

IV. СЕЙСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ВУЛКАНОВ

ВУЛКАНЫ КАМЧАТКИ

С.Л. Сеньюков, И.Н. Нуждина, С.Я. Дроздина

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

Камчатка является зоной активного вулканизма, и по современным представлениям здесь выделено 29 действующих вулканов (рис. 1) [1]. В 2006 г. был продолжен мониторинг их сейсмической и вулканической активности с целью своевременного предупреждения населения и административных органов о возможности извержения, для уменьшения последствий катастрофических событий, а также в целях обеспечения безопасности авиapolетов в районе п-ова Камчатка [2, 3].

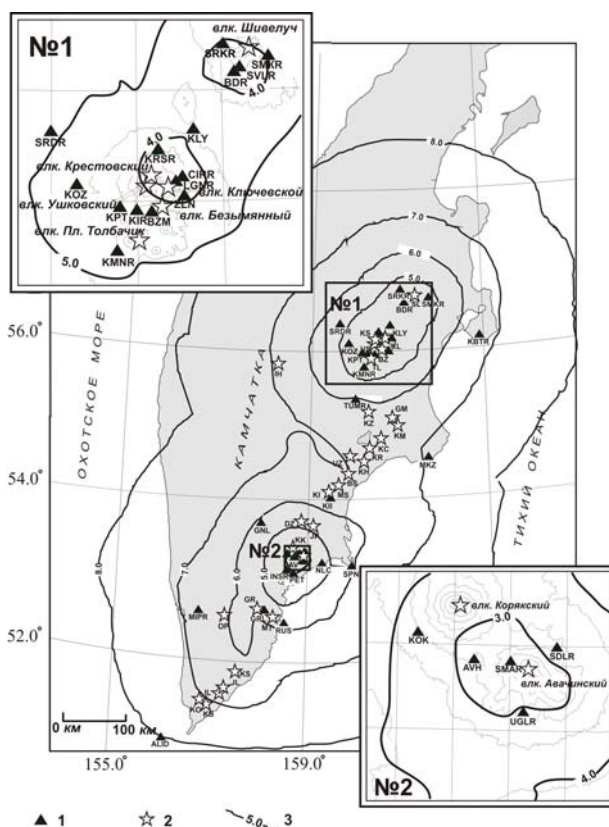


Рис. 1. Активные вулканы Камчатки, радиотелеметрические станции и изолинии K_{min} энергетической представительности землетрясений

1 – телеметрическая сейсмическая станция; 2 – вулкан, 3 – изолиния K_{min} ; № 1, 2 – районы Северной и Авачинской групп вулканов.

Код и название станции: SVLR – «Шивелуч», BDR – «Байдарная», SMKR – «Семкарок», SRKR – «Сорокина», KBTR – «Крутоберегово», KLY – «Ключи», SRDR – «Срединный», KRSR – «Крестовский», CIRR – «Цирк», LGNR – «Логинов», KPT – «Копыто», KOZ – «Козыревск», ZLN – «Зеленая», KMNR – «Жаменистая», TUMR – «Тумрок», KIR – «Жиришева», BZM – «Безымянный», MKZ – «Мыс Козлова», КИ – «Карымский», GNL – «Ганалы», KOK – «Коряка», AVHR – «Авача», SDLR – «Седловина», SMAR – «Сомма», UGLR – «Угловая», GRL – «Горелый», RUS – «Русская», MIPR – «Малая Ипелька», ALID – «Алайд».

Мониторинг проводился по данным следующих видов наблюдений:

- слежение за сейсмической активностью вулканов по данным радиотелеметрических станций в режиме, близком к реальному времени;
- визуальные и видеонаблюдения (в 2006 г. три видеосистемы наблюдали за вулканами Ключевской, Шивелуч и Безымянный (<http://www.emsd.ru/>));
- спутниковый мониторинг термальных аномалий и пепловых выбросов.

Обработка данных сенсора AVHRR спутников NOAA16 и NOAA17 проводилась сотрудниками лаборатории сейсмической и вулканической активности КФ ГС РАН. Прием данных осуществлял Камчатский центр связи и мониторинга. Данные спутников NOAA12, NOAA14, NOAA15, TERRA и MODIS предоставлялись Аляскинской вулканологической обсерваторией. Ежедневная информация о состоянии вулканов, начиная с 2000 г., публикуется в Интернете по адресу: <http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>.

Из всех видов наблюдений сейсмический мониторинг является наиболее надежным и информативным. Его качество не зависит от погодных условий, а высокая информативность доказана многочисленными исследованиями как на Камчатке, так и в мире.

В 2006 г. телеметрическая сеть сейсмических станций в вулканических районах (рис. 1) расширилась. В районе влк. Безымянный 3 августа были введены в систему наблюдений две новые станции – «Киришева» и «Безымянный», что улучшило возможности сейсмических наблюдений для Северной группы. Информация о сейсмических станциях дана в [4–7]. Сеть станций позволяла проводить наблюдения за сейсмической активностью в режиме реального времени с различной степенью детальности для разных вулканов. Наиболее детальные наблюдения проводились для Авачинской (влк. Авачинский и Корякский) и Северной (влк. Шивелуч, Ключевской, Безымянный, Плоский Толбачик, Ушковский и Крестовский) групп вулканов. Вблизи влк. Карымский, Горелый, Мутновский, Алаид и Кизимен работало только по одной станции, поэтому слабые близкие землетрясения лишь фиксировались, но не локализовались. Для остальных вулканов регистрировались только относительно сильные ($K_S \geq 7$) сейсмические события по удаленным станциям. Здесь и далее K_S – энергетический класс землетрясений $K_{S1,2}^{\Phi 68}$, определяемый по номограмме С.А. Федотова [8]. Для пересчета энергетического класса в локальную магнитуду, приведенную в обоих каталогах вулканических землетрясений [9, 10], использовалась формула А.А. Гусева

$$M_L = K_S/2 - 0.75 \text{ [11].}$$

В 2006 г. применялись те же методы обработки сейсмических данных, что и в предыдущие годы [12–17]. Определение кинематических параметров землетрясений в вулканических районах выполнялось на основе одномерных скоростных моделей [11, 18] с помощью программы Ю.Ю. Мельникова [19]. Ниже приведены данные о сейсмической активности Северной (район № 1, рис. 1) и Авачинской групп вулканов (район № 2, рис. 1).

Северная группа вулканов (№ 1). Записи землетрясений в районах вулканов довольно сильно отличаются от тектонических землетрясений. Согласно классификации П.И. Токарева [20], все вулканические землетрясения делятся на пять типов (I–V). У землетрясений I–III типов можно выделить вступления P - и S -волн и они обрабатываются стандартно: определяются времена t_p и t_s вступлений, отношение A_{\max}/T в группе S -волн, по которым далее рассчитываются энергетические классы и координаты гипоцентров. Землетрясения, зарегистрированные тремя и более станциями, локализуются и заносятся в каталог. Для более слабых землетрясений I–III типа, записанных одной или двумя станциями, и всех землетрясений IV типа (в IV типе S -волну выделить невозможно) измеряется отношение A_{\max}/T , которое характеризует их энергию. Для вулканического дрожания (тип V) также измеряется величина A_{\max}/T и продолжительность τ цугов колебаний. Результаты измерений заносятся в таблицы и вычисляются производные параметры за сутки: $(A/T)_{\text{ср}}$, $\Sigma A/T$ и др.

