

VI. СЕЙСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ВУЛКАНОВ

УДК 550.348. (517.66)

ВУЛКАНЫ КАМЧАТКИ

С.Л. Сеньюков, И.Н. Нурждина

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

Аннотация. Приведены результаты мониторинга активности действующих вулканов по данным следующих наблюдений: 1) наблюдения за сейсмичностью вулканов по данным радиотелеметрических сейсмических станций в режиме, близком к реальному времени; 2) визуальные и видеонаблюдения; 3) слежение за развитием 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 вулкана Кизимен за 2012 год. В течение года в районе Северной группы локализовано 7638 землетрясений с $K_S=2.6-11.3$, Авачинской – 169 с $K_S=2.0-5.9$, Мутновско-Гореловской – 79 с $K_S=3.6-6.5$ и 2058 землетрясений с $K_S=3.4-8.0$ вблизи влк. Кизимен. 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 2012 г.: интенсивная вулканическая деятельность влк. Шивелуч, связанная с ростом нового купола, подготовительные и эруптивные фазы двух успешно спрогнозированных эксплозивных извержений влк. Безымянный, период подготовки и начало продолжительного мощного трещинного извержения вулкана Плоский Толбачик, а также продолжение режима квазирегулярного появления землетрясений «drumbeats», сопровождавших выдавливание вязкой магмы и движение лавового потока на влк. Кизимен.

Abstract. The near real-time monitoring results of the active Kamchatka volcanoes are described using three remote methods: 1) seismic monitoring of the data from 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 on the Internet (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>) since February 2000.

Annual results of seismic activity of the Northern (Shiveluch, Klyuchevskoy, Bezymianny, Krestovskiy and Ushkovskiy), Avacha (Avachinsky and Koryaksky), Mutnovsky-Gorely volcano group and Kizimen volcano are presented. 7638 earthquakes with $K_S=2.6-11.3$ were located for Northern volcano group, 169 earthquakes with $K_S=2.0-5.9$ – for Avacha volcano group, 79 earthquakes with $K_S=3.6-6.5$ – Mutnovsky-Gorely volcano group and 2058 earthquakes with $K_S=3.4-8.0$ for Kizimen volcano in 2012. 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 2012: intensive volcanic activity of Shiveluch volcano associated with new cone, preliminary and eruptive phases of the two predicted explosive eruptions of Bezymianny volcano, preliminary period and the beginning of the long-time Tolbachik fissure eruption and a continuation of the quasiregular «drumbeats» earthquakes accompanying viscous magma extrusion and lava flow on Kizimen volcano.

В 2012 г. был продолжен мониторинг активных 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 ФИЦ ЕГС РАН [2–5], позволяющие проводить детальные наблюдения для Северной (влк. Шивелуч, Ключевской, Безымянный, Плоский Толбачик, Ушковский и Крестовский), Авачинской (влк. Авачинский и Корякский), Мутновско-Гореловской (влк. Горелый и Мутновский) групп вулканов и влк. Кизимен 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 2012 г. для расчета их параметров применялась 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 и вулкана Кизимен 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 влк. Кизимен. Анализируются сейсмические события из районов, ограниченных координатами для «Северной группы» вулканов: $\varphi=55.54\text{--}56.80^\circ\text{N}$, $\lambda=159.82\text{--}161.60^\circ\text{E}$; «Авачинской группы»: $\varphi=53.10\text{--}53.40^\circ\text{N}$, $\lambda=158.50\text{--}159.00^\circ\text{E}$; «Мутновско-Гореловской группы»: $\varphi=52.30\text{--}52.70^\circ\text{N}$, $\lambda=157.70\text{--}158.40^\circ\text{E}$; «района влк. Кизимен»: $\varphi=54.90\text{--}55.54^\circ\text{N}$, $\lambda=159.82\text{--}160.80^\circ\text{E}$. Все события сгруппированы в четыре каталога [8–11], включающие 7638 землетрясений по Северной группе [8], 169 – по Авачинской [9], 79 – по Мутновско-Гореловской [10] и 2058 – по влк. Кизимен [11]. В соответствии с принятой системой разделения каждому землетрясению в каталогах [8–11] присвоено название соответствующего вулкана, если оно произошло в пределах установленного радиуса выборки для этого вулкана. Если событие локализовано в соответствующем районе, но вне радиусов выборок для вулканов, то событию присваивалось название вулканического района и ниже по тексту статьи в соответствующих таблицах оно обозначалось «вне вулканов».

Северная группа вулканов. Каталог землетрясений Северной группы вулканов за 2012 г. [8] содержит 7638 землетрясений I–III типов [12]. Карта эпицентров землетрясений и условные зоны сейсмичности рассматриваемых вулканов показаны на рис. 1. Распределение землетрясений по вулканам и по энергетическим классам [13] представлено в табл. 1.

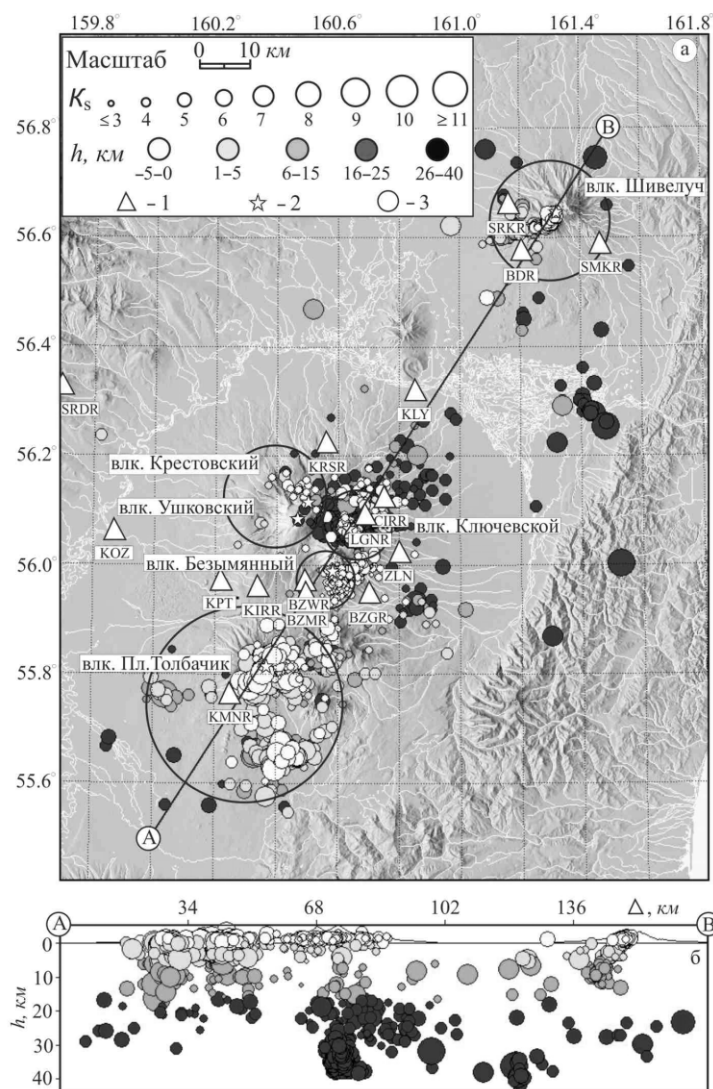


Рис. 1. Карта эпицентров (а) землетрясений Северной группы вулканов за 2012 г. и проекция гипоцентров (б) на вертикальную плоскость, проходящую по линии А–В

1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан; 3 – окружность, охватывающая 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.

Таблица 1. Распределение числа землетрясений по энергетическим классам K_S и суммарная сейсмическая энергия землетрясений в районе Северной группы вулканов в 2012 г.

Название вулкана	$R_{зоны}, км$	K_S									N_{Σ}	$\Sigma E, 10^9 Дж$
		3	4	5	6	7	8	9	10	11		
Безымянный	6	88	107	17	9	1					222	0.014
Ключевской	7	3	2695	3122	160	3					5983	0.381
Плоский Толбачик	20	21	380	200	106	62	21	4	2	1	797	219.595
Шивелуч	12	2	145	171	22						340	0.03
Крестовский и Ушковский	10		25	8							33	0.001
Вне вулканов		9	111	92	34	14	1	2			263	1.564
Всего		123	3463	3610	331	80	22	6	2	1	7638	221.585

Из анализа табл. 1 следует, что в 2012 г. суммарное число землетрясений, локализованных в районе Северной группы вулканов, составило $N_{\Sigma}=7638$, суммарная энергия – $\Sigma E=2.2 \cdot 10^{11}$ Дж (табл. 1), тогда как в 2011 г. было $N_{\Sigma}=6396$, $\Sigma E=1.2 \cdot 10^9$ Дж [14], т.е. число землетрясений, локализованных в районе Северной группы вулканов, выросло незначительно ~ в 1.2 раза, а вот суммарное количество высвобожденной ими энергии увеличилось ~ в 183.6 раза. Такой рост количества высвобожденной энергии связан с высокой сейсмической активностью влк. Плоский Толбачик в период подготовки и началом извержения вулкана. В это время было локализовано 28 землетрясений с $K_S=7.5-11.3$ (табл. 1), в очагах которых высвобождено ~ 98.7% ($\Sigma E=2.19 \cdot 10^{11}$ Дж) всей энергии Северной группы вулканов в 2012 г. Наиболее активной по числу землетрясений в 2012 г., как и в предыдущий 2011 г. ($N_{\Sigma}=5586$) [14], была зона влк. Ключевской. Здесь произошло 78.3% землетрясений от общего числа событий, вошедших в каталог.

Уровень надежной регистрации для землетрясений Северной группы вулканов определен по графику повторяемости (рис. 2). Для построения графика и определения угла его наклона использовался пакет программ ZMAP [15]. Из графика следует, что в 2012 г. для района Северной группы вулканов представительный класс землетрясений составил $K_{min}=4.0$, что ниже такового в 2011 г. ($K_{min}=4.5$) [14]. Надо отметить, что уровень K_{min} меняется в зависимости от событий, происходящих на вулканах. Например, при регистрации сильного непрерывного вулканического дрожания, обычно сопровождающего извержение вулкана, обрабатывать слабые землетрясения невозможно, и в таких случаях значение K_{min} повышается. Так в 2010 г. из-за мощного извержения влк. Ключевской представительный класс составил $K_{min}=5.1$ [16]. Наклон графика повторяемости в 2012 г. получился более пологим $\gamma=0.74 \pm 0.06$ по сравнению со средним значением, определенным по данным за 2000–2011 гг. ($\gamma=1.23$) [14, 16–18]. Землетрясение с максимальным классом $K_S=11.3$ произошло 30 ноября в 11^h00^m на глубине $h=6.5$ км в районе р. Толуд Толбачинского Дола [8]. По расположению эпицентра землетрясения вблизи р. Толуд это землетрясение было названо Толудским, ему посвящена отдельная статья в настоящем ежегоднике [19].

