

VI. 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 2010 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]. Для сейсмического мониторинга вулканов использовались станции радиотелеметрической сети (РТСС) Камчатского филиала Геофизической службы (КФ ГС) РАН [2–5], позволяющие проводить наиболее 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.

В 2010 г. была изменена система обработки землетрясений Камчатки, процесс перехода подробно описан в [6]. Одним из главных моментов изменения методики было внедрение программы «DIMAS» (автор Д.В. – Дрознин) для автоматизированной обработки сейсмических сигналов со встроенной новой программой локации с использованием различных годографов и дополнительной возможностью поиска решений выше уровня моря [7]. Для сравнения результатов двух методик обработки все вулканические землетрясения за 2009 г. обрабатывались параллельно по двум программам: прежней – «НПО» [8] и новой – «DIMAS» [7]. В программах использовались одинаковые одномерные скоростные модели, но разные алгоритмы локации очагов землетрясений. Для локации землетрясений Северной и Авачинской групп вулканов применялись, как и прежде, локальные годографы из [1]. В связи с отсутствием уточненных локальных скоростных моделей для всех остальных вулканических комплексов при расчете положений гипоцентров использовался региональный годограф [9]. Программа «DIMAS» позволяет определять глубину вулканических землетрясений в постройке вулканов в случае отсутствия локальных скоростных моделей, включающих слои выше уровня моря. В соответствии с алгоритмом локации времени пробега из годографа берутся с учетом фактической разницы между высотой станции и глубиной очага. Этим объясняется появление землетрясений с глубиной $h < 0$ в случаях локации гипоцентров с применением среднекамчатской модели среды [9]. Определения энергетических характеристик (K_S и M_C) проводились по одним и тем же формулам.

Сравнительный анализ полученных параметров вулканических землетрясений по выборке из 368 наиболее сильных событий в районах контролируемых вулканов по этим двум программам показал, что систематические отклонения для координат очагов и глубины при новой обработке не превышают ошибки определения. Систематические отклонения в плане получились меньше 1 км. Для очагов, расположенных выше уровня моря, глубина, полученная по программе «DIMAS» в среднем на 1.3 км выше, чем по программе «НПО», а для очагов с глубиной $h = 0$ –40 км – глубже на 0.4 км. Учитывая полученные систематические отклонения, было принято решение с 2010 г. проводить обработку землетрясений только с использованием современного варианта программы «DIMAS». Программа позволяет определять главные параметры сейсмических волн от землетрясений по всем станциям сети КФ ГС РАН в режиме, близком к реальному времени, производить расчет основных характеристик очагов землетрясений и сохранять все данные в сетевой базе (<http://www.emsd.ru/ts>).

Ниже приведены данные о сейсмической активности Северной, Авачинской, Мутновско-Гореловской групп и влк. Кизимен.

Северная группа вулканов. Каталог землетрясений Северной группы вулканов за 2010 г. [10] содержит 7013 землетрясений I–III типов [11]. Распределение землетрясений по вулканам и по энергетическим классам K_S [12] представлено в табл. 1. Кроме землетрясений, происходящих вблизи вулканов, в каталог также включены события, зафиксированные сетью во всем изучаемом районе в пределах координат $\varphi=55.52\text{--}56.80^\circ\text{N}$, $\lambda=159.89\text{--}161.70^\circ\text{E}$. 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 в районе Северной группы вулканов в 2010 г.

Название вулкана	$R_{\text{зоны}}$, км	K_S						N_Σ	ΣE , 10^8 Дж
		3	4	5	6	7	8		
Безымянный	6	3	11	1				15	0.002
Ключевской	7		132	598	25			755	0.839
Плоский Толбачик	20	1	29	25	10	2		67	0.455
Шивелуч	12	1	2135	3519	418	12		6085	8.312
Крестовский и Ушковский	10		1					1	0.00004
Вне вулканов			8	44	28	9	1	90	1.774
Всего		5	2316	4187	481	23	1	7013	11.382

В 2010 г. общее количество землетрясений (табл. 1), локализованных в районе Северной группы вулканов, по сравнению с таковым в 2009 г. ($N=15017$; $\Sigma E=21.82 \cdot 10^8$ Дж [13]), уменьшилось в 2.1 раза, при этом высвобожденная ими энергия также уменьшилась в 1.9 раза.

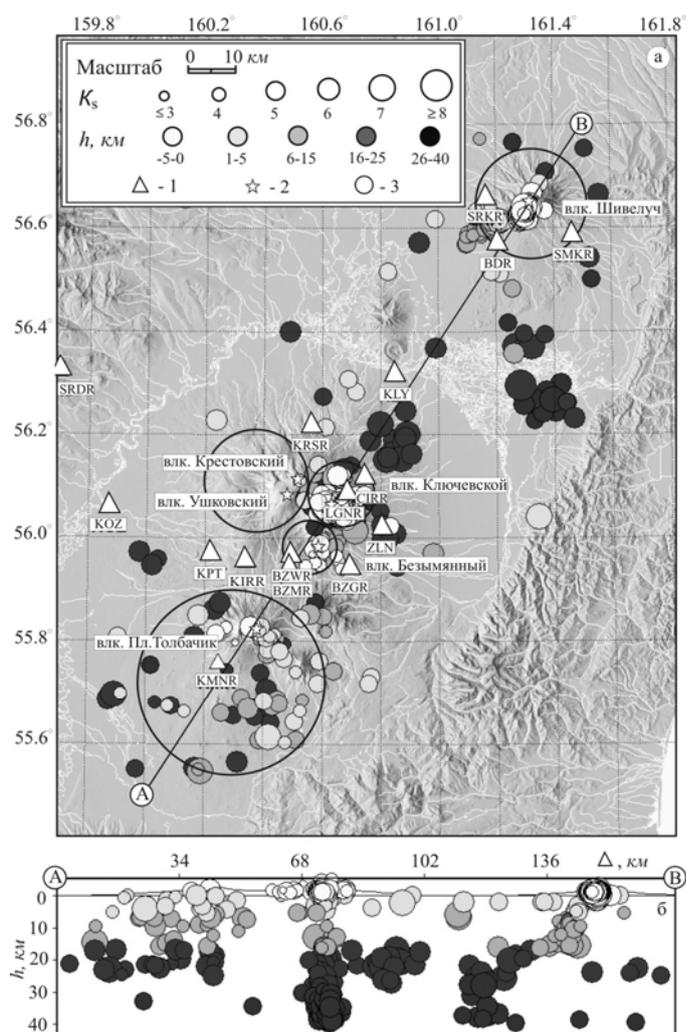


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений Северной группы вулканов за 2010 г. (а) и проекция гипоцентров на вертикальную плоскость (б), проходящую по линии А–В

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

Как и в 2007–2009 гг. [13–15], самой сейсмически активной осталась зона влк. Шивелуч с $R=12$ км. Здесь произошло 86.8 % землетрясений от общего числа событий, вошедших в каталог Северной группы вулканов, а их суммарная сейсмическая энергия составила 73 % от всей высвобожденной энергии в этом районе. В зоне Ключевского вулкана в 2010 г. число землетрясений, по сравнению с 2009 г. ($N=2244$), уменьшилось ~ в 3.0 раза и энергии выделено ими в 2.3 раза меньше, чем за предыдущий год ($\Sigma E=1.936 \cdot 10^8$ Дж) [13].

Уровень надежной регистрации для землетрясений Северной группы вулканов был определен по графику повторяемости (рис. 2), построенному с помощью пакета программ ZMAP [16].

