}=4.3$  и  $\gamma=0.86 \pm 0.08$ .

На вулкане **Безымянный** корректный сейсмический мониторинг был невозможен из-за повышенной сейсмической активности вулкана Ключевской, связанной с подготовкой к извержению и извержением. В 2013 г. в радиусе 6 км от вулкана было локализовано всего 8 землетрясений  $3.2 \leq K_S \leq 4.4$ , выделившаяся суммарная энергия которых составила  $\Sigma E \sim 0.97 \cdot 10^5$  Дж. Извержений вулкана не зафиксировано.

**Вулкан Плоский Толбачик.** Ближайшая телеметрическая станция KMNR расположена в 10 км от кратера вулкана. Продолжалось побочное Толбачинское трещинное извержение (ТТИ) преимущественно эффузивного характера, начавшееся 27 ноября 2012 г. и закончившееся в начале сентября 2013 года. Из-за сильного вулканического дрожания, регистрируемого ближайшими к вулкану станциями, корректный сейсмический мониторинг был затруднен. В 2013 г. в радиусе 20 км от вулкана было локализовано 112 землетрясений, диапазон глубин от кратера – до 24.6 км ниже уровня моря. Землетрясение с максимальным классом  $K_S=8.2$  произошло 27 сентября в 16<sup>h</sup>11<sup>m</sup> на глубине 11.9 км. Выделенная сейсмическая энергия локализованных землетрясений составила  $\Sigma E \sim 2.85 \cdot 10^8$  Дж,  $K_{\text{пред}}=4.9$ , угол наклона близок значению для региональных тектонических землетрясений  $\gamma=0.57 \pm 0.04$ .

**Вулканы Корякский и Авачинский** расположены в 25–30 км от городов Петропавловск-Камчатский и Елизово, поэтому представляют наибольшую потенциальную угрозу для населения.

В 2013 г. в каталог Авачинской группы вулканов вошло 224 землетрясения, суммарная энергия  $\Sigma E \sim 0.43 \cdot 10^7$  Дж, диапазон глубин от вершин вулканов – до 36.4 км глубины. Землетрясение с максимальным классом  $K_S=5.9$  произошло 9 февраля в 17<sup>h</sup>25<sup>m</sup> на глубине 10 км.

В исследуемый период Авачинский вулкан был спокоен, и его сейсмичность не превышала обычный «нормальный, фоновый» уровень. В радиусе 8 км от вулкана было локализовано 171 землетрясение (рис. III.2), представительный класс  $K_{\text{пред}}=2.5$ ,  $\gamma=0.5 \pm 0.06$ .

На вулкане Корякский в 2013 г. наблюдалась очень слабая сейсмичность. В радиусе 8 км от вулкана было локализовано всего 25 землетрясений с классом  $1.8 \leq K_S \leq 4.4$ .

**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 на рис. III.3).

Ближайшая к вулкану Горелый станция GRL [Чебров и др., 2013] расположена в 4 км от кратера. Регистрация станциями в течение всего года непрерывного вулканического дрожания ( $A/T_{\text{сред}}=0.36$  мкм/с по станции GRL), источником которого является вулкан Горелый, затрудняли выделение слабых сейсмических событий и определение их положения в пространстве. Всего в 2013 г. в районе Мутновско-Гореловской группы

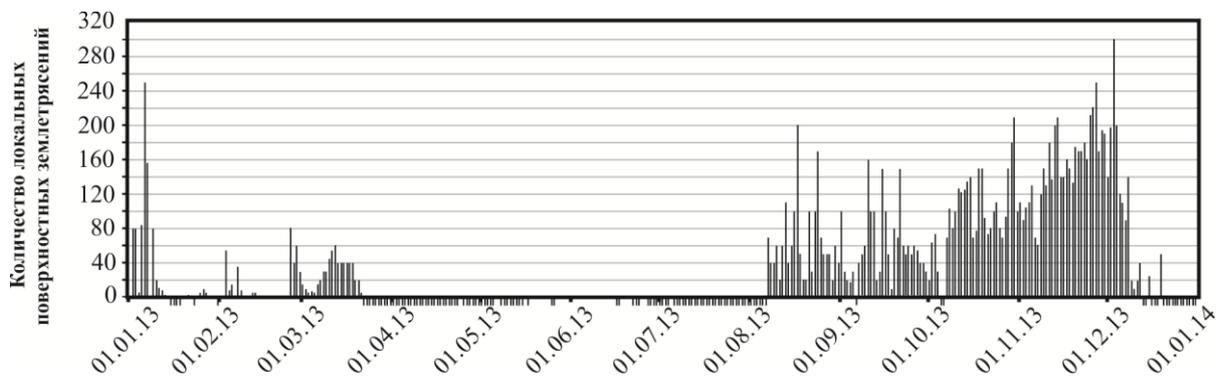
вулканов было локализовано 112 землетрясений ( $\Sigma E \sim 0.31 \cdot 10^8$  Дж). Из них в радиусе выборки 7 км от центров вулканов было локализовано 67 землетрясений на вулкане Горелый и 22 – на Мутновском. Землетрясение с максимальным классом  $K_S=7.2$  произошло 7 апреля в 01<sup>h</sup>59<sup>m</sup> в постройке вулкана Мутновский ( $h=-2.1$  км).

В 2013 г. на вулканах Горелый и Мутновский наблюдалась вулканическая активность только в виде фумарольной деятельности.

**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.4). В 2013 г. в районе вулкана Кизимен наблюдалась слабая сейсмичность, было локализовано всего 197 землетрясений, суммарная выделившаяся энергия которых составила  $\Sigma E \sim 7.04 \cdot 10^8$  Дж. Землетрясение с максимальным классом  $K_S=8.5$  произошло на глубине 3.6 км под постройкой вулкана 25 марта в 14<sup>h</sup>08<sup>m</sup>. Для землетрясений ( $N=168$ ), локализованных в радиусе 15 км от вулкана, были определены представительный класс  $K_{пред}=4.1$  и  $\gamma=0.42 \pm 0.05$ .

В 2013 г. продолжалось извержение вулкана Кизимен, которое сопровождалось истечением вязкого лавового потока и пепловыми выбросами высотой до 4500 м над уровнем моря.

**Вулкан Карымский** продолжал извергаться. Ближайшая станция КП расположена на юго-восточном склоне в 1.5 км от кратера [Чебров и др., 2013]. 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 – КП. На рис. III.7 показано количество локальных ( $2 < K_S < 6$ ) поверхностных землетрясений, большинство из которых – взрывы в кратере.



**Рис. III.7. Сейсмичность вулкана Карымский в 2013 г. по данным сейсмостанции КП.**  
Значение меньше «0» означает отсутствие данных

Гистограмма (рис. III.7) наглядно показывает периоды усиления и спада активности вулкана. Во время активизации регистрировались события, сопровождавшие газопепловые выбросы высотой до 4500 м над кратером.

На вулканах **Крестовский** и **Ушковский** наблюдалась «нормальная, фоновая» сейсмичность.