Каталог землетрясений Северной группы вулканов за 2006 г. [9] содержит 5261 землетрясение I–III типов. Распределение землетрясений по вулканам и по классам представлено в табл. 1. Кроме землетрясений, происходящих в постройках вулканов, в каталог также включены события, зафиксированные сетью во всем изучаемом районе. Карта эпицентров района № 1 и условные зоны сейсмичности рассматриваемых вулканов показаны на рис. 2.

Таблица 1. Распределение числа землетрясений и количества высвобожденной энергии по вулканам и энергетическим классам K_S в районе № 1 в 2006 г.

Название вулкана	$R_{зоны}, км$	K_S								N_{Σ}	$\Sigma E, 10^9 Дж$
		2	3	4	5	6	7	8	9		
Безымянный	6	1	35	113	26	3	2			180	0.031
Ключевской	7		81	1574	2530	141	1			4327	0.41
Плоский Толбачик	20		3	37	30	7	1			78	0.021
Шивелуч	12		33	119	65	10	1			228	0.023
Крестовский и Ушковский	10		49	88	8					145	0.001
Вне вулканов			7	124	106	42	18	5	1	303	2.447
Всего		1	208	2055	2765	203	23	5	1	5261	2.933

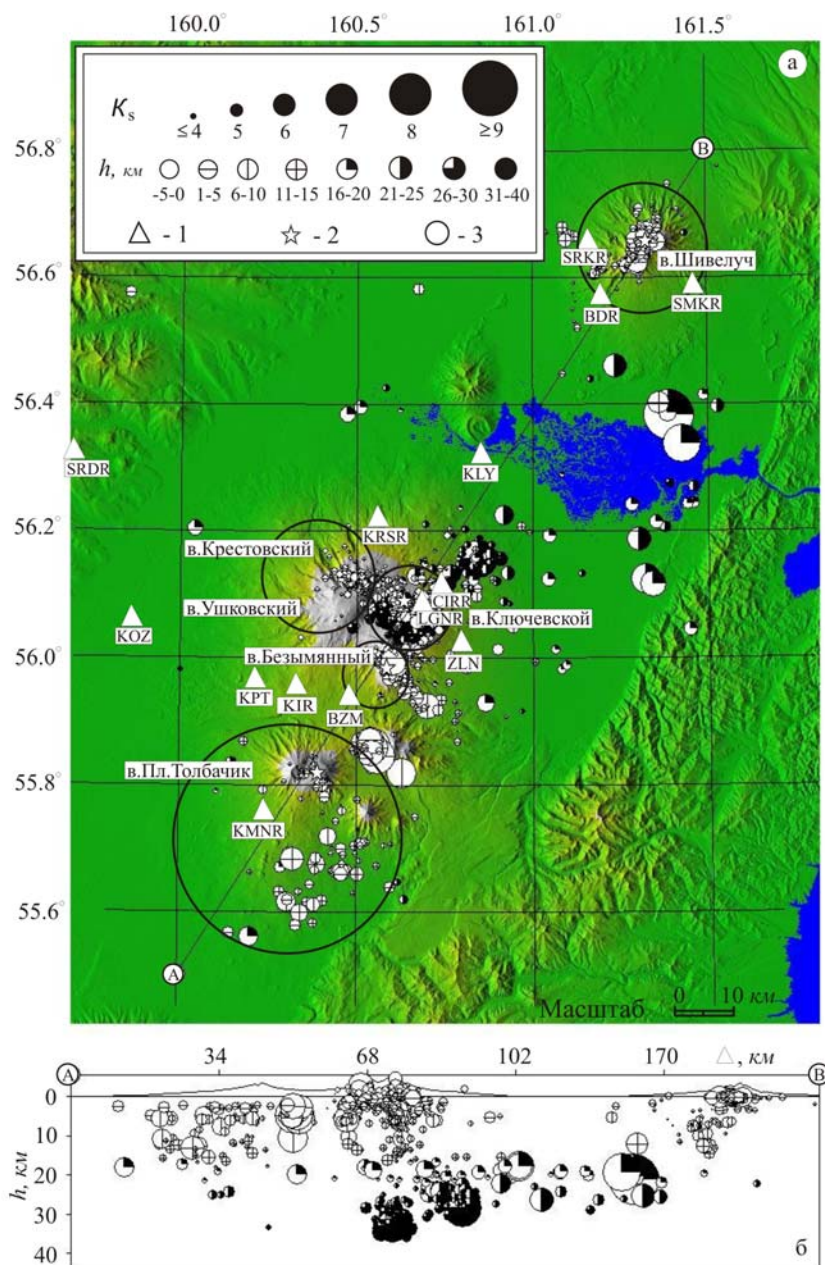


Рис. 2. Карта эпицентров (а) землетрясений Северной группы вулканов за 2006 г. и проекция гипоцентров (б) на вертикальную плоскость, проходящую через линию А–В

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.

Из анализа табл. 1 следует, что в 2006 г., как и в предыдущий год, наиболее активным по числу землетрясений N_z был влк. Ключевской. Здесь произошло $N_z=4327$ землетрясений, что составило 82% от общего числа событий, вошедших в каталог. Несмотря на это, количество высвобожденной ими суммарной сейсмической энергии оказалось в 6 раз меньше, чем таковое значение для вулcano-тектонических землетрясений, локализованных вне зон вулканических построек. Максимальное землетрясение с $K_s=9.2$, $h=19.1$ км произошло 24 апреля в 6^h00^m. Суммарная сейсмическая энергия, выделившаяся в очагах вулканических землетрясений района Северной группы вулканов, составила $\Sigma E=2.9 \cdot 10^9$ Дж, что примерно в 2.9 раза меньше, чем в 2005 г. ($\Sigma E=8.3 \cdot 10^9$ Дж). Уровень надежной регистрации землетрясений определен по графику повторяемости. Для построения графика и определения угла наклона использовался пакет программ ZMAP [21]. Из графика (рис. 3) следует, что представительными для Северной группы вулканов являются землетрясения с $K_{min} \geq 4.9$. Следует отметить, что уровень K_{min} изменчив даже на протяжении года, он зависит от событий, происходящих на вулканах. Например, при регистрации сильного непрерывного вулканического дрожания обрабатывать слабые землетрясения невозможно, в этом случае значение K_{min} повышается. Для землетрясений в диапазоне $K_s=4.9-8.0$ наклон графика повторяемости $\gamma=1.06 \pm 0.1$, что близко к среднему значению $\gamma=0.98$, определенному по данным 2000–2004 гг. [13–17]. В 2005 г. величина γ была равна 0.97 [22].

