

VI. СЕЙСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ВУЛКАНОВ

УДК 550.348.(517.66)

ВУЛКАНЫ КАМЧАТКИ

С.Л. Сеников, И.Н. Нурждина

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

В 2011 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 Геофизической службы (КФ ГС) 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 от $h=-5$ км до $h=40$ км. В 2011 г. для расчета параметров вулканических землетрясений применялась программа «DIMAS» [6] с возможностью поиска решений положений гипоцентров землетрясений выше уровня моря, т.е. отрицательных глубин. 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 для Северной группы вулканов координатами $\varphi=55.52-56.80^\circ\text{N}$, $\lambda=159.82-161.60^\circ\text{E}$; 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 – $\varphi=54.90-55.54^\circ\text{N}$, $\lambda=159.82-160.80^\circ\text{E}$. Все события сгруппированы в четыре каталога [8–11], включающих 6396 землетрясений по Северной группе [8], 420 – по Авачинской [9], 18 – по Мутновско-Гореловской [10] и 41452 – 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 2011 г. [8] содержит 6396 землетрясений I–III типов [12]. Распределение землетрясений по вулканам и по энергетическим классам [13] представлено в табл. 1. Карта эпицентров землетрясений и условные зоны сейсмичности рассматриваемых вулканов показаны на рис. 1.

Из анализа табл. 1 следует, что в 2011 г. суммарное число землетрясений, локализованных в районе Северной группы вулканов, составило $N_{\Sigma}=6396$, суммарная энергия – $\Sigma E=12.07 \cdot 10^8$ Дж (табл. 1), тогда как в 2010 г. было $N_{\Sigma}=7013$, $\Sigma E=11.382 \cdot 10^8$ Дж [14], т.е. число землетрясений немного уменьшилось, а энергии, наоборот, выделилось больше. Увеличение количества высвобожденной сейсмической энергии произошло за счет увеличения числа землетрясений с $K_{\Sigma}=8$, произошедших на влк. Ключевской и Плоский Толбачик.

Таблица 1. Распределение числа землетрясений по энергетическим классам K_S и суммарная сейсмическая энергия землетрясений в районе Северной группы вулканов в 2011 г.

Название вулкана	$R_{зоны}, км$	K_S							N_{Σ}	$\Sigma E, 10^8 Дж$
		2	3	4	5	6	7	8		
Безымянный	6	2	63	83	5				153	0.014
Ключевской	7		1	2340	3162	82		1	5586	6.529
Плоский Толбачик	20			30	34	12	2	1	79	0.455
Шивелуч	12			143	122	35	3		303	0.648
Крестовский и Ушковский	10		2	34	8				44	0.016
Вне вулканов			1	76	117	25	10	2	231	4.408
Всего		2	67	2706	3448	154	15	4	6396	12.07

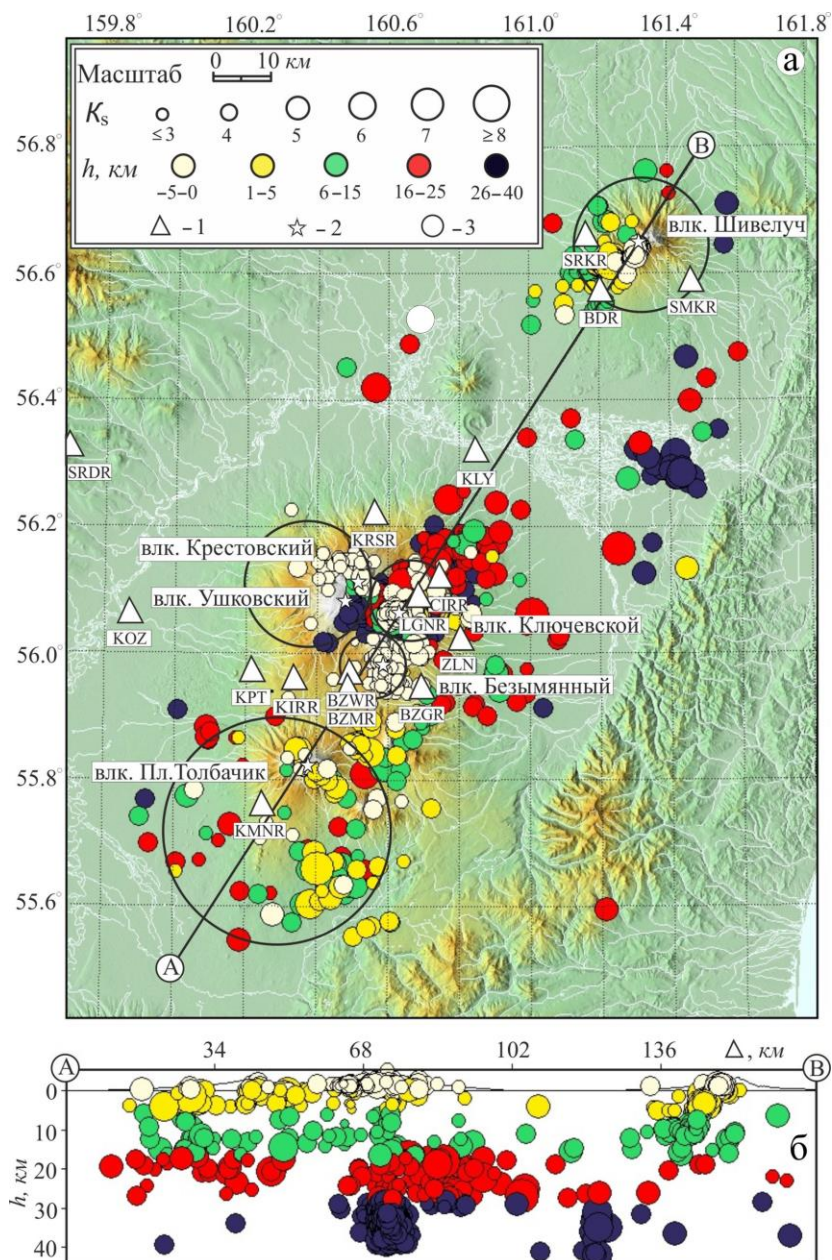


Рис. 1. Карта эпицентров (а) землетрясений Северной группы вулканов за 2011 г. и проекция гипоцентров (б) на вертикальную плоскость, проходящую по линии А–В

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.

Самой сейсмически активной зоной в 2011 г. был влк. Ключевской. Здесь произошло 83.3 % землетрясений от общего числа событий, вошедших в каталог, а их суммарная сейсмическая энергия составила 54.1 % от всей высвобожденной энергии района Северной группы вулканов (табл. 1). На протяжении нескольких лет (2007–2010 гг.) наиболее активной по числу землетрясений была зона влк. Шивелуч. В эти годы доля событий, произошедших на данном вулкане, составляла от 69.8 % в 2008 г. до 86.8 % в 2010 г. от суммарного числа локализованных землетрясений в исследуемом районе [14–17], тогда как в 2011 г. эта доля составила всего лишь 4.7 % (табл. 1).

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 [18]. Из графика следует, что в 2011 г. представительными для района Северной группы вулканов являются землетрясения с $K_{min}=4.5$. Надо отметить, что уровень K_{min} меняется в зависимости от событий, происходящих на вулканах. Например, при регистрации сильного непрерывного вулканического дрожания обрабатывать слабые землетрясения невозможно, и в таких случаях значение K_{min} повышается. Так в 2010 г. из-за сильного непрерывного вулканического дрожания, сопровождавшего мощное извержение влк. Ключевской, представительный класс составил $K_{min}=5.1$ [14]. Наклон графика повторяемости в 2011 г. получился равным $\gamma=1.18\pm 0.07$. Среднее значение угла наклона, определенное по данным за 2000–2010 гг., составило $\gamma=1.28$ [14, 15]. Землетрясение с максимальным классом $K_s=8.4$ произошло 22 февраля в 00^h37^m на глубине $h=15.4$ км под постройкой влк. Ключевской [8].

