

## IV. СЕЙСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ВУЛКАНОВ

УДК 550.348. (517.66)

### **ВУЛКАНЫ КАМЧАТКИ**

**С.Л. Сениюков, И.Н. Нурждина**

*Камчатский филиал ГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, ssl@emsd.ru*

В 2009 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 [1]. Информация о сейсмических станциях приведена в [2–6]. Для сейсмического мониторинга вулканов использовались станции радиотелеметрической сети (РТСС) Камчатки. В 2009 г. сеть РТСС была дополнена новыми станциями «Коряка-Восток» (KRER) и «Арик» (KRX) в районе Корякского вулкана и «Кизимен» (KZV) на влк. Кизимен [5]. Также в 2009 г. стали доступны для оперативной обработки потоки данных станций «Мутновский» (MTVR) и «Асача» (ASAK). Все это позволило проводить детальные наблюдения не только для Авачинской (влк. Авачинский, Корякский) и Северной (влк. Шивелуч, Ключевской, Безымянный, Плоский Толбачик, Ушковский, Крестовский) групп вулканов, но и для Мутновско-Гореловской (влк. Горелый, влк. Мутновский) группы и влк. Кизимен. В 2009 г. применялись те же методы обработки сейсмических данных, что и в предыдущие годы [1, 7–9].

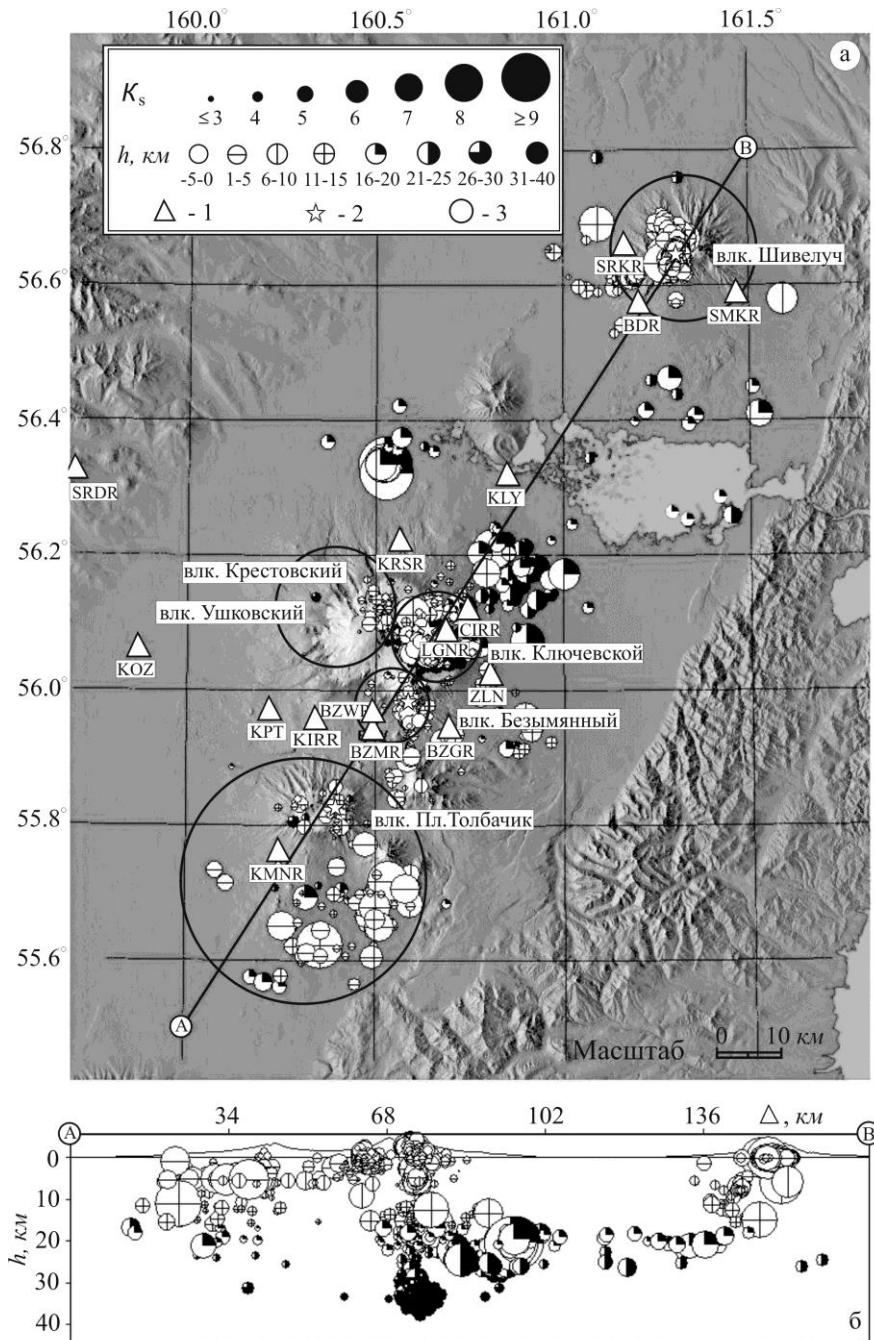
Ниже приведены данные о сейсмической активности Северной, Авачинской, Мутновско-Гореловской групп вулканов и отдельно для влк. Кизимен. Все события сгруппированы в четыре каталога, включающих 15017 землетрясений по Северной группе [10], 2149 – по Авачинской [11], 2858 – по Мутновско-Гореловской [12], 576 – по влк. Кизимен [13]. Выборка землетрясений проведена для каждого вулкана в пределах «радиуса ответственности» и, соответственно, всем таким событиям в [10–13] присвоено название конкретного вулкана. Однако в каждый из названных каталогов включены события вне «радиусов ответственности» отдельных вулканов, но близких к их группам. Эти события входят в «общую зону ответственности» в пределах координат  $\varphi=55.52-56.80^{\circ}\text{N}$ ,  $\lambda=159.89-161.70^{\circ}\text{E}$  и в диапазоне глубин  $h=-5.0-40$  км. Таким событиям в каждом из каталогов присвоены следующие названия: «Северная группа» в [10], «Авачинская группа» – в [11], «Мутновско-Гореловская группа» – в [12], «Вне зоны вулкана» – в [13]. Суммарные числа «внешних» событий невелики и равны  $N_{\Sigma \text{вне}} = 195, 49, 30$  и 43. Они представлены ниже в соответствующих таблицах текста статьи.

**Северная группа вулканов.** Каталог землетрясений Северной группы вулканов за 2009 г. [10] содержит 15017 событий I–III типов [14]. Распределение землетрясений по вулканам и по энергетическим классам  $K_S$  [15] представлено в табл. 1. Карта эпицентров землетрясений и условные зоны сейсмичности рассматриваемых вулканов показаны на рис. 1.

**Таблица 1.** Распределение числа землетрясений по энергетическим классам  $K_S$  и суммарная сейсмическая энергия землетрясений вблизи Северной группы вулканов в 2009 г.

Название вулкана	$R_{\text{зоны}}$ , км	$K_S$							$N_{\Sigma}$	$\Sigma E$ , $10^8$ Дж
		3	4	5	6	7	8	9		
Безымянный	6	31	78	34	2				145	0.064
Ключевской	7	4	1150	1017	69	4			2244	1.936
Плоский Толбачик	20	2	68	39	11	5	1		126	1.692
Шивелуч	12	6	6916	5220	125	6	2		12275	8.45
Крестовский и Ушковский	10	2	20	9	1				32	0.015
Вне вулканов		2	61	82	35	12	2	1	195	9.663
Всего		47	8293	6401	243	27	5	1	15017	21.82

Из анализа табл. 1 следует, что в 2009 г. суммарное число землетрясений, локализованных в районе Северной группы вулканов, составило  $N_{\Sigma}=15017$ , суммарная энергия –  $\Sigma E=21.82 \cdot 10^8$  Дж (табл. 1), тогда как в 2008 г. было  $N_{\Sigma}=9353$ ,  $\Sigma E=27.39 \cdot 10^8$  Дж [8], т.е. число событий выросло в 1.6 раза, а энергия уменьшилась в 1.3 раза. Наиболее активной по числу землетрясений ( $N=12275$ ) осталась зона влк. Шивелуч с  $R=12$  км. Здесь произошло 81.7% землетрясений от общего числа событий, вошедших в каталог, а их суммарная сейсмическая энергия составила всего лишь 38.7% от всей высвобожденной энергии района Северной группы вулканов. В зоне Ключевского вулкана в 2009 г. число землетрясений, по сравнению с таковым в 2008 г., практически не изменилось ( $N=2244$  вместо 2502), но энергии выделено ими в 10 раз меньше ( $\Sigma E=1.94 \cdot 10^8$  Дж (табл. 1) вместо  $\Sigma E=19.47 \cdot 10^8$  Дж [8]).