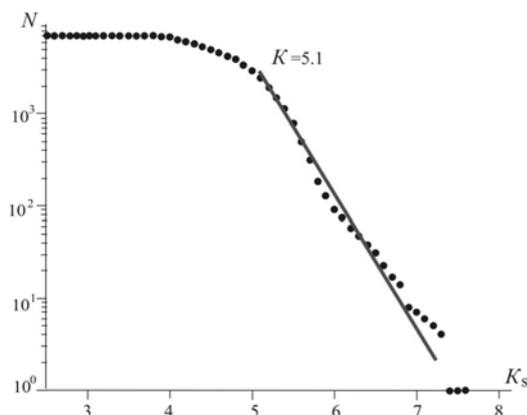


Рис. 2. График повторяемости землетрясений Северной группы вулканов в 2010 г.

Из графика следует, что представительный класс равен $K_{\min}=5.1$. Надо отметить, что 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, и в таких случаях значение K_{\min} повышается. Наклон графика повторяемости в 2010 г. получился равным $\gamma=1.5\pm 0.05$. Среднее значение угла наклона, определенное по данным за 2000–2009 гг., составило $\gamma=1.06$ [13, 14].

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 $K_{\min}=4.0$ [17].

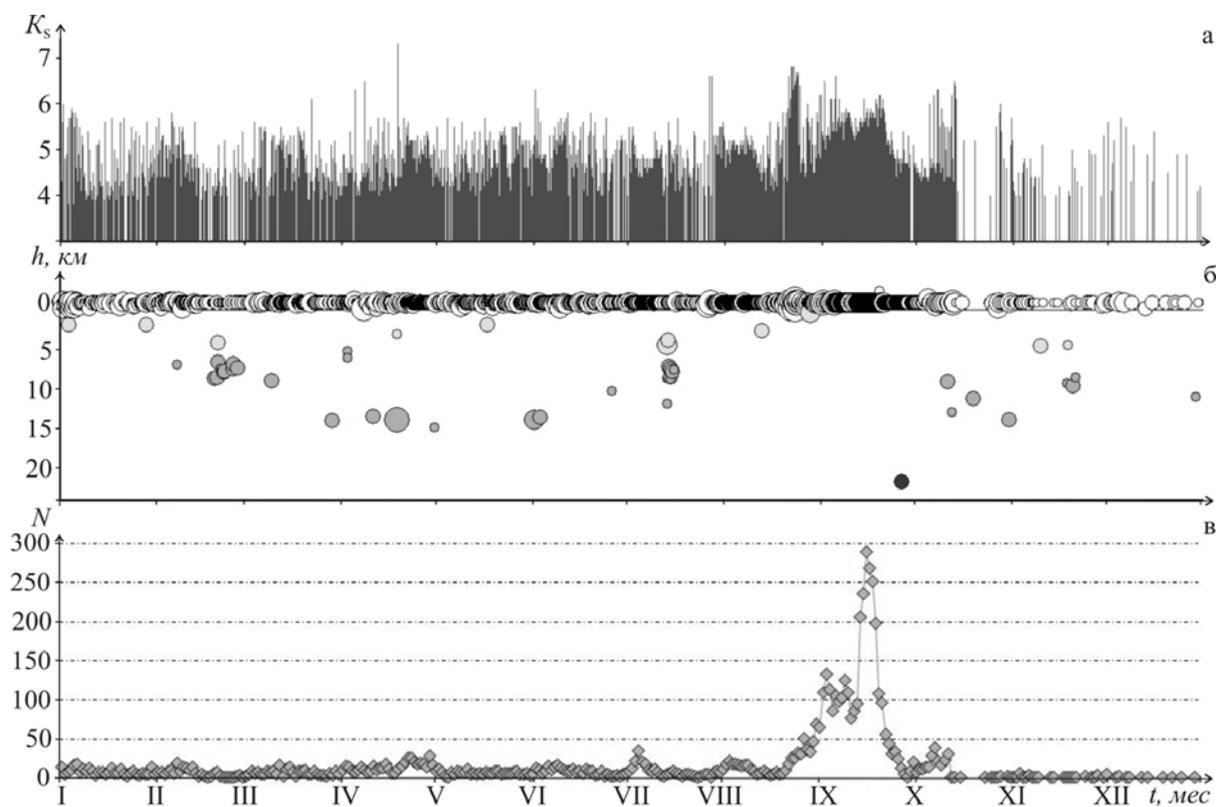


Рис. 3. Изменение во времени энергетического класса K_s (а), глубины гипоцентров h (б) и количества N вулканических землетрясений (в), произошедших в радиусе 12 км от влк. Шивелуч в 2010 г.

В 2010 г. по-прежнему наблюдалась высокая сейсмическая активность влк. Шивелуч (табл. 1) – ($N_{\Sigma}=6085$, $\Sigma E=8.31 \cdot 10^8$ Дж). Высвобожденная сейсмическая энергия осталась на уровне 2009 г. ($N_{\Sigma}=12275$; $\Sigma E=8.45 \cdot 10^8$ Дж), хотя число локализованных землетрясений было в два раза меньше по сравнению с таковым в 2009 г. [13].

Сравнительный анализ решений двух программ – «DIMAS» и «НРО» – показал, что для 48 поверхностных землетрясений ($h=-3.0-5.0$ км) среднее отклонение составило по глубине $\sim h=-1.0$ км, по широте ~ 0.3 км к югу и по долготе ~ 0.1 км на восток. Гипоцентры шести землетрясений, локализованных в диапазоне глубин $h=5.0-40.0$ км, в среднем сместились по широте

те на ~ 0.4 км к югу, а по долготе – на ~ 1.1 км к западу. Глубина гипоцентров в среднем увеличилась на ~ 0.9 км.

Представительный класс, рассчитанный по программе ZMAP, составил $K_{\min}=5.1$. Наклон графика повторяемости $\gamma=1.7\pm 0.05$, по сравнению с $\gamma=1.46$, в 2009 г. [13] стал немного круче. Большие значения угла наклона, возможно, являются следствием относительного увеличения числа землетрясений с $K_S \geq 5.0$ по сравнению с более слабыми. В 2009 г. выше 5 км от уровня моря только 9 % событий имели $K_S \geq 5.0$, а в 2010 г. – 35 %. Возможно, это связано с активизацией деятельности приповерхностного магматического очага.

Землетрясение с максимальным классом $K_S=7.3$ произошло 18 апреля в $17^{\text{h}}14^{\text{m}}$ на глубине $h=14.0$ км [10].

В исследуемый период продолжалось извержение влк. Шивелуч, начавшееся еще в декабре 2006 г. Высокая сейсмическая активность, связанная с интенсивным ростом нового купола, наблюдалась с 22 августа по 27 сентября (рис. 3 в). За этот период было локализовано в застройке вулкана 3546 землетрясений с $K_S=4.0-6.8$, что составляет 58.3 % от всех землетрясений, произошедших в зоне вулкана в 2010 г. Максимальное количество 290 землетрясений за сутки было локализовано 16 сентября [10].

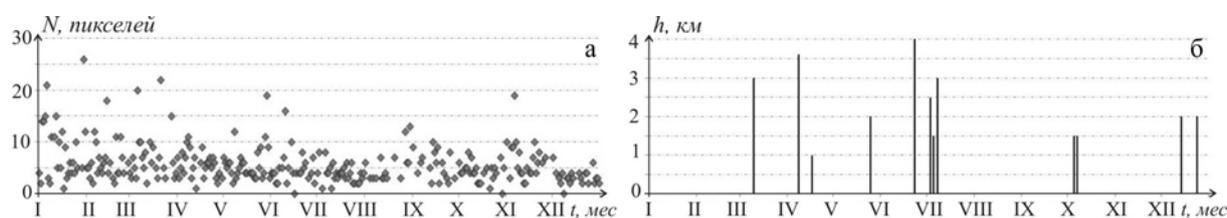


Рис. 4. Изменение во времени размера термальной аномалии на влк. Шивелуч по данным спутников NOAA16 и NOAA17 (а); высота газо-пепловых выбросов над куполом по видеоданным и визуальным наблюдениям сотрудников сейсмической станции «Ключи» (б)

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, которые сопровождалась пепловыми выбросами и сходом пирокластических потоков (рис. 4 б). По визуальным данным газо-пепловый выброс с максимальной высотой 4 км над куполом был зафиксирован 23 июня. При плохих погодных условиях или в темное время суток оценка высоты возможной эксплозии проводилась по сейсмическим данным по методике [18]. В 2010 г. «оранжевый» код опасности присваивался вулкану в течение 108 дней, когда высота пепловой эмиссии превышала 1 км над куполом (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>). 7 дней код был «красный». В эти дни высота пепловых выбросов превышала 8 км над уровнем моря. Наиболее сильные эксплозии с «красным» кодом были зарегистрированы по сейсмическим данным 27–30 октября. В это время вулкан был закрыт облачностью, но эксплозивные извержения хорошо подтвердились спутниковыми наблюдениями и обильным выпадением пепла в г. Усть-Камчатск. Самый сильный в 2010 г. пепловый выброс произошел 29 октября в $13^{\text{h}}30^{\text{m}}$, когда было зарегистрировано поверхностное сейсмическое событие, возможно, сопровождавшее пепловый выброс до 10 км над уровнем моря.