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 $K_{min}=4.6$ [17].

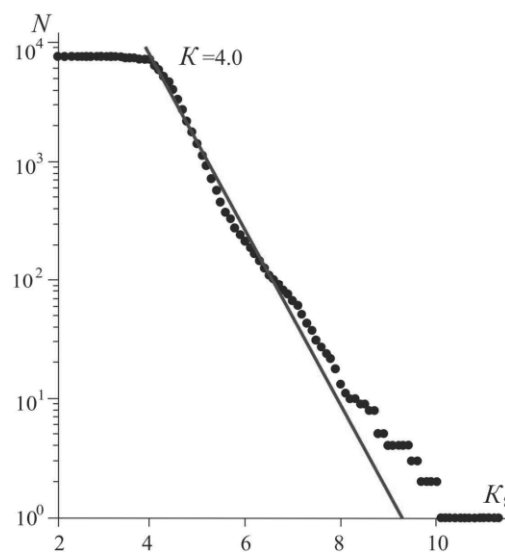


Рис. 2. График повторяемости землетрясений Северной группы вулканов в 2012 г.

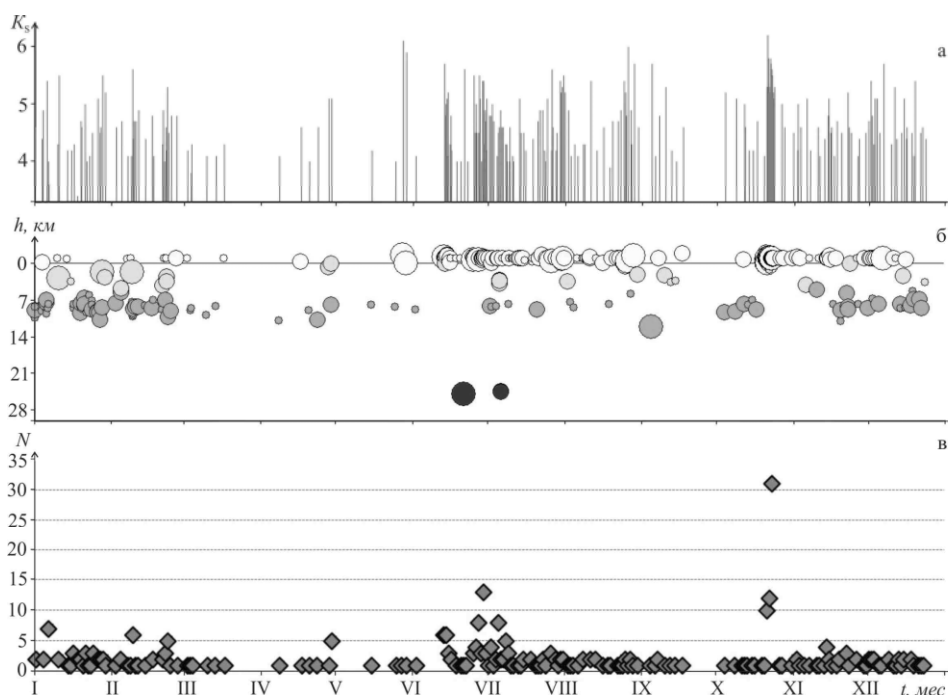


Рис. 3. Изменение во времени энергетического класса K_S (а), глубины гипоцентров h (б) и количества N (в) вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 12 км от влк. Шивелуч в 2012 г.

В 2012 г. ($N=340$, $\Sigma E=0.003 \cdot 10^9$ Дж) (табл. 1), как и в 2011 г. ($N=303$, $\Sigma E=0.648 \cdot 10^8$ Дж) [14] наблюдалась слабая сейсмическая активность влк. Шивелуч. Число землетрясений с $K_S=3.3-6.2$, локализованных в радиусе 12 км и диапазоне глубин $h=-1.9-25$ км (рис. 3 а, б), а также высвобожденная ими энергия, по сравнению с таковыми в 2010 г. ($N=6085$, $\Sigma E=8.312 \cdot 10^8$ Дж), уменьшились, соответственно, в 17.9 и 227 раз [16]. Представительный класс, рассчитанный по программе ZMAP, оказался выше, чем в 2011 г. ($K_{\min}=4$), и составил $K_{\min}=4.6$. Наклон графика повторяемости $\gamma=1.04 \pm 0.06$ стал более крутым по сравнению с таковым в 2011 г. ($\gamma=0.64$) [14]. Землетрясение с максимальным классом $K_S=6.2$ произошло 21 октября в 00^h15^m в постройке вулкана ($h=-0.9$ км) [8]. В течение года было зарегистрировано два кратковременных всплеска сейсмической активности 27–29 июня ($N=24$) и 21–23 октября ($N=53$) (рис. 3 в) [8].

В исследуемый период продолжалось извержение влк. Шивелуч, которое началось еще в декабре 2006 г.

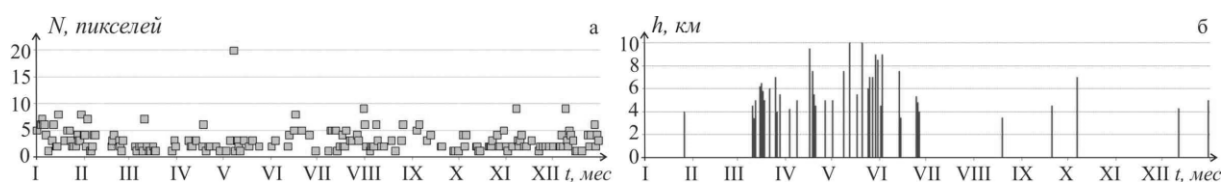


Рис. 4. Изменение во времени размера термальной аномалии на влк. Шивелуч по данным спутников NOAA16 и NOAA17 (а); высота газо-пепловых выбросов над уровнем моря по видеоданным и визуальным наблюдениям сотрудников сейсмической станции «Ключи» (б) в 2012 г.

По-прежнему в течение всего года на спутниковых снимках регистрировалась термальная аномалия (рис. 4 а), свидетельствующая о присутствии на поверхности горячего материала. Выход на поверхность магматического материала из-за резкого сброса давления вызывал новые извержения, которые сопровождалась пепловыми выбросами и сходом пирокластических потоков (рис. 4 б). В зависимости от уровня сейсмической и вулканической активности вулкана ежедневно ему присваивался цветовой код опасности (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>). В 2012 г. соотношение дней с одинаковым цветовым кодом практически не изменилось по срав-

нению с таковым в 2011 г. [14]. Максимальный «красный» уровень опасности в 2012 г. объявлялся 14 раз, из них в восьми случаях (16 и 24 апреля; 5, 12, 20, 29 и 30 мая; 2 июня) по видеоданным были зафиксированы газо-пепловые выбросы высотой более 8 км над уровнем моря (рис. 4 б). В остальных шести случаях (17 апреля; 19 мая; 5, 14, 25 июня и 27 июля), когда вулкан был не виден из-за облачности или темного времени суток, высота 8 км и более оценивалась по сейсмическим данным по методике [20]. К сожалению, из-за плотной облачности спутниковыми данными было подтверждено только эксплозивное извержение, произошедшее 27 июля (Токуо VAAC). Следует отметить, что одним из обязательных условий обнаружения пепловых облаков по спутниковым наблюдениям является превышение высоты пеплового выброса над метеорологическими облаками. Возможно, в остальных пяти событиях высота пепла не превышала высоты облачности.

«Оранжевый» код опасности в исследуемый период присваивался влк. Шивелуч в течение 67 дней, когда высота пепловой эмиссии по видеонаблюдениям или по сейсмическим данным превышала 1 км над куполом, но была меньше 8 км над уровнем моря. Из них 21 пепловый выброс был зарегистрирован спутниковыми наблюдениями, остальные не зафиксированы спутниками из-за облачности в районе вулкана или отсутствия космических снимков по техническим причинам.

Вулкан Ключевской. Существующая сеть станций (рис. 1) позволяет локализовать при благоприятных условиях землетрясения, начиная с $K_S \geq 4.0$ [17]. Ближайшая телеметрическая станция «Логинов» расположена в 4 км от кратера и может регистрировать землетрясения в районе кратера с $K_S \geq 2.2$. В 2012 г. в радиусе 7 км от влк. Ключевской и диапазоне глубин $h = -4.5 - 35.5$ км было локализовано 5973 землетрясения (табл. 1), что в 1.1 раза больше, чем в 2011 г. ($N = 5586$, $\Sigma E = 6.529 \cdot 10^8$ Дж) [14]. Высвобожденная в очагах землетрясений энергия превышает таковую в 2011 г. в 6 раз (табл. 1). Карта эпицентров и проекция гипоцентров на вертикальный разрез представлены на рис. 1, а графики изменения во времени параметров сейсмической активности вулкана – на рис. 5. 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 [21–23]. Поэтому все землетрясения в 2012 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) [14, 22].

