

IV. СЕЙСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ВУЛКАНОВ

УДК 550.348.438 (517.66)

ВУЛКАНЫ КАМЧАТКИ

С.Л. Сениуков, И.Н. Нурждина

Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия, ssl@emsd.ru

Аннотация. Приведены результаты мониторинга активности действующих вулканов Камчатки по данным следующих наблюдений: 1) непрерывное слежение за сейсмичностью вулканов по данным радиотелеметрических сейсмических станций в режиме, близком к реальному времени; 2) визуальные и видеонаблюдения; 3) контроль термальных аномалий и пепловых выбросов по спутниковым данным. Информация об активности вулканов с февраля 2000 г. доступна в Интернете по адресу: <http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>. Дан анализ сейсмической активности в районах Северной (Шивелуч, Ключевской, Безымянный, Плоский Толбачик, Ушковский и Крестовский), Авачинской (Авачинский и Корякский), Мутновско-Гореловской (Мутновский и Горелый) групп вулканов и вулканов Кизимен и Жупановский за год. В 2013 г. в районе Северной группы локализовано 4390 землетрясений с $K_S=3.0-8.5$, Авачинской – 213 с $K_S=1.8-5.7$, Мутновско-Гореловской – 110 с $K_S=2.7-7.2$, 199 землетрясений с $K_S=3.0-8.5$ вблизи влк. Кизимен и 22 с $K_S=3.7-6.7$ – влк. Жупановский. Приведены карты эпицентров, дано распределение землетрясений по энергетическим классам, рассчитано общее количество выделившейся сейсмической энергии. По данным всех видов наблюдений зафиксированы и детально прослежены все периоды активизаций вулканов в 2013 г.: интенсивная вулканическая деятельность влк. Шивелуч, связанная с ростом нового купола, субплинианское вершинное извержение влк. Ключевской, сейсмическая и вулканическая активизация влк. Жупановский после 56-летнего периода покоя, а также завершение мощных продолжительных извержений вулканов Плоский Толбачик и Кизимен.

Ключевые слова: сейсмическая активность действующих вулканов, визуальные и видеонаблюдения, энергетический класс K_S , сейсмическая энергия, график повторяемости землетрясений.

DOI: 10.35540/1818-6254.2019.22.43

Для цитирования: Сениуков С.Л., Нурждина И.Н. Вулканы Камчатки // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – С. 485–501. doi: 10.35540/1818-6254.2019.22.43

В 2013 г. был продолжен мониторинг активности вулканов Камчатки. Положение активных вулканов, описание различных видов наблюдений, с помощью которых проводился мониторинг, его цели и задачи представлены в работе [1]. Для сейсмического мониторинга вулканов использовались станции радиотелеметрической сети (РТСС) Камчатского филиала Геофизической службы (КФ ФИЦ ЕГС) РАН [2–5]. Существующая в 2013 г. сеть позволяла проводить для Северной (влк. Шивелуч, Ключевской, Безымянный, Плоский Толбачик, Ушковский и Крестовский), Авачинской (влк. Авачинский, Корякский), Мутновско-Гореловской (влк. Горелый и Мутновский) групп вулканов, а также для влк. Кизимен и влк. Жупановский детальные наблюдения в режиме, близком к реальному времени.

К вулканическим землетрясениям принято относить события, происходящие в земной коре вблизи вулканов в диапазоне глубин $h=-5.0-40$ км. В 2013 г. для расчета их параметров применялась, как и ранее, программа «DIMAS» [6] с возможностью поиска решений положений гипоцентров землетрясений выше уровня моря. Для Северной и Авачинской групп вулканов использовались локальные годографы [1], для Мутновско-Гореловской группы, вулканов Кизимен и Жупановский при расчете положений гипоцентров использовалась одномерная скоростная модель Камчатского региона [7].

Ниже приведены данные о сейсмической активности Северной, Авачинской, Мутновско-Гореловской групп вулканов и отдельно вулканов Кизимен и Жупановский. Анализируются сейсмические события из районов, ограниченных координатами для «Северной группы» вулканов: $\varphi=55.54-56.80^\circ\text{N}$, $\lambda=159.82-161.60^\circ\text{E}$; «Авачинской группы»: $\varphi=53.10-53.40^\circ\text{N}$,

$\lambda=158.50-159.00^{\circ}\text{E}$; «Мутновско-Гореловской группы»: $\varphi=52.30-52.70^{\circ}\text{N}$, $\lambda=157.70-158.40^{\circ}\text{E}$; «района влк. Кизимен»: $\varphi=54.90-55.54^{\circ}\text{N}$, $\lambda=159.82-160.80^{\circ}\text{E}$ и «района влк. Жупановский»: $\varphi=53.40-53.90^{\circ}\text{N}$, $\lambda=158.70-159.65^{\circ}\text{E}$. Все события сгруппированы в пять каталогов [8–12], включающих 4390 землетрясений по Северной группе [8], 213 – по Авачинской [9], 110 – по Мутновско-Гореловской [10], 199 – по влк. Кизимен [11] и 22 – по влк. Жупановский [12]. В соответствии с принятой системой разделения каждому землетрясению в каталогах [8–12] присвоено название соответствующего вулкана, если оно произошло в пределах установленного радиуса выборки для этого вулкана. Если землетрясение локализовано в вулканическом районе, но вне радиусов выборок, то в каталогах, а также ниже по тексту статьи в соответствующих таблицах оно обозначалось «вне вулканов».

Северная группа вулканов. Каталог землетрясений Северной группы вулканов за 2013 г. [8] содержит 4390 землетрясений I–III типов [13]. Карта эпицентров землетрясений и условные зоны сейсмичности рассматриваемых вулканов показаны на рис. 1.

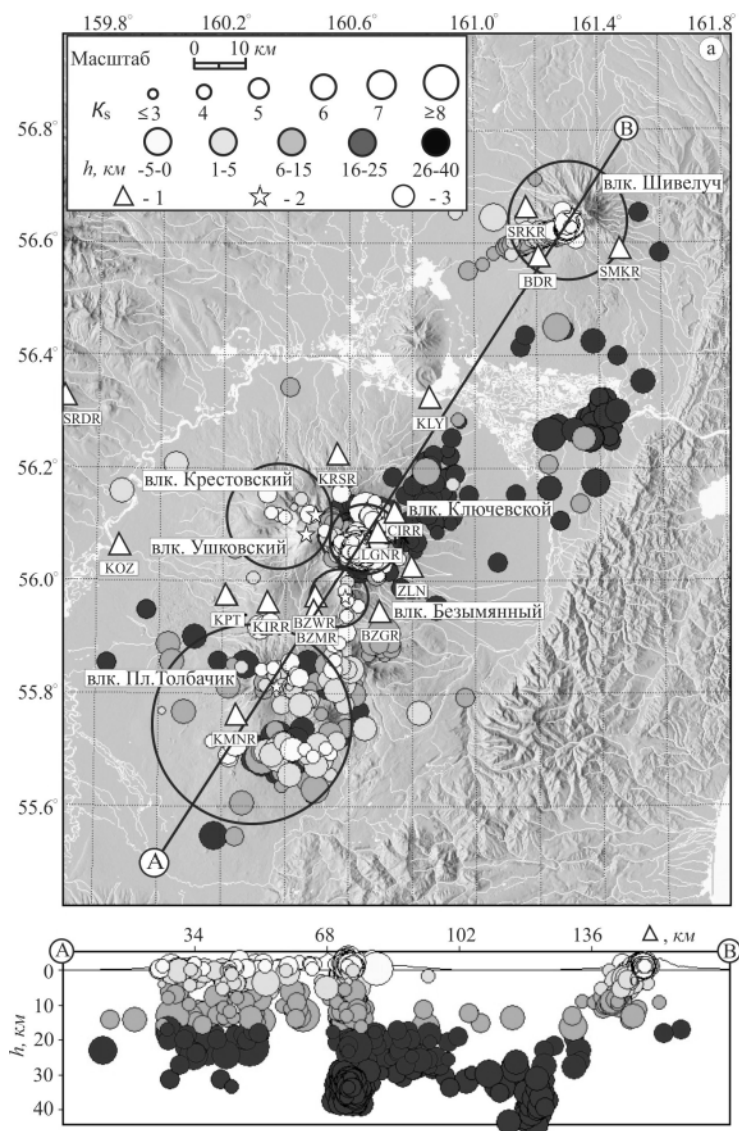


Рис. 1. Карта эпицентров (а) землетрясений Северной группы вулканов за 2013 г. и проекция гипоцентров (б) на вертикальную плоскость, проходящую по линии А–В

1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан; 3 – окружность, оконтуривающая область выборки землетрясений, принадлежащих вулкану. Радиусы областей для разных вулканов равны: Шивелуч – 12 км, Ключевской – 7 км, Крестовский и Ушковский – 10.1 км, Безымянный – 6 км, Плоский Толбачик – 20 км.

Распределение землетрясений по вулканам и по энергетическим классам [14] представлено в табл. 1.

Таблица 1. Распределение числа землетрясений по энергетическим классам K_S и суммарная сейсмическая энергия землетрясений в районе Северной группы вулканов в 2013 г.

Название вулкана	$R_{\text{зоны}},$ км	K_S						N_{Σ}	$\Sigma E,$ 10^8 Дж
		3	4	5	6	7	8		
Безымянный	6	2	6					8	0.001
Ключевской	7		521	1997	211	4	4	2737	6.667
Плоский Толбачик	20	14	40	30	18	9	1	112	2.854
Шивелуч	12	1	889	406	35	5		1336	1.07
Крестовский и Ушковский	10.1	1	9	3	1			14	0.013
Вне вулканов			35	98	41	6	3	183	5.918
Всего		18	1500	2534	306	24	8	4390	16.523

Из анализа табл. 1 следует, что в 2013 г. суммарное число землетрясений, локализованных в районе Северной группы вулканов, составило $N_{\Sigma}=4390$, суммарная энергия – $\Sigma E=1.65 \cdot 10^9 \text{ Дж}$ (табл. 1), тогда как в 2012 г. было $N_{\Sigma}=7638$, $\Sigma E=2.2 \cdot 10^{11} \text{ Дж}$ [15], т.е., было локализовано землетрясений ~ в 2 раза меньше и суммарное количество высвобожденной ими энергии снизилось более чем на два порядка. Снижение сейсмической активности района Северной группы вулканов связано с завершением мощного Толбачинского трещинного извержения имени 50-летия Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (ТТИ-50).