Вулкан Ключевской. Существующая сеть станций (рис. 1) позволяет локализовать при благоприятных условиях землетрясения, начиная с $K_S \geq 4.0$ [17]. Ближайшая телеметрическая станция «Логинов» – расположена в 4 км от кратера и может регистрировать землетрясения в районе кратера с классом $K_S \geq 2.2$. В 2010 г. продолжалось мощное вершинное извержение, начавшееся осенью 2009 г. Извержение вулкана сопровождалось излиянием нескольких лавовых потоков и пепловыми выбросами до 9 км над уровнем моря. В 2010 г. в радиусе 7 км от влк. Ключевской и диапазоне глубин $h=-4.4-35.5$ км было локализовано 755 землетрясений (табл. 1), что значительно меньше (на 33.6 %), чем в 2009 г. [13]. Такое небольшое количество землетрясений объясняется регистрацией в течение всего года сильного вулканического дрожания, которое осложняло выделение и локализацию слабых землетрясений. Карта их эпицентров и проекция гипоцентров на вертикальный разрез представлены на рис. 1, а графики изменения во времени параметров сейсмической активности вулкана на рис. 5. Землетрясение

с максимальным классом $K_S=6.3$ было зарегистрировано 31 декабря в 17^h08^m на глубине $h=31.3$ 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 [19–23]. Поэтому все землетрясения в 2010 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, 17, 21].

В связи с переходом на новую программу определения параметров землетрясений незначительно изменилось распределение землетрясений Ключевского вулкана в пространстве. Так, 62 поверхностных землетрясения ($-5.0 \leq h \leq 5.0$ км) сместились примерно на 0.4 км к северу, 0.1 км к западу и 1.0 км выше по глубине. Для 53-х глубоких землетрясений гипоцентры стали глубже примерно на 2.0 км, по долготе они в среднем сместились на 0.2 км на запад, а по широте отклонение получилось на 0.3 км к северу.

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 растягивающих напряжений, создаваемых активными магматическими процессами [19]. В нижнем горизонте (III) генерируются глубокие длиннопериодные землетрясения, в образовании которых активную роль играет магматический расплав [24]. На протяжении всего года в постройке вулкана регистрировалась сейсмичность, сопровождавшая вершинное извержение. Всего было локализовано 610 поверхностных землетрясений с $K_S=3.9-5.5$.

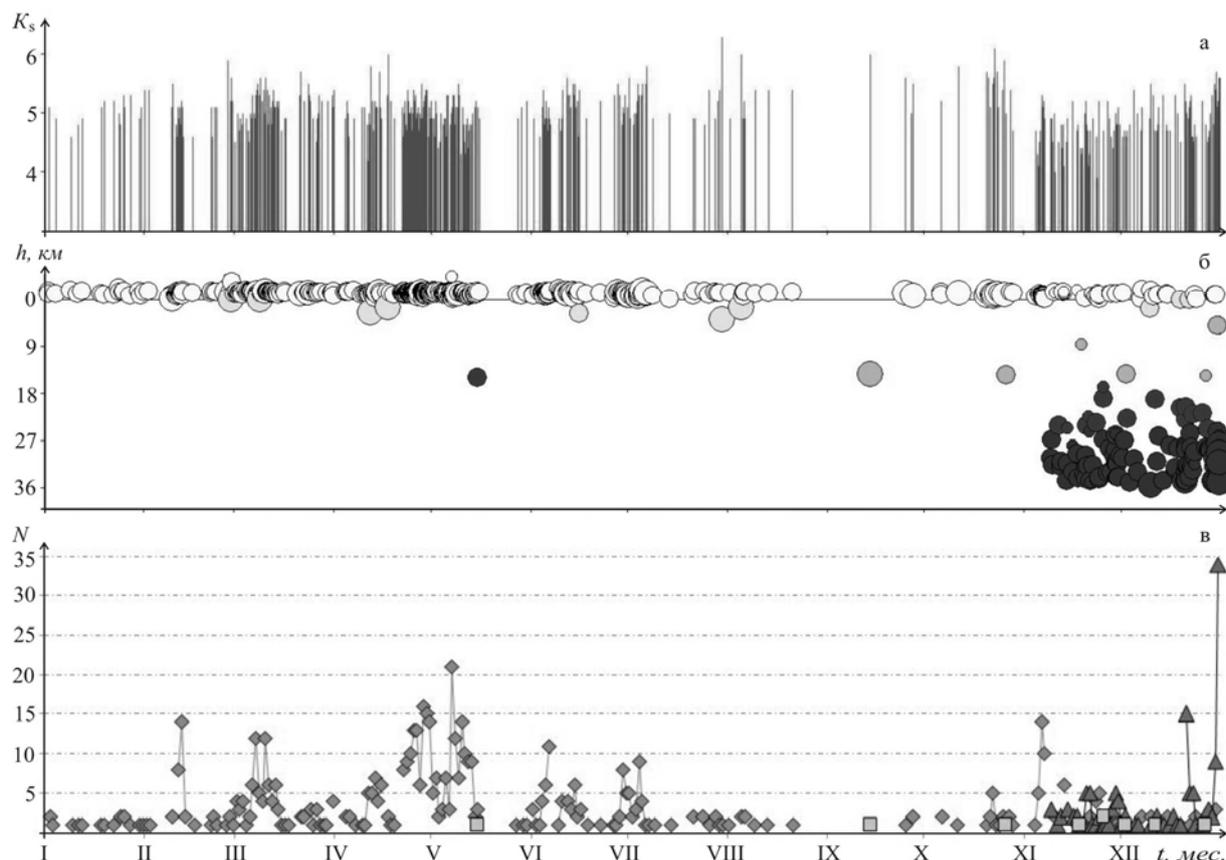


Рис. 5. Изменение во времени энергетического класса K_S (а), глубины гипоцентров h вулканических землетрясений (б); ежесуточного числа поверхностных (ромб), промежуточных (квадрат) и глубоких (треугольник) землетрясений (в), произошедших в радиусе 7 км от влк. Ключевской в 2010 г.

В ноябре активная фаза извержения завершилась. Постепенно сейсмичность из поверхностного слоя (I) переместилась в слои II и III. В 2010 г. были определены параметры для

136 глубоких землетрясений [10], максимальное их число за сутки ($N=34$) (рис. 5 в) было зафиксировано 31 декабря.