**Рис. 1.** Карта эпицентров землетрясений Северной группы вулканов за 2009 г. (а) и проекция гипоцентров (б) на вертикальную плоскость, проходящую через линию А–В

1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан; 3 – круговая область выборки землетрясений с радиусами: Шивелуч – 12 км, Ключевской – 7 км, Крестовский и Ушковский – 10.1 км, Безымянный – 6 км, Плоский Толбачик – 20 км.

Уровень надежной регистрации землетрясений определен по графику повторяемости (рис. 2). Для построения графика и определения угла его наклона использовался пакет программ ZMAP [16]. Из графика следует, что представительными для Северной группы вулканов являются землетрясения с  $K_{\min}=4.5$ , хотя уровень  $K_{\min}$  изменчив на протяжении года, т.к. зависит от событий, происходящих на вулканах. Например, при регистрации сильного непрерывного вулканического дрожания обрабатывать слабые землетрясения невозможно. В таких случаях значение  $K_{\min}$  возрастает. В 2009 г. для землетрясений с  $K_S=4.5-8.6$  значение угла наклона графика повторяемости, равное  $\gamma=1.24\pm 0.06$ , значительно превышает как среднее значение  $\bar{\gamma}=0.87$ , определенное за 2000–2008 гг., так и значение  $\gamma=0.95$  за 2008 г. [7, 8].

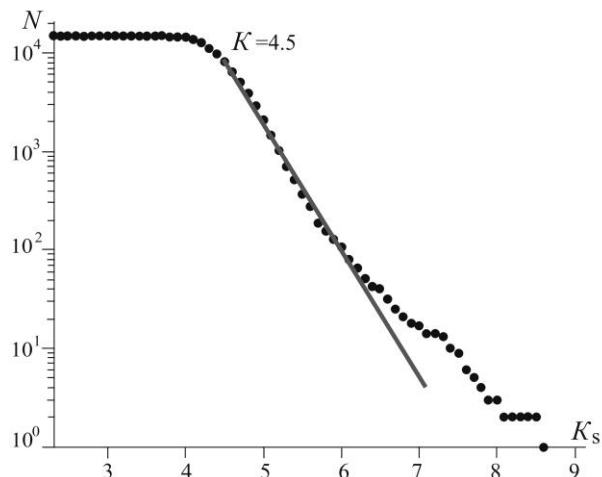


Рис. 2. График повторяемости землетрясений Северной группы вулканов в 2009 г.

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  $K_S=4.0$  [7]. В 2009 г. по-прежнему наблюдалась очень высокая сейсмическая активность вулкана. Число землетрясений ( $N=12275$ ), локализованных в радиусе 12 км от вулкана и в диапазоне глубин  $h=0-17$  км (рис. 3 б, табл. 1). Высвобожденная ими энергия ( $\Sigma E=8.45 \cdot 10^8$  Дж) почти в два раза больше таковой в 2008 г. ( $N=6524$ ,  $\Sigma E=4.73 \cdot 10^8$  Дж [8]).

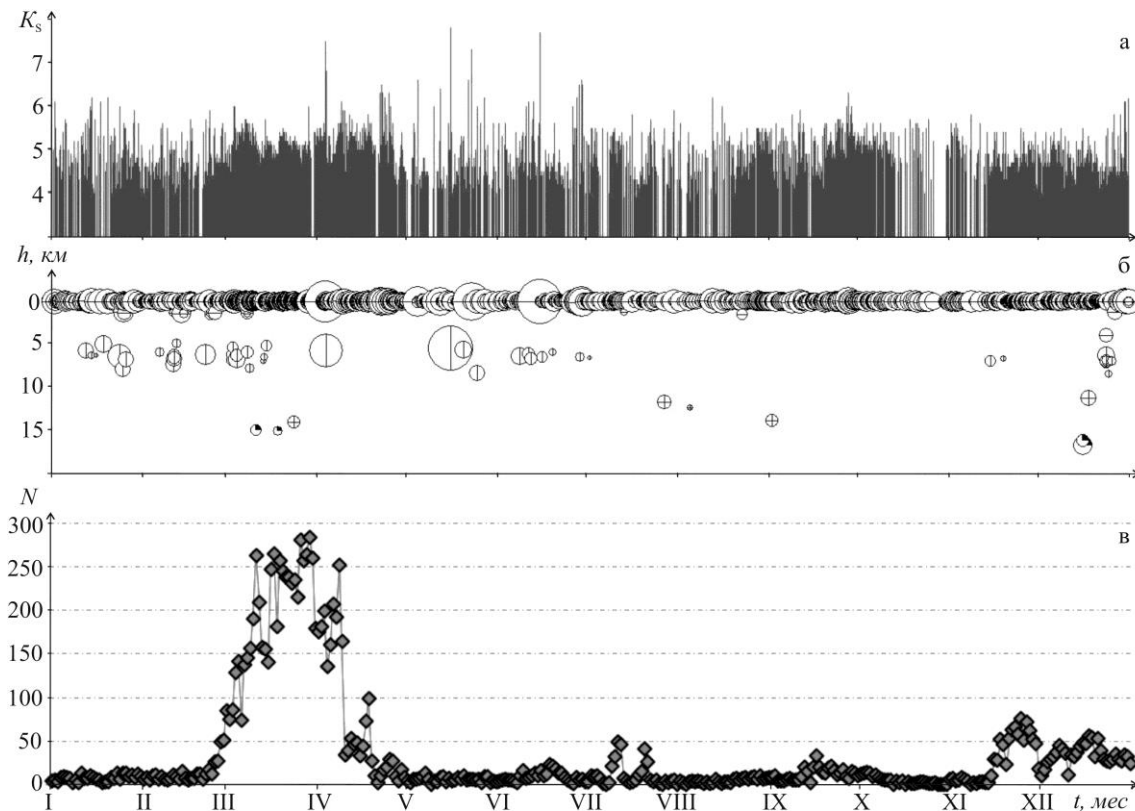
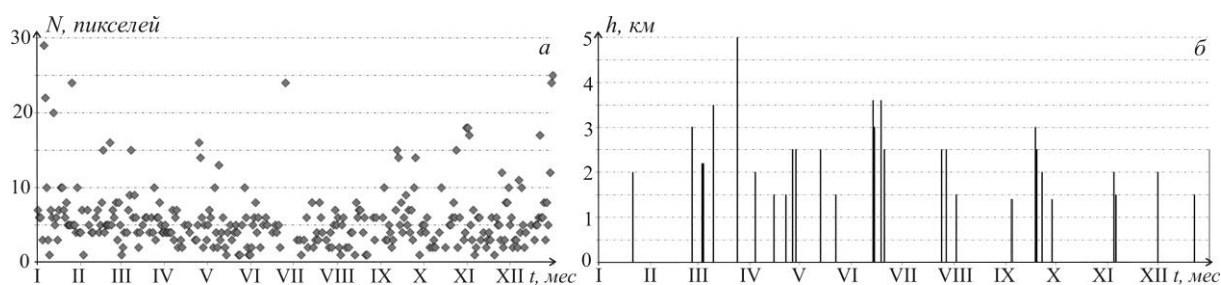


Рис. 3. Изменение во времени энергетического класса  $K_S$  (а), глубины гипоцентров  $h$  (б) и числа  $N$  вулканических землетрясений (в), произошедших в радиусе 12 км от влк. Шивелуч в 2009 г.