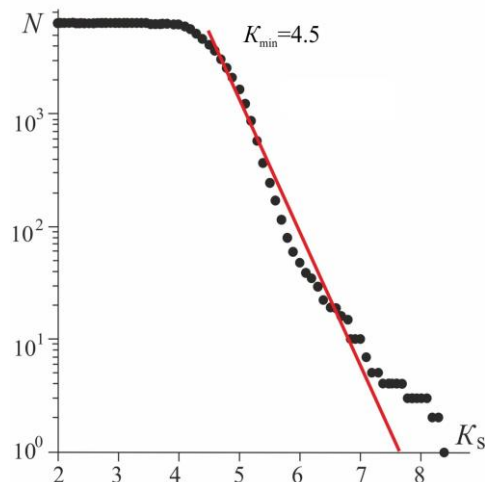


Рис. 2. График повторяемости землетрясений Северной группы вулканов в 2011 г.

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 $K_{min}=4.0$ [19].

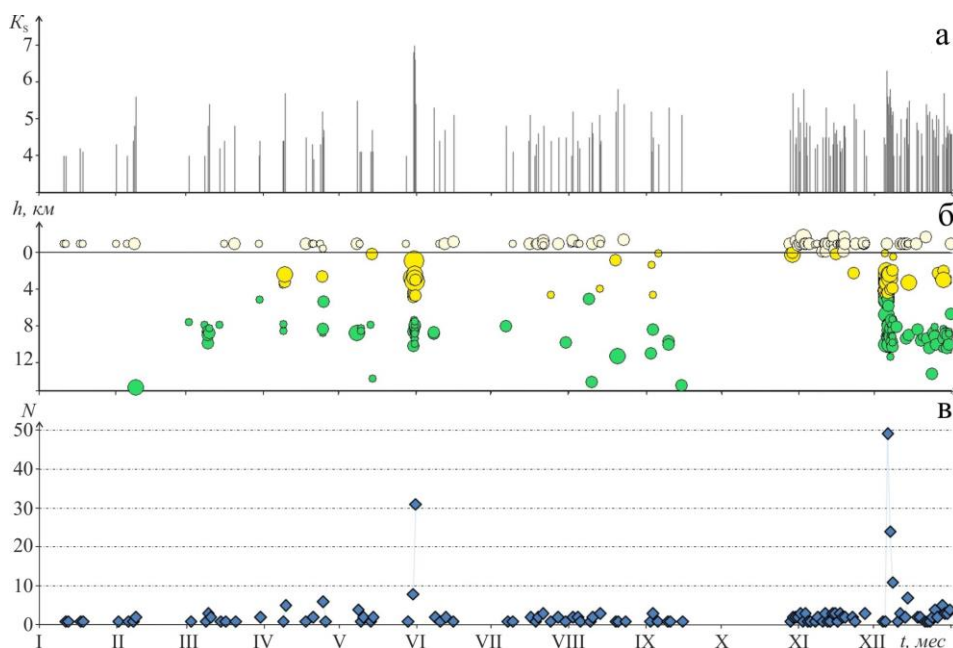


Рис. 3. Изменение во времени энергетического класса K_s (а), глубины гипоцентров h (б) и количества N (в) вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 12 км от влк. Шивелуч в 2011 г.

В 2011 г. наблюдалось снижение сейсмической активности влк. Шивелуч (табл. 1). Число землетрясений с $K_S=3.7-7.0$, локализованных в радиусе 12 км и диапазоне глубин $h=-1.7-15$ 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 [14]) уменьшились соответственно в 20 и 12.8 раз. Представительный класс, рассчитанный по программе ZMAP, оказался ниже, чем в 2010 г. ($K_{\min}=5.1$) и составил $K_{\min}=4.0$. Наклон графика повторяемости $\gamma=0.64 \pm 0.06$ стал более пологим по сравнению с таковым в 2010 г. ($\gamma=1.7$) [14]. Землетрясение с максимальным классом $K_S=7.0$ произошло 31 мая в 03^h14^m на глубине $h=0.9$ км под постройкой вулкана [8]. В течение года было зарегистрировано два всплеска сейсмической активности: 30–31 мая ($N=39$) и 6–8 декабря ($N=84$) (рис. 3 в) [8]. Надо отметить, что в сентябре–октябре станция «BDR» (рис. 1) не работала, поэтому локализовать землетрясения из района влк. Шивелуч в этот период было невозможно.

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

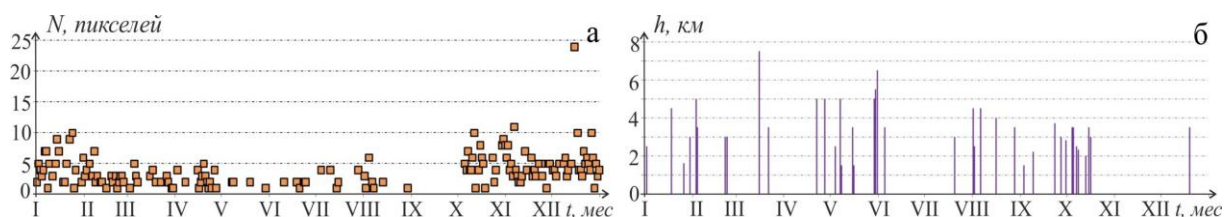


Рис. 4. Изменение во времени размера термальной аномалии на влк. Шивелуч по данным спутников NOAA16 и NOAA17 (а); высота газо-пепловых выбросов над уровнем моря по видеоданным и визуальным наблюдениям сотрудников сейсмической станции «Ключи» (б)

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 сопровождалось пепловыми выбросами и сходом пирокластических потоков (рис. 4 б). По видеоданным газо-пепловый выброс с максимальной высотой 10 км над уровнем моря был зафиксирован 16 марта.

При плохих погодных условиях или в темное время суток оценка высоты возможной эксплозии проводилась по сейсмическим данным по методике [20]. В 2011 г. «оранжевый» код опасности присваивался вулкану в течение 68 дней, когда высота пепловой эмиссии превышала 1 км над куполом, но была меньше 8 км над уровнем моря (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>). «Красный» код опасности объявлялся 12 раз: 27 февраля; 30 мая; 5, 15 и 19 июня; 23 августа; 11 сентября; 3, 4, 14, 17 и 21 октября. В эти дни расчетная высота пепловых выбросов могла превышать 8 км над уровнем моря. Эксплозии 30 мая и 5 июня были зафиксированы и подтверждены видео- и спутниковыми наблюдениями. Остальные 10 были скрыты облачностью или темным временем суток. Спутниковые данные подтвердили еще три эксплозивных извержения из последних 10: 27 февраля, 3 и 4 октября. Следует отметить, что одним из обязательных условий обнаружения пепловых облаков по спутниковым наблюдениям является превышение высоты пепловых облаков над метеорологическими, поэтому остается предположить, что в остальных семи случаях высота пепла не превышала высоты облачности. 21 октября в 15^h26^m было зарегистрировано поверхностное сейсмическое событие, возможно сопровождавшее самый сильный в 2011 г. пепловый выброс до 10.6 км над уровнем моря.