С помощью пакета программ ZMAP [16] были определены значения K_{\min} и угол наклона графика повторяемости для землетрясений в каждом слое. Для поверхностного слоя представительный класс получился равным $K_{\min}=4.9$ при угле наклона $\gamma=1.78\pm 0.05$. Такие большие значения угла наклона получаются в периоды сильного вулканического дрожания и связаны с землетрясениями, происходящими в магматических очагах [25, 26]. Например, в 2009 г. в периоды регистрации на влк. Ключевской сильного вулканического дрожания (январь и конец октября–декабрь), значение представительного класса было $K_{\min}=5.5$ и график повторяемости $\gamma=1.95$ [13]. Для глубоких землетрясений с $h=20\text{--}40$ км представительный класс оказался равным $K_{\min}=4.7$, при угле наклона $\gamma=1.46\pm 0.05$. Значение угла наклона близко к среднему за период 2005–2009 гг. ($\gamma=1.36$) [13–15]. В промежуточном слое II было локализовано всего 10 землетрясений. Для определения параметров K_{\min} и γ такого количества событий недостаточно.

На протяжении практически всего 2010 г. на влк. Ключевской регистрировалась «повышенная» сейсмичность, соответствующая цветовым кодам: «желтый», «оранжевый» и «красный». При этом «оранжевый» код присваивался вулкану 75 дней, когда по визуальным данным регистрировалось излияние лавового потока и (или) наблюдалась пепловая эмиссия высотой до 3 км над кратером. «Красный» код выставлялся 9 сентября и 23–25 октября, когда высота пепловой эмиссии достигала высоты 4 км над кратером. Здесь следует отметить, что метод [18], используемый для выделения пепловых выбросов на влк. Шивелуч, применить для влк. Ключевской не удалось из-за невозможности выделить соответствующий сигнал на фоне сильного вулканического дрожания, сопровождавшего вершинное извержение.

Вулкан Безымянный. Ближайшая телеметрическая станция «Безымянный» (BZMR), расположенная в 7 км от кратера, позволяет регистрировать землетрясения с $K_S \geq 2.9$. В 2010 г. корректный мониторинг влк. Безымянный был невозможен из-за сильного вулканического дрожания, сопровождавшего извержение влк. Ключевской. Это стало основной причиной пропуска сейсмической подготовки эксплозивного извержения влк. Безымянный 31 мая.

В 2010 г. в радиусе 6 км от вулкана и диапазоне глубин $h=-1.5\text{--}5.0$ км было локализовано 15 землетрясений с $K_S=3.3\text{--}4.7$ (рис. 1) [10]. Землетрясение с максимальным классом $K_S=4.7$ произошло 30 мая в $05^{\text{h}}08^{\text{m}}$ в постройке вулкана ($h=-1.4$ км).

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 2010 г. в радиусе 20 км от вулкана было локализовано 67 землетрясений (табл. 1) в диапазоне глубин $h=-1.6\text{--}29.6$ км [10]. Уровень K_{\min} , рассчитанный по программе ZMAP, соответствует классу $K_{\min}=4.1$, угол наклона графика повторяемости $\gamma=0.59\pm 0.07$. Наклон графика практически не меняется на протяжении многих лет и близок к значению для региональных тектонических землетрясений ($\gamma=0.5$) [27]. Событие с максимальным классом $K_S=7.3$ произошло 13 декабря в $01^{\text{h}}30^{\text{m}}$ на глубине $h=3.7$ км. На рис. 1 представлена карта эпицентров и проекция гипоцентров на вертикальный разрез. На протяжении 2010 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 2010 г. в пределах окружности радиусом 10.1 км, включающей оба вулкана (рис. 1), было локализовано всего одно землетрясение с $K_S=3.6$ под постройкой влк. Крестовский ($h=2.9$ км) [10]. Карта эпицентров и проекция гипоцентров на вертикальный разрез представлены на рис. 1. В 2010 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-Камчатский и Елизово.

Координаты гипоцентров землетрясений для Корякского и Авачинского вулканов рассчитывались по программе «DIMAS» [7] с использованием одномерной скоростной модели

среды для влк. Авачинский [1]. До 2009 г влк. Корякский располагался вне локальной сети станций, и поэтому для расчета положений очагов землетрясений в районе этого вулкана использовалась своя модель. В январе 2009 г. на склоне вулкана в 3.2 км от вершины была установлена новая станция «Коряка-Восток» (KRER), а в августе в 5.9 км – станция «Арик» (KRX). Влк. Корякский стал располагаться в пределах локальной сети станций, как и влк. Авачинский, и поэтому при расчетах координат очагов стала применяться модель Авачинского вулкана. Для сейсмических событий, расположенных вне этих вулканов, приблизительно по изолинии 400 м, использовался в расчетах обычный региональный годограф [27]. Карта эпицентров и проекция гипоцентров на вертикальный разрез представлены на рис. 6.

Анализ расхождений параметров землетрясений, полученных по новой программе «DIMAS» [7] и прежней «НИРО» [8] для выборки из 100 событий показал, что сдвиг эпицентров по широте составил примерно 0.4 км на юг, по долготе – 0.4 км на восток и по глубине гипоцентры землетрясений поднялись на 1.4 км.

Таблица 2. Распределение землетрясений Авачинской группы вулканов по энергетическим классам K_S в 2010 г.

Название вулкана	$R_{зоны}, км$	K_S						N_{Σ}	$\Sigma E, 10^7 Дж$
		2	3	4	5	6	7		
Авачинский	8	34	91	42	11		1	179	1.038
Корякский	9	89	113	38	8	4	1	253	2.053
Вне вулканов			9	24	10	4	1	48	1.022
Всего		123	213	104	29	8	3	480	4.113

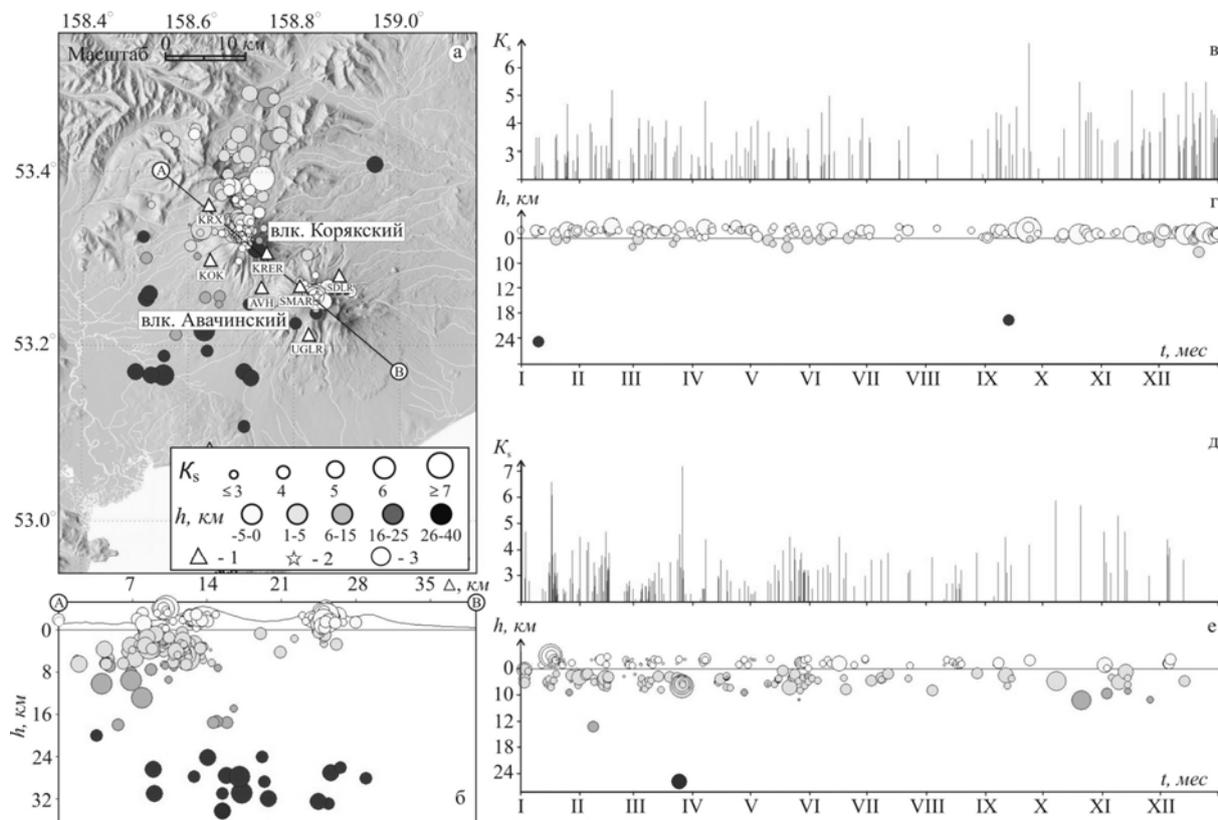


Рис. 6. Карта эпицентров землетрясений Авачинской группы вулканов в 2010 г. (а) и проекция гипоцентров на вертикальный разрез по линии А–В (б), а также изменение во времени параметров вулканических землетрясений Авачинского (в, г) и Корякского (д, е) вулканов в 2010 г.