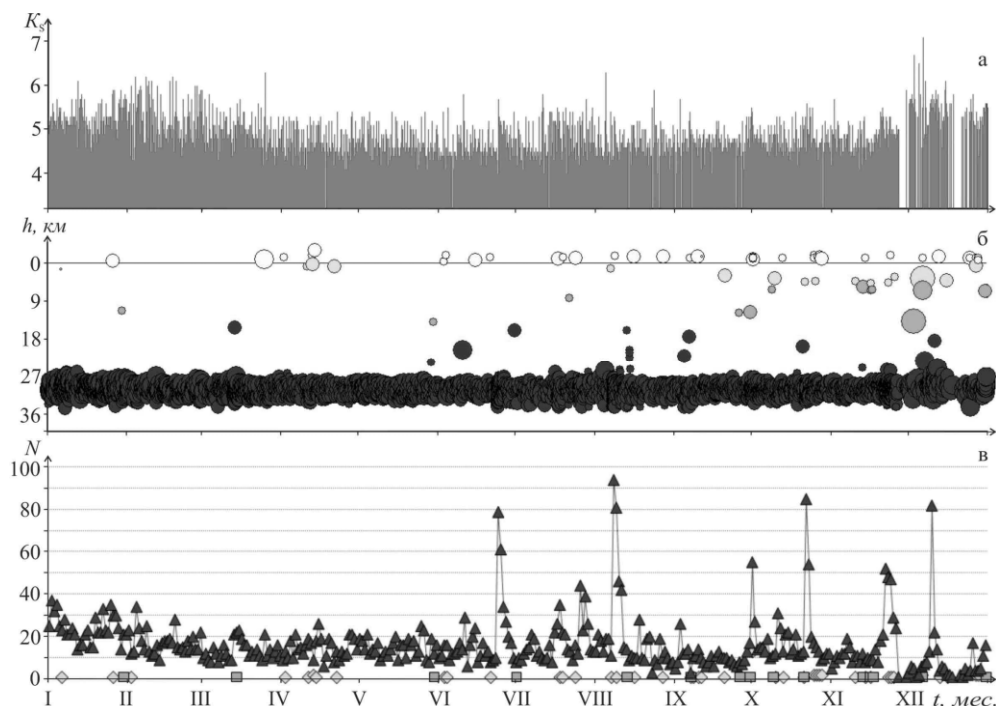


Рис. 5. Изменение во времени энергетического класса K_S (а); глубины гипоцентров h вулканических землетрясений (б); ежесуточного числа поверхностных (ромб), промежуточных (квадрат) и глубоких (треугольник) землетрясений (в), произошедших в радиусе 7 км от влк. Ключевской в 2012 г.

В 2012 г. ($N=5902$, $K_S=3.8-6.5$), как и в предыдущем 2011 г. ($N=5461$, $K_S=3.9-6.0$), практически вся сейсмичность влк. Ключевской была сосредоточена в нижнем (III) горизонте (рис. 5 б), где генерируются глубокие длиннопериодные землетрясения, в образовании которых активную роль играет магматический расплав [24].

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 [21]. В слое (I) было локализовано всего 65 землетрясений с $K_S=3.2-7.1$.

С помощью пакета программ ZMAP [15] были определены значения K_{\min} и угол наклона графика повторяемости для землетрясений нижнего (III) и верхнего слоев (I), в промежуточном слое (II) оказалось недостаточно данных ($N=16$ с $K_S=3.9-6.7$) [8] для определения этих параметров. Для поверхностного слоя в 2012 г. представительный класс получился равным $K_{\min}=4.0$ при угле наклона $\gamma=0.66\pm 0.08$, т.е., по сравнению с таковыми в 2011 г., эти параметры не изменились ($K_{\min}=4.0$, $\gamma=0.73$). Для глубоких землетрясений ($h=20-40$ км) представительный класс в 2012 г. улучшился до $K_{\min}=4.0$, а угол наклона стал более пологим $\gamma=0.96\pm 0.08$ по сравнению с таковыми ($K_{\min}=4.5$, $\gamma=1.30\pm 0.08$) в 2011 г. Среднее значение угла наклона, определенное по данным за 2000–2011 гг., составило $\gamma=1.29$ [14, 16–18]. В 2012 г. на влк. Ключевской «желтый» код опасности выставлялся 64 раза, из которых 26 дней – по спутниковым данным, когда на вулкане наблюдалась термальная аномалия, один день (22 декабря), когда в темное время суток наблюдалось свечение над вулканом, свидетельствующее о присутствии горячего магматического материала в вершинном кратере, а остальные 37 – из-за повышенной сейсмичности. В эти дни было зарегистрировано либо более 100 сейсмических событий IV типа [12], у которых невозможно уверенно выделить объемные волны, либо было локализовано более 50 глубоких землетрясений (рис. 5 в). Надо отметить, что после 27 ноября корректный сейсмический мониторинг влк. Ключевского был осложнен повышенной сейсмичностью, сопровождавшей извержение влк. Плоский Толбачик. Вулканическая активность в 2012 г. на влк. Ключевском проявлялась только в виде фумарольной деятельности.

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

В 2012 г. на влк. Безымянный было зарегистрировано два эксплозивных извержения. По сейсмологическим данным первое извержение произошло 8 марта, второе – 1 сентября.

В 2012 г. в радиусе 6 км от вулкана и диапазоне глубин $h=-2.2-20$ км было локализовано 222 землетрясения с $K_S=2.6-6.6$ (табл. 1, рис. 6 б, в) [8]. Представительный класс для этих событий получился равным $K_{\min}=3.2$ при угле наклона $\gamma=0.62\pm 0.05$. По сравнению со значениями параметров ($N=145$, $K_{\min}=3.7$) в 2009 г. [18] и 2011 г. ($N=153$, $K_{\min}=3.6$, $\gamma=1.24$) [14], количество локализованных землетрясений выросло ~ в 1.5 раза, уровень надежной регистрации улучшился. Наклон графика стал более пологим, чем в 2011 г. ($\gamma=1.24$), и его значение почти совпало с таковым в 2009 г. ($\gamma=0.68$). Землетрясение с максимальным классом $K_S=6.6$ произошло 1 сентября в 03^h14^m в постройке вулкана ($h=-0.2$ км). Первые признаки сейсмической активизации перед извержением 8 марта появились еще в сентябре 2011 г. За месяц до эксплозии стали регистрироваться продолжительные поверхностные сейсмические события – серии (IV тип) [12], являющиеся, по нашему мнению, однозначными предвестниками эксплозивных извержений вулкана. Количество событий IV типа резко выросло накануне извержения (рис. 6 г), которое произошло 8 марта с 21^h27^m до 22^h10^m с максимальной высотой пеплового выброса 8 км над уровнем моря. После извержения сейсмичность резко снизилась до «фонового» уровня. Новый всплеск активности начался в конце июля. Количество землетрясений (III, IV тип) и их энергия постепенно нарастали, достигнув максимума перед извержением ($N_{III}=29$, $N_{IV}=146$). По сейсмологическим данным извержение произошло 1 сентября с 19^h16^m до 19^h45^m, по визуальным наблюдениям высота эруптивного столба достигла высоты 12 км над уровнем моря в 19^h30^m. Сейсмическая подготовка этого извержения была мощнее предыдущего. В период активизации было локализовано $N=107$ землетрясений, в очагах которых было высвобождено энергии в 11.9 раз больше ($\Sigma E=1.2 \cdot 10^7$ Дж), чем в период подготовки извержения с 1 января по 8 марта с $N=93$ и $\Sigma E=0.1 \cdot 10^7$ Дж (рис. 6 в).

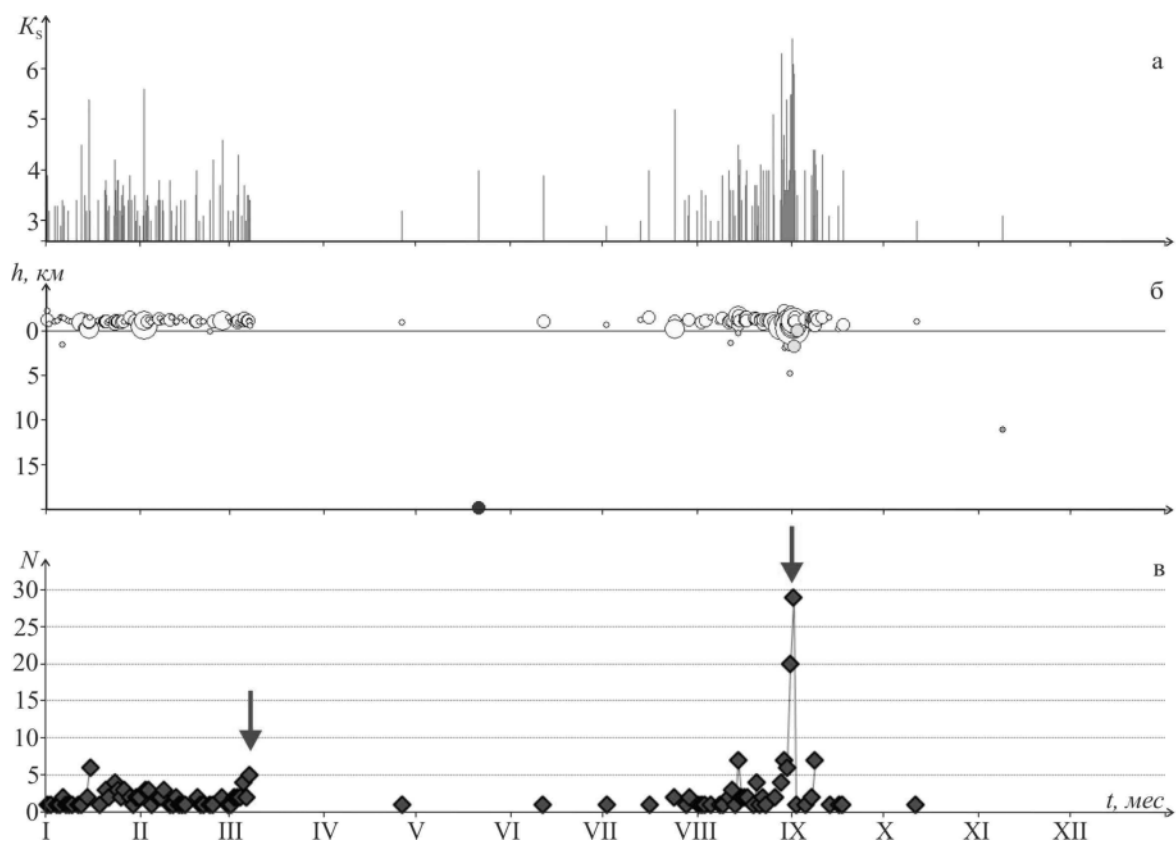


Рис. 6. Изменение во времени энергетического класса K_S (а); глубины гипоцентров h вулканических землетрясений (б); ежесуточного числа поверхностных локализованных землетрясений III типа (в) и землетрясений IV типа (г), произошедших в радиусе 6 км от влк. Безымянный в 2012 г.

Стрелкой указано время эксплозивного извержения.