Представительный класс, рассчитанный по программе ZMAP, составил  $K_{\min}=4.5$ . Наклон графика повторяемости  $\gamma=1.46\pm 0.04$ . Его значение практически не изменилось, по сравнению с таковым ( $\gamma=1.55\pm 0.03$ ) в 2008 г. [8]. Большие значения угла наклона, возможно, являются следствием увеличения числа слабых землетрясений, связанного с активизацией деятельности приповерхностного магматического очага.

Землетрясение с максимальным классом  $K_S=7.8$  произошло 16 мая в  $09^{\text{h}}32^{\text{m}}$  на глубине  $h=5.7\pm 5.0$  км [10].

В исследуемый период продолжалось извержение влк. Шивелуч, которое началось еще в декабре 2006 г. [7]. Высокая сейсмическая активность, связанная с интенсивным ростом нового купола, наблюдалась с марта по май (рис. 3 в). За этот период было локализовано 8368 землетрясений с  $K_S=3.2-7.5$ , что составляет 68.2% от всех землетрясений, произошедших в зоне вулкана в 2009 г. Максимальное число ( $N=285$ ) землетрясений за сутки было локализовано 29 марта [10].



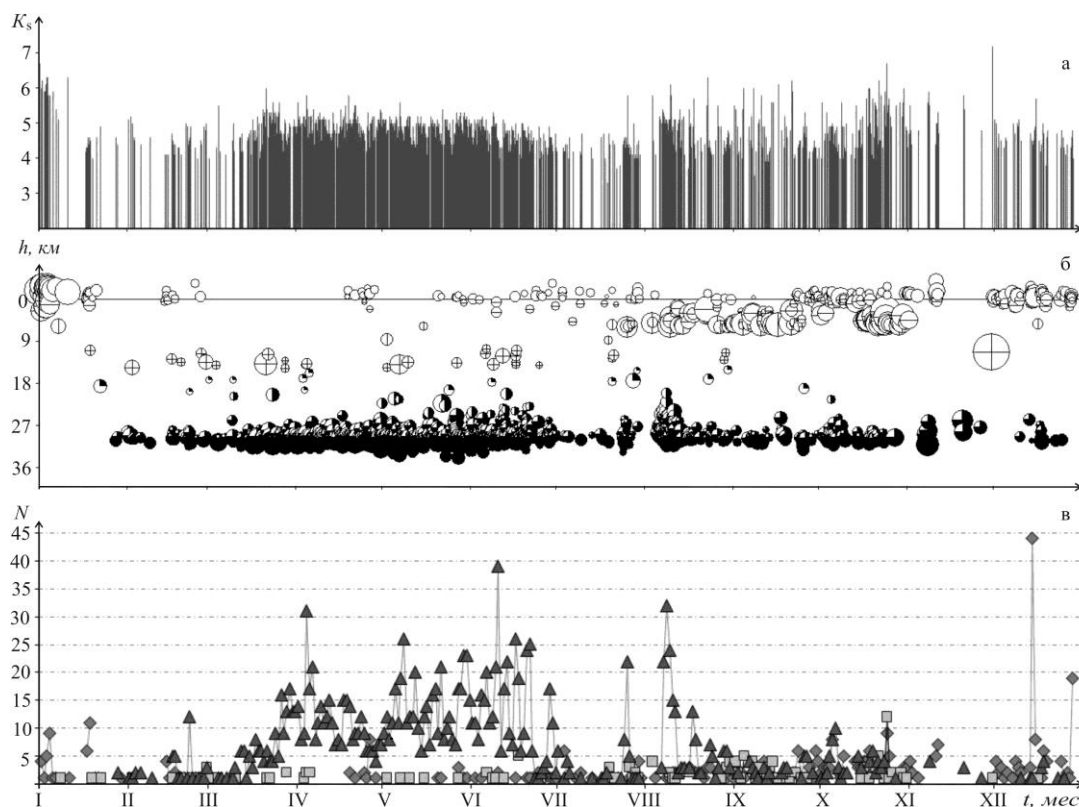
**Рис. 4.** Изменение во времени размера термальной аномалии на влк. Шивелуч по данным спутников NOAA16 и NOAA17 (а); высота газо-пепловых выбросов над куполом по видеоданным и визуальным наблюдениям сотрудников сейсмической станции «Ключи» (б)

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, сопровождавшиеся пепловыми выбросами и сходом пирокластических потоков (рис. 4 б). По визуальным данным газо-пепловый выброс с максимальной высотой 5 км над куполом был зафиксирован 24 марта. При плохих погодных условиях или в темное время суток оценка высоты возможной эксплозии проводилась по сейсмическим данным по методике [17]. 30 октября в  $07^{\text{h}}30^{\text{m}}$  было зарегистрировано поверхностное сейсмическое событие, возможно, сопровождавшее максимальный в 2009 г. пепловый выброс высотой до 14.5 км над куполом. Очень часто в сейсмических событиях, сопровождающих пароксизмальные фазы извержения (землетрясения IV типа), выделить S-волну для определения кинематических характеристик невозможно [14], и поэтому такие события не попадают в каталог.

**Вулкан Ключевской.** Существующая сеть станций (рис. 1) позволяет локализовать при благоприятных условиях землетрясения, начиная с  $K_S\geq 4.0$ . Ближайшая телеметрическая станция «Логоинов» (LGNR), регистрирующая землетрясения с  $K_S\geq 2.2$ , расположена в 4 км от кратера. В 2009 г. по-прежнему наблюдалась высокая сейсмическая активность вулкана. В радиусе 7 км от вулкана и диапазоне глубин  $h=-3.8-34$  км было локализовано 2244 землетрясения [10]. Карта этих эпицентров и проекция гипоцентров на вертикальный разрез представлены на рис. 1, а графики изменения во времени параметров сейсмической активности вулкана – на рис. 5. Максимальное ( $K_S=7.2$ ) землетрясение зарегистрировано 30 ноября в  $12^{\text{h}}43^{\text{m}}$  на глубине  $h=11.4\pm 10.0$  км под постройкой вулкана. 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 [18–21]. Все землетрясения в 2009 г., как и в предыдущие годы, были разделены по трем слоям: I →  $5.0\leq h < 5.0$  км), II →  $5.0\leq h \leq 20.0$  км, III →  $20 < h < 40.0$  км [7, 8, 20].

К концу января 2009 г. закончилось вершинное извержение, начавшееся осенью 2008 г. [8]. График распределения глубины очагов землетрясений во времени (рис. 5 б) наглядно демонстрирует переход сейсмичности из верхних горизонтов (слои I, II) в нижний слой (III). В слоях I и II происходят главным образом вулcano-тектонические землетрясения, возникающие в твердой среде в результате хрупкого разрушения пород под действием сдвиговых и растяги-

вающих напряжений, создаваемых активными магматическими процессами [18]. В нижнем горизонте (III) генерируются глубокие длиннопериодные землетрясения, в образовании которых активную роль играет магматический расплав [22]. Со второй половины марта число глубоких землетрясений постепенно стало расти; 10 июня было локализовано максимальное ( $N=39$ ) их число (рис. 5 в). Всего в 2009 г. были определены параметры для 1691 глубоких землетрясений [10].