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

В 2010 г. в районе Авачинской группы вулканов было локализовано 480 землетрясений с $K_S=1.5-7.2$ [28], что в 4 раза меньше, чем в 2009 г. ($N=1920$) [13]. Суммарная сейсмическая энергия (табл. 2), выделившаяся в очагах вулканических землетрясений, ниже \sim в 10 раз такого значения в 2009 г. ($\Sigma E=40.43 \cdot 10^7$ Дж) [13] и \sim в 4.3 раза по сравнению с 2008 г. ($\Sigma E=17.85 \cdot 10^7$ Дж) [13]. Это связано с высокой сейсмической активностью Корякского вулкана, наблюдавшейся в 2008–2009 гг. Землетрясение с максимальным классом $K_S=7.2$ произошло на глубине $h=4.0$ км под постройкой Корякского вулкана 26 марта в 08^h30^m [28]. Карта эпицентров и проекция гипоцентров на вертикальный разрез представлены на рис. 6.

Представительный класс землетрясений, рассчитанный по программе ZMAP, составил $K_{\min}=2.5$ (рис. 7), что значительно ниже его значений в 2008 г. ($K_{\min}=3.8$ [14]) и в 2009 г. ($K_{\min}=3.1$ [13]). Улучшение уровня надежной регистрации в 2010 г., возможно, связано с установкой и введением в эксплуатацию станции «Арик» (KRX) в августе 2009 г. [3] в районе Корякского вулкана, позволившей локализовать землетрясения на более низком энергетическом уровне.

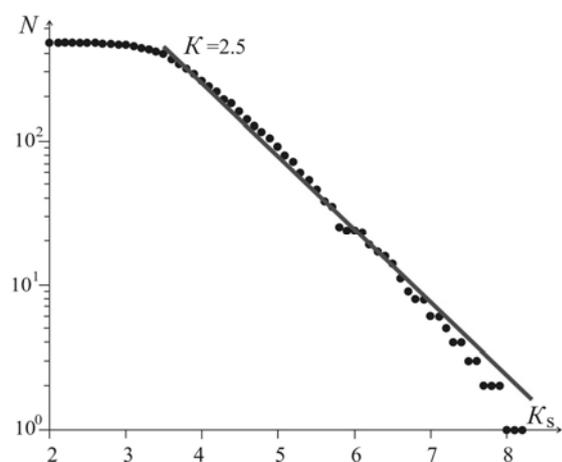


Рис. 7. График повторяемости землетрясений Авачинской группы вулканов за 2010 г

Угол наклона графика повторяемости практически не меняется последние годы. В 2010 г. он был равен $\gamma=0.50 \pm 0.04$, а среднее его значение за период 2006–2009 гг. $\gamma=0.55$ [12–15, 17]. На рис. 6 в, д представлены распределения во времени значений энергетического класса K_S и глубины землетрясений для каждого вулкана.

В 2010 г. в радиусе 8 км от кратера Авачинского вулкана и в диапазоне глубин $h=-3.0-24.8$ км было локализовано 179 землетрясений с $K_S=1.8-6.9$ (рис. 6 в, г). Землетрясение с максимальным классом $K_S=6.9$ произошло в постройке вулкана ($h=-2.0 \pm 0.8$ км) 23 сентября в 21^h55^m [28]. Сейсмичность вулкана соответствует фоновой. На влк. Корякский в 2010 г. наблюдалась относительно спокойная сейсмическая обстановка. по сравнению с таковой в 2008–2009 гг. [13, 14]. В радиусе 9 км от вер-

шины вулкана и в диапазоне глубин $h=-3.0-25.8$ км было локализовано 253 землетрясения с $K_S=1.5-7.2$ (рис. 6 д, е).

Мутновско-Гореловская группа вулканов расположена в 70 км к югу от г. Петропавловска-Камчатского и включает в себя 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 2010 г. рассчитывались по программе «DIMAS», предусматривающей поиск решений по глубине выше уровня моря. Используемый в предыдущие годы пакет программ «НПО» [7] ограничивался нулевой отметкой. В связи с отсутствием локальных скоростных моделей для этого района при расчете положений гипоцентров применялась одномерная скоростная модель Камчатского региона [9]. Карта эпицентров и проекция гипоцентров землетрясений на вертикальный разрез представлены на рис. 8.

Отсутствие по техническим причинам данных со станции GRL с 27 января по 19 апреля, а также регистрация сильного вулканического дрожания с отношением $A/T_{\max}=2.7$ мкм/с, источником которого является влк. Горелый, не позволили локализовать относительно слабые землетрясения, которые были зафиксированы в 2009 г. (амплитуда вулканического дрожания в 2009 г. достигала уровня $A/T_{\max}=1.1$ мкм/с). Возможно поэтому в 2010 г. было локализовано в 50 раз меньше землетрясений, суммарная энергия которых в 6.7 раза ниже, по сравнению с таковой в 2009 г. ($N_{2010}=57$, $\Sigma E_{2010}=1.376 \cdot 10^7$ Дж вместо $N_{2009}=2858$, $\Sigma E_{2009}=9.18 \cdot 10^7$ Дж) (табл. 3) [13]. Землетрясение с максимальным классом $K_S=6.4$ произошло 8 апреля в 04^h01^m на глубине $h=5.0$ км под западной частью постройки влк. Горелый [29].