На влк. Безымянный «желтый» код опасности выставлялся в течение 2012 г. 66 раз. Из них 20 – только по спутниковым данным, когда наблюдалась термальная аномалия. В остальных 46 случаях тревога объявлялась по сейсмическим данным, когда было локализовано хотя бы одно землетрясение с $K_S \geq 4.0$ или более десяти событий с $K_S = 2.6-4.0$ с глубины $h = -3.0-5.0$ км. Дни, когда число зарегистрированных поверхностных событий IV типа превышало $N > 5$, также считались днями «повышенного» уровня сейсмичности. «Оранжевый» код опасности в 2012 г. выставлялся один раз – 7 марта перед извержением вулкана, когда количество землетрясений IV типа превысило $N > 100$. Рост количества землетрясений IV типа, связанных со взрывами на куполе и сходом раскаленных лавин, является прогностическим признаком готовящегося извержения вулкана. На основе ежедневного анализа данных с использованием алгоритма прогноза были сделаны успешные краткосрочные прогнозы начала и масштабов эксплозивных извержений [23]. Для извержения 8 марта первая тревога была объявлена 15 апреля на ближайшие 30 суток, а 3 марта сделано уточнение на последующие семь дней. Для извержения 1 сентября прогноз был сделан за сутки до его начала. В дни извержения вулкана ему был присвоен «красный» код. С 27 ноября корректный сейсмический мониторинг влк. Безымянный был осложнен повышенной сейсмичностью, сопровождавшей извержение влк. Плоский Толбачик.

Вулкан Плоский Толбачик. Действующий влк. Плоский Толбачик вместе с потухшим Острым Толбачиком расположены в южной части Ключевской группы вулканов [24]. Ближайшая телеметрическая станция «Каменистая» (KMNR) расположена в 10 км от кратера вулкана (рис. 1) и регистрирует землетрясения с $K_S \geq 3.3$. Предыдущее Большое трещинное Толбачинское извержение (БТТИ), произошедшее в юго-западном секторе вулкана в 1975–76 гг., предварялось мощной сейсмической подготовкой [25]. В течение 10 дней накануне извержения было локализовано 200 землетрясений с классом $K_S = 7.5 \div 11.5$ [25]. Это позволило успешно предсказать извержение в рамках краткосрочного прогноза. Новое мощное эксплозивно-эффузивное Трещинное Толбачинское извержение (ТТИ) им. 50-летия Института вулканологии и сейсмологии

началось 27 ноября 2012 г. [26, 27]. В отличие от БТТИ сейсмичность, предварявшая новое ТТИ, была относительно слабой. Энергия землетрясений не превышала $K_S \leq 6.5$ [8]. Гипоцентры землетрясений были сосредоточены главным образом под постройкой вулкана в юго-восточном секторе. Частота событий стала постепенно увеличиваться в сентябре 2012 г., и резко выросла накануне извержения. В 2012 г. в радиусе 20 км от вулкана было локализовано 797 землетрясений с $2.7 \leq K_S \leq 11.3$ (табл. 1) в диапазоне глубин $h = -2.7 - 28.1$ км [8]. Уровень K_{\min} , рассчитанный по программе ZMAP, соответствует классу $K_{\min} = 3.7$, угол наклона графика повторяемости $\gamma = 0.44 \pm 0.12$. Наклон графика практически не меняется на протяжении многих лет и близок к значению для региональных тектонических землетрясений ($\gamma = 0.5$) [28]. Событие с максимальным классом $K_S = 11.3$ произошло 30 ноября в 11^h00^m на глубине $h = 6.5$ км в районе реки Толуд Толбачинского Дола [8]. Суммарная энергия $\Sigma E = 2.2 \cdot 10^{11}$ Дж (табл. 1), выделившаяся в очагах землетрясений в 2012 г., в 4826 раз превышает таковую в 2011 г. Исходя из опыта сейсмологических наблюдений перед извержением БТТИ-1975 [25], для этого района был определен уровень «повышенной» сейсмичности, когда число локализованных за сутки землетрясений $N \geq 5$ с классом $K_S \geq 4.0$, или $N \geq 2$ с $K_S \geq 5.0$, или $N \geq 1$ с $K_S \geq 6.0$. Для общего числа поверхностных землетрясений в постройке (III тип + IV тип + низкочастотные серии [12]) граница «нормальной» сейсмичности равна 50. Впервые в исследуемый период уровень «повышенной» сейсмичности был зафиксирован 9 сентября, когда было локализовано 6 землетрясений с $4.5 \leq K_S \leq 8.7$ [8]. Следующее повышение сейсмического фона было зарегистрировано только в ноябре. Накануне извержения, 26 ноября ($N = 151$, $3.5 \leq K_S \leq 7.2$, $h = -2.0 - 4.0$ км) и на следующие сутки ($N = 172$, $3.7 \leq K_S \leq 9.4$, $h = -1.8 - 5.7$ км) резко увеличилось количество локализованных землетрясений (рис. 7) [8]. Все они были приурочены к постройке влк. Плоский Толбачик.

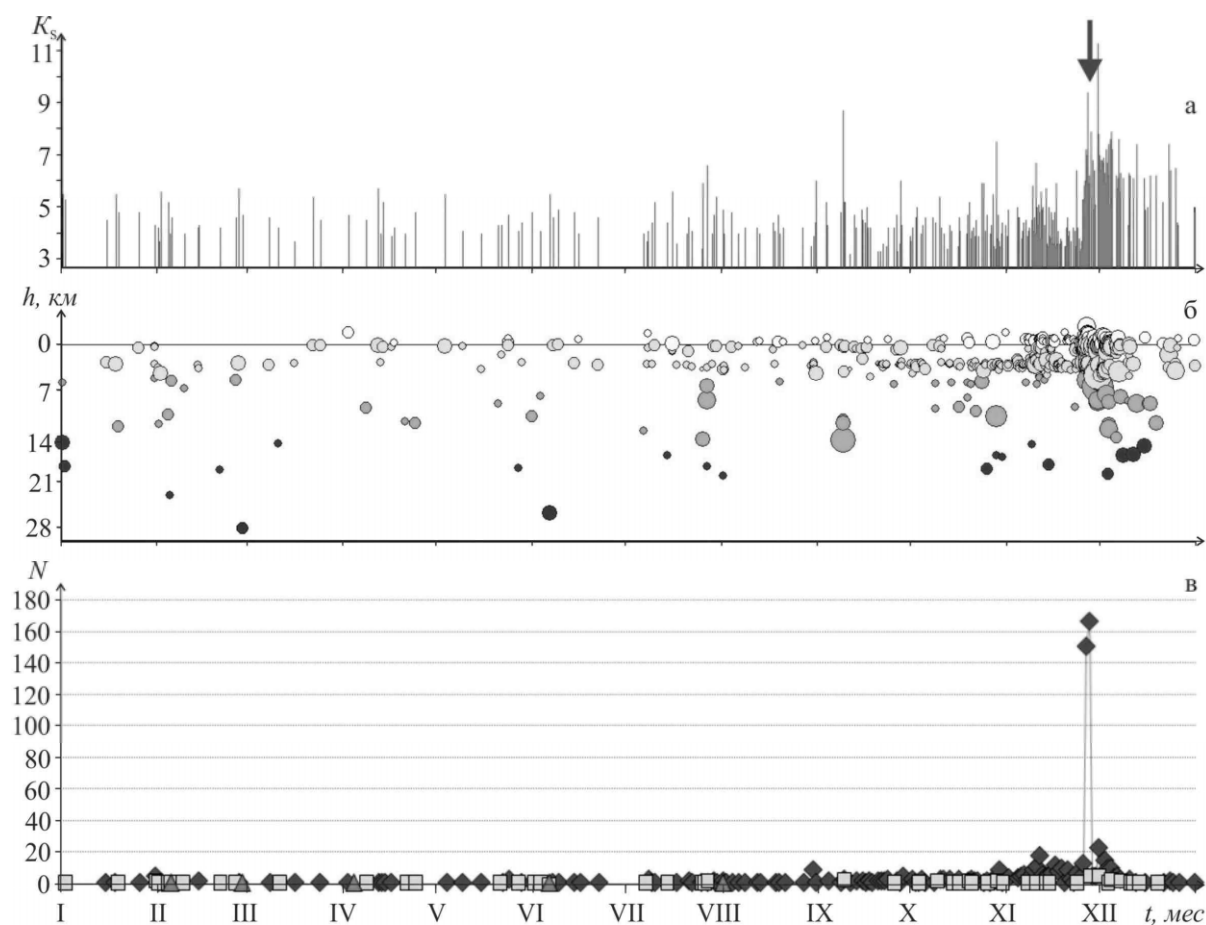


Рис. 7. Изменение во времени энергетического класса K_S (а), глубины гипоцентров h вулканических землетрясений (б); ежесуточного числа поверхностных (ромб), промежуточных (квадрат) и глубоких (треугольник) землетрясений (в), произошедших в радиусе 20 км от влк. Плоский Толбачик в 2012 г.

Стрелкой указано время начала эксплозивно-эффузивного извержения.

В соответствии с регламентом о срочном оповещении заинтересованных ведомств (КФ РЭС, группа KVERT ИВиС ДВО РАН, Аляскинская вулканологическая обсерватория, Токио VACC и др.), 27 ноября в 02^h18^m сотрудниками лаборатории исследования сейсмической и вулканической активности было отправлено первое сообщение о высокой сейсмической активности влк. Плоский Толбачик [28]. По сейсмологическим данным извержение началось в 05^h15^m. Первое сообщение о начавшемся извержении было отправлено в 05^h45^m, а в 06^h20^m – о возможном пепловом выбросе в 05^h52^m на высоту 6 км над уровнем моря. Высота выброса определялась по сейсмическим данным с использованием накопленного опыта регистрации эксплозивных извержений влк. Безымянный [20]. Из-за ненастной погоды вулкан был закрыт облачностью и недоступен для видео и спутниковых наблюдений. Первым визуальным подтверждением извержения влк. Плоский Толбачик было сообщение от сотрудников сейсмостанции «Козыревск» о свечении над кратером и пепловых выбросах, которые просматривались в разрывах между облаками 27 ноября в 10^h00^m. Информация о выпадении пепла в населенных пунктах Майское и Красный Яр в 50–60 км на северо-запад от вулкана поступила утром 28 ноября. На спутниковых снимках были зарегистрированы термальная аномалия и пепловый шлейф от вулкана.