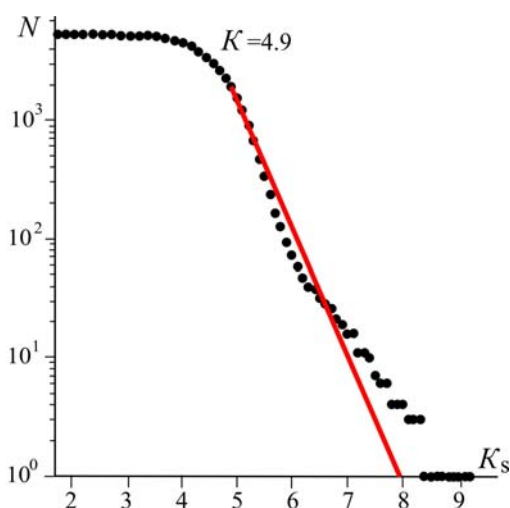


Рис. 3. График повторяемости землетрясений Северной группы вулканов за 2006 г.

Ниже приводится описание активности шести вулканов Северной группы (Шивелуч, Ключевской, Безымянный, Плоский Толбачик, Ушковский, Крестовский) по инструментальным и визуальным наблюдениям в 2006 г.

Вулкан Шивелуч – самый северный действующий вулкан Камчатки (координаты активного кратера – 56°38' N, 161°19' E, абсолютная высота нового растущего купола составила $h_{\gamma} \sim 2500$ м). Вулкан находится в 45 км к северо-востоку от пос. Ключи (рис. 2 а). Ближайшие телеметрические станции – «Сорокина» (SRKR), «Семкарок» (SMKR) и «Байдарная» (BDR) – расположены на расстоянии 8.5–10 км от активного кратера вулкана. Установка этих станций в 2005 г. позволила снизить уровень надежной регистрации до значения $K_{min}=4.5$. Сеть станций, существовавшая до конца 2005 г., позволяла регистрировать без пропусков землетрясения из района влк. Шивелуч, начиная с $K_{min}=5.5$.

В 2006 г. в постройке вулкана в диапазоне глубин $h=0-20$ км было локализовано 220 землетрясений (рис. 4 а, б) [9]. Землетрясение с максимальным классом $K_s=6.6$ произошло 23 декабря в 15^h43^m на глубине около $h \sim 0$ км. С января по ноябрь на вулкане наблюдалась фоновая сейсмичность. По спутниковым данным в этот период времени также не было выявлено заметных признаков активности. В начале декабря было зафиксировано некоторое усиление активности вулкана, выразившееся в увеличении числа поверхностных землетрясений.

По сейсмическим данным, слабое извержение неожиданно началось 4 декабря в 19^h06^m и продолжалось около 15 мин. В дальнейшем наблюдалось постепенное увеличение активности вулкана: рост числа и энергии поверхностных землетрясений, увеличение высоты и продолжительности пепловых выбросов.

На новом куполе в течение всего года наблюдалась термальная аномалия, свидетельствующая о присутствии на поверхности горячего магматического материала (рис. 5 а). По видео – и визуальным наблюдениям удалось зафиксировать несколько пепловых выбросов на вулкане (рис. 5 б). Наибольшая активность зафиксирована 26 декабря, когда произошел пепловый выброс на высоту до 10 км над уровнем моря, наблюдалась непрерывная газопепловая деятельность, а также регистрировалось вулканическое дрожание, которого практически не было в течение года.

По спутниковым данным, пепловый шлейф от извержения протягивался на расстояние свыше 150 км в юго-восточном направлении (рис. 6 а). В период 25–31 декабря термальная аномалия достигала максимального размера до 22 пикселей (рис. 5 а, 6 б).

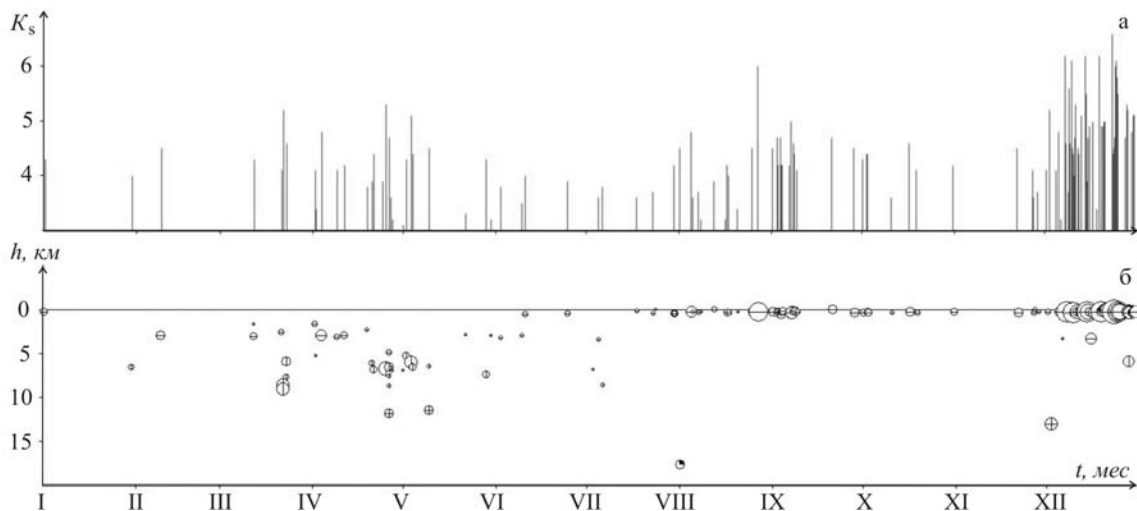


Рис. 4. Изменение во времени энергетического класса K_s (а) и глубины гипоцентров h (б) вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 12 км от влк. Шивелуч в 2006 г.

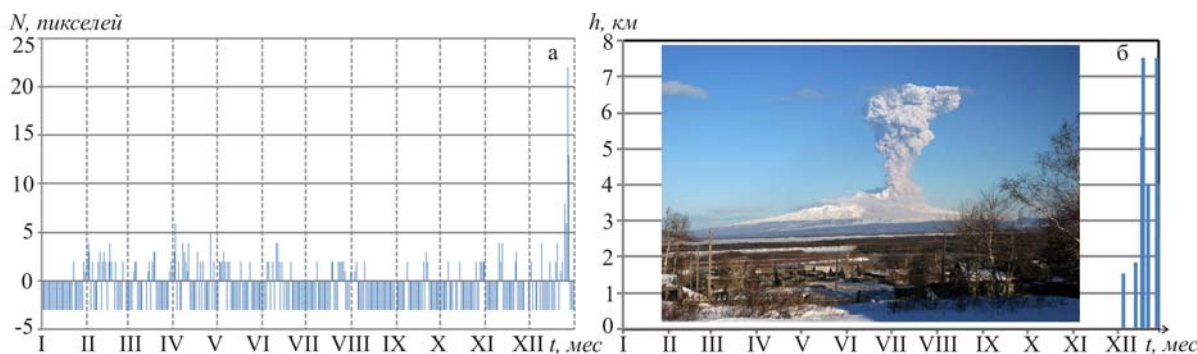


Рис. 5. Изменение во времени для влк. Шивелуч размера термальной аномалии по данным спутников NOAA16 и NOAA17, где отсутствие данных (вулкан закрыт облачностью) отмечено значениями <0 (а); высота газо-пепловых выбросов над куполом по видеоданным и визуальным наблюдениям сотрудников сейсмической станции «Ключи» (б). На рис. 5 б приведена фотография выброса 17 декабря 01^h55^m UTC (фото Ю.В. Демянчука).