Вулкан Ключевской. Существующая сеть станций (рис. 1) позволяет локализовать при благоприятных условиях землетрясения, начиная с $K_S \geq 4.0$ [19]. Ближайшая телеметрическая станция «Логоинов» расположена в 4 км от кратера, может регистрировать в районе кратера землетрясения с $K_S \geq 2.2$. В 2011 г. в радиусе 7 км от влк. Ключевской и диапазоне глубин $h=-4.5-35.5$ км было локализовано 5586 землетрясений (табл. 1), это в 7.4 раза больше, чем в 2010 г. ($N=755$, $\Sigma E=0.84 \cdot 10^8$ Дж [14]). Высвобожденная в очагах землетрясений энергия превышает таковую в 2010 г. в 7.8 раза (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 2011 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].

График распределения глубины очагов землетрясений во времени (рис. 5 б) наглядно демонстрирует высокую сейсмическую активность в нижнем слое (III). Здесь генерируются глубокие длиннопериодные землетрясения, в образовании которых активную роль играет магматический расплав [24]. В 2011 г. в нижнем горизонте было локализовано 5461 землетрясение с $K_S=3.9-6.0$. 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 106 землетрясений с $K_S=3.5-5.5$.

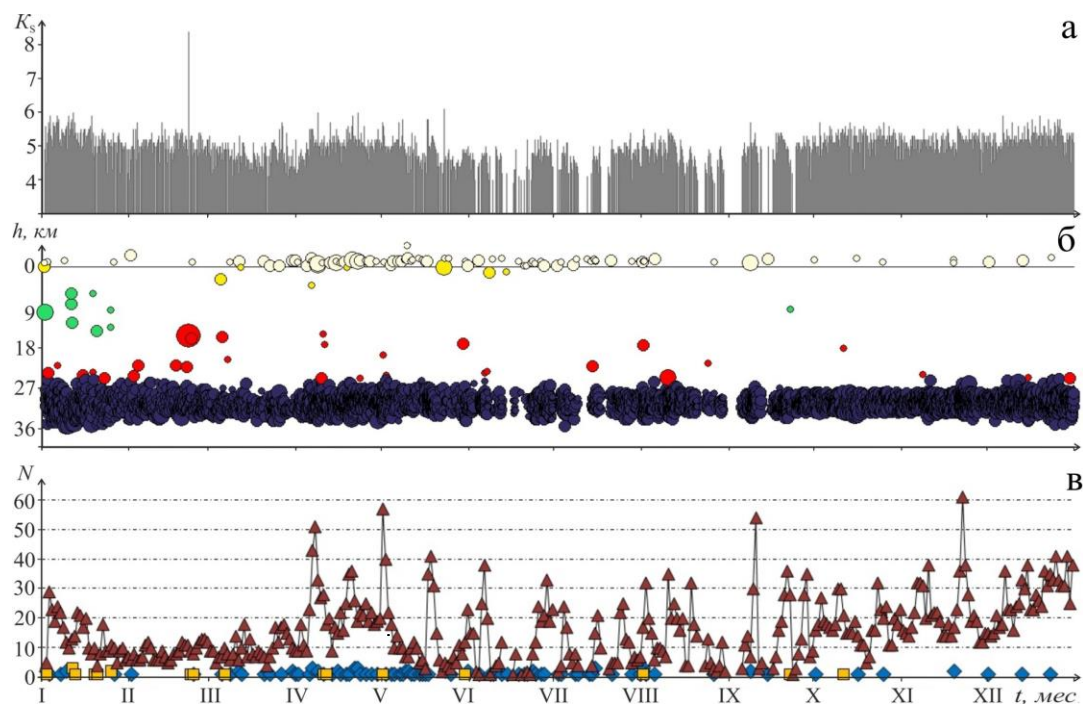


Рис. 5. Изменение во времени энергетического класса K_S (а); глубины гипоцентров h вулканических землетрясений (б); ежесуточного числа поверхностных (ромб), промежуточных (квадрат) и глубоких (треугольник) землетрясений (в), произошедших в радиусе 7 км от влк. Ключевской в 2011 г.

С помощью пакета программ ZMAP [18] были определены значения K_{\min} и угол наклона графика повторяемости для землетрясений в каждом слое. Для поверхностного слоя представительный класс получился равным $K_{\min}=4.0$ при угле наклона $\gamma=0.73 \pm 0.04$, т.е., по сравнению с 2010 г. при значениях $K_{\min}=4.9$, $\gamma=1.78$, когда во время мощного извержения влк. Ключевской с излиянием нескольких лавовых потоков регистрировалось сильное вулканическое дрожание и все землетрясения были связаны с магматическими процессами в постройке вулкана, в 2011 г. K_{\min} понизился практически на класс, а наклон графика стал пологим. Для глубоких землетрясений с $h=20-40$ км представительный класс в 2011 г. оказался равным $K_{\min}=4.5$ при угле наклона $\gamma=1.30 \pm 0.08$. Эти значения близки к таковым в 2010 г. ($K_{\min}=4.6$, $\gamma=1.46$). Среднее значение угла наклона, определенное по данным за 2000–2010 гг., составило $\gamma=1.28$ [14–17, 19]. В промежуточном слое (II) было локализовано всего 19 землетрясений с $K_S=4.0-8.4$ [8]. Для определения параметров K_{\min} и γ такого количества событий недостаточно.

В течение 2011 г. на влк. Ключевской «желтый» код опасности был выставлен 139 раз. Из них семь дней только по спутниковым данным, когда на вулкане наблюдалась термальную аномалия, и остальные – из-за повышенной сейсмичности. В эти дни было зарегистрировано более 100 сейсмических событий IV типа [12], у которых невозможно уверенно выделить объемные волны, и локализовано 50 более глубоких землетрясений (рис. 5 в). Вулканическая активность в 2011 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 $K_S \geq 2.9$. 13 апреля 2011 г. на влк. Безымянный было зарегистрировано эксплозивное извержение. По сейсмическим данным извержение началось в 20^h20^m и продолжалось до 21^h00^m, в этот период на станции «Зелёная» (ZLN) регистрировалось сейсмическое событие, амплитуда скорости которого достигала $A/T_{\max} = 27.8$ мкм/с. К сожалению, вулкан был закрыт облачностью, но по данным мировой сети локации молний (World Wide Lightning Location Network) (<http://wwlln.net/>) вблизи влк. Безымянный в 20^h34^m регистрировались многочисленные вспышки молний. Также, по словам очевидцев, в районе пос. Красный Яр, расположенного в ~45 км на север–северо-запад от вулкана, наблюдался сильный пеплопад.