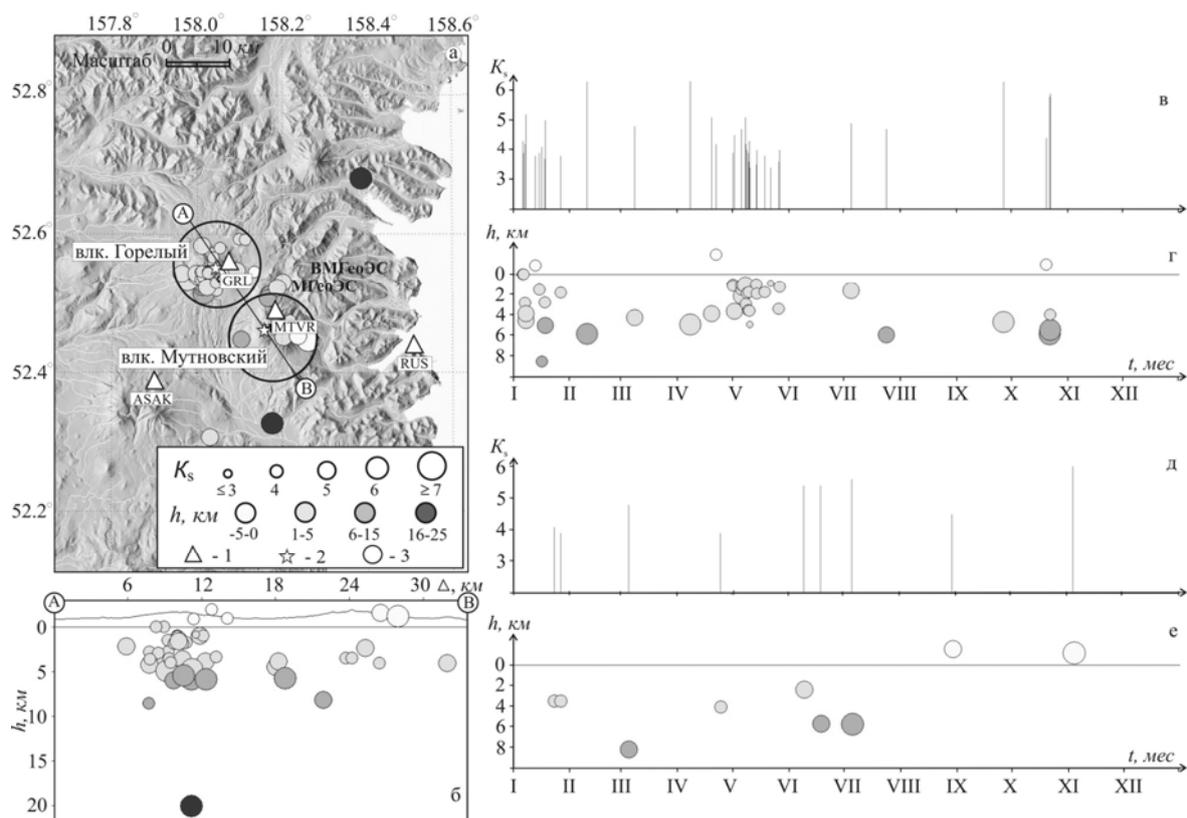


Рис. 8. Карта эпицентров (а) и проекция гипоцентров на вертикальный разрез по линии А–В (б) для землетрясений Мутновско-Гореловской группы, а также изменение во времени энергетического класса K_S (в, д) и глубины гипоцентров h (г, е) вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 7 км от Горелого и от Мутновского вулканов, соответственно

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

Таблица 3. Распределение землетрясений района Гореловско-Мутновской группы вулканов по энергетическим классам K_S в 2010 г.

Название вулкана	$R_{зоны},$ км	K_S				N_{Σ}	$\Sigma E,$ 10^7 Дж
		3	4	5	6		
Горелый	7	3	27	8	5	43	0.905
Мутновский	7		4	3	2	9	0.202
Вне вулканов				3	2	5	0.269
Всего		3	31	14	9	57	1.376

Для построения в 2010 г. графика повторяемости землетрясений района Горело-Мутновской 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 в диапазоне глубин $h = -1.9$ – 8.6 км было локализовано 43 землетрясения с $K_S = 3.4$ – 6.4 (рис. 8 в, г).

Станция «Мутновка» (MTVR) установлена на расстоянии ~ 3 км от активного кратера (рис. 8). Минимальный уровень регистрируемой сейсмичности по этой станции соответствует $K_S \geq 2.0$. В 2010 г. в радиусе 7 км от вулкана было локализовано всего 9 землетрясений с $K_S = 3.9$ – 6.0 , диапазон глубин $h = -1.5$ – 8.2 км (рис. 8 д, е). Землетрясение с максимальным классом $K_S = 6.0$ произошло 4 ноября в 06^h55^m в постройке вулкана ($h = -1.2$ 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 [30]. Последнее его извержение произошло в 1927–1928 гг. [30].

Ближайшая телеметрическая станция «Кизимен» (KZV) расположена на склоне вулкана ~ в 2.5 км от вершины (рис. 9).

При расчете положений гипоцентров землетрясений района влк. Кизимен, так же как и для землетрясений Мутновско-Гореловской группы вулканов, использовалась одномерная скоростная модель Камчатского региона [9] и пакет программ «DIMAS» [7], предусматривающий поиск решений по глубине выше уровня моря.

Высокая сейсмическая активность на влк. Кизимен, начавшаяся в середине 2009 г., продолжалась и в 2010 г. (рис. 9 в). Всего в 2010 г. в районе вулкана в диапазоне глубин $h = -3.0 - 19.1$ км (рис. 9 г) было локализовано 2863 землетрясения [31], из них 2840 в радиусе 15 км от вершины вулкана (табл. 4).

Таблица 4. Распределение землетрясений по энергетическим классам K_S в 2010 г.

Название вулкана	$R_{\text{зоны}}, \text{ км}$	K_S										N_{Σ}	$\Sigma E, 10^{11} \text{ Дж}$
		4	5	6	7	8	9	10	11	12			
Кизимен	15	53	655	1336	554	159	63	16	4	1	2840	14.445	
Вне вулкана			7	9	7						23	0.001	
Всего		53	662	1345	561	159	63	16	4	1	2863	14.446	

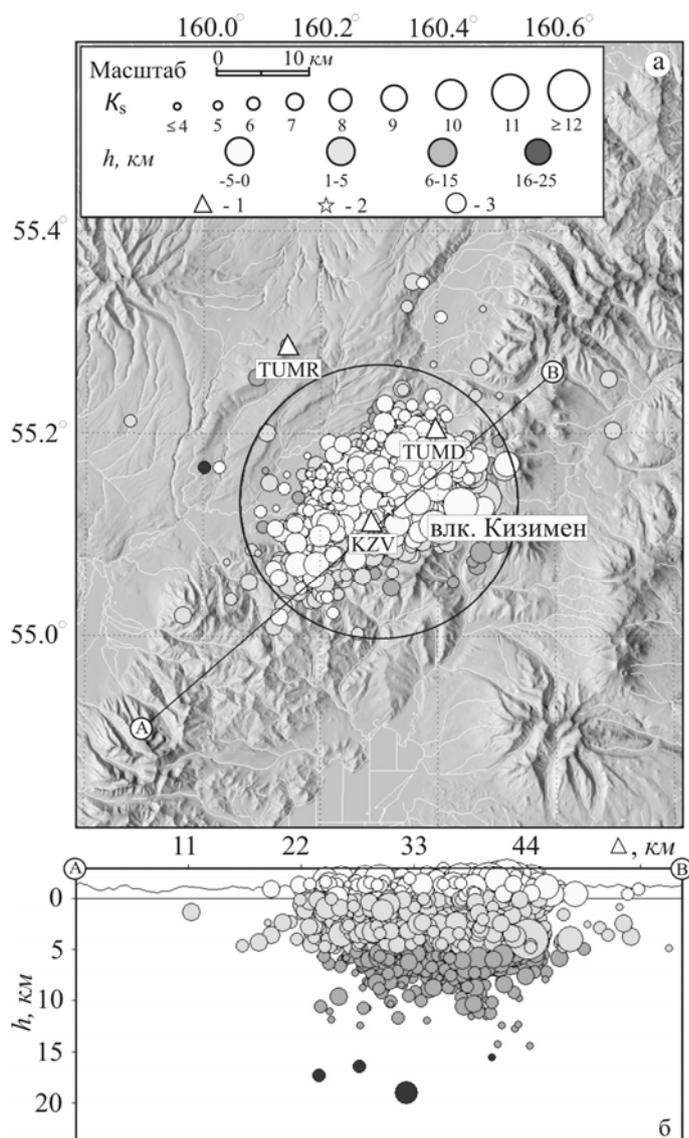


Рис. 9. Карта эпицентров (а) и проекция гипоцентров на вертикальную плоскость по линии А–В (б) для землетрясений района влк. Кизимен

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

Представительный класс землетрясений $K_{\min} = 5.7$ и угол наклона графика повторяемости $\gamma = 0.50 \pm 0.01$ (рис. 10), по сравнению с предыдущим 2009 г., практически не изменились ($K_{\min} = 5.7$, $\gamma = 0.54$).