Наиболее активной по числу землетрясений в 2013 г., как и в предыдущем 2012 г. ($N_{\Sigma}=5983$) [15], была зона влк. Ключевской. Здесь произошло 62 % землетрясений от общего числа событий, вошедших в каталог. Также нужно выделить высокую сейсмическую активность зоны влк. Шивелуч, где было локализовано в ~ 4 раза больше землетрясений, чем в 2012 г. ($N_{\Sigma}=340$) [15], что составило 30 % от общего количества землетрясений Северной группы. Для построения графика повторяемости и определения угла его наклона использовался пакет программ ZMAP [16]. Из графика следует, что в 2013 г. представительными для района Северной группы вулканов являются землетрясения с $K_{\min}=4.8$, т.е. уровень энергии надежной регистрации увеличился по сравнению с таковым в 2012 г. ($K_{\min 2012}=4.0$) [15]. До конца августа 2013 г. продолжалось мощное извержение ТТИ-50, а в сентябре началось извержение влк. Ключевской. Оба извержения сопровождались сильным вулканическим дрожанием (ВД), максимальная величина которого достигала 13.9 мкм/с (на станции «Каменистая» (KMNR)) на влк. Толбачик и 312.4 мкм/с (станция «Цирк» (CIRR)) на влк. Ключевской. Из-за высокого уровня непрерывного ВД обработать слабые землетрясения было невозможно, что привело к повышению значения K_{\min} . Наклон графика повторяемости в 2013 г. для землетрясений Северной группы вулканов получился более крутым $\gamma=1.07 \pm 0.07$ по сравнению с таковым в 2012 г. ($\gamma=0.74$), но близким к среднему значению, определенному по данным за 2000–2012 гг. ($\gamma=0.99$) [15, 17–18]. Землетрясение с максимальным классом $K_S=8.5$ произошло 15 февраля в $04^{\text{h}}29^{\text{m}}$ на глубине $h=19.8 \text{ км}$ в районе р. Толуд Толбачинского Дола [8].

Ниже приводится описание активности шести вулканов Северной группы по инструментальным и визуальным наблюдениям.

Вулкан Шивелуч. Конфигурация сети сейсмических станций (рис. 1 а) позволяет регистрировать без пропусков землетрясения из района влк. Шивелуч, начиная со значения $K_{\min}=4.0$ [18].

В 2013 г. на влк. Шивелуч наблюдалась высокая сейсмическая активность (табл. 1). Число землетрясений ($3.4 \leq K_S \leq 6.6$), локализованных в радиусе 12 км и диапазоне глубин $h= -1.7-12.8 \text{ км}$ (рис. 2 а, б), а также высвобожденная ими энергия по сравнению с таковыми в 2012 г. ($N=340$, $\Sigma E=0.3 \cdot 10^8 \text{ Дж}$) выросли ~ в 4 раза [15]. Представительный класс, рассчитанный по программе ZMAP [16], понизился до $K_{\min}=4.0$ по сравнению с таковым в 2012 г. ($K_{\min}=4.6$), а вот наклон графика повторяемости $\gamma=0.95 \pm 0.02$ практически не изменился ($\gamma=1.04$) [15]. Землетрясения с максимальным классом $K_S=6.6$ произошли 13 февраля в $09^{\text{h}}44^{\text{m}}$, 17 февраля в $20^{\text{h}}03^{\text{m}}$, 10 апреля в $21^{\text{h}}58^{\text{m}}$, 19 октября в $17^{\text{h}}59^{\text{m}}$ в постройке вулкана и 27 октября в $12^{\text{h}}55^{\text{m}}$ на глубине $h=2.3 \text{ км}$ под юго-западным склоном [8]. В течение года было зарегистрировано четыре кратковременных всплеска сейсмической активности 10–12 апреля ($N=75$), 2–9 июня ($N=227$), 3–5 июля ($N=44$), и 14–27 ноября ($N=135$). Максимальное количество землетрясений ($N=41$) за сутки было локализовано 6 июня (рис. 2 б) [8].

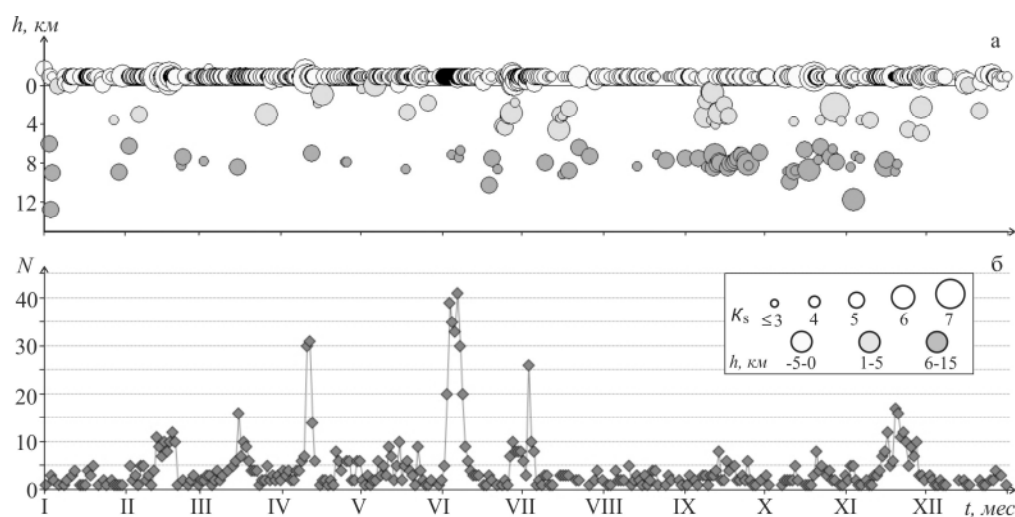


Рис. 2. Изменение во времени глубины гипоцентров h (а) и числа N (б) вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 12 км от влк. Шивелуч в 2013 г.

В исследуемый период продолжалось экструзивно-эксплозивное извержение влк. Шивелуч, которое началось еще в декабре 2006 года. По-прежнему в течение всего года на спутниковых снимках регистрировалась термальная аномалия (рис. 3 а), свидетельствующая о присутствии на поверхности горячего материала, а по видео наблюдениям фиксировались пепловые выбросы (рис. 3 б). В зависимости от уровня сейсмической и вулканической активности вулкана ежедневно ему присваивался цветовой код опасности (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>). Максимальный уровень опасности «красный» объявлялся в 2013 г. на восемь дней, из них в трех случаях (4 марта, 18 октября и 3 декабря) по видеоданным были зафиксированы газо-пепловые выбросы высотой более 8 км над уровнем моря (рис. 3 б). В остальных пяти случаях (26 июня, 26 июля, 30 октября, 17 и 28 декабря) высота 8 км и более оценивалась по сейсмическим данным по методике [19]. Это случаи, когда высоту эксплозии было невозможно определить из-за облачности над вулканом или темного времени суток. Во время извержения 26 июня спутниковых снимков не было, но в пос. Ключи наблюдался пеплопад. Все остальные пепловые выбросы подтверждены спутниковыми данными, которые предоставляет Аляскинская Вулканологическая Обсерватория на своем сайте: <https://volcview.wr.usgs.gov/>. Обработка данных осуществляется сотрудниками лаборатории исследований сейсмической и вулканической активности (ЛИСВА).

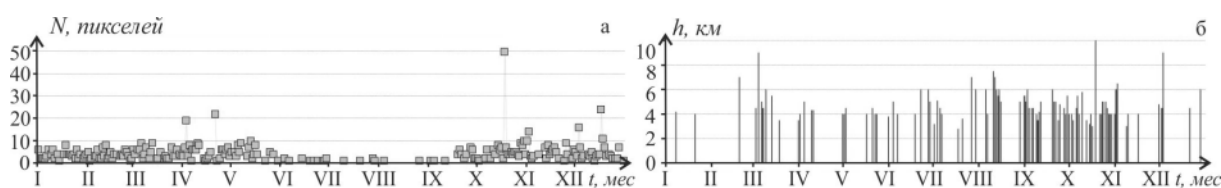


Рис. 3. Изменение во времени размера термальной аномалии на влк. Шивелуч по данным спутников NOAA16 и NOAA17 (а); высота газо-пепловых выбросов над уровнем моря по видеоданным и визуальным наблюдениям сотрудников сейсмической станции «Ключи» (б) в 2013 г.

«Оранжевый» код опасности в исследуемый период присваивался влк. Шивелуч в течение 249 дней, когда высота пепловой эмиссии по сейсмическим данным превышала 1 км над куполом, но была меньше 8 км над уровнем моря. Из них 90 пепловых выбросов было подтверждено видеонаблюдениями и 36 – спутниковыми наблюдениями, остальные не зафиксированы из-за облачности в районе вулкана или отсутствия космических снимков по техническим причинам. Следует отметить, что одним из обязательных условий обнаружения пепловых облаков по спутниковым наблюдениям является превышение высоты пеплового выброса над метеорологическими облаками.

Сравнение дней с одинаковым цветовым кодом позволяет сделать вывод о более высокой активности влк. Шивелуч в 2013 г. по сравнению с таковой в 2012 г. («красный» – 14 дней; «оранжевый» – 67) [15].

Вулкан Ключевской. Существующая сеть станций (рис. 1) позволяет локализовать при благоприятных условиях землетрясения, начиная с $K_S \geq 4.0$ [18]. Ближайшая телеметрическая станция «Логинов» (LGNR) расположена в 4 км от кратера и может регистрировать землетрясения в районе кратера с классом $K_S \geq 2.2$. В 2013 г. в радиусе 7 км от влк. Ключевской и диапазоне глубин $h = -3.9-34.5$ км было локализовано 2737 землетрясений (табл. 1), это в 2.2 раза меньше, чем в 2012 г. ($N=5983$, $\Sigma E=0.38 \cdot 10^9$ Дж) [15]. Но суммарная энергия, высвобожденная в очагах этих землетрясений, превысила таковую в 2012 г. в 1.8 раза (табл. 1). Причиной такого соотношения является локализация в 2013 г. четырех землетрясений с относительно высоким энергетическим классом $7.6 \leq K_S \leq 7.9$. Карта эпицентров и проекция гипоцентров на вертикальный разрез представлены на рис. 1, а графики изменения во времени параметров сейсмической активности вулкана – на рис. 4. Характер сейсмичности Ключевского вулкана связан с притоком мантийных магм в промежуточный магматический очаг на глубинах $h=20-35$ км и дальнейшим их подъемом в постройку вулкана при вершинном извержении [20–22]. Поэтому все землетрясения в 2013 г., как и в предыдущие годы, были разделены по трем слоям: поверхностные (I → $-5.0 \leq h \leq 5.0$ км); промежуточные (II → $5.0 < h \leq 20.0$ км) и глубокие (III → $20 < h < 40.0$ км) [20–23].

В 2013 г., как и в предыдущем 2012 г., практически вся сейсмичность влк. Ключевской была сосредоточена в нижнем (III) горизонте (рис. 4 а), где генерируются глубокие длиннопериодные землетрясения, в образовании которых активную роль играет магматический расплав [23]. Всего в каталог вошло $N=2127$ ($4.0 \leq K_S \leq 7.6$) глубоких землетрясений, максимальное количество $N=186$ за сутки было локализовано 7 апреля (рис. 4 б).