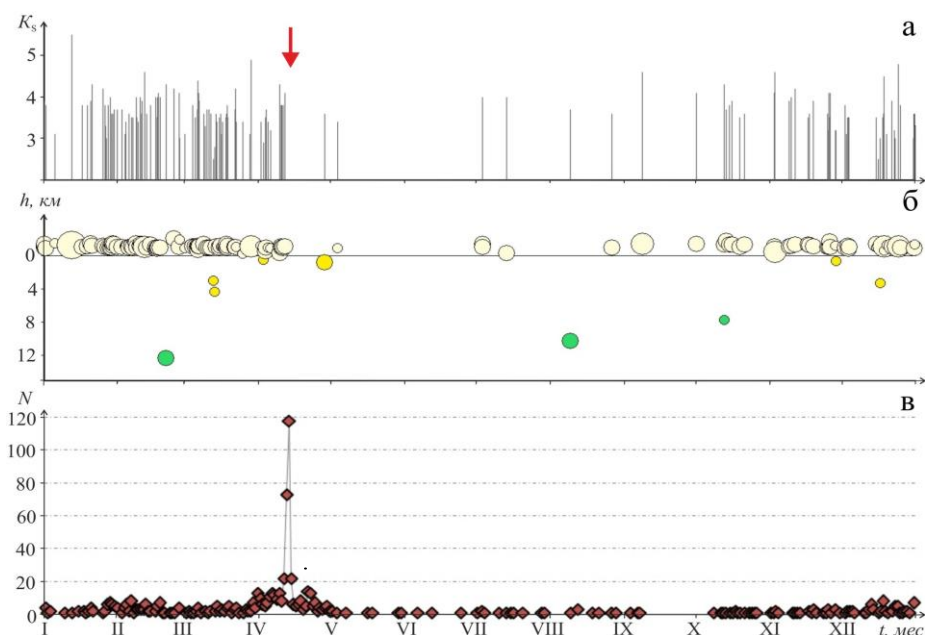


Рис. 6. Изменение во времени энергетического класса K_S (а); глубины гипоцентров h вулканических землетрясений (б); ежесуточного числа поверхностных землетрясений IV типа (в), произошедших в радиусе 6 км от влк. Безымянный в 2011 г. (стрелкой указано время эксплозивного извержения)

В 2011 г. в радиусе 6 км от вулкана и диапазоне глубин $h = -1.2 - 12.4$ км было локализовано 153 землетрясения с $K_S = 2.5 - 5.5$ (табл. 1, рис. 6 б, в) [8]. Представительный класс для этих событий получился равным $K_{\min} = 3.6$ при угле наклона $\gamma = 1.24 \pm 0.04$. По сравнению с параметрами ($N = 124$, $K_{\min} = 3.7$) в 2009 г., угол наклона графика повторяемости ($\gamma = 0.68$ [15]) стал круче в два раза. Землетрясение с максимальным классом $K_S = 5.5$ произошло 1 декабря в 16^h57^m в постройке вулкана ($h = -1.2$ км).

В течение 2011 г. на влк. Безымянный «желтый» код опасности выставлялся 45 раз. Из них девять – только по спутниковым данным, когда наблюдалась термальная аномалия. В остальных 36 случаях тревога объявлялась по сейсмическим данным, когда было локализовано хотя бы одно землетрясение с $K_S \geq 4.0$ или более 10 событий с $K_S \geq 3.3$ в диапазоне глубин $h = -3.0 - 5.0$ км. Дни, когда число зарегистрированных поверхностных событий IV типа превышало $N \geq 5$, также считались днями с превышением «фонового» уровня сейсмичности. Рост количества землетрясений IV типа, связанных с взрывами в кратере и сходом раскаленных лавин, является прогностическим признаком готовящегося извержения вулкана. Краткосрочный прогноз по данному предвестнику был передан в КФ РЭС 7 апреля [23]. Эксплозивное извержение произошло 13 апреля («красный» код), и прогноз полностью оправдался.

Вулкан Плоский Толбачик. Ближайшая телеметрическая станция «Каменистая» (KMNR) расположена в 10 км от кратера вулкана и регистрирует землетрясения с $K_S \geq 3.3$. В 2011 г. в радиусе 20 км от вулкана было локализовано 79 землетрясений с $K_S = 3.6 - 7.7$ (табл. 1) в диапазоне глубин $h = -1.8 - 23.7$ км [8]. Уровень K_{\min} , рассчитанный по программе ZMAP, соответствует классу $K_{\min} = 4.4$, угол наклона графика повторяемости – $\gamma = 0.55 \pm 0.03$. Наклон графика практически не меняется на протяжении многих лет и близок к значению для регио-

нальных тектонических землетрясений ($\gamma=0.5$) [25]. Событие с максимальным классом $K_S=7.7$ произошло 6 октября в 17^h57^m на глубине $h=1.3$ км. На рис. 1 представлена карта эпицентров и проекция гипоцентров на вертикальный разрез. На протяжении 2011 г. в районе влк. Плоский Толбачик наблюдалась «обычная, фоновая» сейсмичность.

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 2011 г. в пределах окружности радиусом $R=10.1$ км, включающей оба вулкана (рис. 1), было локализовано 44 землетрясения с $K_S=3.4-5.4$ в диапазоне глубин $h=-2.9-33.4$ км [8]. Представительный класс землетрясений, рассчитанный по программе ZMAP, равен $K_{min}=4.0$ при угле наклона графика повторяемости $\gamma=0.75 \pm 0.04$. Карта эпицентров и проекция гипоцентров на вертикальный разрез представлены на рис. 1. В 2011 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.

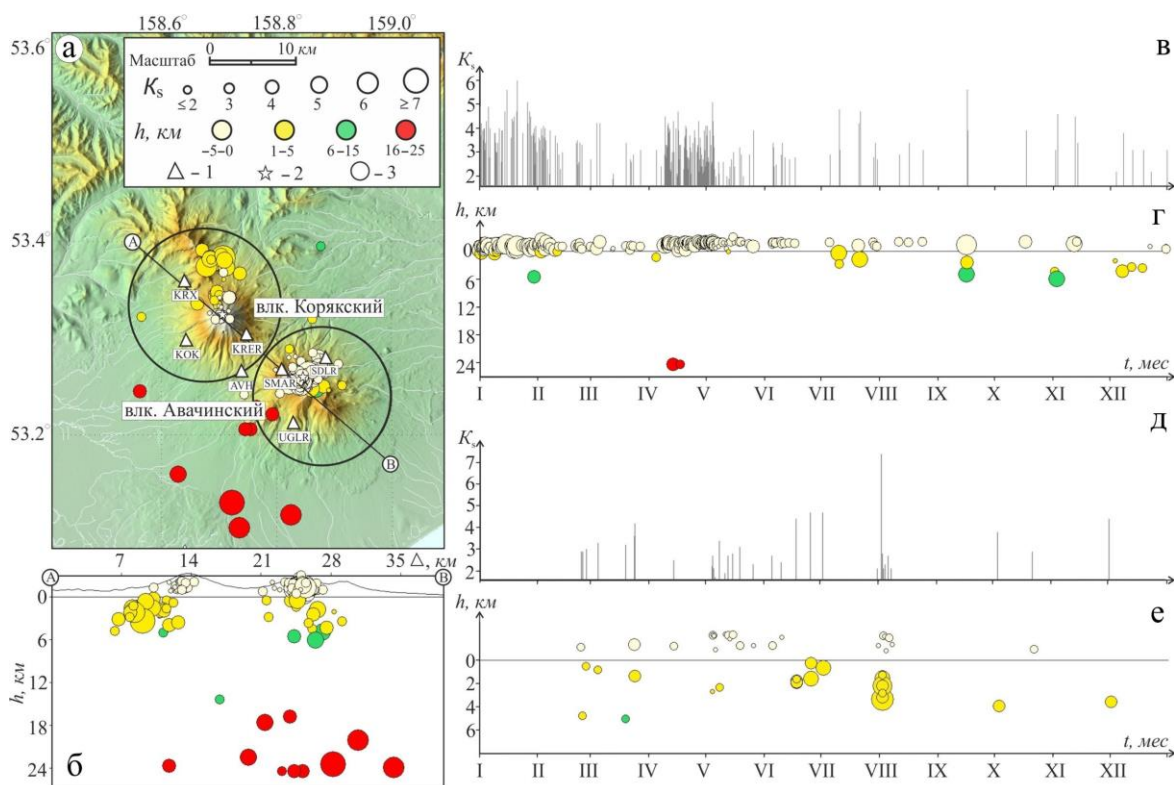


Рис. 7. Карта эпицентров землетрясений Авачинской группы вулканов в 2011 г. (а) и проекция гипоцентров на вертикальный разрез по линии А–В (б), а также изменение во времени параметров вулканических землетрясений Авачинского (в, г) и Корякского (д, е) вулканов в 2011 г.