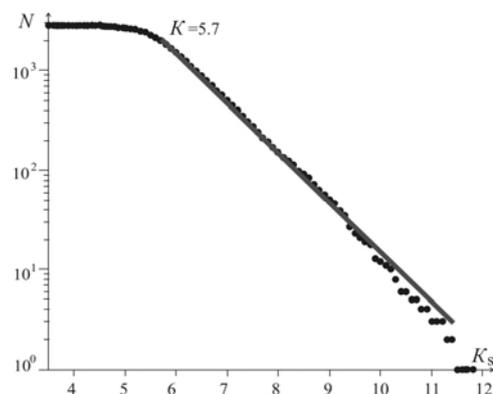


Рис. 10. График повторяемости землетрясений вулкана Кизимен за 2010 г.

На рис. 11 представлены изменения во времени различных параметров землетрясений, эпицентры которых нахо-

дятся внутри окружности радиусом $R=15$ км от кратера вулкана. Землетрясение с максимальным классом $K_S=11.8$ произошло 27 ноября в 19^h29^m на глубине $h=4.1$ км [31].

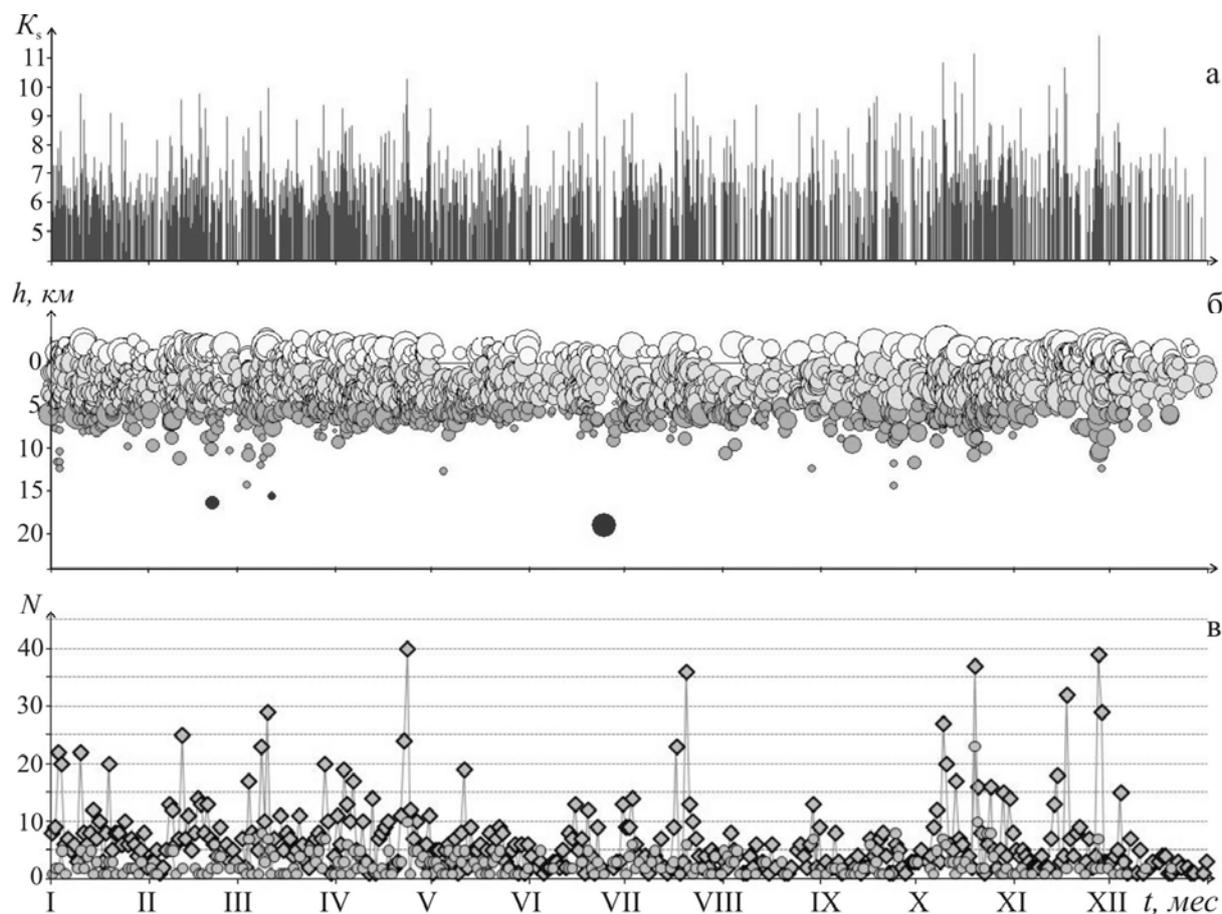


Рис. 11. Изменение во времени энергетического класса K_S (а), глубины гипоцентров h (б) и ежесуточного числа вулканических землетрясений N (в) с глубин $h=-3.0-5.0$ км (ромб) и $h=5.0-20.0$ км (круг), произошедших в радиусе 15 км от влк. Кизимен в 2010 г.

Три сильных землетрясения с $K_S=10.2-11.2$ произошли 9, 13 и 19 октября в 17^h19^m, 11^h50^m и в 10^h06^m, соответственно, в диапазоне глубин $h=-2.0-3.0$ км. Два сдвоенных во времени и пространстве поверхностных землетрясения в 18^h56^m с $K_S=11.4$ и в 19^h29^m с $K_S=11.8$ произошли 27 ноября вблизи вулкана [31]. В мировой практике такие сдвоенные события свидетельствуют о движении интрузии и обычно приводят к сильному извержению вулкана. Сдвоенные землетрясения 27 ноября явились самыми сильными событиями в каталоге влк. Кизимен в 2010 г. Оба события ощущались в пункте ист. Тумрок с интенсивностью $I=5$ баллов на расстоянии 7 и 12 км соответственно [32].

С 9 декабря стало регистрироваться вулканическое дрожание, появились поверхностные сейсмические события IV типа [11], возможно сопровождавшие газовые взрывы с обломочными лавинами.

По данным фотосъемки Михаила Жукова с базы «Тумрок» на влк. Кизимен была отмечена следующая активизация:

- 16 октября впервые зафиксирована новая fumarola на юго-восточном склоне близко к вершине (10 октября ее еще не было);
- первая паро-газовая эмиссия с пеплом из новой fumaroly сфотографирована 11 ноября (9 ноября пепла еще не было);
- эмиссия с пеплом высотой до 1 км над вершиной продолжалась несколько дней, после чего существенно уменьшилась, и 18 ноября пепел в выбросах уже не фиксировался [33].

По визуальным данным с базы «Ипуин» (наблюдатель Е. Власов, сотрудник Кроноцкого заповедника), расположенной в 25 км к западу от влк. Кизимен, были отмечены периодические

пепловые выбросы. Также 9 декабря по данным Аляскинской вулканологической обсерватории (АВО) на спутниковых снимках впервые была зафиксирована яркая термальная аномалия, что указывало на близость горячего материала к поверхности.

На основании всех зарегистрированных данных 10 декабря 2010 г. сотрудниками лаборатории ИСВА был передан в Камчатский филиал Российского экспертного совета (КФ РЭС) прогноз развития активизации влк. Кизимен: «Все представленные данные свидетельствуют об активизации вулкана, разрушении его постройки и о подготовке к сильному эксплозивному извержению (индекс вулканической эксплозивности VEI=3–4), которое может произойти в ближайший месяц».

По сейсмическим данным 12 декабря 2010 г. в 19^h49^m была зарегистрирована серия поверхностных сейсмических событий продолжительностью 20^m, которая сопровождала сильное эксплозивное извержение влк. Кизимен. По спутниковым данным АВО пепловый шлейф от вулкана на высоте около 10 км распространялся в северо-западном направлении через поселки Козыревск и Тигиль. Выпадение пепла в пос. Козыревск началось в 20^h00^m, а в пос. Тигиль – в 23^h30^m.

Еще одна подобная серия поверхностных сейсмических событий, сопровождавших сильное эксплозивное извержение, была зафиксирована 31 декабря в 17^h56^m.