В слоях I и II происходят, главным образом, вулcano-тектонические землетрясения, возникающие в твердой среде в результате хрупкого разрушения пород под действием сдвиговых и растягивающих напряжений, создаваемых активными магматическими процессами [20]. В 2013 г. было локализовано поверхностных (I) землетрясений $N=470$ ($3.6 \leq K_S \leq 7.9$) и $N=140$ ($3.6 \leq K_S \leq 7.9$) – в промежуточном слое (II).

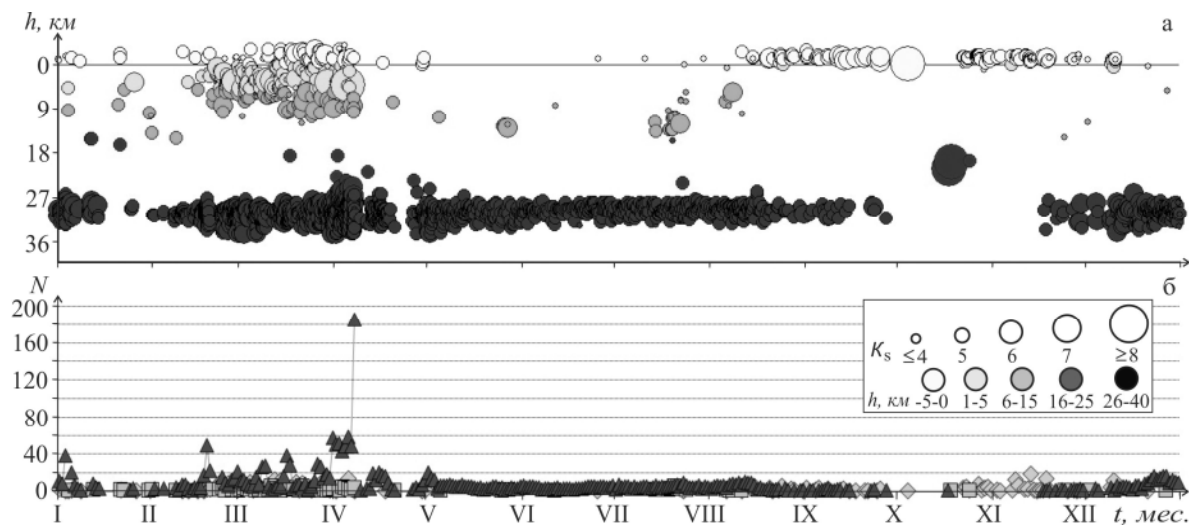


Рис. 4. Изменение во времени глубины гипоцентров h вулканических землетрясений (а), ежесуточного числа поверхностных (ромб), промежуточных (квадрат) и глубоких (треугольник) землетрясений (б), произошедших в радиусе 7 км от влк. Ключевской в 2013 г.

С помощью пакета программ ZMAP [16] были определены значения K_{\min} и угол наклона графика повторяемости для землетрясений в каждом слое. Для поверхностного слоя в 2013 г. представительный класс получился равным $K_{\min}=4.1$ при угле наклона $\gamma=0.78 \pm 0.05$, т.е. по сравнению с 2012 г. ($K_{\min}=4.0$, $\gamma=0.66$) и 2011 г. ($K_{\min}=4.0$, $\gamma=0.73$) эти параметры практически не изменились. Для глубоких землетрясений ($h=20-40$ км) представительный класс в 2013 г. повысился до $K_{\min}=4.9$, а угол наклона стал более крутым $\gamma=1.5 \pm 0.08$ по сравнению с 2012 г. ($K_{\min}=4.0$, $\gamma=0.96$). Среднее значение угла наклона, определенное по данным за 2000–2012 гг., составило $\gamma=1.13$ [15, 17–18]. Для промежуточного слоя представительный класс получился $K_{\min}=4.3$ при угле наклона $\gamma=0.74 \pm 0.07$.

Извержение влк. Ключевской по сейсмическим данным началось 15 августа в 06^h30^m, когда было зарегистрировано резкое усиление амплитуды вулканического дрожания. Подъем центра выделенной сейсмической энергии с глубины ~ 30 км к кратеру, появление и увеличение количества землетрясений IV типа [13] (взрывов газов), регистрация вулканического дрожания и нарастание его амплитуды, а также появление и рост интенсивности термальной аномалии в центральном кратере по спутниковым данным указывали на подготовку вершинного извержения [22]. С 26 августа началось излияние лавового потока на западный склон вулкана, и в дальнейшем наблюдалось усиление эксплозивно-эффузивного извержения и сопутствующего ему ВД. Амплитуда дрожания стала резко расти после 1 октября, превысив уровень, зарегистрированный в предыдущих извержениях 2000–2012 гг. Динамика роста вулканического дрожания была подобна динамике роста перед пароксизмальным извержением в 1994 г. (рис. 5). На основании этого, 15 октября в 00 часов (стрелка на рис. 5) был сделан успешный прогноз усиления вершинного извержения до субплинианского, с высотой пепловых выбросов до 13 км над уровнем моря и излиянием мощных лавовых и грязевых потоков. Уже через 5 часов после объявления прогноза высота пепловой эмиссии увеличилась с 2 км до 5 км над кратером, а через 7 часов – до 7 км (или 12 км над уровнем моря). В период максимальной фазы извержения 15–20 октября были зафиксированы: пепловая колонна высотой до 12 км над уровнем моря; выпадение пепла в ближайших поселках мощностью до нескольких миллиметров; сход лавовых потоков протяженностью несколько километров; грязевой поток, размывший дорогу в 55 км от вершины вулкана. 21 октября извержение влк. Ключевской пошло на убыль – вулканическое дрожание резко упало, так же, как и после пароксизма в 1994 году.

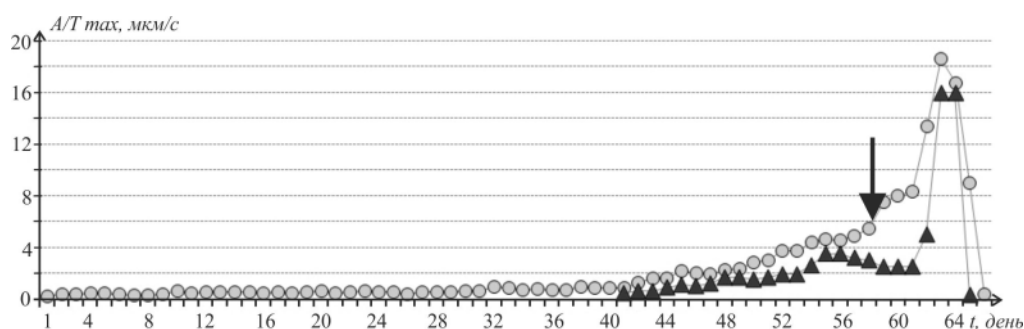


Рис. 5. Изменение во времени максимальной амплитуды вулканического дрожания при извержениях влк. Ключевской в сентябре 1994 г. (треугольники) и в октябре 2013 г. (кружки) по станции «Крестовский» (KRSR) (стрелкой показано время прогноза)

В 2013 г. на влк. Ключевской «красный» код опасности выставлялся на восемь дней (15–20 октября и 17, 19 ноября). В эти дни по сейсмическим данным регистрировалось мощное ВД до 134–312 мкм/с на станции «Цирк» (CIRR), а по видео, визуальным и спутниковым наблюдениям регистрировались пепловые выбросы на высоту 8–12 км над уровнем моря. «Оранжевый» код опасности в исследуемый период присваивался вулкану в течение 56 дней, когда были зафиксированы пепловые выбросы до 8 км над уровнем моря или лавовый поток. В состоянии опасности «желтого» кода влк. Ключевской находился 74 дня. В эти дни зарегистрировано либо более 100 сейсмических событий IV типа [13], у которых невозможно уверенно выделить объемные волны, или локализовано более 50 глубоких землетрясений (рис. 4), или наблюдалось свечение над кратером.

Вулкан Безымянный. Ближайшая телеметрическая станция «Безымянный» (BZMR), расположенная в 7 км от растущего купола, позволяет регистрировать землетрясения с $K_S \geq 2.9$.

В 2013 г. из-за высокой сейсмической активности во время извержений вулканов Плоский Толбачик и Ключевской был невозможен корректный сейсмический мониторинг влк. Безымянный, и в это время для него выставлялся «белый» код (319 дней). «Желтый» код присваивался вулкану на три дня в течение года. Из них два – по сейсмическим данным, когда в постройке вулкана регистрировалось землетрясение с $K_S \geq 4.0$, и один – по температуре термальной аномалии, превышающей фон на 20 градусов на спутниковых снимках.

Всего в 2013 г. в радиусе 6 км от вершины и диапазоне глубин $h = -1.9$ –3 км было локализовано $N=8$ ($3.2 \leq K_S \leq 4.4$, $\Sigma E = 0.001 \cdot 10^8$ Дж) землетрясений (табл. 1) [8]. Эксплозивных извержений по сейсмическим, видео и спутниковым наблюдениям не зафиксировано.

Вулкан Плоский Толбачик. Ближайшая телеметрическая станция «Каменистая» (KMNR) расположена в 10 км от кратера вулкана (рис. 1) и регистрирует землетрясения с $K_S \geq 3.3$. В 2013 г. в районе вулкана было локализовано 122 землетрясения с $3.0 \leq K_S \leq 8.2$ (табл. 1) в диапазоне глубин $h = -2.6 - 24.6$ км [8], (рис. 6). Суммарная энергия, выделившаяся в очагах землетрясений в 2013 г., составила $\Sigma E = 2.85 \cdot 10^8$ Дж (табл. 1). Таким образом, количество локализованных землетрясений уменьшилось ~ в 7 раз, а суммарная их энергия – в 759 раз, по сравнению с таковыми в 2012 г. ($N = 797$, $\Sigma E = 2.2 \cdot 10^{11}$ Дж). Тогда на вулкане регистрировалась высокая сейсмическая активность, связанная с подготовкой и началом мощного ТТИ-50 [15, 24]. Уровень K_{\min} , рассчитанный по программе ZMAP, соответствует классу $K_{\min} = 4.1$, угол наклона графика повторяемости $\gamma = 0.40 \pm 0.06$. Наклон графика практически не меняется на протяжении многих лет и достаточно близок к среднегололетнему значению для региональных тектонических землетрясений ($\gamma = 0.500 \pm 0.003$) [25].