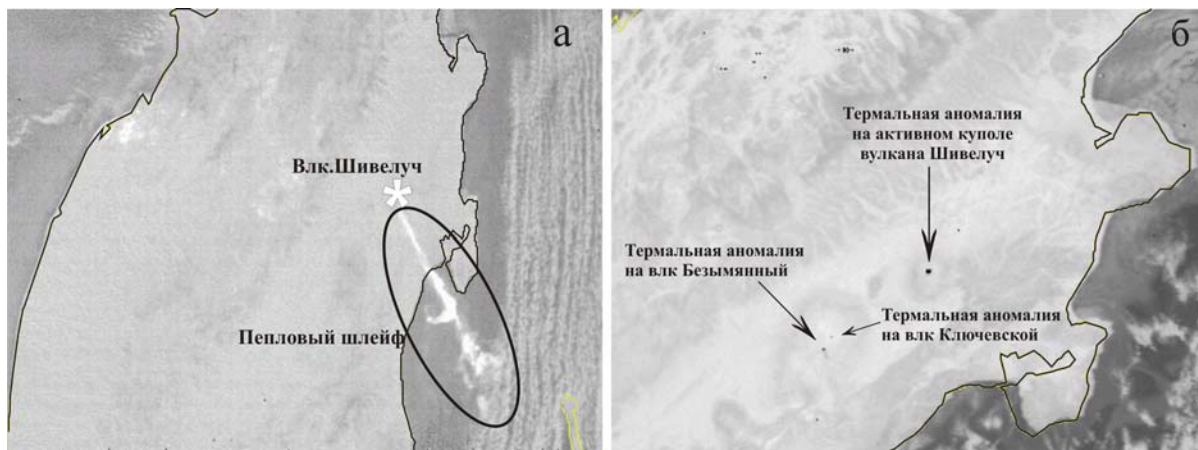


Рис. 6. Спутниковые снимки влк. Шивелуч: а – пепловый шлейф 27 декабря в 04^h44^m (спутник NOAA16); б – термальная аномалия 28 декабря в 09^h57^m (спутник NOAA17) [23].

Вулкан Ключевской – координаты вершины: $56^{\circ}04' N$, $160^{\circ}38' E$; абсолютная высота вулкана $h_v=4750$ м. Диаметр вершинного кратера, венчающего конус, – около 700 м. Ближайшая телеметрическая станция «Логоинов» (LGNR), регистрирующая землетрясения с $K_S \geq 2.2$, расположена в 4 км от кратера. Сеть станций позволяет локализовать при благоприятных условиях землетрясения, начиная с $K_S \geq 4.0$. В 2006 г. в радиусе 7 км от вулкана и диапазоне глубин от вершины до 40 км (изучаемый пространственный объем) было локализовано 4327 землетрясений [9]. Карта их эпицентров и проекция гипоцентров на вертикальный разрез представлены на рис. 2, а графики изменения во времени параметров сейсмической активности вулкана на рис. 7. Землетрясение с максимальным классом $K_S=7.4$ зарегистрировано 15 февраля в $11^h 02^m$ на глубине $h \sim 30$ км. Характер сейсмичности Ключевского вулкана напрямую связан с притоком мантийных магм в промежуточный магматический очаг на глубинах 20–35 км и дальнейшим их подъемом в постройку вулкана при вершинном извержении [24, 25].

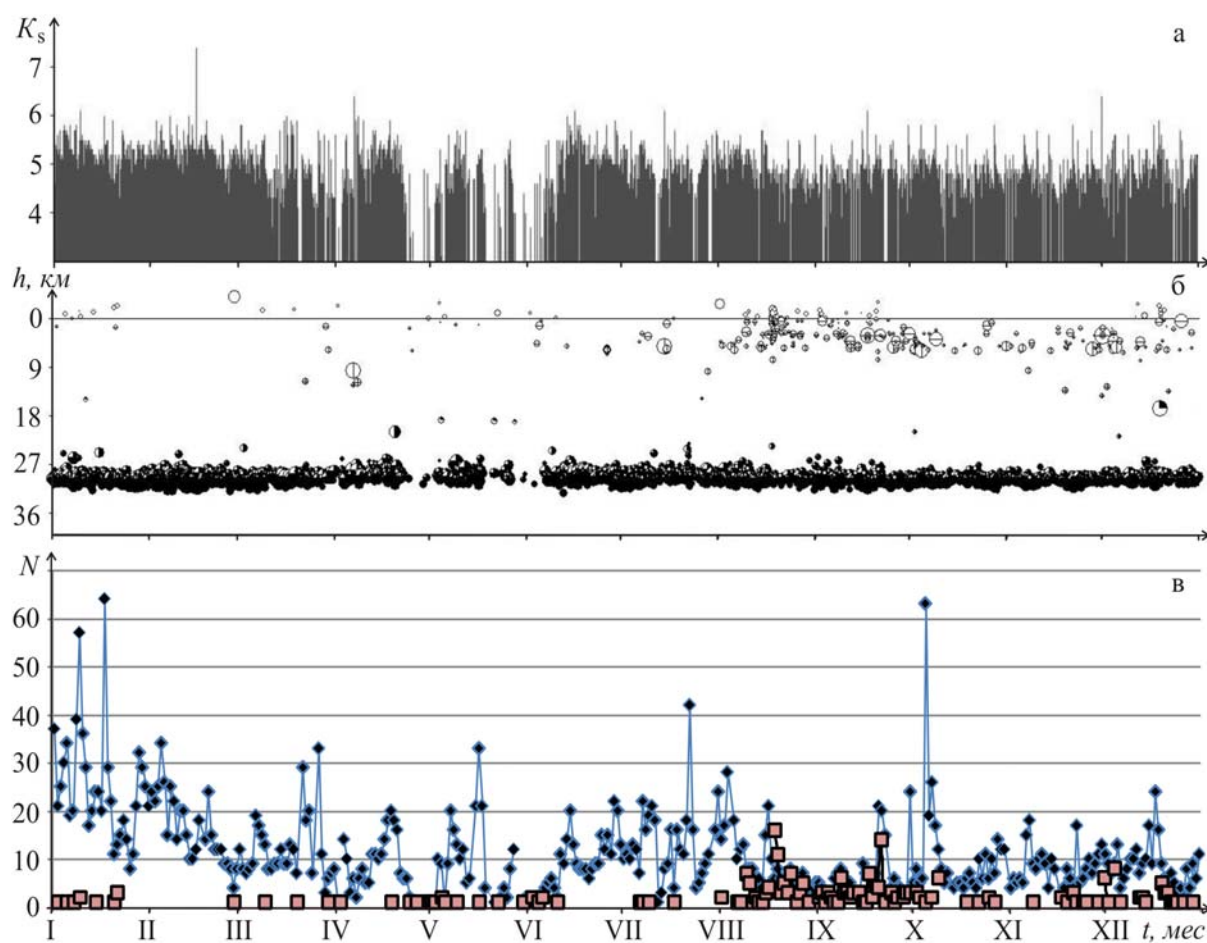


Рис. 7. Изменение во времени энергетического класса K_S (а), глубины гипоцентров h (б) вулканических землетрясений, ежесуточного числа поверхностных (квадрат) и глубоких (ромб) землетрясений (в), произошедших в радиусе 7 км от влк. Ключевской в 2006 г.