В заключение отметим, что в 2010 г. КФ ГС РАН стал проводить обработку землетрясений с использованием программы «DIMAS». Программа позволяет производить расчет параметров очагов вулканических землетрясений с сохранением их в сетевой базе в режиме, близком к реальному времени. Данные сетевой базы открыты для общего пользования в Интернете по адресу: <http://www.emsd.ru/ts/>.

В 2010 г. наблюдалась высокая сейсмическая и вулканическая активность вулканов Камчатки. В течение всего года происходили рост и обрушение купола влк. Шивелуч, сопровождавшиеся огромным количеством землетрясений и эксплозивными извержениями.

На влк. Ключевской продолжалось мощное вершинное эксплозивно-эффузивное извержение с излиянием нескольких лавовых потоков и пепловыми выбросами. Извержение сопровождалось большим количеством поверхностных землетрясений, происходящих в постройке вулкана, и вулканическим дрожанием. К сожалению, на фоне сильного вулканического дрожания от Ключевского вулкана невозможно было выделить сейсмические события, связанные с подготовкой эксплозивного извержения влк. Безымянный 31 мая.

В 2010 г. продолжалась сейсмическая активизация влк. Кизимен, начавшаяся в 2009 г. после почти 80-летнего спокойствия. Нараставшая в течение всего года сейсмичность влк. Кизимен привела к образованию новой фумаролы на юго-восточном склоне близ вершины 16 октября и мощным эксплозивным извержениям 12 и 31 декабря. Время начала и энергия (индекс вулканической эксплозивности VEI=3) эксплозивного извержения влк. Кизимен было успешно спрогнозировано по решению КФ РЭС (справка КФ РЭС №28 от 29.12.2011).

Вулканы Горелый и Мутновский представляют потенциальную опасность для геотермического комплекса МГеоЭС и ВМГеоЭС. В июне 2010 г. у основания стенки активного кратера, заполненного кислотным озером, образовалась бокка диаметром около 20 м, из которой под высоким давлением извергались раскаленные газы (~870° С) [34]. В течение всего года паро-газовая активизация сопровождалась спазматическим вулканическим дрожанием ($A/T_{\text{сред.}}=0.5$ мкм/с).

Всего в 2010 г. в районе Северной, Авачинской, Мутновско-Гореловской групп вулканов, а также в районе влк. Кизимен было локализовано 10414 землетрясений, высвобожденная ими сейсмическая энергия составила $\Sigma E=14.5 \cdot 10^{11}$ Дж.

Л и т е р а т у р а

1. Сеньюков С.Л. Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений в 2000–2004 гг. // Вулканология и сейсмология. – 2006. – № 3. – С. 68–78.
2. Старовойт О.Е., Мишаткин В.Н. Сейсмические станции Российской академии наук (состояние на 2001 г.). – Москва-Обнинск: ГС РАН, 2001. – 86 с.

3. **Чебров В.Н., Матвеев Е.А., Шевченко Ю.В., Ящук В.В., Музуров Е.Л. (сост.)**. Сейсмические станции сети Камчатки и Командорских островов в 2010 г. (См. Приложение к наст. сб. на CD).
4. **Чебров В.Н., Сеньюков 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., 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. **Чебров В.Н., Левина В.И., Ландер А.В., Чеброва А.Ю., Сеньюков С.Л., Дрознин Д.В., Дрознина С.Я.** Региональный каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов 1962–2010 гг.: технология и методика создания. (См. раздел V (Методические вопросы) в наст. сб.).
7. **Дрознин Д.Д., Дрознина С.Я.** Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов «DIMAS» // Сейсмические приборы. – М.: ИФЗ РАН, 2010. – 46. – № 3. – С. 22–34.
8. **Мельников Ю.Ю.** Пакет программ для определения координат гипоцентров землетрясений Камчатки на ЭВМ // Вулканология и сейсмология. – 1990. – № 5. – С. 103–112.
9. **Кузин И.П.** Фокальная зона и строение верхней мантии в районе Восточной Камчатки. – М.: Наука, 1974. – 145 с.
10. **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 2010 г. (См. Приложение к наст. сб. на CD).
11. **Токарев П.И.** Вулканические землетрясения Камчатки. – М.: Наука, 1981. – 164 с.
12. **Федотов С.А.** Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. – М.: Наука, 1972. – 117 с.
13. **Сеньюков С.Л., Нуждина И.Н.** Сейсмический мониторинг вулканов Камчатки // Землетрясения Северной Евразии, 2009 год. – Обнинск: ГС РАН, 2015. – С. 352–364.
14. **Сеньюков С.Л., Нуждина И.Н.** Сейсмический мониторинг вулканов Камчатки // Землетрясения Северной Евразии, 2008 год. – Обнинск: ГС РАН, 2014. – С. 453–462.
15. **Сеньюков С.Л., Нуждина И.Н., Дрознина С.Я.** Сейсмический мониторинг вулканов Камчатки // Землетрясения Северной Евразии, 2007 год. – Обнинск: ГС РАН, 2012. – С. 449–460.
16. **Weimer S.** A software package to analyze seismicity: ZMAP // Seism. Res. Lett. – 2001. – 72. – № 2. – P. 374–383.
17. **Сеньюков С.Л., Нуждина И.Н., Дрознина С.Я.** Сейсмический мониторинг вулканов Камчатки // Землетрясения Северной Евразии, 2006 год. – Обнинск: ГС РАН, 2012. – С. 449–460.
18. **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.
19. **Федотов С.А., Жаринов Н.А., Гонтовая Л.И.** Магматическая питающая система Ключевской группы вулканов (Камчатка) по данным о ее извержениях, землетрясениях, деформациях и глубинном строении // Вулканология и сейсмология. – 2010. – № 1. – С. 3–35.
20. **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.
21. **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.
22. **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.
23. **Сеньюков 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. **Murru M., Montuori C.** The locations of magma chambers at Mt. Etna, Italy, mapped by b-values // Geophysical research letters. – 1999. – **26**. – № 16. – P. 2553–2556.
26. **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.
27. **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.
28. **Нуждина И.Н. (отв. сост.), Кожевникова Т.Ю., Толокнова С.Л., Соболевская О.В. (сост.)**. Каталог землетрясений Авачинской группы вулканов за 2010 г. (См. Приложение к наст. сб. на CD).
29. **Нуждина И.Н. (отв. сост.), Кожевникова Т.Ю., Толокнова С.Л., Соболевская О.В. (сост.)**. Каталог землетрясений Мутновско-Гореловской группы вулканов за 2010 г. (См. Приложение к наст. сб. на CD).
30. **Действующие вулканы Камчатки** / Под ред. Федотова С.А., Масуренкова Ю.П. – М.: Наука, 1991. – II. – С. 18–32.
31. **Нуждина И.Н. (отв. сост.), Кожевникова Т.Ю., Толокнова С.Л., Соболевская О.В., Напылова Н.А. (сост.)**. Каталог землетрясений вулкана Кизимен за 2010 г. (См. Приложение к наст. сб. на CD).
32. **Сеньюков С.Л., Дрознина С.Я. (отв. сост.), Козлова Н.И., Карпенко Е.А., Леднева Н.А., Митюшкина С.В., Назарова З.А., Напылова Н.А., Раевская А.А., Ромашева Е.И. (сост.)**. Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов за 2010 г. (См. Приложение к наст. сб. на CD).
33. **Сеньюков С.Л., Нуждина И.Н., Дрознина С.Я., Гарбузова В.Т., Кожевникова Т.Ю., Соболевская О.В.** Сейсмичность вулкана Кизимен // «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России» Труды Третьей региональной научно-технической конференции 9–15 октября 2011 г. Петропавловск-Камчатский. – Обнинск: ГС РАН, 2011. – С. 140–144.
34. **Овсянников А.А.** Состояние вулкана Горелый в июне 2010 г. // Вестник КРАУНЦ. – Наука о Земле. – 2010. – № 1. – Выпуск 15. – С. 10.