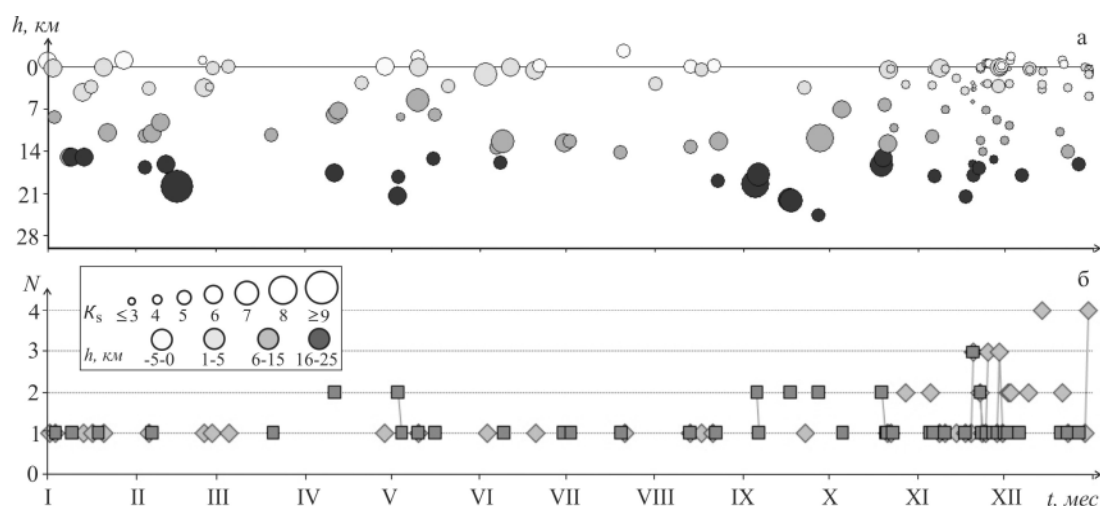


Рис. 6. Изменение во времени глубины гипоцентров h вулканических землетрясений (а); ежесуточного числа поверхностных $-5.0 \leq h \leq 5.0$ км (ромб) и глубоких $5.0 < h \leq 40.0$ км (квадрат) землетрясений (б), произошедших в радиусе 20 км от влк. Плоский Толбачик в 2013 г.

В 2013 г. продолжалось ТТИ-50 с излиянием протяженных, мощных лавовых потоков. По сейсмическим данным извержение сопровождалось непрерывным ВД, максимальная амплитуда $A/T_{\max} = 13.9$ мкм/с была зарегистрирована 17 января. С 23 августа вулканическая и сейсмическая активности пошли на убыль, и извержение вулкана завершилось. В 2013 г. для влк. Плоский Толбачик самый высокий уровень опасности был «оранжевый», он присваивался вулкану в течение 227 дней. Из них по сейсмическим данным – на 181 день, когда по станции KMNR регистрировалось ВД с $A/T_{\max} \geq 3.0$ мкм/с, а остальные 46 – по видео данным, зафиксировавшим излияние лавовых потоков. «Желтый» код в течение года выставлялся на 93 дня, из них 54 – при регистрации ВД с $0.5 \leq A/T_{\max} < 3.0$ и 39 – по спутниковым данным при регистрации термальной аномалии.

Вулканы Ушковский и Крестовский. Сеть сейсмических станций позволяет локализовать землетрясения с занесением в каталог, начиная с $K_{\min} = 4.0$. Ближайшие телеметрические станции «Крестовский» (KRSR) и «Логинов» (LGNR) расположены в 12 км от вершины влк. Крестовский и регистрируют землетрясения с $K_S \geq 3.5$. В 2013 г. в пределах окружности радиусом $R = 10.1$ км, включающей оба вулкана (рис. 1), было локализовано всего 14 землетрясений с $3.2 \leq K_S \leq 6.0$, в диапазоне глубин $h = -1.4 - 21.0$ км [8]. Такого количества событий недостаточно для расчета представительного класса K_{\min} и угла наклона графика повторяемости γ . Землетрясение с максимальным классом $K_S = 6.0$ произошло 27 марта в 06^h55^m под постройкой влк. Крестовский ($h = 8.2$ км) [8]. Карта эпицентров и проекция гипоцентров на вертикальный разрез даны на рис. 1. В 2013 г. никаких проявлений вулканической активности не отмечено.

Авачинская группа вулканов. В Авачинскую группу вулканов входят два действующих вулкана: Авачинский и Корякский. Из всех вулканов они представляют наибольшую потенциальную опасность, т.к. расположены в 30 км от наиболее густонаселенных городов Камчатки – Петропавловска-Камчатского и Елизово.

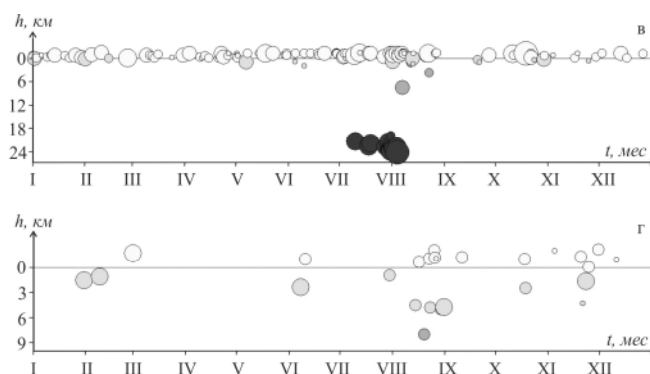
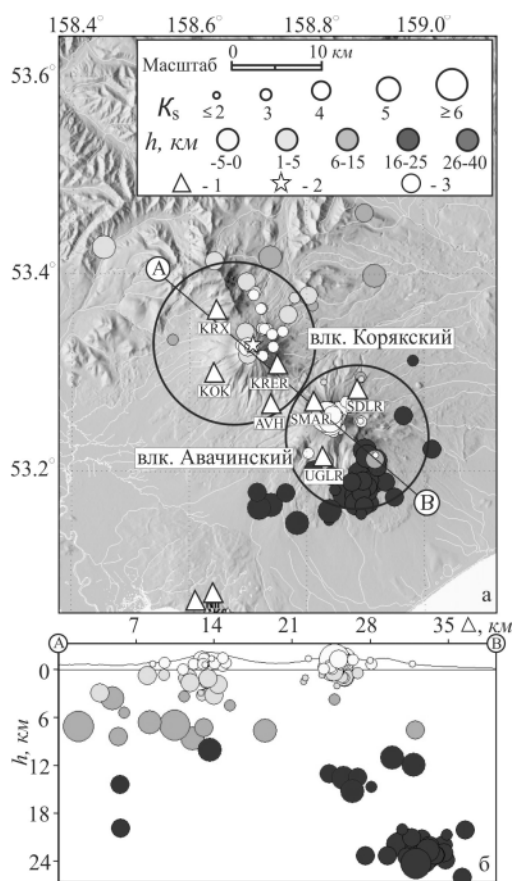


Рис. 7. Карта эпицентров землетрясений Авачинской группы вулканов в 2013 г. (а) и проекция гипоцентров на вертикальный разрез по линии А–В (б), а также изменение во времени параметров вулканических землетрясений Авачинского (в) и Корякского (г) вулканов в 2013 г.

1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан; 3 – окружность, ооконтуривающая область выборки землетрясений вокруг Авачинского ($R=8$ км) и Корякского вулканов ($R=9$ км).

Как уже было сказано ранее, координаты гипоцентров землетрясений в районе Корякского и Авачинского вулканов рассчитывались с использованием одномерной скоростной модели среды для влк. Авачинский [1]. А для сейсмических событий, расположенных в плане вне этих вулканов, приблизительно за пределами изогипсы 400 м, использовался в расчетах обычный региональный годограф [7]. Карта эпицентров и проекция гипоцентров на вертикальный разрез даны на рис. 7. **Таблица 2.** Распределение землетрясений Авачинской группы вулканов по энергетическим классам K_S в 2013 г.

Название вулкана	$R_{зоны}, км$	K_S					N_{Σ}	$\Sigma E, 10^6 Дж$
		2	3	4	5	6		
Авачинский	8	44	70	43	13	1	171	2.494
Корякский	9	4	17	4			25	0.081
Вне вулканов		1	4	7	5		17	0.484
Всего		49	91	54	18	1	213	3.059

В 2013 г. в районе Авачинской группы вулканов в диапазоне глубин $h=-2.2-36.4$ км было локализовано $N=213$ землетрясений с $K_S=1.8-5.7$ [9], суммарная энергия которых равна $\Sigma E=3.06 \cdot 10^6 Дж$ (табл. 2). Эти значения немного выше аналогичных в 2012 г. ($N=169, \Sigma E=2.01 \cdot 10^6 Дж$) ~ в 1.3 и 1.5 раза соответственно [15]. В 2013 г. землетрясение с максимальным классом $K_S=5.7$ произошло в постройке ($h=-1.9$ км) Авачинского вулкана 19 октября в 01^h42^m [9].

Уровень надежной регистрации землетрясений Авачинской группы вулканов в 2013 г. $K_{min}=2.5$ улучшился по сравнению с 2012 г. ($K_{min}=2.9$) и 2011 г. ($K_{min}=2.7$) [15]. Угол наклона графика повторяемости практически не меняется последние годы. В 2013 г. он был равен $\gamma=0.51 \pm 0.07$, а среднее его значение за период 2006–2012 гг. $\gamma=0.63$ [15, 17, 18]. На рис. 7 в, г представлены распределения во времени значений энергетического класса K_S и глубины землетрясений для каждого вулкана.

В 2013 г. в радиусе 8 км от кратера влк. Авачинский и в диапазоне глубин $h=-2.2-36.4$ км было локализовано 171 землетрясение с $K_S=1.8-5.7$ (рис. 7 в, табл. 2). Представительный класс для землетрясений влк. Авачинский составил $K_{min}=2.5$ при угле наклона графика повторяемости $\gamma=0.43 \pm 0.03$. На влк. Корякский в 2013 г., в радиусе 9 км от вершины вулкана и в диапазоне

глубин $h = -2.2-8.1$ км было локализовано всего 25 землетрясений с $K_S = 1.8-4.4$ (рис. 7 г, табл. 2) [9].

Сейсмичность Авачинской группы вулканов соответствует «фоновой». Вулканическая активность проявлялась только в виде фумарольной деятельности.

Мутновско-Гореловская группа (рис. 8). В 2013 г. в районе Мутновско-Гореловской группы было локализовано $N=110$ землетрясений в диапазоне глубин $h = -2.1-18.0$ км с энергетическим классом $K_S = 1.8-5.7$ (табл. 3). Высвобожденная в очагах землетрясений суммарная энергия составила $\Sigma E = 2.984 \cdot 10^7$ Дж, что превышает ~ в 2 раза таковое значение 2012 г. ($N=79$, $\Sigma E = 1.417 \cdot 10^7$ Дж) [15] и ~ в 7 раз значение 2011 г. ($N=18$, $\Sigma E = 0.418 \cdot 10^7$ Дж) [17]. Уровень надежной регистрации землетрясений Мутновско-Гореловской группы вулканов получился равным $K_{\min} = 3.4$, а $\gamma = 0.52 \pm 0.08$. Землетрясение с максимальным классом $K_S = 7.2$ произошло на глубине $h = -2.1$ км в постройке влк. Мутновский 7 апреля в 01^h59^m [10].