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

В 2011 г. в районе Авачинской группы вулканов было локализовано 420 землетрясений с $K_S=1.6-7.4$ [9], суммарная энергия которых $\Sigma E=3.748 \cdot 10^7$ Дж (табл. 2). Это чуть меньше аналогичных значений в 2010 г. ($N=480$, $\Sigma E=4.113 \cdot 10^7$ Дж) [14]. По сравнению со значениями

параметров ($N=1920$, $\Sigma E=40.43 \cdot 10^7$ Дж) в 2009 г., когда на влк. Корякский наблюдалась высокая сейсмическая активность, аналогичные значения в 2011 г. ниже \sim в 4.6 и 10.8 раза соответственно [15]. В 2011 г. землетрясение с максимальным классом $K_S=7.4$ произошло 2 августа в 14^h15^m на глубине $h=3.4$ км под постройкой Корякского вулкана [9]. Карта эпицентров и проекция гипоцентров на вертикальный разрез представлены на рис. 7.

Таблица 2. Распределение землетрясений Авачинской группы вулканов по энергетическим классам K_S в 2011 г.

Название вулкана	$R_{зоны},$ км	K_S						N_{Σ}	$\Sigma E,$ 10^7 Дж
		2	3	4	5	6	7		
Авачинский	8	101	168	76	12	3		360	0.365
Корякский	9	14	19	10	4	1	1	49	2.599
Вне вулканов			3	4	1	2	1	11	0.785
Всего		115	190	90	17	6	2	420	3.748

Представительный класс землетрясений Авачинской группы практически не изменился по сравнению с таковым ($K_{min}=2.5$) в 2010 г. [14] и составил $K_{min}=2.7$ (рис. 8). Угол наклона графика повторяемости практически не меняется последние годы. В 2011 г. он был равен $\gamma=0.58 \pm 0.05$, а среднее его значение за период 2006–2010 гг. $\gamma_{cp.}=0.53$ [14–17, 19]. На рис. 7 в–д представлены распределения во времени значений энергетического класса K_S и глубины землетрясений для каждого вулкана.

В 2011 г. в радиусе 8 км от кратера влк. Авачинский и диапазоне глубин $h=-3.0-24.5$ км было локализовано 360 землетрясений с $K_S=1.6-6.0$ (рис. 7 в, г). Землетрясение с максимальным классом $K_S=6.0$ произошло в постройке вулкана ($h=-1.1$ км) 21 января в 00^h48^m [9].

На влк. Корякский в 2011 г. в радиусе 9 км от вершины вулкана и диапазоне глубин $h=-2.2-5.1$ км было локализовано всего 49 землетрясений с $K_S=1.6-7.4$ (рис. 7 д, е) [9].

Сейсмичность 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.

Координаты гипоцентров для вулканов Мутновский и Горелый в 2011 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].

Таблица 3. Распределение землетрясений района Мутновско-Гореловской группы вулканов по энергетическим классам K_S в 2011 г.

Название вулкана	$R_{зоны},$ км	K_S			N_{Σ}	$\Sigma E,$ 10^7 Дж
		4	5	6		
Горелый	7	1	6	2	9	0.304
Мутновский	7	2	4	1	7	0.086
Вне вулканов			2		2	0.028
Всего	7	3	12	3	18	0.418

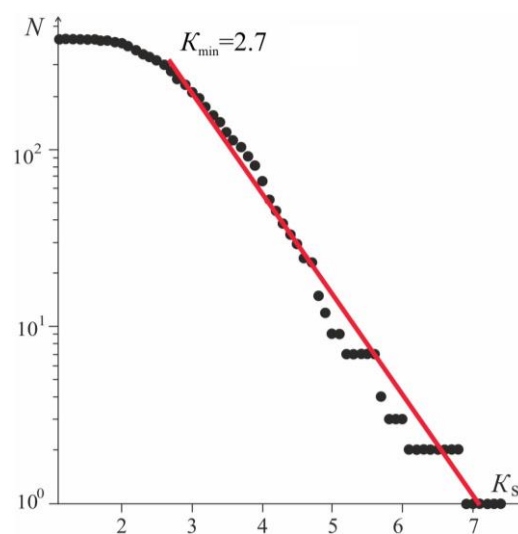


Рис. 8. График повторяемости землетрясений Авачинской группы вулканов за 2011 г.

Отсутствие данных со станции «Мутновский» МТВР в январе–марте и июне–августе, а также регистрация сильного вулканического дрожания с отношением A/T_{\max} до 2.5 мкм/с , источником которого является влк. Горелый, не позволили локализовать землетрясения с энергетическим классом $K_S < 4.0$. Возможно поэтому в 2011 г. ($N=18$, $\Sigma E=0.418 \cdot 10^7 \text{ Дж}$) (табл. 3) в каталог вошло \sim в 159 раз меньше землетрясений по сравнению с таковым в 2009 г. ($N=2858$, $\Sigma E=9.18 \cdot 10^7 \text{ Дж}$) [10], суммарная энергия которых в 22 раза ниже. По тем же причинам и в 2010 г. было локализовано только 57 землетрясений ($\Sigma E=9.18 \cdot 10^7 \text{ Дж}$) [14].