Вся сейсмичность в 2006 г., как и в предыдущие годы, была условно разделена по трем слоям: (I: $-5.0 \leq h \leq 5.0$ км; II: $5.1 \leq h \leq 20.0$ км; III: $h > 20$ км) [26, 27]. В двух первых слоях 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, и распределенных в достаточно большом объеме, окружающем магматические каналы и очаги [24, 28]. В нижнем слое генерируется множество глубоких длиннопериодных землетрясений, в образовании которых активную роль играет магматический расплав [28]. График распределения глубины очагов во времени (рис. 7 б) наглядно демонстрирует, что основная часть землетрясений в 2006 г. происходила в нижнем (III) слое. В 2006 г. были определены параметры для 3951 глубокого землетрясения,

максимальное число которых ($N=64$) было зарегистрировано 17 января (рис. 7 в). В начале октября также зафиксирован максимум в ежесуточном распределении глубоких землетрясений: 5 октября локализовано $N=63$ события. В двух других слоях сейсмичность практически отсутствовала: было локализовано 258 событий из поверхностного слоя и 118 из промежуточного. С помощью пакета программ ZMAP [21] были определены значения K_{\min} и угол наклона графика повторяемости для землетрясений в каждом слое. Уровень K_{\min} в поверхностном слое получился равным $K_{\min}=4.0$, что соответствует значению такого параметра за 2004 г. Отсутствие сильного вулканического дрожания улучшило условия регистрации, и значение K_{\min} существенно снизилось, по сравнению с таковыми значениями в периоды высокого уровня дрожания. Так, в 2003 г. $K_{\min}=5.0$, а в 2005 г. $K_{\min}=4.6$ [16, 22]. Угол наклона графика повторяемости для поверхностных землетрясений не изменился, по сравнению с таковым в 2005 г. и равен $\gamma=0.85\pm 0.02$. Для глубоких землетрясений представительный класс оказался равным $K_{\min}=4.9$, $\gamma=1.39\pm 0.03$. Такое же высокое значение угла наклона было в 2003 г. ($\gamma=1.2$), среднее же значение за период 2003–2005 гг. получилось равным $\gamma=0.93$. Для землетрясений промежуточного слоя II представительный класс в 2006 г. равен $K_{\min}=3.7$. Угол наклона имеет стабильное значение на протяжении многих лет и равен $\gamma=0.63\pm 0.05$.

В 2006 г. на Ключевском вулкане практически в течение всего года наблюдалась фоновая сейсмическая и вулканическая активность. Только в конце декабря была отмечена небольшая активизация в виде слабого вулканического дрожания, регистрации большого числа землетрясений IV типа и появления первой термальной аномалии в районе центрального кратера.

Вулкан Безымянный – координаты вершины: $55^{\circ}58' N$, $160^{\circ}35' E$; абсолютная высота вулкана $h_y=2869$ м. До августа 2006 г. ближайшие телеметрические станции «Логоинов» (LGNR) и «Зеленая» (ZLN), расположенные в 13.5 км от кратера вулкана (рис. 1, 2 а), были способны регистрировать землетрясения с $K_S \geq 3.6$. В августе в систему наблюдений были введены две новые телеметрические станции – «Киришева» (KIR) и «Безымянный» (BZM), расположенные к западу от влк. Безымянный (рис. 1). Относительно близкое расположение станции «Безымянный» к вершине вулкана ($\Delta=7$ км) позволило регистрировать слабые землетрясения $K_S \geq 2.9$ этого активного центра. В 2006 г. в радиусе 6 км от вулкана было локализовано 180 землетрясений на глубинах $h=-2.3-19.0$ км (рис. 8 а, б) [9]. Землетрясения с максимальным классом $K_S=7.1$ произошли 7 мая в $10^{\text{h}05^{\text{m}}}$ на глубине $h=-0.2$ км и 9 мая в $08^{\text{h}22^{\text{m}}}$ в постройке вулкана ($h=-2.3$ км). Представительный класс, рассчитанный по программе ZMAP, в 2006 г. составил $K_{\min}=3.6$, угол наклона графика повторяемости $\gamma=0.65\pm 0.04$. Значение угла наклона не изменилось, по сравнению с таковым в 2005 г. ($\gamma=0.63$), и немного меньше, чем был определен для графика повторяемости 2004 г. ($\gamma=0.89$).

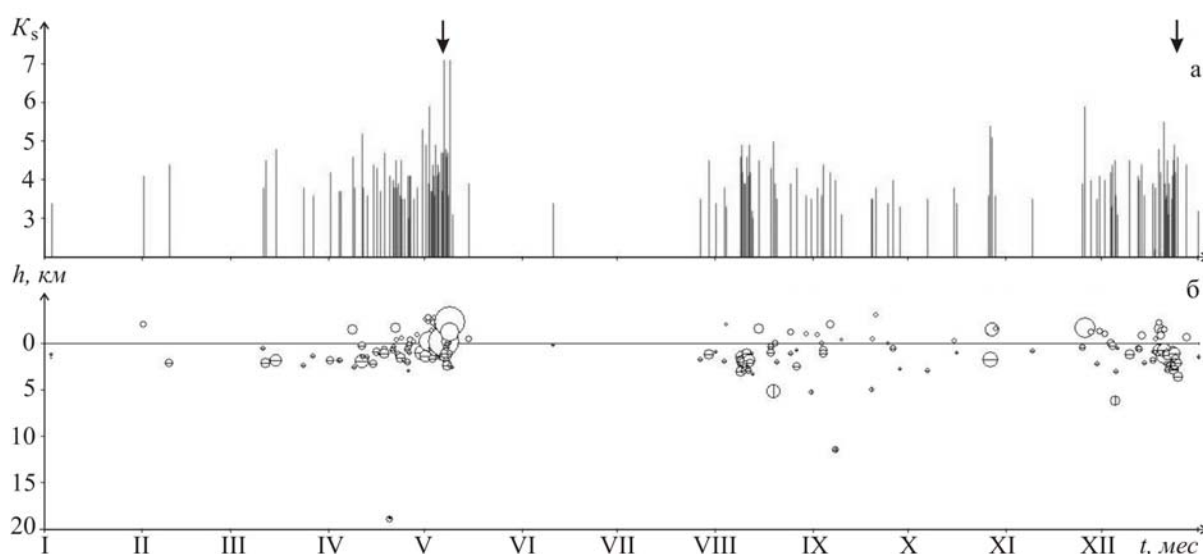


Рис. 8. Изменение во времени энергетического класса K_S (а) и глубины гипоцентров h (б) вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 6 км от влк. Безымянный в 2006 г. (стрелками обозначены моменты эксплозивных извержений вулкана)

Наличие на вулкане постоянной термальной аномалии, наблюдаемой на снимках со спутников NOAA16 и NOAA17 с начала изучения спутниковых данных (сентябрь 2002 г.), свидетельствовало о том, что горячий материал находится близко к поверхности и вулкан может начать извергаться без сильной сейсмической подготовки [29]. В течение исследуемого периода на влк. Безымянный наблюдалось три сейсмических активизации, две из которых (апрель-май и декабрь) закончились извержением (рис. 8 а). Первые признаки весенней активизации были зафиксированы 1 апреля [9], когда было локализовано первое землетрясение с $K_S=4.2$ и сейсмичность превысила фоновый уровень [29]. В дальнейшем наблюдался рост числа и энергии поверхностных землетрясений (рис. 8). За весь период активизации было внесено в каталог 80 землетрясений с $3.0 \leq K_S \leq 7.1$, выделенная сейсмическая энергия которых составила $\Sigma E = 2.8 \cdot 10^7$ Дж.