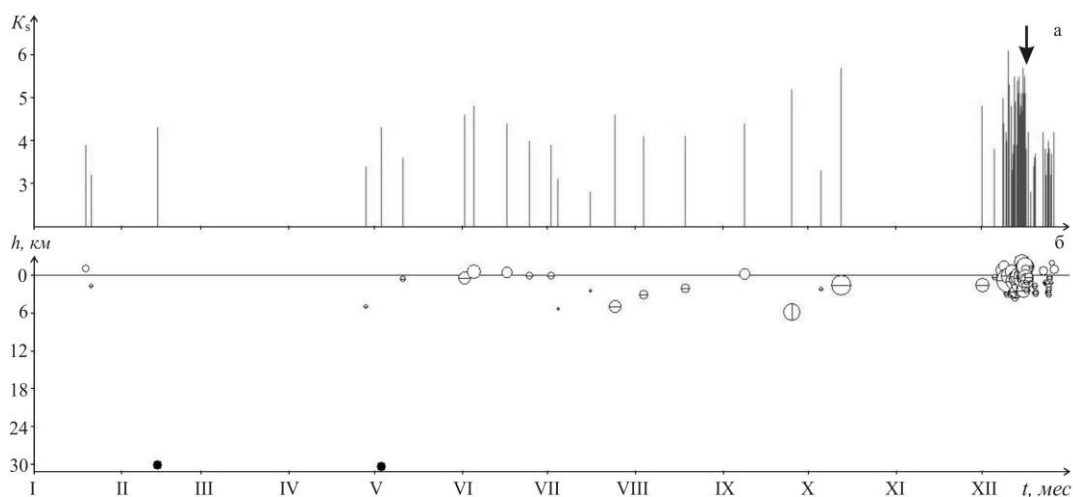
**Рис. 5.** Изменение во времени энергетического класса  $K_s$  (а), глубины гипоцентров  $h$  вулканических землетрясений (б) и ежесуточных чисел землетрясений в I (ромб), во II (квадрат) и в III (треугольник) слоях (в), произошедших в радиусе 7 км от влк. Ключевской в 2009 г.

Во второй половине года сейсмичность вновь начала постепенно перемещаться из глубины к поверхности. Появление землетрясений в верхнем слое (рис. 5 б, в) и дальнейший рост их числа свидетельствовали о поступлении новой порции магмы в постройку вулкана и скором вершинном извержении. По визуальным наблюдениям первые всплески горячей магмы были отмечены 2 августа. Вершинное извержение в виде стромболианской деятельности и слабые пепловые выбросы продолжались до конца года. Во время извержения практически вся сейсмичность сосредоточена в верхнем слое (I) (рис. 5 б, в). В верхнем диапазоне глубин было локализовано 399 землетрясений. Максимальное их число ( $N=44$ ) было зафиксировано 14 декабря (рис. 5 в). В слое II были определены параметры 154 землетрясений.

С помощью пакета программ ZMAP [16] были определены значения  $K_{\min}$  и угол наклона графика повторяемости для землетрясений в каждом слое. Для поверхностного слоя определены два уровня  $K_{\min}$  в зависимости от состояния сейсмической активности. Для периода, когда регистрируется слабое вулканическое дрожание или оно отсутствует, представительный класс получился равным  $K_{\min}=4.1$  при угле наклона  $\gamma=0.7\pm 0.1$ . Величина угла наклона близка к среднему значению  $\gamma=0.66$  за 2005–2008 гг., представительный класс не изменился, по сравнению с таковым в 2008 г. [7–8]. Во время регистрации на влк. Ключевской сильного вулканического дрожания, сложно выделить и локализовать слабые землетрясения. В эти периоды (январь и конец октября–декабрь 2009 г.) значение представительного класса повысилось до  $K_{\min}=5.5$ , а график повторяемости стал круче ( $\gamma=1.95\pm 0.1$ ). Такие большие значения угла наклона графика повторяемости связаны с землетрясениями, происходящими в магматических очагах [23, 24]. Для глубоких землетрясений с  $h=20\text{--}40$  км представительный класс оказался равным  $K_{\min}=4.6$

при угле наклона  $\gamma=2.17\pm 0.12$ . Такой же крутой ( $\gamma=2.0$ ) график повторяемости землетрясений был в 2007 г. Среднее значение угла наклона за период 2003–2008 гг. равно  $\bar{\gamma}=1.5$ . Для землетрясений слоя II с  $h=5.1\text{--}20$  км представительный класс в 2009 г. равен  $K_{\min}=4.0$ . Угол наклона имеет стабильное значение на протяжении многих лет и равен  $\gamma=0.55\pm 0.04$ .

**Вулкан Безымянный.** Ближайшая телеметрическая станция «Безымянный» (BZMR), расположенная в 7 км от растущего купола, позволяет регистрировать землетрясения с  $K_S \geq 2.9$ . Сейсмический режим вулкана за последние годы не менялся. После периода покоя наблюдается сейсмическая активизация, обычно заканчивающаяся извержением. В 2009 г. влк. Безымянный извергался один раз.



**Рис. 6.** Изменение во времени энергетического класса  $K_S$  (а) и глубины гипоцентров  $h$  (б) вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 6 км от влк. Безымянный в 2009 г. (стрелкой обозначен момент эксплозивного извержения вулкана)

В течение года сейсмичность на вулкане была минимальной. Сейсмическая подготовка извержения началась 8 декабря роем поверхностных землетрясений (рис. 6 а, б), число и энергия которых постепенно увеличивались. Это послужило основанием для успешного краткосрочного прогноза извержения влк. Безымянный, который был передан в КФ РЭС 11 декабря [25]. Во время активизации было локализовано 124 землетрясения с  $K_S=2.8\text{--}6.1$  [10], высвобожденная суммарная энергия которых составила  $\Sigma E=5.89 \cdot 10^6$  Дж. Эксплозивное извержение вулкана началось 16 декабря в 11<sup>h</sup>15<sup>m</sup> и продолжалось несколько часов. По сейсмическим данным это был самый сильный взрыв из 17 эксплозивных извержений влк. Безымянный за последние 10 лет. Поскольку вулкан был закрыт облачностью, высоту пеплового выброса можно было оценить только по спутниковым данным, и она достигла значения 8 км над уровнем моря.

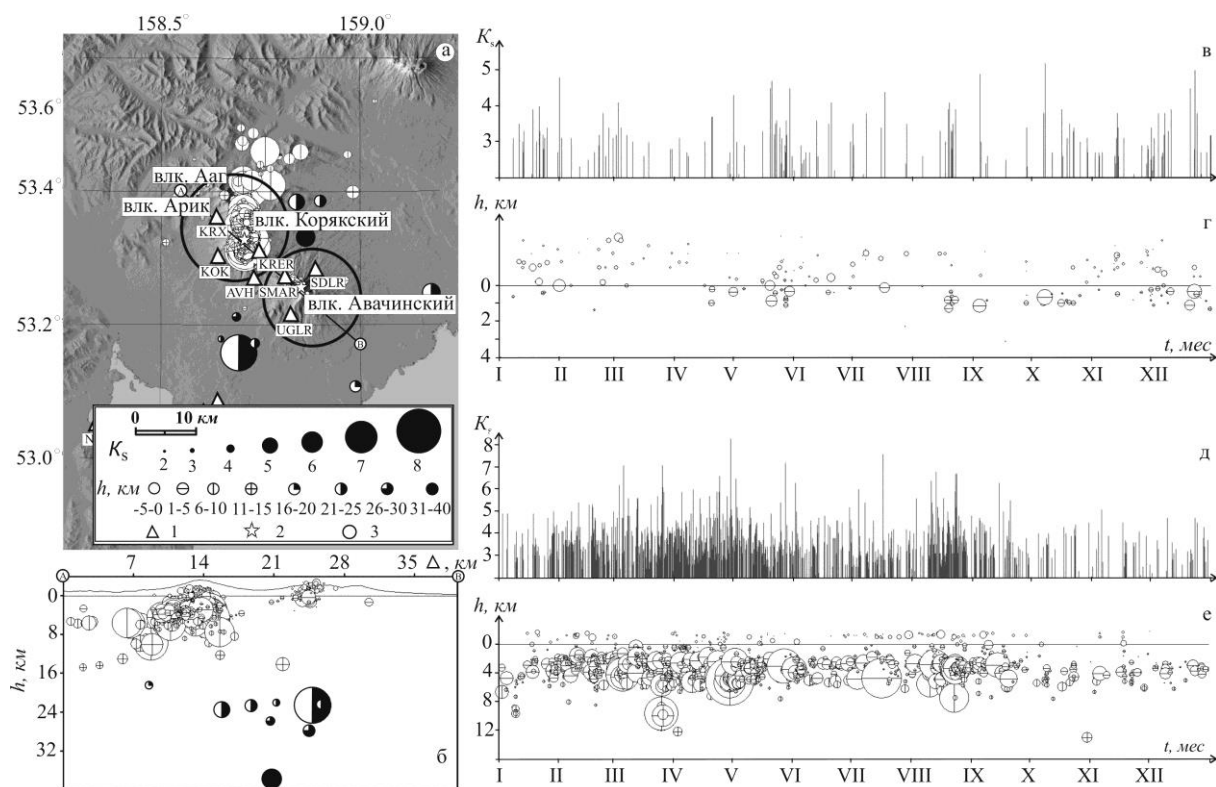
Всего в 2009 г. в радиусе 6 км от влк. Безымянный и диапазоне глубин  $h=-2.0\text{--}30.2$  км было локализовано 145 землетрясений [10]. Землетрясение с максимальным классом  $K_S=6.1$  произошло 10 декабря в 18<sup>h</sup>49<sup>m</sup> под постройкой вулкана ( $h=0.8$  км). Уровень надежной регистрации землетрясений для влк. Безымянный в 2009 г. составил  $K_{\min}=3.7$  при угле наклона графика повторяемости  $\gamma=0.68\pm 0.07$ . Эти параметры практически не меняются на протяжении нескольких лет, их средние значения за период 2005–2008 гг. равны:  $\gamma=0.75$ ,  $K_{\min}=3.7$  [7, 8].