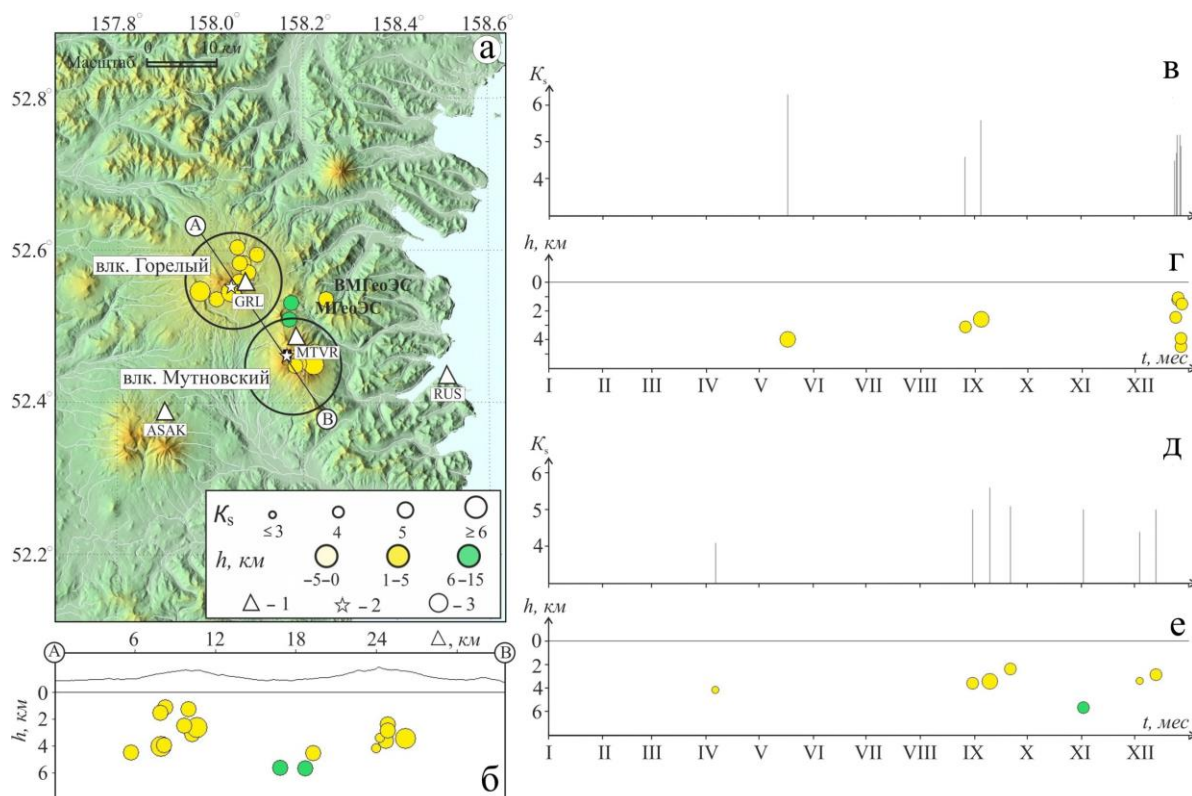


Рис. 9. Карта эпицентров (а) и проекция гипоцентров на вертикальный разрез по линии А–В (б) для землетрясений Мутновско-Гореловской группы, а также изменение во времени энергетического класса K_S (в, д) и глубины гипоцентров h (г, е) вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 7 км от влк. Горелый и Мутновский соответственно

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

Землетрясение с максимальным классом $K_S=6.3$ произошло 17 мая в $06^{\text{h}}35^{\text{m}}$ на глубине $h=4.0 \text{ км}$ под западной частью постройки влк. Горелый [10].

Для построения в 2011 г. графика повторяемости землетрясений района Мутновско-Гореловской группы вулканов данных недостаточно.

Ближайшая к влк. Горелый станция «Горелый» (GRL) расположена в 4 км от кратера и позволяет регистрировать землетрясения с $K_S \geq 2.2$. В исследуемый период практически вся сейсмичность была сосредоточена в районе влк. Горелый (табл. 3). В радиусе 7 км от вершины и диапазоне глубин $h=1.1-4.5 \text{ км}$ было локализовано 9 землетрясений $K_S=4.5-6.3$ (рис. 9 в, г).

Станция «Мутновская» (МТВР) установлена на расстоянии $\sim 3 \text{ км}$ от активного кратера (рис. 9). Минимальный уровень регистрируемой сейсмичности по этой станции соответствует $K_S \geq 2.0$. В 2011 г. в радиусе 7 км от вулкана было локализовано всего 7 землетрясений с $K_S=4.1-5.6$, диапазон глубин $h=-1.5-8.2 \text{ км}$ (рис. 8 д, е). Землетрясение с максимальным классом $K_S=5.6$ произошло 9 сентября в $17^{\text{h}}02^{\text{m}}$ под постройкой вулкана ($h=3.4 \text{ км}$).

Вулкан Кизимен, самый южный из действующих вулканов Центральной Камчатской депрессии, по отношению к другим вулканам Камчатки занимает обособленное положение на западном склоне южной части хребта Тумрок [26].

Ближайшая телеметрическая станция «Кизимен» (KZV) расположена на склоне вулкана ~ в 2.5 км от вершины (рис. 10 а). 18 марта 2011 г. в районе Тумрокских источников, ~ в 9.4 км от влк. Кизимен, была установлена новая станция «Тумрок-источники» (TUMD) (рис. 10 а).

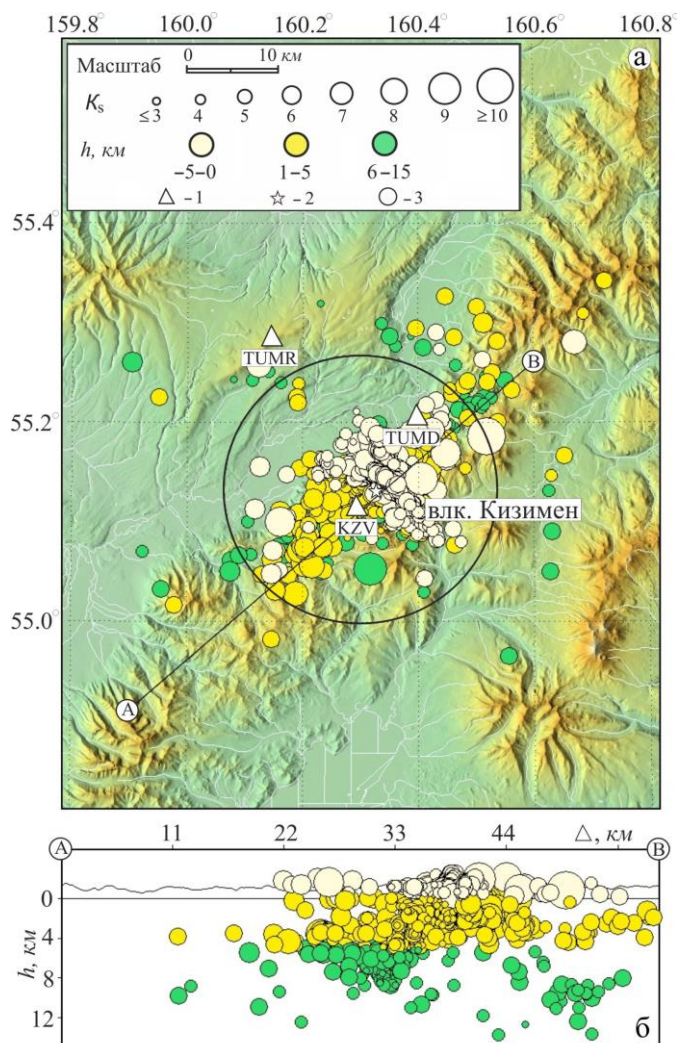


Рис. 10. Карта эпицентров (а) и проекция гипоцентров на вертикальную плоскость по линии А–В (б) для землетрясений района влк. Кизимен

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

12 км. Здесь следует отметить, что механизм очага главного толчка также хорошо согласуется с результатами исследований деформаций земной поверхности по спутниковым данным. Именно внедрение близвертикальной дайки размером примерно 14×10 км с глубины 12 км и азимутом простирания $AZM=40^\circ$ является наилучшим решением при интерпретации интерферограмм со спутников ALOS и ENVISAT [28].

Таблица 4. Параметры механизма очага землетрясения влк. Кизимен 27 ноября 2010 г. с $K_s=11.8$, $M_w=5.1$ ($\varphi=55.21^\circ$, $\lambda=160.46^\circ$)

Агентство	Дата, д м ч мин с	t_0	$h_{мех}$, км	Магнитуды			K_p [1]	Оси главных напряжений				Нодальные плоскости					Источники			
				MPSP [29]	m_b [27]	M_w [27]		T		N		P		NP1		NP2				
								PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	SLIP		STK	DP	SLIP
GCMT	27 12	19 29 35.4	12	5.4	5.2	5.1	11.8	7	137	8	228	79	8	55	52	-80	218	39	-103	[27]

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 2011 г. продолжалось извержение влк. Кизимен, начавшееся в ноябре 2010 г. Наиболее сильное землетрясение, зарегистрированное в процессе подготовки и хода извержения влк. Кизимен в 2009–2011 гг., произошло 27 ноября 2010 г. с $M_w=5.1$ [27]. Оно было зафиксировано мировой сетью сейсмических станций. Для этого землетрясения агентством GCMT был определен механизм очага, параметры которого приведены в табл. 4, а стереограмма – на рис. 11. При горизонтальном растяжении и вертикальном сжатии по наклонным плоскостям разрывов в очаге реализовались сбросовые смещения. Ось растяжения направлена вкост простирания основных геологических структур хр. Тумрок. Нодальные плоскости простираются с северо-востока на юго-запад, что хорошо согласуется с направлением хр. Тумрок и большой оси облака эпицентров землетрясений, сопровождающих извержение (рис. 10). Полученный механизм очага землетрясения 27 ноября 2010 г. позволяет высказать предположение о возможном внедрении магматического материала по разлому юго-западного направления с глубины около

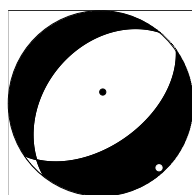


Рис. 11. Стереодиаграмма механизма очага землетрясения влк. Кизимен 27 ноября 2010 г. с $K_S=11.8$, $M_w=5.1$ в проекции нижней полусферы
1 – нодальные линии; 2, 3 – оси главных напряжений: растяжения и сжатия соответственно; зачернена область волн сжатия.