Особое внимание хотелось бы обратить на развитие сейсмичности в начале извержения, так как эта информация важна для создания модели подготовки и механизма извержения. На рис. 8 показано положение эпицентров землетрясений за период 00^h–08^h 27 ноября на аэрофотограмметрических снимках, полученных во время вертолетного облета вулкана 13 декабря 2012 г. [30]. Все землетрясения на рис. 8 имеют глубины $h = -1.8 - 5.0$ км при ошибке определения ± 3 км, поэтому вертикальное распределение не изучалось. Образовавшаяся новая трещинная зона начинается на высоте 2358 м над уровнем моря и заканчивается на отметке 1460 м. Вдоль трещины протяженностью 6 км и шириной 350 м расположены многочисленные эруптивные центры [30]. Верхний эруптивный центр (ВЭЦ), расположенный на высоте ~ 1870 м, был назван в честь сотрудника Института вулканологии Игоря Меняйлова. Нижний эруптивный центр (НЭЦ), расположенный на высоте ~ 1460 м, был назван в честь Софьи Набоко. На рис. 8 а показаны эпицентры землетрясений, локализованных до начала извержения [8]. Практически все землетрясения произошли в узкой зоне юго-восточного простирания от кратера влк. Плоский Толбачик, ограниченной районом возможного внедрения нового магматического материала.

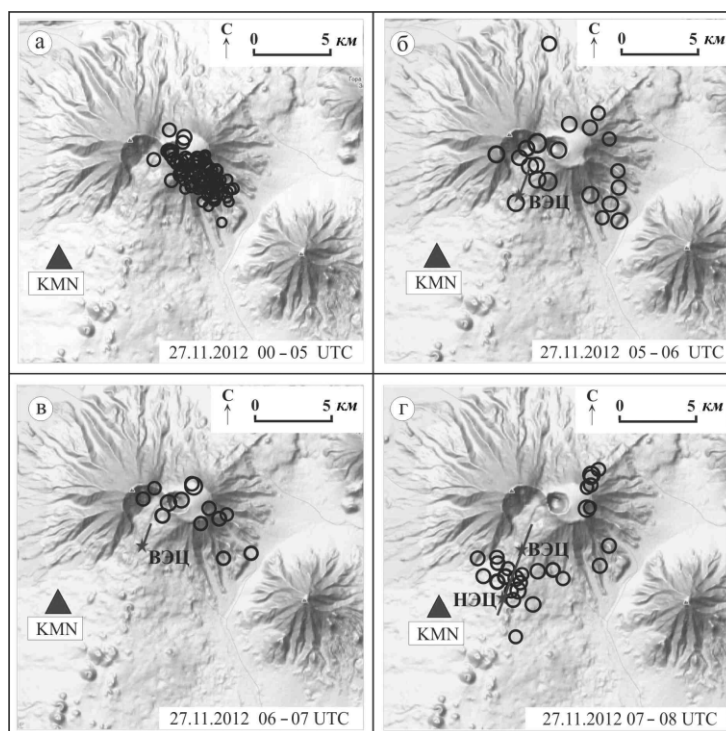


Рис. 8. Положение эпицентров землетрясений за период времени 00^h–08^h 27 ноября на аэрофотограмметрических снимках от 13 декабря 2012 г.

Красной линией обозначена радиальная трещина, вдоль которой расположены эруптивные центры: ВЭЦ – верхний эруптивный центр, НЭЦ – нижний эруптивный центр.

На рис. 8 б представлены эпицентры землетрясений, которые были связаны с началом извержения. Часть эпицентров расположена вблизи ВЭЦ на высоте ~ 1870 м, а остальные – по периметру кратера вулкана. Такое расположение могло свидетельствовать о воздымании постройки и ее растрескивании. Примерно с 06^h00^m до 07^h00^m (рис. 8 в) количество землетрясений снизилось, эпицентры легли в ту же зону, вытянутую от кратера на юго-восток, как и перед извержением (рис. 8 а). В следующий час с 07^h00^m до 08^h00^m большинство эпицентров сместилось к вновь образовавшемуся НЭЦ на высоте ~ 1460 м. Это говорит о хорошей точности определения положений эпицентров. После 08^h00^m сейсмические события слились в мощное непрерывное вулканическое дрожание, которое регистрировалось до конца года.

В 2012 г. на влк. Плоский Толбачик практически до начала извержения регистрировалась «фоновая» сейсмичность и «желтый» код опасности выставлялся только один день в сентябре и шесть дней в ноябре, когда сейсмическая активность превышала этот уровень. Максимальный «красный» уровень был присвоен 27 ноября. В этот день наблюдался высочайший уровень сейсмичности, сопровождавшей подготовку и начало извержения. Было зарегистрировано 267 землетрясений, из них 172 с $K_S=3.7-9.4$ и $h=-1.8-5.7$ км было локализовано. Регистрировались серии поверхностных событий, возможно сопровождавших пепловые выбросы до 10 км над уровнем моря, подтвержденные визуальными и спутниковыми данными. С 28 ноября и до конца года сейсмической и вулканической активности вулкана присваивался 34 раза «оранжевый» код опасности.

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 2012 г. в пределах окружности радиусом $R=10.1$ км, включающей оба вулкана (рис. 1), было локализовано всего 33 землетрясения с $K_S=3.7-5.3$ в диапазоне глубин $h=-2.6-32.0$ км [8]. Такого количества событий для расчета представительного класса K_{min} и угла наклона графика повторяемости γ не достаточно. Землетрясение с максимальным классом $K_S=5.3$ произошло 3 декабря в 22^h48^m под постройкой вулкана ($h=27.1$ км) [8]. Карта эпицентров и проекция гипоцентров на вертикальный разрез представлены на рис. 1. В 2012 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.

Координаты гипоцентров для Корякского и Авачинского вулканов рассчитывались по программе «DIMAS» [6] с использованием одномерной скоростной модели среды для влк. Авачинский [1]. Для сейсмических событий, расположенных вне этих вулканов, приблизительно по изолинии 400 м, использовался в расчетах обычный региональный годограф [7]. Карта эпицентров и проекция гипоцентров на вертикальный разрез представлены на рис. 7.

В 2012 г. в районе Авачинской группы вулканов было локализовано 169 землетрясений с $K_S=2.0-5.9$ [9], суммарная энергия которых равна $\Sigma E=2.007 \cdot 10^7$ Дж (табл. 2). Это ~ в 1.9 раза меньше аналогичных значений в 2011 г. ($N=420$, $\Sigma E=3.748 \cdot 10^7$ Дж) [14], а по сравнению с 2009 г. ($N=1920$, $\Sigma E=40.43 \cdot 10^7$ Дж), когда на влк. Корякский наблюдалась высокая сейсмическая активность, возросшая ~ в 11.4 и 20.1 раза соответственно [18]. В 2012 г. землетрясение с максимальным классом $K_S=5.9$ произошло в постройке ($h=-1.2$ км) Авачинского вулкана 3 августа в 01^h59^m [9]. Карта эпицентров и проекция гипоцентров на вертикальный разрез представлены на рис. 9.

Таблица 2. Распределение землетрясений Авачинской группы вулканов по энергетическим классам K_S в 2012 г.

Название вулкана	$R_{зоны},$ км	K_S					N_{Σ}	$\Sigma E,$ 10^6 Дж
		2	3	4	5	6		
Авачинский	8	21	90	37	8	1	157	1.852
Корякский	9		8	2	1		11	0.124
Вне вулканов					1		1	0.031
Всего		21	98	39	10	1	169	2.007

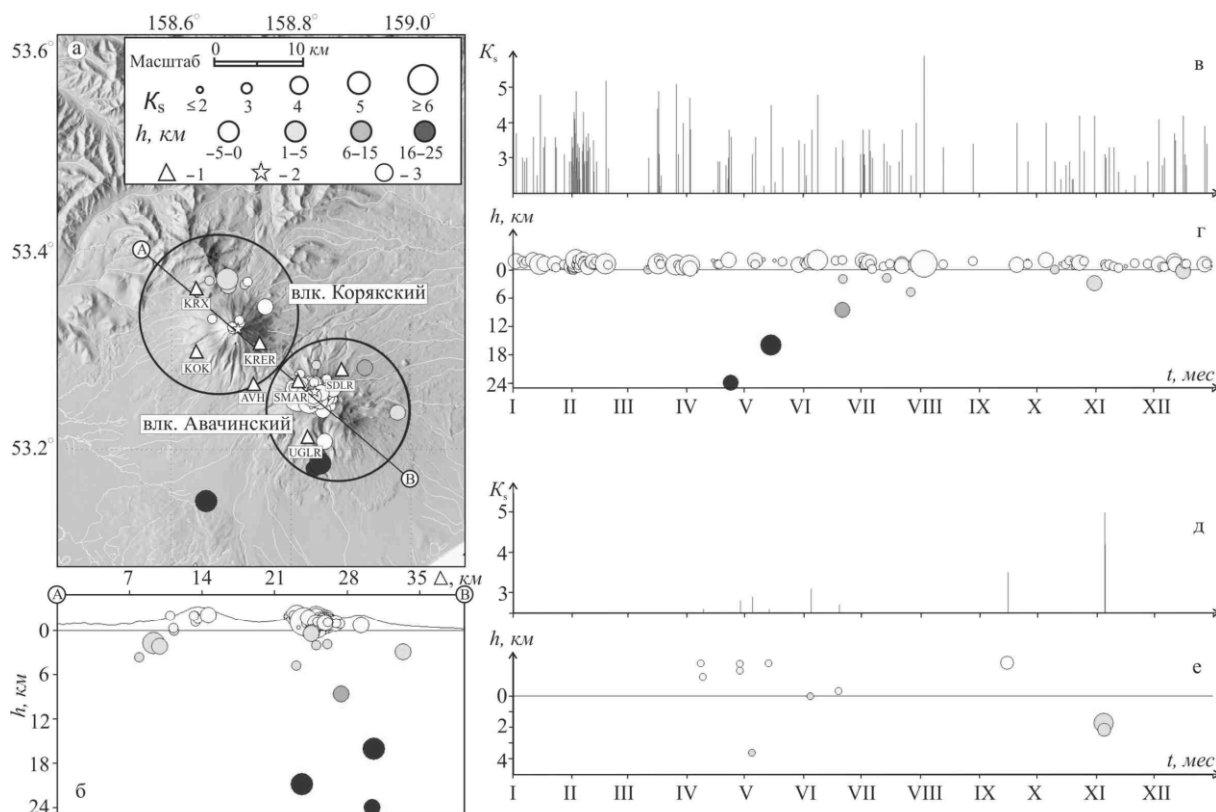


Рис. 9. Карта эпицентров землетрясений Авачинской группы вулканов в 2012 г. (а) и проекция гипоцентров на вертикальный разрез по линии А–В (б), а также изменение во времени параметров вулканических землетрясений Авачинского (в, г) и Корякского (д, е) вулканов в 2012 г.