Таблица 3. Распределение землетрясений района Гореловско-Мутновской группы вулканов по энергетическим классам K_S в 2013 г.

Название вулкана	$R_{\text{зоны}},$ км	K_S					N_{Σ}	$\Sigma E,$ 10^7 Дж
		3	4	5	6	7		
Горелый	7	15	28	19	5		67	0.735
Мутновский	7	8	9	2	2	1	22	2.064
Вне вулканов		2	7	11	1		21	0.185
Всего		25	44	32	8	1	110	2.984

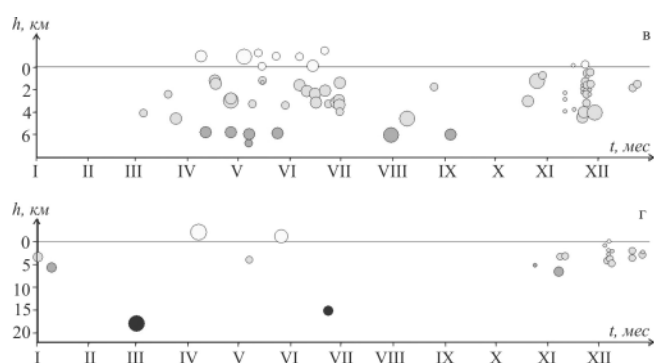
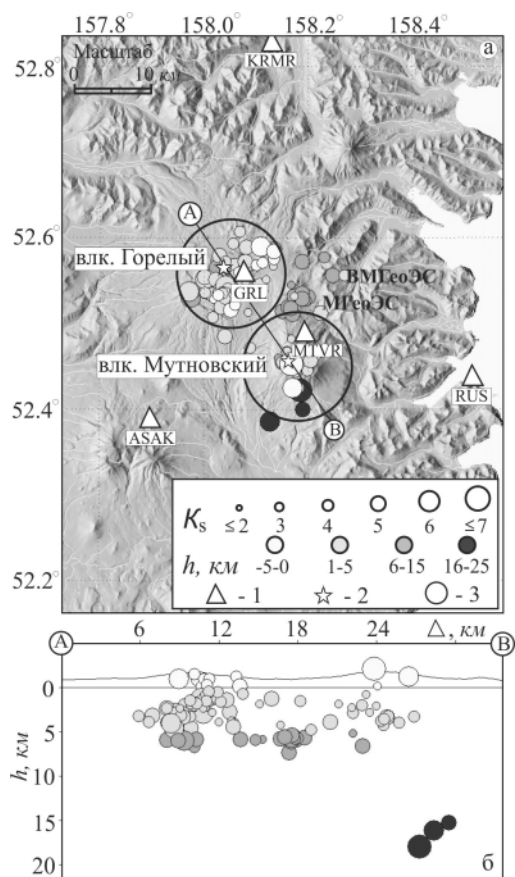


Рис. 8. Карта эпицентров (а) и проекция гипоцентров на вертикальный разрез по линии А–В (б) для землетрясений Мутновско-Гореловской группы в 2013 г., а также изменение во времени глубины гипоцентров h (в, г) вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 7 км от влк. Горелый и Мутновский, соответственно

1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан; 3 – окружность, ооконтуривающая область выборки землетрясений вокруг вулканов Горелый и Мутновский.

Ближайшая к влк. Горелый станция «Горелый» (GRL) расположена в 4 км от кратера и позволяет регистрировать землетрясения с $K_S \geq 2.2$. В 2013 г., как и в предыдущие 2010–2012 гг. [15, 17], на влк. Горелый регистрировалось вулканическое дрожание $A/T_{\max} = 1.38$ мкм/с, не позволяющее локализовать слабую сейсмичность. В каталог вошло всего

67 землетрясений с $K_S = 3.1-6.3$ (рис. 8 в, табл. 3), локализованных в радиусе 7 км от вершины вулкана и диапазоне глубин $h = -1.4-6.8$ км [10]. Землетрясение с максимальным классом $K_S = 6.3$ произошло на глубине $h = 4.1$ км под постройкой влк. Горелый 28 ноября в 20^h24^m [10]. В течение года «желтый» код опасности выставлялся для вулкана на 257 дней, из них только

два – по спутниковым данным, когда фиксировалась термальная аномалия, а остальные 255 – по сейсмическим критериям. Критерием «желтого» уровня опасности по сейсмичности для вулканов Мутновско-Гореловской группы является локализация в течение суток более четырех землетрясений с $K_S \geq 4.0$, или двух и более с $K_S \geq 5.0$, или одного и более с $K_S \geq 6.0$, либо когда общее количество зафиксированных поверхностных событий (III и IV типа) [10] на вулкане $N \geq 50$ или регистрируется ВД с $A/T_{\max} \geq 0.5$ мкм/с. В 2013 г. «белый» код присваивался влк. Горелый в течение 100 дней из-за отсутствия сейсмических данных со станции GRL. Вулканическая активность проявлялась только в виде фумарольной деятельности.

Станция «Мутновская» (MTVR), установлена на расстоянии ~ 3 км от активного кратера (рис. 8 а). Минимальный уровень регистрируемой сейсмичности по этой станции соответствует $K_S=2.0$. В 2013 г. в радиусе 7 км от вулкана было локализовано всего 22 землетрясения с $K_S=2.7-7.2$, диапазон глубин $h=-2.1-18.0$ км (рис. 8 г, табл. 3). В 2013 г. при повышенном уровне сейсмичности влк. Мутновский на 45 дней присваивался «желтый» код активности. При отсутствии данных со станции MTVR, выставлялся «белый» уровень – 21 день. В остальное время наблюдалась «фоновая» сейсмичность. Вулканическая активность влк. Горелый и влк. Мутновский в 2013 г. проявлялась только в виде фумарольной деятельности.

Вулкан Кизимен (рис. 9 а). В 2013 г. продолжилось извержение влк. Кизимен, начавшееся в ноябре 2010 года. Уровень сейсмичности, сопровождавшей извержение, по сравнению с таковым в 2010–2012 гг., резко снизился и по количеству землетрясений, и по выделенной в их очагах энергии. Всего в 2013 г. в районе вулкана было локализовано 199 землетрясений [11] в диапазоне глубин $h= -1.7-36.5$ км, из них 170 – в радиусе 15 км от вершины вулкана (табл. 4). Это количество меньше ~ в 10 раз, чем в 2012 г. ($N=2058$, $\Sigma E=4.89 \cdot 10^8$ Дж) [15], но их суммарная энергия в 1.4 раза больше (табл. 4). А по сравнению с ситуацией в 2011 г., когда выжимание вязкой лавы сопровождалось микроземлетрясениями с квазипериодичностью $\Delta T=8-50$ с и продолжительностью от десятков минут до десятков дней, количество локализованных землетрясений ($N=41452$) и их суммарная энергия ($\Sigma E=14.445 \cdot 10^{11}$ Дж) уменьшились ~ в 200 раз и ~ в 2094 раза соответственно [17]. Землетрясение с максимальным классом $K_S=8.5$ произошло под постройкой вулкана ($h=3.6$ км) 25 марта в 14^h08^m [11].

Рис. 9. Карта эпицентров (а) и проекция гипоцентров на вертикальную плоскость по линии А–В (б) для землетрясений района влк. Кизимен в 2013 г.

1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан; 3 – окружность, ооконтуривающая область выборки землетрясений вокруг вулкана Кизимен.

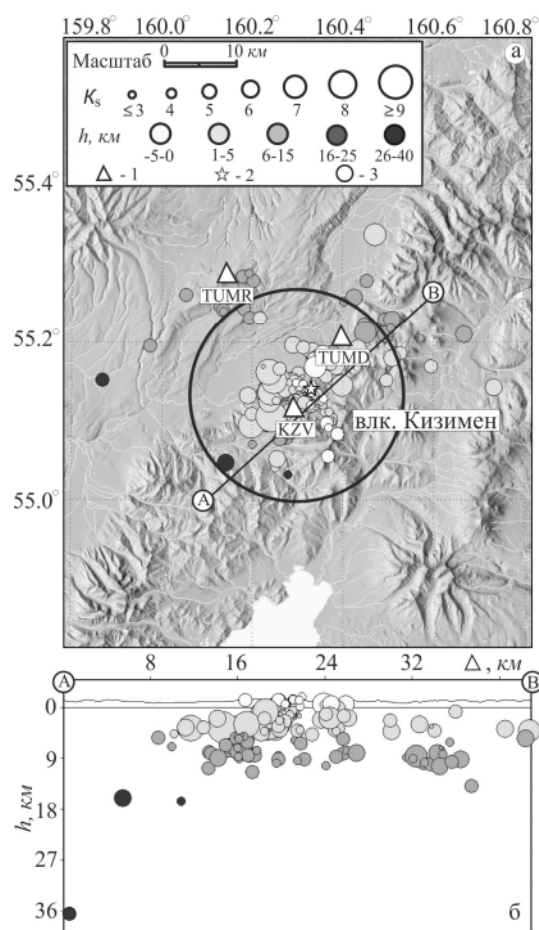


Таблица 4. Распределение землетрясений из района влк. Кизимен по энергетическим классам K_S в 2013 г.

Название вулкана	$R_{\text{зоны, км}}$	K_S						N_{Σ}	$\Sigma E, 10^8 \text{ Дж}$
		3	4	5	6	7	8		
Кизимен	15	9	88	44	20	5	4	170	6.824
Вне вулкана		2	8	13	6			29	0.088
Всего		11	96	57	26	5	4	199	6.912

На рис. 10 представлены изменения во времени различных параметров землетрясений, эпицентры которых находятся внутри окружности радиусом $R=15$ км от кратера вулкана.