Пароксизмальная фаза извержения произошла 9 мая с 08^h21^m до 08^h45^m. В этот момент на станции «Зеленая» было зарегистрировано сейсмическое событие с максимальной амплитудой $A/T_{max} = 23.5$ мкм/с, сопровождавшее эксплозивное извержение. Высота пеплового выброса разными наблюдателями оценивалась от 12 до 15 км над уровнем моря. Спутниковые данные зафиксировали распространение пеплового облака от извержения влк. Безымянный (рис. 9 а).



Рис. 9. Распространение пеплового облака от извержений влк. Безымянный. Спутниковые снимки NOAA17 от 09 мая, 10^h56^m (а) и NOAA16 от 24 декабря, 17^h35^m (б).

Активизация перед декабрьским извержением началась в конце ноября с регистрации первых землетрясений, произошедших в постройке вулкана. В декабре наблюдался постепенный рост числа и энергии поверхностных землетрясений, но в целом предвещающая извержение сейсмичность была слабее, чем в апреле-мае. Всего за весь период этой активизации было локализовано 41 землетрясение, количество высвобожденной энергии составило $\Sigma E = 0.8 \cdot 10^7$ Дж. По визуальным и видеоданным извержение началось 24 декабря примерно в 00^h00^m со слабых пепловых выбросов. По сейсмическим данным максимальная фаза эксплозивного извержения произошла в период с 09^h17^m до 10^h20^m, когда на станции «Зеленая» было зарегистрировано сейсмическое событие с максимальной амплитудой $A/T_{max} = 42.5$ мкм/с. По визуальным данным сотрудников сейсмостанции «Козыревск», в это время отчетливо наблюдалась пепловая колонна грибообразной формы высотой до 13 км над уровнем моря. По спутниковым данным, продвижение пеплового облака было прослежено на расстоянии более 2000 км в восточном направлении (рис. 9 б).

Согласно алгоритму прогноза извержений влк. Безымянный [29] сотрудниками лаборатории ИСВА в обоих случаях были сделаны краткосрочные прогнозы времени и масштабов извержений. Документы о прогнозах были своевременно переданы в Камчатское отделение Центра прогноза землетрясений. Извержения ожидалось продолжительностью от нескольких часов до нескольких суток с пепловыми выбросами высотой $h = 10-15$ км над уровнем моря, с возможным излиянием лавового потока длиной несколько километров и выпадением пепла слоем до нескольких миллиметров в ближайших населенных пунктах (Ключи, Козыревск, Усть-Камчатск) в зависимости от направления ветра. Прогнозы были признаны успешными.

Вулкан Плоский Толбачик – координаты вершины: $55^{\circ}49' \text{ N}$, $160^{\circ}22' \text{ E}$; абсолютная высота вулкана $h_y=3085 \text{ м}$. Ближайшая телеметрическая станция «Каменистая» (KMNR) расположена в 10 км от кратера вулкана и регистрирует землетрясения с $K_S \geq 3.3$. Теоретический уровень K_{min} по трем станциям до августа соответствовал классу землетрясений $K_{min}=5.0$. Установленные новые станции – «Киришева» (KIR) и «Безымянный» (BZM) – к северу от вулкана улучшили условия для сейсмического мониторинга. Уровень K_{min} , рассчитанный по программе ZMAP, соответствует классу $K_{min}=4.1$, угол наклона графика повторяемости $\gamma=0.51 \pm 0.05$. Наклон графика совпадает со значением γ для региональных тектонических землетрясений [30], для периода 2000–2005 гг. $\gamma=0.49$. В 2006 г. в радиусе 20 км от вулкана было локализовано 78 землетрясений на глубинах $h=2.0\text{--}21.9 \text{ км}$ [9]. Событие с максимальным классом $K_S=6.8$ произошло 31 июля в $06^{\text{h}}04^{\text{m}}$ на глубине $h=11.8 \text{ км}$. На рис. 2 представлена карта эпицентров и проекция гипоцентров на вертикальный разрез. На протяжении 2006 г. в районе влк. Плоский Толбачик наблюдалась «обычная, фоновая» сейсмичность. В районе лавового потока второго конуса северного прорыва большого трещинного Толбачинского извержения 1975 г., по данным инфракрасных снимков со спутников NOAA16 и NOAA17 в 2006 г., продолжала наблюдаться термальная аномалия.

Вулканы Ушковский и Крестовский образуют единый вулканический массив, осложненный вершинной кальдерой. Этот массив рассечен глубокими ледниковыми ущельями и эрозионными долинами. Влк. Крестовский – координаты вершины: $56^{\circ}07' \text{ N}$, $160^{\circ}30' \text{ E}$, абсолютная высота вулкана $h_y=4108 \text{ м}$; Ушковский – координаты вершины: $56^{\circ}04' \text{ N}$, $160^{\circ}28' \text{ E}$; абсолютная высота вулкана $h_y=3943 \text{ м}$. Ближайшие телеметрические станции «Крестовский» и «Логинов» расположены в 12 км от вершины влк. Крестовского и регистрируют землетрясения с $K_S \geq 3.5$. Теоретический уровень K_{min} по трем станциям составил $K_{min}=3.8$. Сеть позволяет локализовать землетрясения с занесением в каталог, начиная с минимального $K_S=3.0$. В 2006 г. в пределах окружности радиусом 10.1 км , включающей оба вулкана (рис. 2), было локализовано 145 землетрясений на глубинах $h=-2.5\text{--}13.0 \text{ км}$ [9]. Угол наклона графика повторяемости для них получился равным $\gamma=1.32 \pm 0.13$, что значительно выше значения $\gamma=0.73$, рассчитанного для периода 2000–2005 гг. Событие с максимальным классом $K_S=5.0$ произошло 5 апреля в $22^{\text{h}}27^{\text{m}}$ на глубине $h=0.8 \text{ км}$. Карта эпицентров и проекция гипоцентров на вертикальный разрез представлены на рис. 2.

В 2006 г. сейсмичность района влк. Крестовский и Ушковский была фоновой и никаких проявлений вулканической активности, а также термальных аномалий на снимках из космоса отмечено не было.

Авачинская группа вулканов (№ 2). 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 – Петропавловск-Камчатский и Елизово.