Извержение сопровождалось очень высокой сейсмической активностью. Всего в 2011 г. в районе вулкана в диапазоне глубин $h=2.5-13.8$ км было локализовано 41452 землетрясения [11], из них 41389 в радиусе 15 км от вершины вулкана (табл. 5), это ~ в 14.5 раз больше, чем в 2010 г. ($N=2864$). Несмотря на такое превышение числа землетрясений, энергии в их очагах высвобождено меньше в 24.9 раза (табл. 5), чем за предыдущий год ($\Sigma E=14.445 \cdot 10^{11}$ Дж), когда выжимание интрузии перед сильнейшим извержением сопровождалось землетрясениями с $K_S \geq 11$ ($N=5$) [14].

Таблица 5. Распределение землетрясений по энергетическим классам K_S в 2011 г.

Название вулкана	$R_{зоны}$, км	K_S								N_{Σ}	ΣE , 10^{10} Дж
		3	4	5	6	7	8	9	10		
Кизимен	15	3	2683	34833	3783	66	14	5	2	41389	2.618
Вне вулкана			3	26	29	3	1		1	63	3.176
Всего		3	2686	34859	3812	69	15	5		41452	5.794

Представительный класс землетрясений, рассчитанный по программе ZMAP [18], равен $K_{min}=5.0$. Улучшение уровня надежной регистрации, по сравнению с таковым в 2009–2010 гг. ($K_{min}=5.7$) [14, 15], связано с установкой станции «Тумрок-источники» (TUMD), образовавшей совместно со станциями «Тумрок» (TUMR) и «Кизимен» (KZV) (рис. 10 а) локальную сеть для детального сейсмического мониторинга. Наклон графика повторяемости в 2011 г. стал более крутым ($\gamma=1.39 \pm 0.11$) (рис. 12) в отличие от предыдущих значений в 2009 ($\gamma=0.54$) и 2010 гг. ($\gamma=0.51$). Крутизна наклона свидетельствует о сейсмичности, связанной с магматическими процессами [30, 31].

На рис. 13 представлены изменения во времени различных параметров землетрясений, эпицентры которых находятся внутри окружности радиусом $R=15$ км от кратера вулкана.

Отличительной особенностью сейсмичности в 2011 г. является квазипериодическое появление похожих по форме записи микроземлетрясений с одинаковой амплитудой, связанное с выжиманием вязкой магмы [32]. Временные интервалы появления землетрясений варьируют от десятков минут до десятков дней (рис. 14). Впервые подобная сейсмичность была отмечена 9 декабря 2010 г. за несколько часов до пепловых выбросов [14], и была, по-видимому, обусловлена выжиманием самой первой порции лавового материала. Затем подобные землетрясения были зарегистрированы 23 декабря 2010 г. и 23 января 2011 г., а с 13 мая 2011 г. микроземлетрясения с квазипериодичностью 8–50 с и энергетическими классами $K_S=2.0-5.5$ начали регистрироваться непрерывно. Наибольшее их количество регистрировалось с 15 августа по 12 октября (рис. 13). Максимальное число землетрясений ($N=1676$) за сутки было локализовано 24 сентября. При малых интервалах времени между микроземлетрясениями запись сливалась, становилась непрерывной и напоминала спазматическое вулканическое дрожание. В работах американских вулканологов режим квазирегулярного появления микроземлетрясений, зарегистрированных во время выжимания отдельных блоков вязкой магмы на экструзивном куполе вулкана Сент-Хеленс в 2004 г., был назван “drumbeats” – барабанным боем [33].

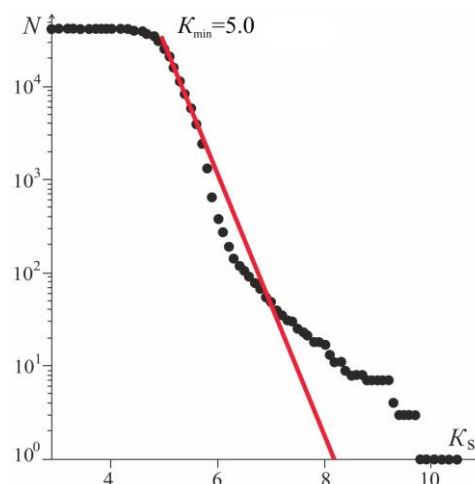


Рис. 12. График повторяемости землетрясений вулкана Кизимен за 2011 г.