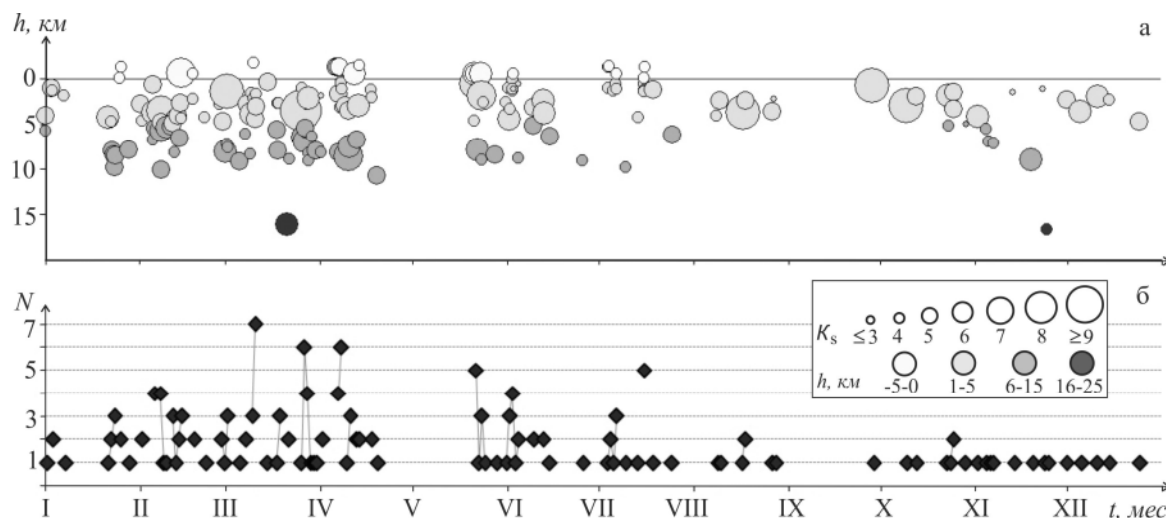


Рис. 10. Изменение во времени глубины гипоцентров h (а) и ежесуточного числа вулканических землетрясений (б), произошедших в радиусе 15 км от влк. Кизимен в 2013 г.

В 2013 г. продолжилось эксплозивно-эффузивное извержение с пепловыми выбросами и излиянием вязкого лавового потока. На рис. 11 представлено изменение во времени размера термальной аномалии и высоты пепловых выбросов над уровнем моря, зарегистрированных видеонаблюдениями. По видеоданным газо-пепловый выброс с максимальной высотой 5 км над уровнем моря был зафиксирован 11 января 05^h49^m (рис. 11 б). При плохих погодных условиях или в темное время суток оценка высоты возможной эксплозии проводилась по сейсмическим данным по методике [19]. 22 июля в 01^h57^m было зарегистрировано сейсмическое событие продолжительностью 45 минут, возможно, сопровождавшее пепловый выброс на высоту 6.8 км над уровнем моря.

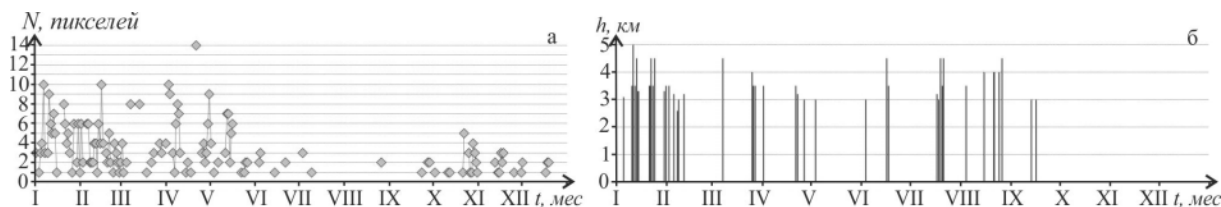
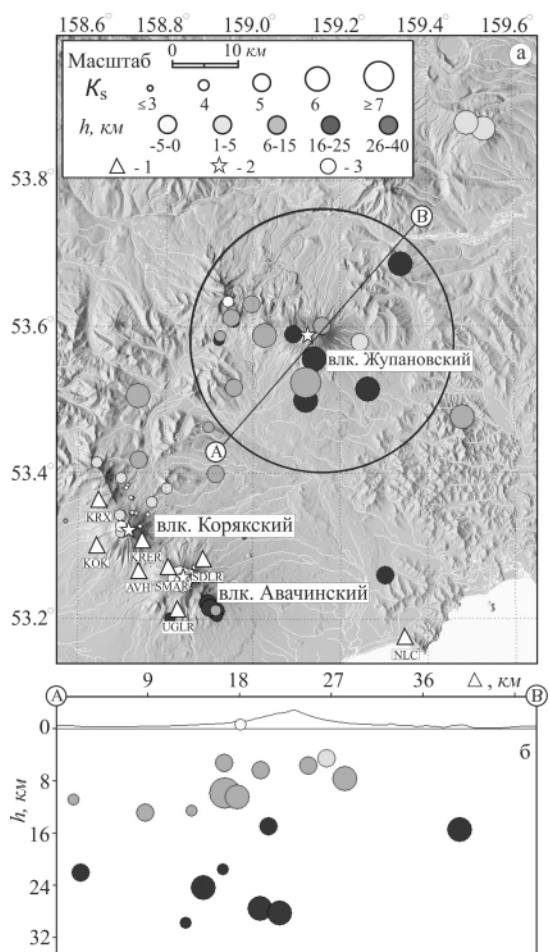


Рис. 11. Изменение во времени размера термальной аномалии на влк. Кизимен по данным спутников NOAA16 и NOAA17 (а); высота газо-пепловых выбросов над уровнем моря по видеоданным (б) в 2013 г.

С сентября извержение постепенно стало ослабевать и к концу года завершилось. На протяжении года на влк. Кизимен из-за высокой сейсмической и вулканической активности выставлялись повышенные коды опасности: «оранжевый» – 271 день, «желтый» – 42. Из них 164 дня из-за высокого уровня сейсмичности, в остальных случаях, когда на вулкане наблюдалось излияние лавового потока по видео наблюдениям или при наличии термальной аномалии на спутниковых снимках (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>).

Вулкан Жупановский расположен в юго-восточном поясе Камчатки и представляет собой восточную часть Дзензур-Жупановского вулканического хребта, образованную четырьмя слившимися конусами стратовулканов [26]. Исторические извержения 1776, 1882, 1925, 1929, 1940 и 1956–1957 гг. были связаны с третьим конусом и имели характер сравнительно небольших эксплозий [26]. Сейсмический мониторинг влк. Жупановский проводится станциями, ближайшие из которых «Седловина» (SDLR), «Корякский ретранслятор» (KRER) и «Арик» (KRX) расположены в 38–40 км от него в районе Авачинской группы вулканов (рис. 12 а).



Первое пробуждение влк. Жупановский после 56-ти летнего периода fumarольной деятельности началось по сейсмическим данным 23 октября ~ в 15^h00^m с образования трещины и новой fumarолы на западном склоне третьего конуса [27]. В течение двух суток из трещины извергались пепел и газ.

На рис. 12 представлены карта эпицентров землетрясений и проекция их гипоцентров на вертикальный разрез. Перед извержением наблюдалось некоторое усиление сейсмической активности в июле–августе 2013 г. (рис. 13). В этот период было локализовано 11 землетрясений с $K_S=3.9-5.7$, диапазон глубин $h=-0.6-29.8$ км [12], (рис. 13 а, б).

Всего в 2013 г. в каталог вошло 22 землетрясения ($3.0 \leq K_S \leq 8.2$, $h = -0.6-29.8$ км) [12], суммарная энергия, выделявшаяся в очагах которых составила $\Sigma E = 1.39 \cdot 10^7$ Дж (табл. 5).

Рис. 12. Карта эпицентров (а) и проекция гипоцентров на вертикальную плоскость по линии А–В (б) для землетрясений района влк. Жупановский в 2013 г.

1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан; 3 – окружность, ооконтуривающая область выборки землетрясений вокруг влк. Жупановский.

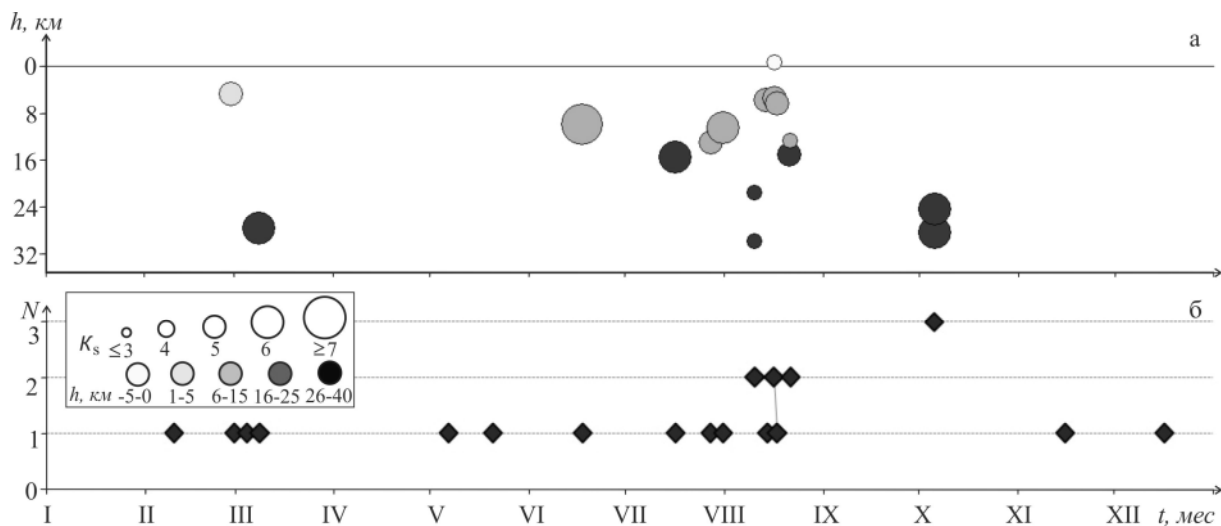


Рис. 13. Изменение во времени глубины гипоцентров h (а) и ежесуточного числа вулканических землетрясений (б), произошедших в радиусе 20 км от влк. Жупановский в 2013 г.

Таблица 5. Распределение землетрясений района влк. Жупановский по ким классам K_S в 2013 г.

Название вулкана	$R_{зоны}, км$	K_S				N_{Σ}	$\Sigma E, 10^7 Дж$
		4	5	6	7		
Жупановский	20	4	7	4	1	16	0.992
Вне вулкана		1	1	4		6	0.396
Всего		5	8	8	1	22	1.388

Землетрясение с максимальным классом $K_S=6.7$ произошло на глубине $h=9.9$ км подстройкой влк. Жупановский 17 июня в $15^{\text{h}}44^{\text{m}}$ [12]. К сожалению, из-за удаленности станций от вулкана (рис. 12 а) точность локации очагов землетрясений существенно хуже относительно других контролируемых вулканов. Средняя ошибка в плане равна ~ 7 км, а по глубине – ~ 9 км.

Временная сеть в районе Трещинного Толбачинского извержения (ТТИ-50). В январе–октябре 2013 г. в южной части Ключевской группы вулканов работала временная сеть автономных сейсмических станций Guralp CMG-6TD [28]. Расстановка была ориентирована на усиление системы сейсмологических наблюдений этого района для получения новых данных о сейсмичности Толбачинского извержения [24]. Временная сеть обеспечила получение информации на более низком энергетическом уровне, чем это позволяет региональная сеть сейсмических станций Камчатки. За время работы временных станций было локализовано более 700 землетрясений с $ML=0-3.5$, $K_S=1.5-8.5$ [29], что на порядок превышает число сейсмических событий, зарегистрированных региональной сетью в южном секторе Ключевской группы за то же время. Результаты изложены в публикациях [30, 31]. Необходимо отметить, что параметры большинства этих событий удалось определить благодаря полосовой фильтрации в диапазоне 8–16 Гц. В связи с тем, что в настоящее время в рутинной обработке отсутствуют методики для определения энергетических параметров землетрясений по высоким частотам – оценки энергетических классов этих событий, полученные стандартными методами, могут содержать значительные ошибки.