Влк. Авачинский – координаты вершины: $53^{\circ}15' \text{ N}$, $158^{\circ}50' \text{ E}$, абсолютная высота вулкана $h_y=2741 \text{ м}$, диаметр кратера – около 350 м . Координаты вершины влк. Корякский: $53^{\circ}19' \text{ N}$, $158^{\circ}43' \text{ E}$; абсолютная высота вулкана $h_y=3456 \text{ м}$.

Координаты гипоцентров для Корякского и Авачинского вулканов рассчитывались, как и в предшествующие годы, по программе Ю.Ю. Мельникова [19] с использованием двух разных одномерных скоростных моделей среды [11, 18]. Для сейсмических событий, расположенных вне этих вулканов, приблизительно по изолинии 400 м , использовался в расчетах обычный региональный годограф [31]. Карта эпицентров и проекция гипоцентров на вертикальный разрез представлены на рис. 10. Весь район № 2, изображенный на рис. 1, по теоретическим расчетам является областью надежной регистрации для событий энергетического класса $K_{min}=4.0$, но в районе влк. Авачинский уровень ниже и равен $K_{min}=3$. Так как в 2006 г в районе Авачинского вулкана произошло больше событий, чем в районе Корякского вулкана (рис. 10), поэтому уровень надежной регистрации составил $K_{min}=3.0$ (рис. 11). Угол наклона графика повторяемости получился равным $\gamma=0.74 \pm 0.05$, это немного выше, чем значение γ в 2005 г. ($\gamma=0.54$) и среднее значение, рассчитанное для периода 2000–2005 гг. ($\gamma=0.44$).

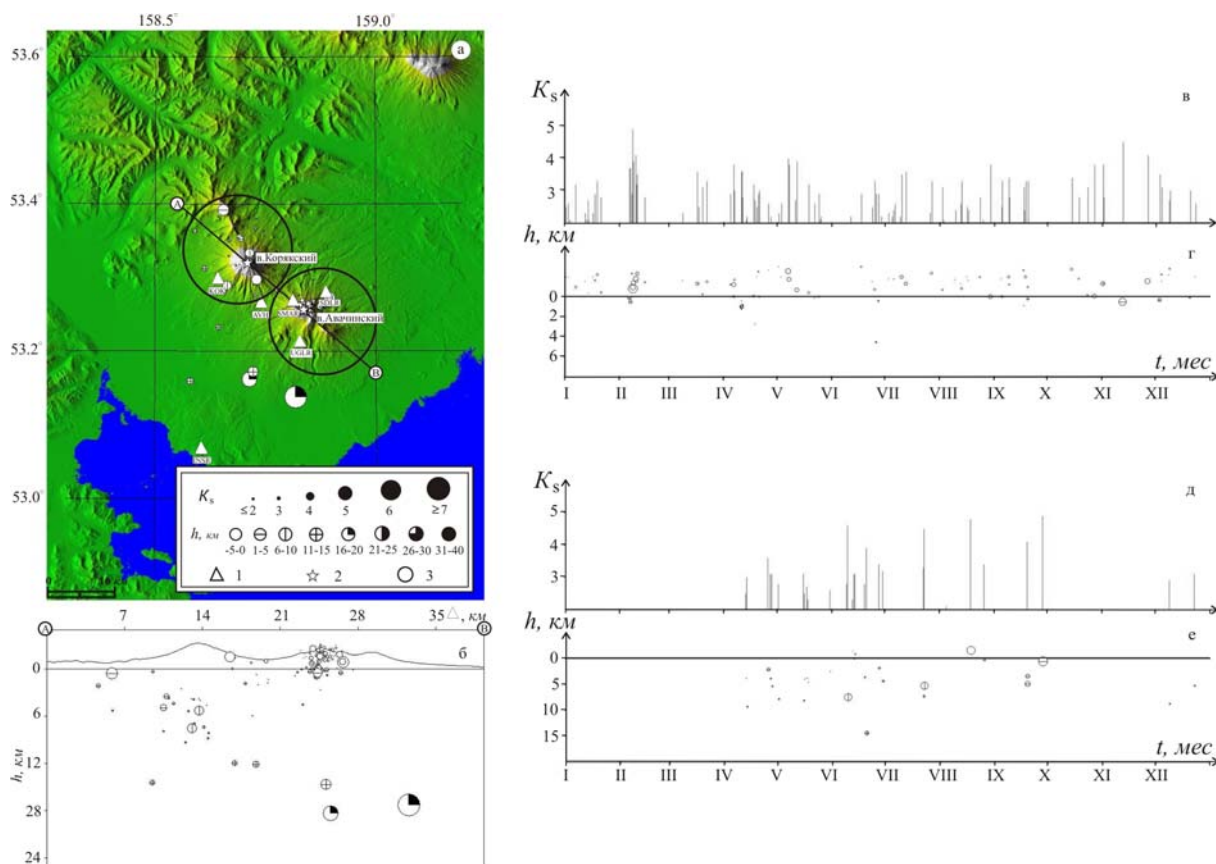


Рис. 10. Карта эпицентров (а) и проекция гипоцентров на вертикальный разрез вдоль линии А–В (б) для землетрясений района № 2, а также изменение во времени энергетического класса K_S (в, д) и глубины гипоцентров h (г, е) вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 8 км от вулканов Авачинский и Корякский в 2006 г.

1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан; 3 – окружности радиусом 8 км оконтуривают области выборки землетрясений вокруг Авачинского и Корякского вулканов.

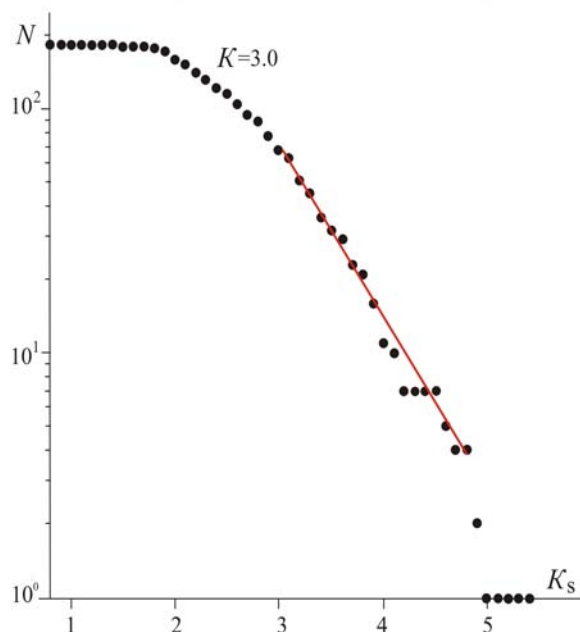


Рис. 11. График повторяемости землетрясений Авачинской группы вулканов за 2006 г.

Каталог землетрясений Авачинской группы за 2006 г. [8] содержит параметры 185 землетрясений с $K_S=1.6-6.4$. Землетрясение с максимальным классом $K_S=6.4$ произошло 25 декабря в 10^h55^m на глубине $h = 17.5$ км вне зоны вулканических построек. Распределение землетрясений по вулканам и классам представлено в табл. 2. В графе «Примечание» каталога указана принадлежность землетрясения к сейсмоактивной зоне вулкана, выделенной соответствующей окружностью на рис. 10. На рис. 10 также представлены распределения во времени значений энергетического класса K_S (в, д) и глубины для каждого вулкана (г, е). Суммарная энергия всех землетрясений, включенных в каталог, составила $\Sigma E=3.429 \cdot 10^6$ Дж.