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

Представительный класс землетрясений Авачинской группы практически не изменился по сравнению с таковым в 2011 г. ($K_{\min}=2.7$) [14] и составил $K_{\min}=2.9$ (рис. 10). Угол наклона графика повторяемости практически не меняется последние годы. В 2012 г. он был равен $\gamma=0.69\pm 0.04$, а среднее его значение за период 2006–2011 гг. $\gamma=0.56$ [14, 16–18]. На рис. 9 в–е представлены распределения во времени значений энергетического класса K_S и глубины землетрясений для каждого вулкана.

В 2012 г. в радиусе 8 км от кратера влк. Авачинский в диапазоне глубин $h=-2.1-24.0$ км было локализовано 157 землетрясений с $K_S=2.0-5.9$ (рис. 9 в, г). На влк. Корякский в 2012 г. в радиусе 9 км от вершины вулкана и диапазоне глубин $h=-2.1-3.6$ км было локализовано всего 11 землетрясений с $K_S=2.5-5.0$ (рис. 9 д, е) [9].

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

Мутновско-Гореловская группа вулканов расположена в 70 км к югу от г. Петропавловск-Камчатский и включает два действующих вулкана – Мутновский и Горелый. В районе этой группы вулканов расположены Мутновская и Верхне-Мутновская геотермальные электростанции (рис. 11).

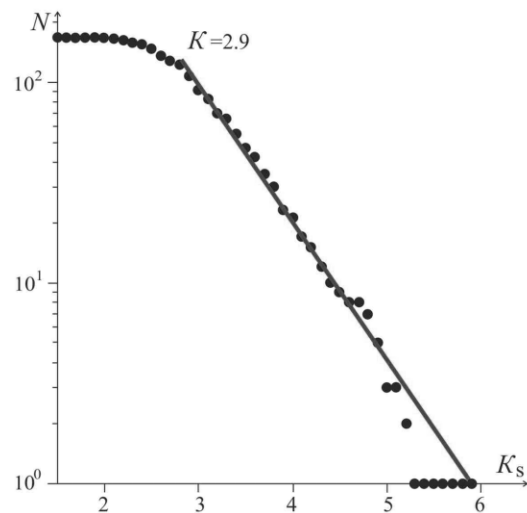


Рис. 10. График повторяемости землетрясений Авачинской группы вулканов в 2012 г.

Координаты гипоцентров для вулканов Мутновский и Горелый в 2012 г. рассчитывались по программе «DIMAS» [6], предусматривающей поиск решений по глубине выше уровня моря. В связи с отсутствием локальных скоростных моделей для этого района при расчете положений гипоцентров применялась одномерная скоростная модель Камчатского региона [7].

Так же, как и в 2010–2011 гг., длительное время (с 4 февраля по 10 мая) отсутствовали данные со станции «Горелый» (GRL) и в течение всего года регистрировалось сильное спазматическое вулканическое дрожание ($A/T_{\max} \leq 1.8 \text{ мкм/с}$), источником которого является влк. Горелый. Все это не позволило локализовать в районе Мутновско-Гореловской группы землетрясения с энергетическим классом $K_S < 3.6$. Тем не менее, в 2012 г. в каталог вошло 79 землетрясений с суммарной энергией, равной $\Sigma E = 1.417 \cdot 10^7 \text{ Дж}$ (табл. 3), что превышает показатели в 2011 г. в 4.4 раза по числу землетрясений и ~ в 3.4 раза по суммарной энергии ($N=18, \Sigma E=0.418 \cdot 10^7 \text{ Дж}$) [10].

Таблица 3. Распределение землетрясений района Гореловско-Мутновской группы вулканов по энергетическим классам K_S в 2012 г.

Название вулкана	$R_{\text{зоны}}, \text{ км}$	K_S				N_{Σ}	$\Sigma E, 10^7 \text{ Дж}$
		4	5	6	7		
Горелый	7	14	21	1	2	38	0.894
Мутновский	7	9	15			24	0.113
Вне вулканов		5	7	5		17	0.410
Всего		28	43	6	2	79	1.417

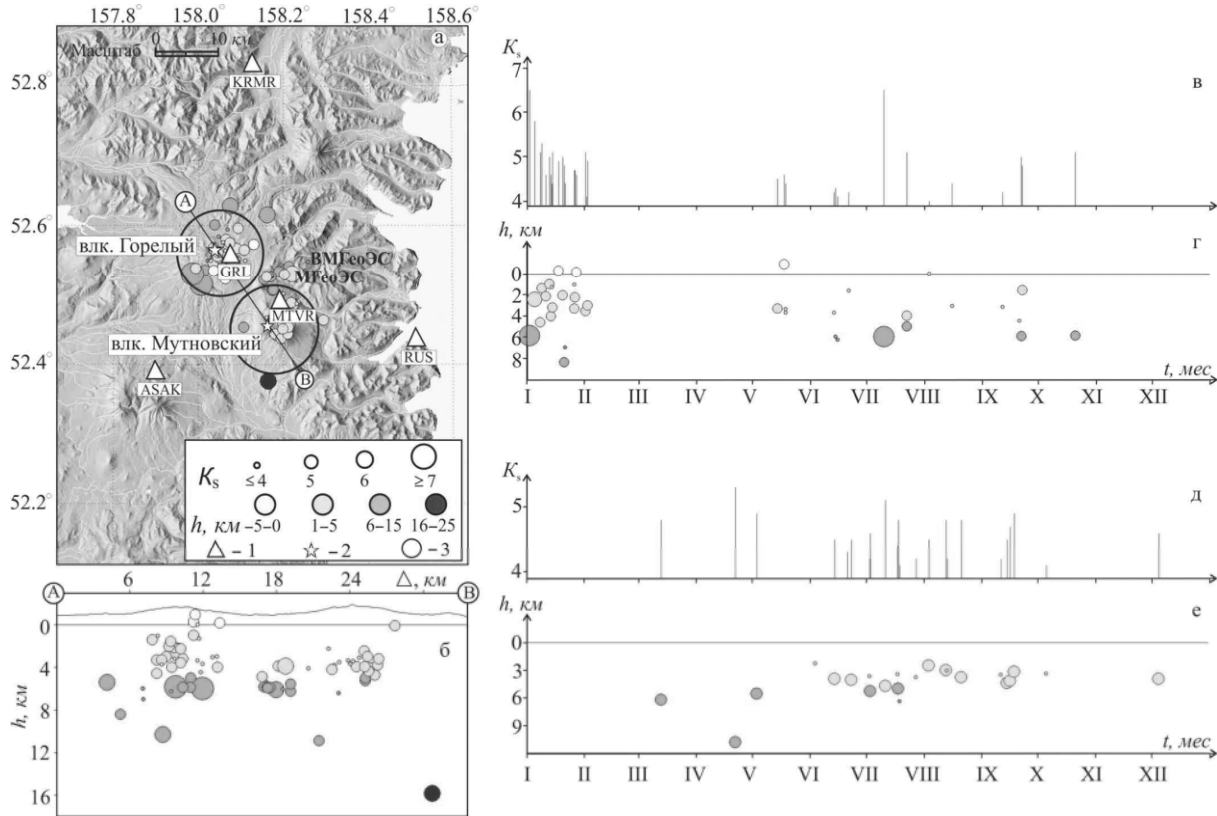


Рис. 11. Карта эпицентров (а) и проекция гипоцентров на вертикальный разрез по линии А–В (б) для землетрясений Мутновско-Гореловской группы, а также изменение во времени энергетического класса K_S (в, д) и глубины гипоцентров h (г, е) вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 7 км от влк. Горелый и Мутновский соответственно

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

Землетрясения с максимальным классом $K_S=6.5$ произошли на глубине $h \sim 6.0 \text{ км}$ под юго-западной частью постройки влк. Горелый 2 января в $14^{\text{h}}27^{\text{m}}$ и 10 июля $05^{\text{h}}06^{\text{m}}$ [10]. Для построения в 2012 г. графика повторяемости землетрясений района Мутновско-Гореловской группы вулканов данных недостаточно. Ближайшая к влк. Горелый станция GRL расположена в 4 км от кра-

тера и позволяет регистрировать землетрясения с $K_S \geq 2.2$. В 2012 г., как и в предыдущие 2010–2011 гг. [14, 16], на влк. Горелый наблюдалась слабая сейсмичность. В радиусе 7 км от вершины вулкана и диапазоне глубин $h = -0.9 - 8.4$ км было локализовано всего 38 землетрясений $K_S = 3.9 - 6.5$ (рис. 11 в, г). Это ~ в 71.9 раза меньше числа землетрясений в 2009 г. ($N = 2731$) [16], когда на влк. Горелый были локализованы рои землетрясений, сопровождавшие образование высокотемпературной бокки у основания стенки активного кратера [16, 18, 31].

Станция «Мутновская» (MTVR) установлена на расстоянии ~ 3 км от активного кратера (рис. 11). Минимальный уровень регистрируемой сейсмичности по этой станции соответствует $K_{\min} = 2.0$. В 2012 г. в радиусе 7 км от вулкана было локализовано всего 24 землетрясения (рис. 11 д, е) с $K_S = 3.9 - 5.3$, диапазон глубин $h = 2.3 - 10.9$ км. Землетрясение с максимальным классом $K_S = 5.3$ произошло 21 апреля в 21^h43^m под западным сектором постройки вулкана ($h = 10.9$ км). В 2012 г. на влк. Мутновский «желтый» код активности выставлялся 62 раза, когда станцией MTVR регистрировалось большое количество ($N \geq 50$) слабых сейсмических событий.