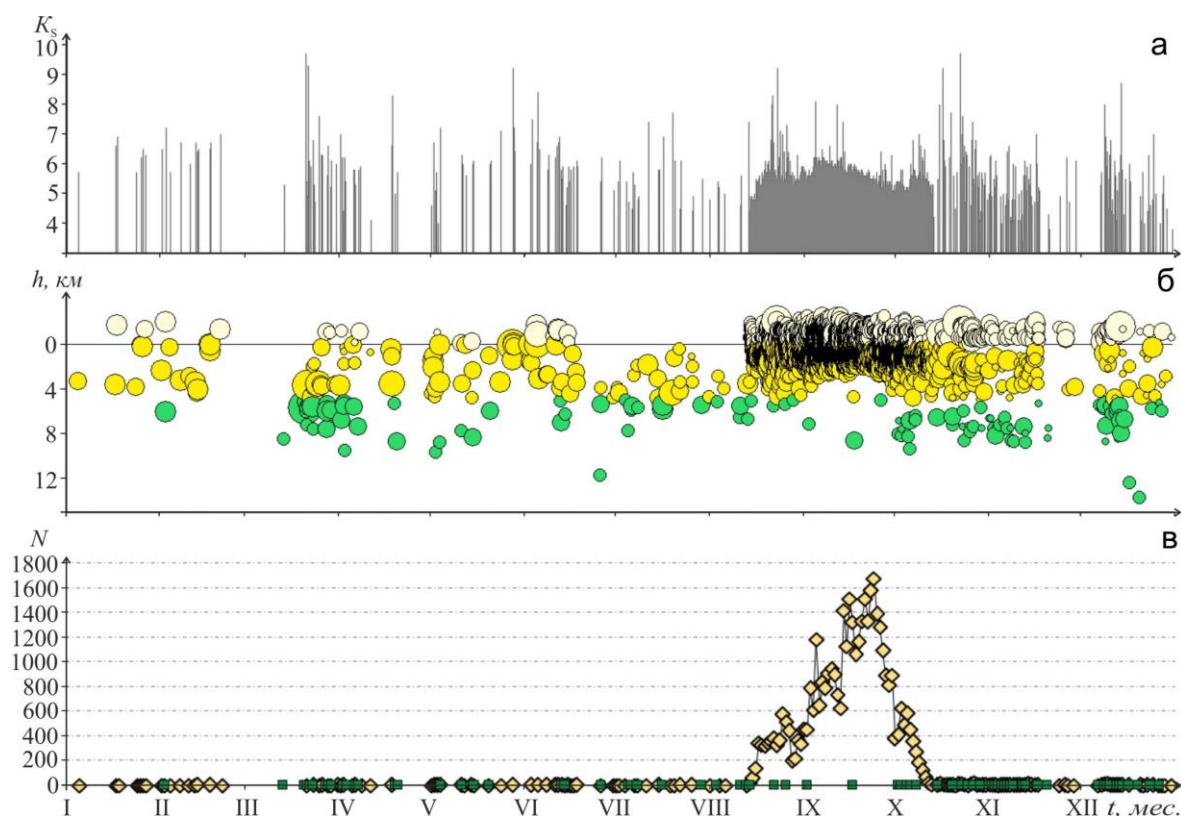


Рис. 13. Изменение во времени энергетического класса K_S (а), глубины гипоцентров h (б) и ежесуточного числа вулканических землетрясений N (в) с глубины $-3.0 \leq h \leq 5.0$ км (ромб) и $5.0 < h \leq 20.0$ км (прямоугольник), произошедших в радиусе 15 км от влк. Кизимен в 2011 г.



Рис. 14. Четырехчасовой фрагмент записи «drumbeats», сопровождавших извержение влк. Кизимен, зарегистрированный станцией KZV на горизонтальном канале N–S 11 октября 2011 г. [32]

Всего за период активизации с 15 августа по 12 октября в каталог вошло 40878 землетрясений с $K_S=3.7-9.2$, произошедших в радиусе 15 км от вулкана в диапазоне глубин $h=-2.5-9.4$ км [11]. Землетрясение с максимальным классом $K_S=10.5$ произошло в районе влк. Кизимен вне радиуса выборки 21 августа в 02^h31^m на глубине $h=-0.8$ км.

В 2011 г. продолжалось мощное эксплозивно-эффузивное извержение с пепловыми выбросами до 10 км над уровнем моря и вязкими лавовыми потоками, сопровождавшееся высокой сейсмической активностью. На протяжении всего года на влк. Кизимен был выставлен повышенный код активности: «оранжевый» – 235 дней, «желтый» – 98. Самый высокий «красный» код опасности в 2011 г. присваивался вулкану 6 раз, когда высота пепловой эмиссии по сейсмическим данным могла превышать 8 км над уровнем моря (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>).

Заключение. В 2011 г. наблюдалась высокая активность вулканов Камчатки.

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, по сравнению с предыдущими годами была слабее.

С начала 2011 г. на влк. Безымянный регистрировалась сейсмическая активность, завершившаяся эксплозивным извержением 13 апреля. Увеличение числа сейсмических событий и их энергии перед эксплозией позволили сделать успешный краткосрочный прогноз времени, места и силы извержения.

В 2011 г. продолжалось извержение влк. Кизимен, начавшееся в ноябре 2010 г. после почти 80-летнего спокойствия. Извержение сопровождалось очень высокой сейсмической активностью. Впервые на активных вулканах Камчатки, на которых ведется сейсмический мониторинг, был зарегистрирован режим «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. На протяжении всего 2011 г. на влк. Горелый наблюдалась повышенная сейсмическая активность («желтый» код) в виде спазматического вулканического дрожания с $A/T_{\text{ср}}=0.53 \text{ мкм/с}$. К сожалению, регистрация станцией «Горелый» (GRL) вулканического дрожания, а также отсутствие данных со станции «Мутновская» (MTVR) не позволили зарегистрировать сейсмичность в районе влк. Мутновский в полном объеме.

Всего в 2011 г. в районе Северной, Авачинской, Мутновско-Гореловской групп вулканов, а также в районе влк. Кизимен было локализовано 48286 землетрясений, высвобожденная ими сейсмическая энергия составила $\Sigma E=5.92 \cdot 10^{10} \text{ Дж}$.

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.) – Москва – 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 2011 г. // Землетрясения Северной Евразии, 2011 год. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – Приложение на CD_ROM.
4. Чебров В.Н., Сеньюков С.Л., Дрознина С.Я. Камчатка и Командорские острова // Землетрясения России, 2011 год. – Обнинск: ГС РАН, 2013. – С. 53–59.
5. Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Кугаенко Ю.А., Левина В.И., Сеньюков С.Л., Сергеев В.А., Шевченко Ю.В., Ящук В.В. Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 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 2011 г. // Землетрясения Северной Евразии, 2011 год. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – Приложение на CD_ROM.
9. Нуждина И.Н. (отв. сост.), Кожевникова Т.Ю., Толокнова С.Л., Соболевская О.В. (сост.). Каталог землетрясений Авачинской группы вулканов за 2011 г. // Землетрясения Северной Евразии, 2011 год. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – Приложение на CD_ROM.
10. Нуждина И.Н. (отв. сост.), Кожевникова Т.Ю., Толокнова С.Л., Соболевская О.В. (сост.). Каталог землетрясений Мутновско-Гореловской группы вулканов за 2011 г. // Землетрясения Северной Евразии, 2011 год. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – Приложение на CD_ROM.
11. Нуждина И.Н. (отв. сост.), Кожевникова Т.Ю., Толокнова С.Л., Напылова Н.А., Напылова О.А., Демянчук М.В., Назарова З.А., Соболевская О.В. (сост.). Каталог землетрясений вулкана Кизимен за 2011 г. // Землетрясения Северной Евразии, 2011 год. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – 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. **Сенюков С.Л., Нуждина И.Н.** Вулканы Камчатки // Землетрясения Северной Евразии, 2010 год. – Обнинск: ГС РАН, 2016. – С. 382–395.
15. **Сенюков С.Л., Нуждина И.Н.** Вулканы Камчатки // Землетрясения Северной Евразии, 2009 год. – Обнинск: ГС РАН, 2015. – С. 353–365.
16. **Сенюков С.Л., Нуждина И.Н.** Вулканы Камчатки // Землетрясения Северной Евразии, 2008 год. – Обнинск: ГС РАН, 2014. – С. 453–462.
17. **Сенюков С.Л., Нуждина И.Н., Дрознина С.Я.** Вулканы Камчатки // Землетрясения Северной Евразии, 2007 год. – Обнинск: ГС РАН, 2012. – С. 449–460.
18. **Weimer S.** A software package to analyze seismicity: ZMAP // *Seism. Res. Lett.* – 2001. – **72**. – №2. – P. 374–383.
19. **Сенюков С.Л., Нуждина И.Н., Дрознина С.Я.** Вулканы Камчатки // Землетрясения Северной Евразии, 2006 год. – Обнинск: ГС РАН, 2012. – С. 449–460.
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 Kamchatkan 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. **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.
23. **Сенюков 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. **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.
26. **Действующие вулканы Камчатки** / Под ред. С.А. Федотова, Ю.П. Масуренкова – М.: Наука, 1991. – II. – С. 18–32.
27. **International Seismological Centre (ISC)**, On-line Bulletin, Internatl. Seis. Cent., Thatcham, United Kingdom, 2014. – URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/>.
28. **Ji L., Lu Z., Dzurisin D., Senyukov S.** Pre-eruption deformation caused by dike intrusion beneath Kizimen volcano, Kamchatka, Russia, observed by InSAR // *Journal of Volcanology and Geothermal Research.* – 2013. – **256**. – P. 87–95.
29. **Сейсмологический бюллетень (ежедекадный) за 2011 год** / Отв. ред. О.Е. Старовойт. – Обнинск: ГС РАН, 2011–2012. – URL: ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_bulletin/2011.
30. **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.
31. **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.
32. **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.
33. **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.