Закключение. В 2013 г. наблюдалась высокая активность вулканов Камчатки. В течение всего года на влк. Ключевской наблюдалась высокая сейсмическая активность. По сейсмическим данным вершинное извержение вулкана началось 15 августа. В дальнейшем наблюдалось усиление эффузивно-эксплозивного извержения и сопутствующего ему ВД. Динамика роста ВД была подобна динамике роста перед пароксизмальным извержением в 1994 году. Это позволило сделать успешный прогноз усиления вершинного извержения до пароксизмального, субплинианского. Такие извержения, начиная с 1737 г., наблюдались в среднем через 26 лет. За период детальных вулканологических исследований на Камчатке с 1935 г. субплинианское извержение произошло дважды: в 1944–1945 гг. и в 1994 г. [32].

На влк. Шивелуч продолжалась высокая вулканическая активность с эксплозивными извержениями и сходом раскаленных лавин. Сейсмическая активность, сопровождавшая рост и обрушение купола, выросла по сравнению с таковой в предыдущем 2012 г. [15].

В 2013 г. на влк. Плоский Толбачик продолжилось мощное эксплозивно-эффузивное Толбачинское трещинное извержение (ТТИ-50) [24], начавшееся 27 ноября 2012 года. Извержение, сопровождавшееся излиянием протяженных лавовых потоков и пепловыми выбросами, закончилось в конце августа 2013 года.

Продолжилось эксплозивно-эффузивное извержение влк. Кизимен с пепловыми выбросами и вязкими лавовыми потоками, начавшееся в ноябре 2010 года. С сентября извержение постепенно стало ослабевать и к концу года завершилось.

Вулканы Горелый и Мутновский представляют потенциальную опасность для геоэнергетического комплекса МГеоЭС и ВМГеоЭС. К сожалению, в 2013 г. отсутствие в течение длительного времени данных со станции «Горелый» (GRL), а также регистрация ею вулканического дрожания от влк. Горелый не позволили локализовать сейсмичность в районе Мутновско-Гореловской группы в полном объеме.

После 56-летнего периода покоя 23 октября 2013 г. началось извержение влк. Жупановский. Из-за удаленности сейсмических станций от вулкана не удалось зарегистрировать и локализовать детальную сейсмичность, сопровождавшую подготовку и извержение. Для успешного мониторинга активности влк. Жупановский необходима установка сейсмических станций вблизи вулкана. Это позволит зафиксировать слабые землетрясения с энергетическим классом $K_S \leq 4.0$, контролирующую деятельность вулкана, а также повысить точность локации их очагов.

Всего в 2013 г. в районе Северной, Авачинской и Мутновско-Гореловской групп вулканов, а также в районе вулканов Кизимен и Жупановский было локализовано 4934 землетрясения, высвобожденная ими сейсмическая энергия составила $\Sigma E = 2.4 \cdot 10^9$ Дж.

Временные сейсмологические наблюдения в районе ТТИ-50 были организованы благодаря финансовой поддержке Президиума РАН.

Л и т е р а т у р а

1. **Сенюков С.Л.** Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений в 2000–2004 гг. // Вулканология и сейсмология. – 2006. – № 3. – С. 68–78.
2. **Старовойт О.Е., Мишаткин В.Н.** Сейсмические станции Российской академии наук (состояние на 2001 г.) – М. – Обнинск: ГС РАН, 2001. – 86 с.
3. **Чебров Д.В., Матвеев Е.А., Шевченко Ю.В., Ящук В.В., Музуров Е.Л. (сост.)**. Сейсмические станции сети Камчатки и Командорских островов в 2013 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – Приложение на CD_ROM.
4. **Чебров В.Н., Сенюков С.Л., Дрознина С.Я.** Камчатка и Командорские острова // Землетрясения России в 2012 году. – Обнинск: ГС РАН, 2014. – С. 52–62.
5. **Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Кугаенко Ю.А., Левина В.И., Сенюков С.Л., Сергеев В.А., Шевченко Ю.В., Ящук В.В.** Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. – 2013. – № 1. – С. 18–40.
6. **Дрознин Д.В., Дрознина С.Я.** Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов «DIMAS» // Сейсмические приборы. – М.: ИФЗ РАН, 2010. – 46. – № 3. – С. 22–34.
7. **Кузин И.П.** Фокальная зона и строение верхней мантии в районе Восточной Камчатки. – М.: Наука, 1974. – 145 с.
8. **Нуждина И.Н. (отв. сост.), Напылова Н.А., Напылова О.А., Демянчук М.В., Кожевникова Т.Ю., Толокнова С.Л. (сост.)**. Каталог землетрясений Северной группы вулканов за 2013 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – Приложение на CD_ROM.
9. **Нуждина И.Н. (отв. сост.), Кожевникова Т.Ю., Толокнова С.Л., Назарова З.А. (сост.)**. Каталог землетрясений Авачинской группы вулканов за 2013 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – Приложение на CD_ROM.
10. **Нуждина И.Н. (отв. сост.), Кожевникова Т.Ю., Толокнова С.Л., Назарова З.А. (сост.)**. Каталог землетрясений Мутновско-Гореловской группы вулканов за 2013 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – Приложение на CD_ROM.
11. **Нуждина И.Н. (отв. сост.), Кожевникова Т.Ю., Толокнова С.Л., Назарова З.А., Соболевская О.В. (сост.)**. Каталог землетрясений вулкана Кизимен за 2013 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – Приложение на CD_ROM.
12. **Нуждина И.Н. (отв. сост.), Кожевникова Т.Ю., Назарова З.А., Толокнова С.Л. (сост.)**. Каталог землетрясений вулкана Жупановский за 2013 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – Приложение на CD_ROM.
13. **Токарев П.И.** Вулканические землетрясения Камчатки. – М.: Наука, 1981. – 164 с.
14. **Федотов С.А.** Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. – М.: Наука, 1972. – 117 с.
15. **Сенюков С.Л., Нуждина И.Н.** Вулканы Камчатки // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 21 (2012 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – С. 449–465.
16. **Weimer S.** A software package to analyze seismicity: ZMAP // Seism. Res. Lett. – 2001. – 72. – N 2. – P. 374–383.
17. **Сенюков С.Л., Нуждина И.Н.** Вулканы Камчатки // Землетрясения Северной Евразии, 2011 год. – Обнинск: ГС РАН, 2017. – С. 463–476.
18. **Сенюков С.Л., Нуждина И.Н., Дрознина С.Я.** Вулканы Камчатки // Землетрясения Северной Евразии, 2006 год. – Обнинск: ГС РАН, 2012. – С. 449–460.
19. **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.
20. **Федотов С.А., Жаринов Н.А., Гонтовая Л.И.** Магматическая питающая система Ключевской группы вулканов (Камчатка) по данным об ее извержениях, землетрясениях, деформациях и глубинном строении // Вулканология и сейсмология. – 2010. – № 1. – С. 3–35.
21. **Сенюков С.Л., Дрознина С.Я., Нуждина И.Н., Гарбузова В.Т., Кожевникова Т.Ю.** Исследования активности вулкана Ключевской дистанционными методами с 01.01.2001 г. по 31.07.2005 г. // Вулканология и сейсмология. – 2009. – № 3. – С. 50–59.

22. **Сениуков С.Л.** Прогноз извержений вулканов Ключевской и Безымянный на Камчатке // Saarbrücken: LAP LAMBERTS Academic Publishing. – 2013. – 144 с.
23. **Горельчик В.И., Сторчеус А.В.** Глубокие длиннопериодные землетрясения под Ключевским вулканом, Камчатка // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. – Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. – С. 373–389.
24. **Толбачинское Трещинное Извержение 2012-2013 гг.** / Под ред. Е.И. Гордева, Н.Л. Добрецова – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. – 421 с.
25. **Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Кравченко Н.М., Коновалова А.А.** Параметрическое представление динамики сейсмичности Камчатки // Вулканология и сейсмология. – 2013. – № 1. – С. 65–84.
26. **Масуренков Ю.П., Флоренский И.В., Мелекесцев И.В.** Вулкан Жупановский // Действующие вулканы Камчатки. М.: Наука, 1991. – Т. II. – С. 218–225.
27. **Самойленко С.Б., Мельников Д.В., Чирков С.А., Маневич Т.М.** Активизация Жупановского вулкана в 2013–2014 гг. // Вестник КРАУНЦ. – Науки о Земле. – 2014. – Выпуск 23. – № 1. — С. 21–26.
28. **Кугаенко Ю.А. (сост.).** Временная локальная сеть сейсмических станций в районе Толбачинского извержения в 2013 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – Приложение на CD-ROM.
29. **Кугаенко Ю.А. (отв. сост.), Коновалова А.А.** Каталог землетрясений района Трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. // Землетрясения России в 2013 году. – Обнинск: ГС РАН, 2015. – Приложение на CD-ROM.
30. **Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Коновалова А.А.** Сейсмичность, сопровождавшая Трещинное Толбачинское извержение 2012–2013 гг., по данным временной локальной сети // Землетрясения России в 2013 году. – Обнинск: ГС РАН, 2015. – С. 93–98.
31. **Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Абкадыров И.Ф., Воропаев П.В.** Временные сейсмологические наблюдения в районе трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. и их результаты // Вулканология и сейсмология. – 2017. – № 4. – С. 67–82.
32. **Озеров А.Ю., Карпов Г.А., Дроздин В.А., Двигало В.Н., Демянчук Ю.В., Иванов В.В., Белосусов А.Б., Фирстов П.П., Гаврилов В.А., Ящук В.В., Округина А.М.** Динамика извержения Ключевского вулкана 7 сентября – 2 октября 1994 г. (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. – 1996. – № 5. – С. 3–16.