**Вулкан Плоский Толбачик.** На протяжении 2009 г. в районе влк. Плоский Толбачик наблюдалась «обычная, фоновая» сейсмичность. Ближайшая телеметрическая станция «Каменная» (KMNR), расположенная в 10 км от кратера вулкана, регистрировала землетрясения с  $K_S \geq 3.3$ . В 2009 г. в радиусе 20 км от вулкана было локализовано 126 землетрясений (табл. 1) в диапазоне глубин  $h=-1.2\text{--}28.1$  км [10]. Уровень  $K_{\min}$ , рассчитанный по программе ZMAP, равен  $K_{\min}=4.0$ , угол наклона графика повторяемости  $\gamma=0.52\pm 0.03$ . Величина  $\gamma$  практически не меняется на протяжении многих лет и близка к значению  $\gamma=0.5$  для региональных тектонических землетрясений [26]. Максимальное ( $K_S=8.0$ ) событие произошло 17 июля в 20<sup>h</sup>16<sup>m</sup> на глубине  $h=10.1\pm 10$  км. На рис. 1 представлена карта эпицентров и проекция гипоцентров на вертикальный разрез. На протяжении 2009 г. в районе влк. Плоский Толбачик наблюдалась «обычная, фоновая» сейсмичность.

**Вулканы Ушковский и Крестовский.** В 2009 г. сейсмичность района влк. Крестовский и Ушковский была фоновой и никаких проявлений вулканической активности не отмечено. 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 2009 г. в пределах окружности радиусом 10.1 км, включающей оба вулкана, было локализовано всего 32 землетрясения (рис. 1) на глубинах  $h = -1.8-25.2$  км [10]. Максимальное землетрясение с  $K_S=5.7$  произошло 20 сентября в 02<sup>h</sup>01<sup>m</sup> на глубине  $h=5.9 \pm 4.5$  км под постройкой влк. Крестовский. Для определения представительного класса и угла наклона графика повторяемости такого небольшого числа событий недостаточно. Карта эпицентров и проекция гипоцентров на вертикальный разрез представлены на рис. 1.

**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. Суммарное число зарегистрированных в группе землетрясений составило  $N_{\Sigma}=1920$  [11].

Координаты гипоцентров для Корякского и Авачинского вулканов рассчитывались, как и в предшествующие годы, по программе Ю.Ю. Мельникова [9] с использованием двух разных одномерных скоростных моделей среды [1]. Для 49 сейсмических событий, расположенных вне этих вулканов (табл. 2), приблизительно по изолинии 400 м, и отмеченных в каталоге как «Авачинская группа», использовался в расчетах обычный региональный годограф [27]. Карта эпицентров и проекция гипоцентров на вертикальный разрез представлены на рис. 7.



**Рис. 7.** Карта эпицентров землетрясений Авачинской группы вулканов в 2009 г. (а) и проекция гипоцентров на вертикальный разрез вдоль линии А–В (б), а также изменение во времени параметров вулканических землетрясений Авачинского (в, г) и Корякского (д, е) вулканов в 2009 г.

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

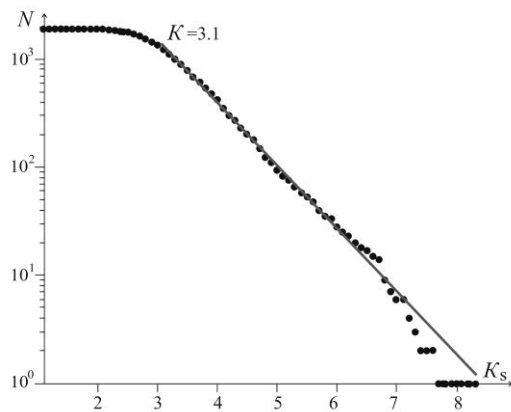
В 2009 г. в районе Авачинской группы вулканов было локализовано 1920 землетрясений с  $K_S=1.6-8.3$  [11], что  $\sim 2$  раза больше, чем в 2008 г. с  $N_{\Sigma}=1015$  [8]. Суммарная сейсмическая энергия, выделившаяся в очагах вулканических землетрясений, более чем в два раза превысила

такое значение за 2008 г. [8] и ~ в 25 раз выше среднего значения за период 2004–2007 гг. [7, 8]. Максимальное событие с  $K_S=8.3$  реализовалось на глубине  $h=5.2\pm 5.0$  км под постройкой Корякского вулкана 30 апреля в 01<sup>h</sup>20<sup>m</sup> [11]. 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 2009 г.

Название вулкана	$R_{зоны},$ км	$K_S$							$N_{\Sigma}$	$\Sigma E,$ $10^7$ Дж
		2	3	4	5	6	7	8		
Авачинский	8	41	109	26	5				181	0.089
Корякский	9	161	918	488	84	29	8	2	1690	34.876
Вне вулканов			3	20	17	4	5		49	5.466
Всего		202	1030	534	106	33	13	2	1920	40.431

Представительный класс, рассчитанный по программе ZMAP, составил  $K_{\min}=3.1$ , что соответствует среднему значению за период 2005–2007 гг. ( $K_{\min}=3.0$ ) (рис. 8). Улучшение уровня надежной регистрации в 2009 г., по сравнению с таковой ( $K_{\min}=3.8$ ) в 2008 г. [8], связано, возможно, с установкой двух новых станций в районе влк. Корякский. Угол наклона графика повторяемости практически не меняется последние годы. В 2009 г. он был равен  $\gamma=0.58\pm 0.02$ , а среднее его значение за период 2005–2008 гг.  $\gamma=0.6$  [7, 8]. На рис. 7 представлены распределения во времени значений энергетического класса  $K_S$  и глубины землетрясений для каждого вулкана.