Вулкан Кизимен, самый южный из действующих вулканов Центральной Камчатской депрессии, по отношению к другим вулканам Камчатки занимает обособленное положение на западном склоне южной части хр. Тумрок [32]. Ближайшая телеметрическая станция «Кизимен» (KZV) расположена на склоне вулкана ~ в 2.5 км от вершины (рис. 12 а).

При расчете положений гипоцентров землетрясений района влк. Кизимен, так же, как и для землетрясений Мутновско-Гореловской группы вулканов, использовались одномерная скоростная модель Камчатского региона [7] и пакет программ «DIMAS» [6], предусматривающий поиск решений по глубине выше уровня моря.

В 2012 г. продолжалось извержение влк. Кизимен, начавшееся в ноябре 2010 г. Уровень сейсмичности, сопровождавшей извержение, по сравнению с таковым в 2010–2011 гг. стал ниже и по количеству локализованных землетрясений, и по выделенной в их очагах энергии. Всего в 2012 г. в районе вулкана в диапазоне глубин $h = -2.5 - 28.9$ км было локализовано 2058 землетрясений [11], из них 1973 в радиусе 15 км от вершины вулкана (табл. 4). Это количество меньше ~ в 1.4 раза, чем в 2010 г. ($N = 2864$) [16], и в ~ в 20.1 меньше, чем в 2011 г. ($N = 41452$), когда выжимание вязкой лавы сопровождалось микроземлетрясениями с квазипериодичностью $\Delta T = 8 - 50$ с и продолжительностью от десятков минут до десятков дней [14]. Суммарная энергия, высвобожденная в очагах землетрясений в 2012 г., составила $\Sigma E = 4.887 \cdot 10^8$ Дж (табл. 5), что значительно (~ в 2954 раза) меньше, чем в 2010 г. ($\Sigma E = 14.445 \cdot 10^{11}$ Дж), когда перед сильнейшим извержением выжимание интрузии сопровождалось землетрясениями с $K_S \geq 11$ ($N = 5$) [16], и ~ в 118.5 раз меньше,

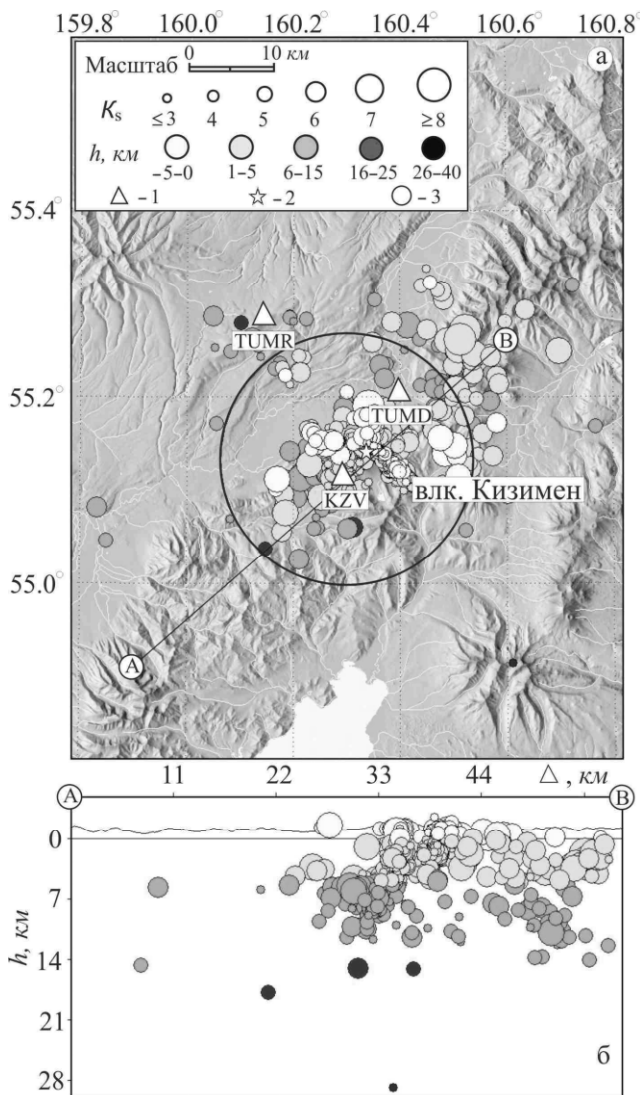


Рис. 12. Карта эпицентров (а) и проекция гипоцентров на вертикальную плоскость по линии А–В (б) для землетрясений района влк. Кизимен

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

чем в 2011 г. ($\Sigma E = 5.794 \cdot 10^{10}$ Дж) [14]. Землетрясение с максимальным классом $K_S = 8.0$ произошло в постройке вулкана ($h = -0.1$ км) 3 марта в 17^h48^m [11].

Представительный класс землетрясений, рассчитанный по программе ZMAP [15], получился равным $K_{\min} = 4.3$. Наклон графика повторяемости в 2012 г. стал более пологим $\gamma = 0.85 \pm 0.1$ по сравнению с таковым ($\gamma = 1.39 \pm 0.11$) в предыдущем 2011 г. (рис. 13), но круче, чем в 2009 г. ($\gamma = 0.54$) и 2010 г. ($\gamma = 0.51$). Крутизна наклона свидетельствует о сейсмичности, связанной с магматическими процессами [33, 34].

Таблица 4. Распределение землетрясений района вулкана Кизимен по энергетическим классам K_S в 2012 г.

Название вулкана	$R_{\text{зоны}},$ км	K_S						N_{Σ}	$\Sigma E,$ 10^8 Дж
		3	4	5	6	7	8		
Кизимен	15	2	1410	477	68	15	1	1973	3.126
Вне вулкана			12	37	28	6	2	85	1.761
Всего		2	1422	514	96	21	3	2058	4.887

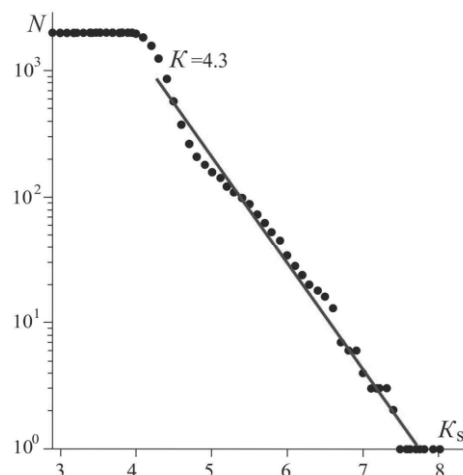


Рис. 13. График повторяемости землетрясений вулкана Кизимен за 2012 г.

На рис. 14 представлены изменения во времени различных параметров землетрясений, эпицентры которых находятся внутри окружности радиусом $R = 15$ км от кратера вулкана.

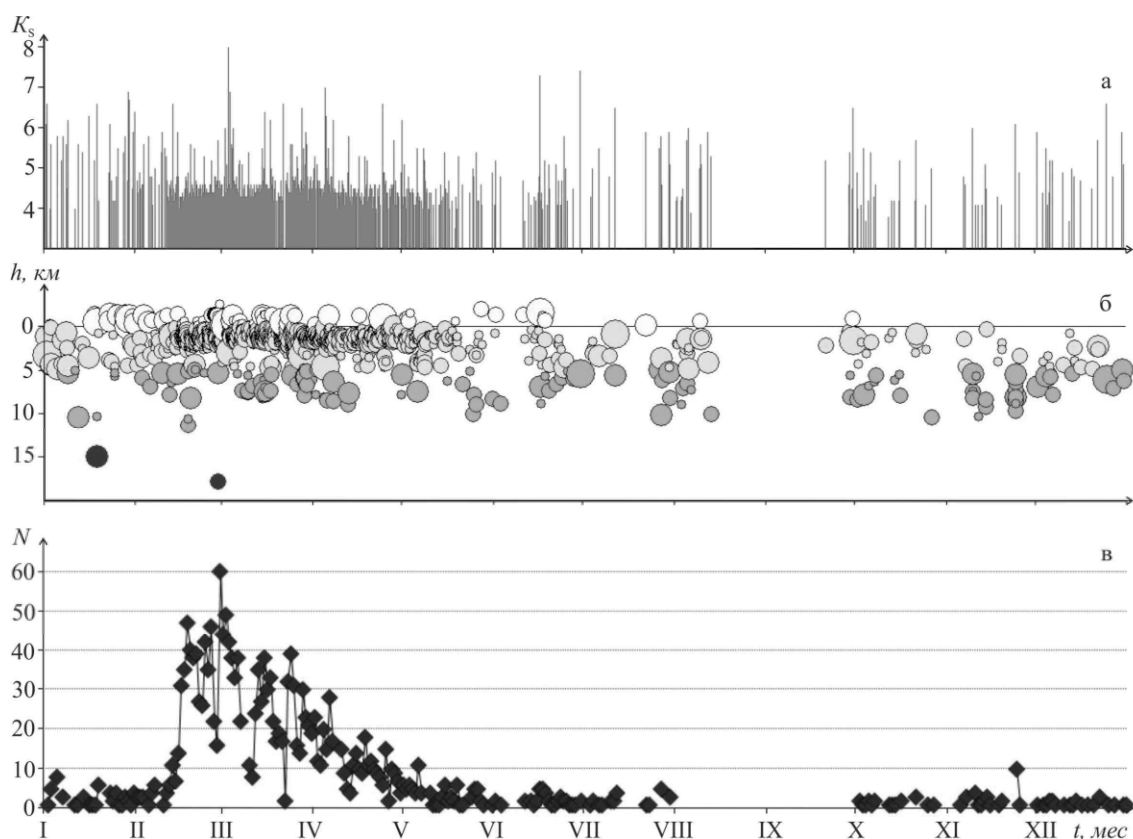


Рис. 14. Изменение во времени энергетического класса K_S (а), глубины гипоцентров h (б) и ежесуточного числа вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 15 км от влк. Кизимен в 2012 г.