METADATA IN ENGLISH

VOLCANOES of KAMCHATKA

S.L. Seniukov, I.N. Nuzhdina

Kamchatka branch of the GS RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, ssl@emsd.ru

Abstract. The results of near real-time monitoring of the active Kamchatka volcanoes are described. Continuous monitoring was carried out using three remote methods: 1) seismic monitoring according to automatic telemetric seismic stations; 2) visual and video observation; 3) satellite observation of the thermal anomalies and ash clouds. Daily information about volcanic activity is published in the Internet (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>) since February 2000. Annual results of seismic activity of the Northern (Shiveluch, Kluchevskoy, Bezymianny, Krestovskiy and Ushkovskiy), Avacha (Avachinsky and Koryaksky), Mutnovsky-Gorely volcano group and Kizimen volcano are presented. 4390 earthquakes with $K_S=3.0-8.5$ were located for Northern volcano group, 213 earthquakes with $K_S=1.8-5.7$ – for Avacha volcano group, 110 earthquakes with $K_S=2.7-7.2$ – Mutnovsky-Gorely volcano group, 199 earthquakes with $K_S=3.0-8.5$ for Kizimen volcano and 22 earthquakes with $K_S=3.7-6.7$ for Zhupanovskiy volcano in 2013. Maps of epicenters, quantities of seismic energy and earthquake distribution according to class are given. All periods of activity were fixed and investigated by remote methods in 2013: intensive volcanic activity of Sheveluch volcano associated with new cone, subplinian summit eruption of Kluchevskoy volcano, seismic and volcanic activity of Zhupanovskiy volcano after 56-year quite period, and the ending of the long-time eruptions: Tolbachik fissure eruption and Kizimen volcano eruption.

Keywords: seismic activity of active volcanoes, visual and video surveillance, energy class K_S , seismic energy.

DOI: 10.35540/1818-6254.2019.22.43

For citation: Seniukov S.L., & Nuzhdina I.N. (2019). Seismic monitoring of volcanoes of Kamchatka. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 22 (2013), 485–501. (In Russ.). doi: 10.35540/1818-6254.2019.22.43

References

1. Seniukov, S.L. (2006). [Monitoring of Volcanic Activity in Kamchatka by Remote Sensing Techniques in 2000–2004]. *Vulkanologiya i seismologiya* [Journal of Volcanology and Seismology], 3, 68–78. (In Russ.).
2. Starovoit, O.E., & Mishatkin, V.N. (2001). *Seismicheskie stantsii Rossiiskoi akademii nauk (sostoianie na 2001 g.)* [Seismic stations of the Russian Academy of Sciences (state in 2001)]. Moscow-Obninsk, Russia: GS RAS Publ., 86 p. (In Russ.).
3. Chebrov, D.V., Matveenkov, E.A., Shevchenko, Iu.V., Iashchuk, V.V., & Muzurov, E.L. (2019). Seismic stations of the Kamchatka and Commander Islands network in 2013. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 22 (2013), Appendix on CD. (In Russ.).
4. Chebrov, V.N., Droznina, S.Ia., & Seniukov, S.L. (2014). [Kamchatka and Comandor Islands]. In *Zemletryaseniia Rossii, 2012 god* [Earthquakes in Russia, 2012] (pp. 56–62). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
5. Chebrov, V.N., Droznin, D.V., Kugaenko, Iu.A., Levina, V.I., Seniukov, S.L., Sergeev, V.A., Shevchenko, Iu.V., & Iashchuk, V.V. (2013). [The System of Detailed Seismological Observations in Kamchatka in 2011]. *Vulkanologiya i seismologiya* [Journal of Volcanology and Seismology], 1, 18–40. (In Russ.).
6. Droznin, D.V., & Droznina, S.Ia. (2010). [Interactive program “DIMAS” of the seismic signal processing]. [Seismic Instruments], 46 (3), 22–34. (In Russ.).
7. Kuzin, I.P. (1974). *Fokal'naia zona i stroenie verkhnei mantii v raione Vostochnoi Kamchatki* [Focal zone and upper mantle structure in the region of Eastern Kamchatka]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 145 p. (In Russ.).
8. Nuzhdina, I.N., Napylova, N.A., Napylova, O.A., Demianchuk, M.V., Kozhevnikova, T.Iu., & Toloknova, S.L. (2019). Earthquake catalog of the Northern Group of Volcanoes for 2013. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 22 (2013), Appendix on CD. (In Russ.).
9. Nuzhdina, I.N., Kozhevnikova, T.Iu., Toloknova, S.L., & Nazarova, Z.A. (2019). The catalog of earthquakes of the Avachinsky group of volcanoes for 2013. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 22 (2013), Appendix on CD. (In Russ.).
10. Nuzhdina, I.N., Kozhevnikova, T.Iu., Toloknova, S.L., & Nazarova, Z.A. (2019). The catalog of earthquakes of the Mutnovsky-Gorelovsky group of volcanoes for 2013. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 22 (2013), Appendix on CD. (In Russ.).
11. Nuzhdina, I.N., Kozhevnikova, T.Iu., Toloknova, S.L., & Nazarova, Z.A. (2019). The catalog of earthquakes of the Kizimen volcano for 2013. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 22 (2013), Appendix on CD. (In Russ.).
12. Nuzhdina, I.N., Kozhevnikova, T.Iu., Nazarova, Z.A., & Toloknova, S.L. (2019). The catalog of earthquakes of the Zhupanovsky volcano for 2013. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 22 (2013), Appendix on CD. (In Russ.).
13. Tokarev, P.I. (1981). *Vulkanicheskie zemletriaseniia Kamchatki* [Volcanic earthquakes in Kamchatka]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 164 p. (In Russ.).
14. Fedotov, S.A. (1971). *Energeticheskaya klassifikatsiya Kurilo-Kamchatskikh zemletriasenii i problema magnitude* [Energy classification of the Kuril-Kamchatka earthquakes and the problem of magnitudes]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 117 p. (In Russ.).
15. Seniukov, S.L., & Nuzhdina, I.N. (2018). Kamchatka volcanoes. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 21 (2012), 449–465. (In Russ.).
16. Weimer, S. (2001). A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seismological Research Letters*, 72 (2), 374–383.
17. Seniukov, S.L., & Nuzhdina, I.N. (2017). [Kamchatka volcanoes]. In *Zemletryaseniia Severnoi Evrazii, 2011 god* [Earthquakes in Northern Eurasia, 2011] (pp. 463–476). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
18. Seniukov, S.L., Nuzhdina, I.N., & Droznina, S.Ia. (2012). [Kamchatka volcanoes]. In *Zemletryaseniia Severnoi Evrazii, 2006 god* [Earthquakes in Northern Eurasia, 2006] (pp. 449–460). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).

19. Senyukov, S.L., Droznina, S.Ya., & Kozhevnikova, T.Yu. (2013). *Experience of the detection of ash plume and estimation its height using local seismicity for Kamchatkan volcanoes during 2003–2011 (Kamchatka Peninsula, Russia)*. In V.M. Zobin (ed.), *Complex monitoring of volcanic activity: methods and results*. (pp. 35–52), New York, USA: Nova Science Publishers, Inc.
20. Fedotov, S.A., Zharinov, N.A., & Gontovaia, L.I. (2010). [Magmatic feeding system of the Klyuchevskaya group of volcanoes (Kamchatka) according to its eruptions, earthquakes, deformations, and deep structure]. *Vulkanologiya i seismologiya* [Journal of Volcanology and Seismology], 1, 3–35. (In Russ.).
21. Seniukov, S.L., Droznina, S.Ia., Nuzhdina, I.N., Garbuzova, V.T., & Kozhevnikova, T.Iu. (2009). [Studies of the activity of Klyuchevskoy volcano by remote sensing from January 1, 2001 to July 31, 2005]. *Vulkanologiya i seismologiya* [Journal of Volcanology and Seismology], 3, 50–59. (In Russ.).
22. Seniukov, S.L. (2013). *Prognoz izverzhenii vulkanov Kliuchevskoi i Bezymiannyi na Kamchatke* [Forecast of eruptions of Klyuchevskoy and Bezymianny volcanoes in Kamchatka]. Saarbrucken, Germany: LAP LAMBERTS Academic Publ., 144 p. (In Russ.).
23. Gorel'chik, V.I., & Storcheus, A.V. (2001). [Deep long-period earthquakes under Klyuchevsky volcano, Kamchatka]. In *Geodinamika i vulkanizm Kurilo-Kamchatskoi ostrovoduzhnoi sistemy* [Geodynamics and volcanism of the Kuril-Kamchatka island arc system] (pp. 373–389). Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia: IVGG FED RAS Publ. (In Russ.).
24. Gordeev, E.I., & Dobretsov, N.L. (2017). *Tolbachinskoe Treshchinnoe Izverzhenie 2012–2013 gg.* [Tolbachik Fissure Eruption 2012–2013]. Novosibirsk, Russia: SB RAS Publ., 421 p. (In Russ.).
25. Saltykov, V.A., Kugaenko, Iu.A., Kravchenko, N.M., & Konovalova, A.A. (2013). [Parametric representation of Kamchatka's seismicity dynamics]. *Vulkanologiya i seismologiya* [Journal of Volcanology and Seismology], 1, 65–84. (In Russ.).
26. Masurenkov, Iu.P., Florenskii, I.V., & Melekestsev, I.V. (1991). *Vulkan Zhupanovskii* [Zhupanovsky volcano]. In *Active volcanoes of Kamchatka (Fedotov, S.A., & Masurenkov Iu.P. (Ed.) Vol.2)*. (pp. 215–225). Moscow: Nauka Publ. (In Russ.).
27. Samoilenko, S.B., Mel'nikov, D.V., Chirkov, S.A., & Manevich, T.M. (2014). [Activation of the Zhupanovsky volcano in 2013–2014]. *Vestnik KRAUNTs*. [Bulletin of KRAUNZ], 23(1), 21–26. (In Russ.).
28. Kugaenko, Iu.A. (2019). Temporary local network of seismic stations in the Tolbachinsky eruption region in 2013. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 22 (2013), Appendix on CD. (In Russ.).
29. Kugaenko, Iu.A., & Konovalova, A.A. (2015). [The earthquake catalog in the area of the Tolbachik Fissure eruption 2012–2013]. In *Zemletryaseniia Rossii, 2013 god* [Earthquakes in Russia, 2013]. (Appendix on CD). Obninsk: GS RAS Publ. (In Russ.).
30. Kugaenko, Iu.A., Saltykov, V.A., & Konovalova, A.A. (2015). [The seismicity of the Tolbachik Fissure eruption 2012–2013 according to a temporary local network]. In *Zemletryaseniia Rossii, 2013 god* [Earthquakes in Russia, 2013] (pp. 93–98). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
31. Kugaenko, Iu.A., Saltykov, V.A., Abkadyrov, I.F., & Voropaev, P.V. (2017). [Temporary seismological observations in the area of the fissure Tolbachinsky eruption 2012–2013 and their results]. *Vulkanologiya i seismologiya* [Journal of Volcanology and Seismology], 4, 67–82. (In Russ.).
32. Ozerov, A.Iu., Karpov, G.A., Droznin, V.A., Dvigalo, V.N., Demianchuk, Iu.V., Ivanov, V.V., Belousov, A.B., Firstov, P.P., Gavrilov, V.A., Iashchuk, V.V., & Okrugina, A.M. (1996). [Dynamics of the Klyuchevskoy volcano eruption in September 7 – October 2, 1994 (Kamchatka)]. *Vulkanologiya i seismologiya* [Journal of Volcanology and Seismology], 5, 3–16. (In Russ.).