**Рис. 8.** График повторяемости землетрясений Авачинской группы вулканов за 2009 г.

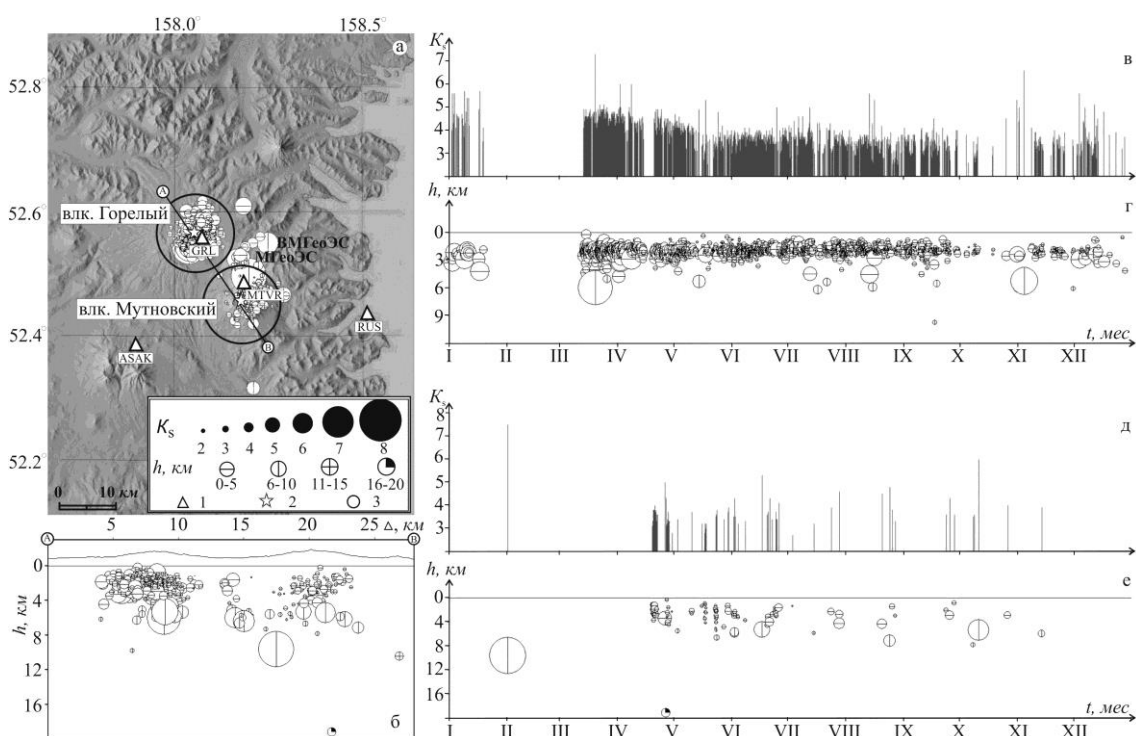
В 2009 г. в радиусе 8 км от кратера влк. Авачинский и в диапазоне глубин  $h=-2.8-3.1$  км было локализовано 181 землетрясение с  $K_S=1.7-5.2$ . Землетрясение с максимальным классом ( $K_S=5.2$ ) произошло под постройкой вулкана на глубине  $h=0.7\pm 0.5$  км 8 октября в 00<sup>h</sup>05<sup>m</sup> [11]. Сейсмичность вулкана соответствует «фоновой».

В 2009 г. наблюдалась высокая сейсмическая активность влк. Корякский, начавшаяся в марте 2008 г. [28]. Вулкан расположен на пересечении двух разломов северо-западного и северо-восточного направлений. С северо-запада к Корякскому вулкану примыкают и служат его основанием среднеплейстоценовые постройки вулканов Ааг и Арик. В августе 1966 г. был зарегистрирован рой землетрясений ( $N=89$ ,  $K_S=4.0-9.0$ ,  $h=0-10$  км), эпицентры которых группировались в северо-восточной и восточной частях построек этих вулканов (Аагский рой землетрясений) [29]. Сейсмическая активизация 2008 г. началась тоже из этого района на глубине  $h=5-15$  км, постепенно смещаясь под постройку Корякского вулкана на глубины  $h=3-10$  км. В январе 2009 г. на склоне вулкана в 3.2 км от вершины была установлена новая сейсмическая станция «Коряка-Восток» (KRER), а в сентябре в 5.9 км от вершины – станция «Арик» (KRX) (рис. 7 а) [5]. Установка новых станций [5] на склоне вулкана повысила точность локации землетрясений в пространстве, включая постройку вулкана, и позволила регистрировать более слабые землетрясения. Всего в 2009 г. в радиусе 9 км от вершины влк. Корякский и диапазоне глубин  $h=-1.8-13.0$  км было локализовано 1690 землетрясений с  $K_S=1.6-8.3$  [11] (рис. 7 д, е). Представительный класс и наклон графика повторяемости, рассчитанные по программе ZMAP, составили  $K_{\min}=3.0$  и  $\gamma=0.59\pm 0.02$ . Наряду с высокой сейсмической активностью усилилась и вулканическая деятельность влк. Корякский. По визуальным и спутниковым данным в марте–апреле и в августе высота парогазовых выбросов достигала 2 км, а протяженность пепловых шлейфов доходила до 500 км. Эмиссия происходила на высоте ~ 3 км из фумарол на северо-западном склоне, образовавшихся при слабом эксплозивном извержении в 1956–1957 гг.



В 2009 г. впервые был начат мониторинг сейсмической активности **Мутновско-Гореловской группы вулканов**. Группа расположена в 70 км к югу от г. Петропавловск-Камчатский и включает в себя два действующих вулкана – Мутновский и Горелый. В районе этой группы вулканов расположены Мутновская и Верхне-Мутновская геотермальные электростанции. Введенные в эксплуатацию в конце декабря 2008 г. две новые телеметрические станции «Мутновка» (MTVR) и «Асача» (ASAK) совместно со станциями «Горелый» (GRL) и «Русская» (RUS) образовали локальную сеть для детального сейсмического мониторинга этого района [5].

В связи с отсутствием локальных скоростных моделей для этих районов при расчете положений гипоцентров использовалась одномерная скоростная модель Камчатского региона [27]. Используемый пакет программ «НПО» [9] не предусматривал поиск решения по глубине выше уровня моря, ограничиваясь нулевой отметкой. Карта эпицентров и проекция гипоцентров на вертикальный разрез вдоль линии А–В представлены на рис. 9.



**Рис. 9.** Карта эпицентров (а) и проекция гипоцентров на вертикальный разрез вдоль линии А–В (б) для землетрясений района Мутновско-Гореловской группы вулканов, а также изменение во времени параметров вулканических землетрясений влк. Горелый (в, г) и влк. Мутновский (д, е) в 2009 г.

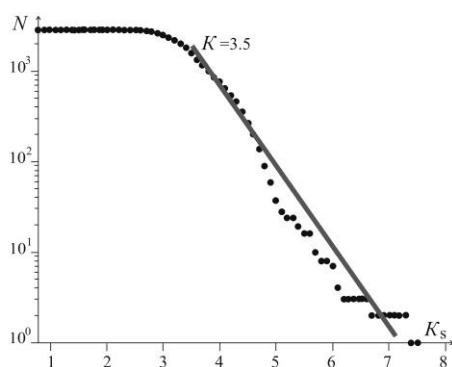
1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан; 3 – окружность, ооконтуривающая область выборки землетрясений вокруг влк. Горелый и Мутновский ( $R=7$  км).

В 2009 г. в районе Мутновско-Гореловской группы вулканов было локализовано 2858 землетрясений с  $K_s=2.1-7.5$  [12], высвобожденная ими энергия составила  $\Sigma E=9.18 \cdot 10^7$  Дж (табл. 3). Рассчитанный для них по программе ZMAP [16] представительный класс составил  $K_{min}=3.5$  при угле наклона  $\gamma=0.91 \pm 0.08$ . При сильном вулканическом дрожании ( $A/T_{max}=1.1$  м/с), источником которого является влк. Горелый, появился второй локальный минимум  $K_{min}=5.0$  (рис. 10).

Ближайшая к влк. Горелый телеметрическая станция «Горелый» GRL расположена в 4 км от кратера и позволяет регистрировать землетрясения с  $K_s \geq 2.2$ . С 23 января по 13 марта 2009 г. станция не работала, поэтому в этот период был возможен пропуск событий (рис. 9 в, г). Представительный класс и угол наклона графика повторяемости для землетрясений влк. Горелый соответствует данным, полученным для всей Мутновско-Гореловской группы вулканов ( $K_{min}=3.5$ ,  $\gamma=0.94$ ), т.к. землетрясений на влк. Горелый в 21.5 раза больше, чем на влк. Мутновский и вне зон вулканов вместе (табл. 3).

**Таблица 3.** Распределение землетрясений района Гореловско-Мутновской группы вулканов по энергетическим классам  $K_S$  в 2009 г.