В 2006 г. на влк. Авачинский и Корякский наблюдался фоновая сейсмичность. По визуальным данным и по спутниковым наблюдениям никаких проявлений вулканической активности отмечено не было. В 2006 г. угол наклона графика повторяемости земле-

трясений Авачинского вулкана не изменился, по сравнению с таковым в 2004–2005 гг., и составил $\gamma=0.47\pm 0.03$.

Таблица 2. Распределение землетрясений в районе № 2 по энергетическим классам K_S в 2006 г.

Название вулкана	$R_{\text{зоны}}$, км	K_S					N_{Σ}	ΣE , 10^6 Дж
		2	3	4	5	6		
Авачинский	8	64	59	39	18		142	0.305
Корякский	8	8	16	5	3		32	0.268
Вне вулканов		3	2	3	2	1	11	2.856
Всего		75	77	26	6	1	185	3.429

Для землетрясений, принадлежащих Корякскому вулкану, угол наклона графика повторяемости в 2006 г. равен $\gamma=0.66\pm 0.03$, это немного выше, чем для периода 2000–2005 гг. ($\gamma=0.50$).

Л и т е р а т у р а

1. Действующие вулканы Камчатки / Под ред. С.А. Федотова, Ю.П. Масуренкова – М.: Наука, 1991. – 1. – С. 5–11.
2. Кирьянов В.Ю. Вулканические пеплы Камчатки как источник потенциальной вулканической опасности для пассажирских авиалиний // Вулканология и сейсмология. – 1992. – № 3. – С. 16–36.
3. Кирьянов В.Ю., Чубарова О.С., Сеньюков С.Л., Евдокимова О.А., Гарбузова В.Т. Группа по обеспечению безопасности полетов от вулканических пеплов (КВЕРТ): 8 лет деятельности // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. – Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. – С. 408–423
4. Старовойт О.Е., Мишаткин В.Н. Сейсмические станции Российской академии наук (состояние на 2001 г.) – М. – Обнинск: ГС РАН, 2001. – 86 с.
5. 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.
6. Левина В.И., Чебров В.Н. Камчатка и Командорские острова // Землетрясения России в 2006 году. – Обнинск: ГС РАН, 2009. – С. 42–47.
7. Левина В.И., Чебров В.Н. Камчатка и Командорские острова // Землетрясения России в 2005 году. – Обнинск: ГС РАН, 2007. – С. 38–43.
8. Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. – М.: Наука, 1972. – 117 с.
9. Нуждина И.Н. (отв. сост.), Дрознина С.Я., Кожевникова Т.Ю., Толочнова С.Л. Каталог землетрясений Северной группы вулканов за 2006 г. ($N=5264$). (См. Приложение к наст. сб. на CD).
10. Нуждина И.Н. (отв. сост.), Дрознина С.Я., Кожевникова Т.Ю., Толочнова С.Л. Каталог землетрясений Авачинской группы вулканов за 2006 г. ($N=185$). (См. Приложение к наст. сб. на CD).
11. Детальные сейсмологические исследования Камчатки и Командорских островов (01.01 – 31.12.1998 г.). – Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 1999. – 259 с.
12. Сеньюков С.Л., Чебров В.Н., Гарбузова В.Т., Дрознина С.Я., Нуждина И.Н., Кожевникова Т.Ю., Толочнова С.Л. Сейсмический мониторинг вулканов Камчатки // Землетрясения Северной Евразии в 1999 году. – Обнинск: ГС РАН, 2005. – С. 253–273.
13. Сеньюков С.Л., Гарбузова В.Т., Дрознина С.Я., Нуждина И.Н., Кожевникова Т.Ю., Толочнова С.Л. Сейсмический мониторинг вулканов Камчатки // Землетрясения Северной Евразии в 2000 году. – Обнинск: ГС РАН, 2006. – С. 321–336.
14. Сеньюков С.Л., Гарбузова В.Т., Дрознина С.Я., Нуждина И.Н., Кожевникова Т.Ю., Толочнова С.Л. Сейсмический мониторинг вулканов Камчатки // Землетрясения Северной Евразии в 2001 году. – Обнинск: ГС РАН, 2007. – С. 360–376.
15. Сеньюков С.Л., Гарбузова В.Т., Дрознина С.Я., Нуждина И.Н., Кожевникова Т.Ю., Толочнова С.Л. Сейсмический мониторинг вулканов Камчатки // Землетрясения Северной Евразии в 2002 году. – Обнинск: ГС РАН, 2008. – С. 380–394.

16. **Сенюков С.Л., Гарбузова В.Т., Дрознина С.Я., Нуждина И.Н., Кожевникова Т.Ю., Толочкова С.Л.** Сейсмический мониторинг вулканов Камчатки // Землетрясения Северной Евразии в 2003 году. – Обнинск: ГС РАН, 2008. – С. 382–395.
17. **Сенюков С.Л., Гарбузова В.Т., Дрознина С.Я., Нуждина И.Н., Кожевникова Т.Ю., Толочкова С.Л.** Сейсмический мониторинг вулканов Камчатки // Землетрясения Северной Евразии в 2004 году. – Обнинск: ГС РАН, 2008. – С. 382–395.
18. **Сенюков С.Л.** Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений в 2000–2004 гг. // Вулканология и сейсмология. – 2006. – № 3. – С. 68–78.
19. **Мельников Ю.Ю.** Пакет программ для определения координат гипоцентров землетрясений Камчатки на ЭВМ // Вулканология и сейсмология. – 1990. – № 5. – С. 103–112.
20. **Токарев П.И.** Вулканические землетрясения Камчатки. – М.: Наука, 1981. – 164 с.
21. **Weimer S.** A software package to analyze seismicity: ZMAP// Seism.Res.Lett. – 2001. – 72 – № 2. – P. 374–383.
22. **Сенюков С.Л., Нуждина И.Н., Дрознина С.Я., Гарбузова В.Т.** Сейсмический мониторинг вулканов Камчатки // Землетрясения Северной Евразии в 2005 году. – Обнинск: ГС РАН, 2010. – С. 419–431.
23. **Potts R. J., & Ebert E. E.** On the detection of volcanic ash in NOAA AVHRR infrared satellite imagery. In: 8th Australasian Remote Sensing Conference. – Canberra: Committee of the 8th Australian Remote Sensing Conference, 1996. – P. 25–29.
24. **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.
25. **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.
26. **Сенюков 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». I. – Петропавловск-Камчатский, 2008. – С. 120–125.
27. **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 31.07.2005г. // Вулканология и сейсмология. – 2009. – № 3. – С. 50–59.
28. **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.
29. **Сенюков С.Л.** Результаты применения алгоритма прогноза извержений вулкана Безымянный в 2004–2007 гг. в режиме реального времени // Труды региональной научно-технической конференции «Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России». – Петропавловск-Камчатский, 2008. – С. 59–63.
30. **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.
31. **Кузин Т.П.** Фокальная зона и строение верхней мантии в районе Восточной Камчатки. – М.: Наука, 1974. – 132 с.