В 2012 г. на влк. Кизимен регистрировалось квазипериодическое появление микроземлетрясений («drumbeats») [35, 36]. Впервые подобное явление, связанное с выжиманием вязкой

магмы, было отмечено 9 декабря 2010 г. за несколько часов до пепловых выбросов [16], а в 2011 г. оно наблюдалось непрерывно в течение нескольких месяцев (май–октябрь). В 2012 г. режим «drumbeats» по частоте появления землетрясений и их энергии был намного слабее, чем в предыдущем 2011 г. Большинство землетрясений было зарегистрировано только одной станцией «Кизимен» (KZV) и не вошло в каталог. В период с 14 августа по 19 сентября (рис. 14), когда станция KZV не работала, определить параметры землетрясений было невозможно из-за недостатка данных. Максимальное количество землетрясений ($N=60$) за сутки было локализовано 29 февраля (рис. 14 в), тогда как в 2011 г. оно было ~ в 30 раз больше ($N=1676$) [14].

В 2012 г. продолжалось эксплозивно-эффузивное извержение с пепловыми выбросами до 5000 м над уровнем моря и вязкими лавовыми потоками. На протяжении всего года на влк. Кизимен из-за высокой сейсмической и вулканической активности был выставлен повышенный код опасности: «оранжевый» – 241 день, «желтый» – 66. Из них 116 раз из-за высокого уровня сейсмичности, в остальных случаях, когда на вулкане наблюдался лавовый поток или при наличии термальной аномалии на спутниковых снимках (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>).

Закключение. В 2012 г. наблюдалась высокая активность вулканов Камчатки.

Главное событие 2012 г. – это новое мощное эксплозивно-эффузивное трещинное Толбачинское извержение (ТТИ) им. 50-летия Института вулканологии и сейсмологии, начавшееся 27 ноября 2012 г. после почти 36-летнего периода покоя. В отличие от предыдущего Большого трещинного Толбачинского извержения (БТТИ) 1975 г., предварявшегося мощной сейсмической подготовкой, сейсмичность перед ТТИ была относительно слабой. Извержение продолжалось до сентября 2013 г. и сопровождалось пепловыми выбросами и излиянием протяженных лавовых потоков.

В течение всего года на влк. Ключевской наблюдалась высокая сейсмическая активность в диапазоне глубин $h=25-36$ км.

На влк. Шивелуч продолжалась высокая вулканическая активность с эксплозивными извержениями и сходом раскаленных лавин. При этом сейсмическая активность, сопровождавшая рост и обрушение купола, была на том же уровне, что и в предыдущем 2011 г. [14].

В 2012 г. на влк. Безымянный произошло два эксплозивных извержения: 8 марта и 1 сентября. Увеличение числа сейсмических событий и их энергии перед эксплозией позволили сделать успешные краткосрочные прогнозы времени, места и масштабов этих двух извержений [23] без ложных тревог.

Продолжалось извержение влк. Кизимен, начавшееся в ноябре 2010 г. Извержение сопровождалось высокой сейсмической активностью в режиме «drumbeats». Это квазирегулярное появление землетрясений, примерно 2–3 события в минуту, на длительных временных участках, от часа до нескольких месяцев, связанное с выжиманием вязкой магмы.

Вулканы Горелый и Мутновский представляют потенциальную опасность для геоэнергетического комплекса МГеоЭС и ВМГеоЭС. В 2012 г. на влк. Горелый 273 дня выставился «желтый» уровень опасности, из них – 265 раз при повышенной сейсмической активности в виде спазматического вулканического дрожания с $A/T_{\max}=0.5-1.8$ мкм/с и 8 раз – при наличии термальной аномалии на спутниковых снимках. К сожалению, отсутствие в течение длительного времени данных со станции «Горелый» (GRL), а также регистрация ею вулканического дрожания от влк. Горелый не позволили зарегистрировать сейсмичность в районе Мутновско-Гореловской групп в полном объеме.

Всего в 2012 г. в районе Северной, Авачинской и Мутновско-Гореловской групп вулканов, а также в районе влк. Кизимен было локализовано 9944 землетрясения, высвобожденная ими сейсмическая энергия составила $\Sigma E=2.2 \cdot 10^{11}$ Дж.

Л и т е р а т у р а

1. Сеньюков 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 2012 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 21 (2012 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – Приложение на CD_ROM.
4. **Чебров В.Н., Сениюков С.Л., Дрознина С.Я.** Камчатка и Командорские острова // Землетрясения России, 2012 год. – Обнинск: ГС РАН, 2014. – С. 52–62.
5. **Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Кугаенко Ю.А., Левина В.И., Сениюков 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.Д., 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.), Кожевникова Т.Ю., Толокнова С.Л., Напылова Н.А., Напылова О.А., Демянчук М.В., Соболевская О.В. (сост.).** Каталог землетрясений Северной группы вулканов за 2012 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 21 (2012 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – Приложение на CD_ROM.
9. **Нуждина И.Н. (отв. сост.), Кожевникова Т.Ю., Толокнова С.Л., Назарова З.А., Соболевская О.В. (сост.).** Каталог землетрясений Авачинской группы вулканов за 2012 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 21 (2012 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – Приложение на CD_ROM.
10. **Нуждина И.Н. (отв. сост.), Кожевникова Т.Ю., Толокнова С.Л., Соболевская О.В., Назарова З.А. (сост.).** Каталог землетрясений Мутновско-Гореловской группы вулканов за 2012 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 21 (2012 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – Приложение на CD_ROM.
11. **Нуждина И.Н. (отв. сост.), Кожевникова Т.Ю., Толокнова С.Л., Назарова З.А. (сост.).** Каталог землетрясений вулкана Кизимен за 2012 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 21 (2012 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – Приложение на CD_ROM.
12. **Токарев П.И.** Вулканические землетрясения Камчатки. – М.: Наука, 1981. – 164 с.
13. **Федотов С.А.** Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. – М.: Наука, 1972. – 117 с.
14. **Сениюков С.Л., Нуждина И.Н.** Вулканы Камчатки // Землетрясения Северной Евразии, 2011 год. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – С. 463–476.
15. **Weimer S.** A software package to analyze seismicity: ZMAP // Seism. Res. Lett. – 2001. – 72. – N 2. – P. 374–383.
16. **Сениюков С.Л., Нуждина И.Н.** Вулканы Камчатки // Землетрясения Северной Евразии, 2010 год. – Обнинск: ГС РАН, 2016. – С. 382–395.
17. **Сениюков С.Л., Нуждина И.Н., Дрознина С.Я.** Вулканы Камчатки // Землетрясения Северной Евразии, 2006 год. – Обнинск: ГС РАН, 2012. – С. 449–460.
18. **Сениюков С.Л., Нуждина И.Н., Дрознина С.Я.** Вулканы Камчатки // Землетрясения Северной Евразии, 2009 год. – Обнинск: ГС РАН, 2015. – С. 352–364.
19. **Кугаенко Ю.А., Павлов В.М., Иванова Е.И., Абубакиров И.Р., Салтыков В.А., Воропаев П.В.** Толудское вулканотектоническое землетрясение 30 ноября 2012 г. с $K_S=12.3$, $M_w=4.8$, $I_0^p=7-8$ и Толудская вспышка сейсмичности, сопровождавшие начало Трещинного Толбачинского Извержения (Камчатка) // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 21 (2012 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – С. 408–419.
20. **Senyukov S.L., Droznina S.Ya., Kozhevnikova T.Yu.** Experience of the detection of ash plume and estimation its height using local seismicity for Kamchatka volcanoes during 2003–2011 (Kamchatka Peninsula, Russia) // Complex monitoring of volcanic activity: methods and results, New York: Nova Science Publishers, Inc. – 2001. – P. 35–52.
21. **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.
22. **Сениюков 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.
23. **Сениюков С.Л.** Прогноз извержений вулканов Ключевской и Безымянный на Камчатке // Saarbrücken: LAP LAMBERTS Academic Publishing. – 2013. – 144 с.

24. 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.
25. Двигало В.Н., Федотов С.А., Чирков А.М. Вулкан Плоский Толбачик // Действующие вулканы Камчатки. М.: Наука, 1991. – Т. 1. – С. 200–213.
26. Токарев П.И. Предсказание места и времени начала большого Толбачинского извержения в июле 1975 г. // ДАН СССР. 1976. – 229. – № 2. – С. 439–442.
27. Самойленко С.Б., Мельников Д.В., Магуськин М.А., Овсянников А.А. Начало Трещинного Толбачинского извержения в 2012 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2012. – № 2. – С. 20–22.
28. Senyukov S.L., Nuzhdina I.N., Droznina S.Y., Garbuzova V.T., Kozhevnikova T.Y., Sobolevskaya O.V., Nazarova Z.A., Bliznetsov V.E. Seismic monitoring of the Plosky Tolbachik eruption in 2012–2013 (Kamchatka peninsula Russia) // Journal of Volcanology and Geothermal Research. – 2015. – 302. – С. 117–129.
29. Салтыков В.А., Кравченко Н.М. Комплексный анализ сейсмичности Камчатки 2005–2007 гг. на основе регионального каталога // Вулканология и сейсмология. – 2009. – № 4. – С. 53–63.
30. Двигало В.Н., Свирид И.Ю., Шевченко А.В. Первые количественные оценки параметров Трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. по данным аэрофотограмметрических наблюдений // Вулканология и сейсмология. – 2014. – № 5. – С. 3–11.
31. Овсянников А.А. Состояние вулкана Горелый в июне 2010 г. // Вестник КРАУНЦ. Наука о Земле. – 2010. – № 1. – Выпуск 15. – С. 10.
32. Действующие вулканы Камчатки / Под ред. С.А. Федотова, Ю.П. Масуренкова – М.: Наука, 1991. – Т. II. – С. 18–32.
33. Murru M., Montuori C. The locations of magma chambers at Mt. Etna, Italy, mapped by b-values // Geophysical research letters. – 1999. – 26. – N 16. – P. 2553–2556.
34. Wiemer Stefan, McNutt Stephen R. Variations in the frequency-magnitude distribution with depth in two volcanic areas: Mount St. Helens, Washington, and Mt. Spurr, Alaska. // Geophysical research letters. – 1997. – 24. – N 2. – P. 189–192.
35. Фирстов П.П., Шакирова А.А. Особенности сейсмичности в период подготовки и в процессе извержения вулкана Кизимен (Камчатка) в 2009–2013 гг. // Вулканология и сейсмология. – 2014. – № 4. – С. 3–19.
36. Iverson R.M., Dzurisin D., Gardner S.A. et. al. Dynamics of seismogenetic volcanic extrusion at Mount St. Helens in 2004–2005 // Nature. – 2006. – 444. – P. 439–443.