Название вулкана	$R_{зоны}, км$	$K_S$						$N_{\Sigma}$	$\Sigma E, 10^7 Дж$
		2	3	4	5	6	7		
Горелый	7	38	1423	1084	175	9	2	2731	5.496
Мутновский	7		54	37	4	2		97	3.345
Вне вулканов			6	12	9	3		30	0.338
Всего		38	1483	1133	188	14	2	2858	9.179



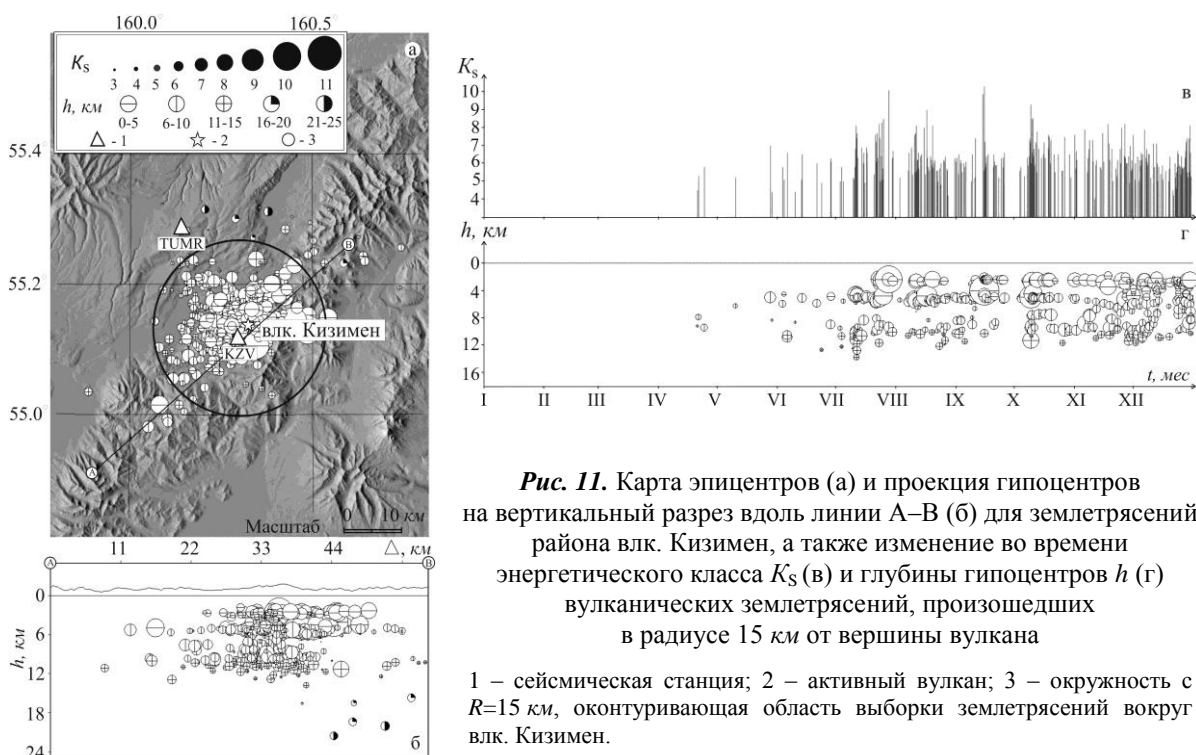
**Рис. 10.** График повторяемости землетрясений Мутновско-Гореловской группы вулканов за 2009 г.

Всего в исследуемый период в радиусе  $R=7 км$  от вершины влк. Горелый было локализовано 2731 землетрясение в диапазоне глубин  $h=0.2-9.8 км$  (табл. 3). Максимальное ( $K_S=7.3$ ) произошло 20 марта в  $04^h45^m$  на глубине  $h=6.0 \pm 5.0 км$  под постройкой вулкана [12].

Станция «Мутновка» (MTVR) [5] установлена на северо-восточном гребне Мутновского вулкана на высоте 1390 м, расстояние до активного кратера  $\sim 3 км$  (рис. 9). Минимальный класс регистрируемых событий по этой станции соответствует  $K_S=2.0$ , хотя представительный класс, рассчитанный по программе ZMAP, равен  $K_{min}=3.2$ , а угол наклона графика повторяемости составил  $\gamma=0.76$ . В 2009 г. в радиусе 7 км от вулкана было локализовано 97 землетрясений с

$K_S=2.7-7.5$ , в диапазоне глубин  $h=0.4-19.2 км$  (рис. 9 д, е). Землетрясение с максимальным классом  $K_S=7.5$  произошло 1 февраля в  $07^h17^m$  на глубине  $h=9.6 км$  под северо-восточным склоном вулкана, под южным флангом Мутновского гидротермального месторождения.

**Вулкан Кизимен** расположен на западном склоне южной части хр. Тумрок. Это самый южный из действующих вулканов Центральной Камчатской депрессии [30]. Последнее историческое извержение вулкана произошло в 1927–1928 гг.



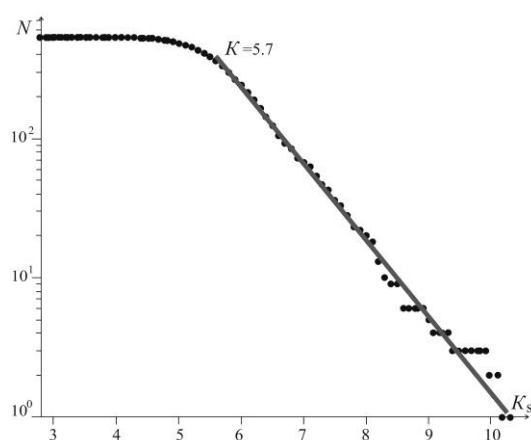
**Рис. 11.** Карта эпицентров (а) и проекция гипоцентров на вертикальный разрез вдоль линии А–В (б) для землетрясений района влк. Кизимен, а также изменение во времени энергетического класса  $K_S$  (в) и глубины гипоцентров  $h$  (г) вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 15 км от вершины вулкана

1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан; 3 – окружность с  $R=15 км$ , оконтуривающая область выборки землетрясений вокруг влк. Кизимен.

Ближайшая телеметрическая станция «Тумрок» (TUMR) расположена в 20 км от вулкана (рис. 11). В конце сентября 2009 г. на юго-западном склоне вулкана ~ в 2.5 км от вершины была установлена новая станция «Кизимен» (KZV) [5], данные которой были введены в обработку только в конце октября. Представительный класс землетрясений района влк. Кизимен  $K_{\min}=5.7$ . Угол наклона графика повторяемости (рис. 12) равен  $\gamma=0.55\pm 0.02$ , что близко к значению для региональных тектонических землетрясений.

**Таблица 4.** Распределение землетрясений района влк. Кизимен по энергетическим классам  $K_S$  в 2009 г.

Название вулкана	$R_{\text{зоны}}$ , км	$K_S$								$N_{\Sigma}$	$\Sigma E$ , $10^{10}$ Дж
		3	4	5	6	7	8	9	10		
Кизимен	15	1	15	154	259	72	26	3	3	533	4.842
Вне вулкана			7	14	16	3	1	2		43	0.102
Всего		1	22	168	275	75	27	5	3	576	4.944



**Рис. 12.** График повторяемости землетрясений вулкана Кизимен за 2009 г.

При расчете положений гипоцентров землетрясений района влк. Кизимен, так же как и для землетрясений Мутновско-Гореловской группы, использовалась одномерная скоростная модель Камчатского региона и пакет программ «НИРО» [9, 27].

В 2009 г. первые землетрясения были зарегистрированы в конце апреля, а с июля началось усиление сейсмической активности вулкана (рис. 11 в). Всего в 2009 г. в районе влк. Кизимен было локализовано 576 землетрясений в диапазоне глубин  $h=1.9-21.6$  км [13], из них 533 – в радиусе 15 км от вершины вулкана (табл. 4). Землетрясение с максимальным классом  $K_S=10.3$  произошло 15 сентября в 19<sup>h</sup>04<sup>m</sup> на глубине  $h=4.1$  км под постройкой вулкана [13]. Надо отметить, что такого класса в этом районе не наблюдалось, по крайней мере в течение последних 10 лет. В исследуемый период вулкан находился в состоянии активной фумарольной деятельности.

по крайней мере в течение последних 10 лет. В исследуемый период вулкан находился в состоянии активной фумарольной деятельности.

**Закключение.** В 2009 г. наблюдалась высокая сейсмическая и вулканическая активность вулканов Камчатки. В течение всего года происходили рост и разрушение купола влк. Шивелуч, которые сопровождалась огромным числом землетрясений и эксплозивными извержениями.

С февраля месяца на влк. Ключевской началась сейсмическая активизация в нижнем «глубоком» слое, связанная с поступлением магматического материала и обычно предвещающая вершинные извержения вулкана. Эксплозивно-эффузивное извержение началось в августе и продолжалось до конца года.

Также в исследуемый период произошло извержение влк. Безымянный, сейсмическая подготовка в котором началась за 8 дней до взрыва.

В 2009 г. на влк. Корякский, одном из наиболее опасном вулкане для населения краевой столицы, зарегистрировано несколько всплесков сейсмической активизации. Во время усиления сейсмичности, наблюдалась вулканическая активизация в виде парагазовой эмиссии с пеплом. Установка новых станций «Коряка-Восток» KRER с 11 февраля и «Арик» KRX с 19 августа 2009 г. [6] в районе влк. Корякский повысила уровень надежной регистрации землетрясений и точность локации их в пространстве.

Вулканы Горелый и Мутновский представляют потенциальную опасность для геоэнергетического комплекса МГеоЭС и ВМГеоЭС. Ввод в обработку потоков данных новых станций «Мутновский» MTVR и «Асача» ASAK [6] в районе Мутновско-Гореловской группы вулканов улучшили сейсмический мониторинг в этом районе. В 2009 г. на влк. Горелый были не только

зафиксированы, но локализованы рои землетрясений, возможно, сопровождавшие образование высокотемпературной бокки у основания стенки активного кратера. В ноябре, впервые за последние 20 лет, на влк. Горелый была отмечена парогазовая деятельность. После почти 80-летнего спокойствия летом 2009 г. началась сейсмическая активизация влк. Кизимен. Установка новой телеметрической станции «Кизимен» KZV позволила повысить уровень сейсмического мониторинга вулкана.

Всего в 2009 г. в районе Северной, Авачинской, Мутновско-Гореловской групп вулканов, а также в районе влк. Кизимен было локализовано 20371 землетрясение, высвобожденная ими сейсмическая энергия составила  $\Sigma E = 5.6 \cdot 10^{10}$  Дж.

### Л и т е р а т у р а

1. **Сенюков С.Л.** Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений в 2000–2004 гг. // Вулканология и сейсмология. – 2006. – № 3. – С. 68–78.
2. **Старовойт О.Е., Мишаткин В.Н.** Сейсмические станции Российской академии наук (состояние на 2001 г.). – М. – Обнинск: ГС РАН, 2001. – 86 с.
3. **Левина В.И., Иванова Е.И., Гусева Е.И.** Камчатка и Командорские острова // Землетрясения Северной Евразии в 2001 году. – Обнинск: ГС РАН, 2007. – С. 213–222.
4. **Чебров В.Н., Сенюков С.Л., Дрознина С.Я.** Камчатка и Командорские острова // Землетрясения России, 2008 год. – Обнинск: ГС РАН, 2010. – С. 51–56.
5. **Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Кугаенко Ю.А., Левина В.И., Сенюков С.Л., Сергеев В.А., Шевченко Ю.В., Ящук В.В.** Система детальнейших сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. – 2013. – № 1. – С. 18–40.
6. **Чебров В.Н., Матвеев Е.А., Шевченко Ю.В., Ящук В.В., Музуров Е.Л. (сост.).** Сейсмические станции сети Камчатки и Командорских островов в 2009 г. (См. Приложение к наст. сб. на CD).
7. **Сенюков С.Л., Нуждина И.Н., Дрознина С.Я.** Вулканы Камчатки // Землетрясения Северной Евразии, 2006 год. – Обнинск: ГС РАН, 2012. – С. 449–460.
8. **Сенюков С.Л., Нуждина И.Н.** Вулканы Камчатки // Землетрясения Северной Евразии, 2008 год. – Обнинск: ГС РАН, 2014. – С. 453–462.
9. **Мельников Ю.Ю.** Пакет программ для определения координат гипоцентров землетрясений Камчатки на ЭВМ // Вулканология и сейсмология. – 1990. – № 5. – С. 103–112.
10. **Нуждина И.Н. (отв. сост.), Кожевникова Т.Ю., Толочкова С.Л., Напылова Н.А., Напылова О.А., Демянчук М.В., Соболевская О.В. (сост.).** Каталог землетрясений Северной группы вулканов за 2009 г. (См. Приложение к наст. сб. на CD).
11. **Нуждина И.Н. (отв. сост.), Кожевникова Т.Ю., Толочкова С.Л., Соболевская О.В. (сост.).** Каталог землетрясений Авачинской группы вулканов за 2009 г. (См. Приложение к наст. сб. на CD).
12. **Нуждина И.Н. (отв. сост.), Кожевникова Т.Ю., Толочкова С.Л., Соболевская О.В. (сост.).** Каталог землетрясений Мутновско-Гореловской группы вулканов за 2009 г. (См. Приложение к наст. сб. на CD).
13. **Нуждина И.Н. (отв. сост.), Кожевникова Т.Ю., Толочкова С.Л., Соболевская О.В. (сост.).** Каталог землетрясений вулкана Кизимен за 2009 г. (См. Приложение к наст. сб. на CD).
14. **Токарев П.И.** Вулканические землетрясения Камчатки. – М.: Наука, 1981. – 164 с.
15. **Федотов С.А.** Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. – М.: Наука, 1972. – 117 с.
16. **Weimer S.** A software package to analyze seismicity: ZMAP // Seism. Res. Lett. – 2001. – 72. – № 2. – P. 374–383.
17. **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.
18. **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.

19. **Федотов С.А., Жаринов Н.А., Горельчик В.И.** Деформации и землетрясения Ключевского вулкана, модель его деятельности // Вулканология и сейсмология. – 1988. – № 2. – С. 3–42.
20. **Сеньюков С.Л., Нуждина И.Н.** Пространственно-временной анализ землетрясений вулкана Ключевской за 1999–2007 гг. // Труды региональной научно-технической конференции 11–17 ноября 2007 г. «Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России». – Петропавловск-Камчатский, 2008. – Т. 1. – С. 120–125.
21. **Сеньюков С.Л., Дрознина С.Я., Нуждина И.Н., Гарбузова В.Т., Кожевникова Т.Ю.** Исследования активности вулкана Ключевской дистанционными методами с 01.01.2001 г. по 31.07.2005 г. // Вулканология и сейсмология. – 2009. – № 3. – С. 50–59.
22. **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.
23. **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.
24. **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.
25. **Сеньюков С.Л.** Прогноз извержений вулканов Ключевской и Безымянный на Камчатке // Saarbrücken: LAP LAMBERTS Academic Publishing, 2013. – 144 с.
26. **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.
27. **Кузин И.П.** Фокальная зона и строение верхней мантии в районе Восточной Камчатки. – М.: Наука, 1974. – 132 с.
28. **Сеньюков С.Л., Нуждина И.Н.** Сейсмичность вулкана Корякский в 1966–2009 гг. // Труды Второй региональной научно-технической конференции 11–18 октября 2009 г. «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». – Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. – С. 91–95.
29. **Горельчик В.И.** О рою землетрясений в районе вулкана Ааг // Бюллетень вулканологических станций. – 1969. – № 45. – С. 32–38.
30. **Действующие вулканы Камчатки** / Под ред. С.А. Федотова, Ю.П. Масуренкова. – М.: Наука, 1991. – II. – С. 18–32.