

## IV. СЕЙСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ВУЛКАНОВ

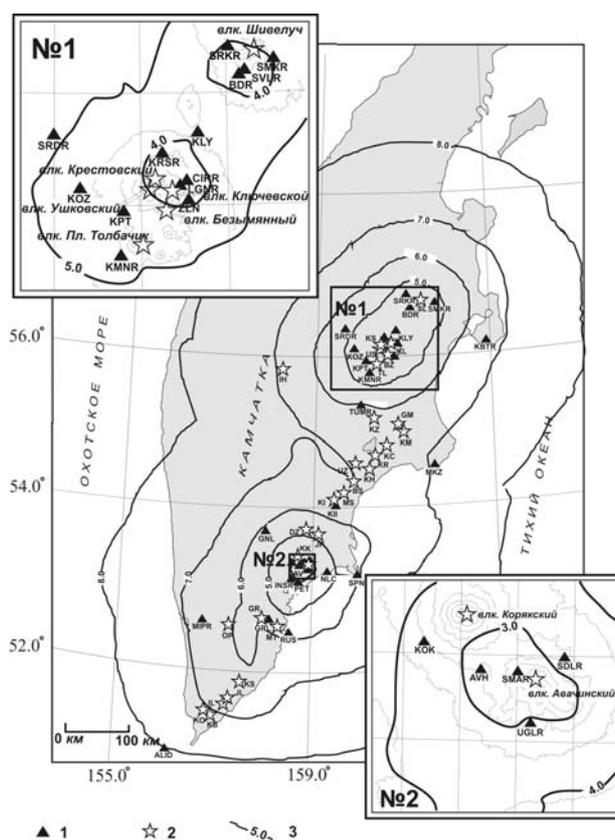
УДК 550.348.438(517.66)

### **СЕЙСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ВУЛКАНОВ КАМЧАТКИ**

**С.Л. Сениюков, И.Н. Нуждина, С.Я. Дроздина, В.Т. Гарбузова**

*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 2005 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 – «Каменистая», TUMR – «Тумрок», MKZ – «Мыс Козлова», КП – «Карымский», GNL – «Ганалы», КОК – «Коряка», AVHR – «Авача», SDLR – «Седловина», SMAR – «Сомма», UGLR – «Угловая», GRL – «Горелый», RUS – «Русская», MIPR – «Малая Ипелька», ALID – «Алаид».

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 2005 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 исследований сейсмической и вулканической активности (ИСВА) КФ ГС РАН. Прием данных осуществлял Камчатский центр связи и мониторинга. Данные спутников NOAA12, NOAA14, NOAA15, TERRA и MODIS предоставлены 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 2005 г. телеметрическая сеть сейсмических станций в вулканических районах (рис. 1) расширилась. Вместо станции «Шивелуч», единственной вблизи одноименного вулкана и уничтоженной 27 февраля 2005 г. пирокластическим потоком во время его извержения, в сентябре–октябре 2005 г. были развернуты три новые: «Семкарок», «Сорокина», «Байдарная» [4]. Информация о других сейсмических станциях представлена в работах [5, 6]. 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 (вулканы Авачинский и Корякский) и Северной (вулканы Шивелуч, Ключевской, Безымянный, Плоский Толбачик, Ушковский и Крестовский) групп вулканов. На вулканах Карымский, Горелый, 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 [7]. Для пересчета энергетического класса в локальную магнитуду, приведенную в обоих каталогах вулканических землетрясений [8, 9], использована формула А.А. Гусева из [10].

$$M_L = K_S/2 - 0.75.$$

В 2005 г. применялись те же методы обработки сейсмических данных, что и в предыдущие годы [11–15]. Определение кинематических параметров землетрясений в вулканических районах выполнялось на основе одномерных скоростных моделей [11, 16] с помощью программы Ю.Ю. Мельникова [17]. Ниже приведены данные о сейсмической активности Северной и Авачинской групп вулканов (районы № 1, 2, рис. 1).

**Северная группа вулканов (№ 1).** Записи землетрясений в районах вулканов довольно сильно отличаются от тектонических землетрясений. Согласно классификации П.И. Токарева [18], 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, максимальные амплитуды  $A_{\max}$   $S$ -волн и соответствующие периоды  $T$ , рассчитываются энергетические классы и координаты гипоцентров. Землетрясения, зарегистрированные тремя и более станциями, локализируются 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  $\tau$  цугов колебаний. Результаты измерений заносятся в таблицы и вычисляются производные параметры за сутки:  $(A/T)_{\text{cp}}$ ,  $\Sigma A/T$  и др.

Каталог землетрясений Северной группы вулканов за 2005 г. [8] содержит 4898 землетрясений I–III типов. Распределение землетрясений по вулканам и по энергетическим классам  $K_S$  классам вблизи разных вулканов 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 по энергетическим классам  $K_S$  в районе № 1 в 2005 г.

Название вулкана	$R_{зоны}, км$	$K_S$							$N_{\Sigma}$	$\Sigma E, 10^9 Дж$
		3	4	5	6	7	9	10		
Безымянный	6	40	130	52	4	2			228	0.024
Ключевской	7	28	1584	2488	179				4279	0.437
Плоский Толбачик	20	8	38	27	9	4	1	1	88	6.883
Шивелуч	12		5	59	22	1			87	0.041
Крестовский и Ушковский	10	18	57	8	1				84	0.002
Вне вулканов			50	50	20	11	1		132	0.948
Всего		94	1864	2684	235	18	2	1	4898	8.334

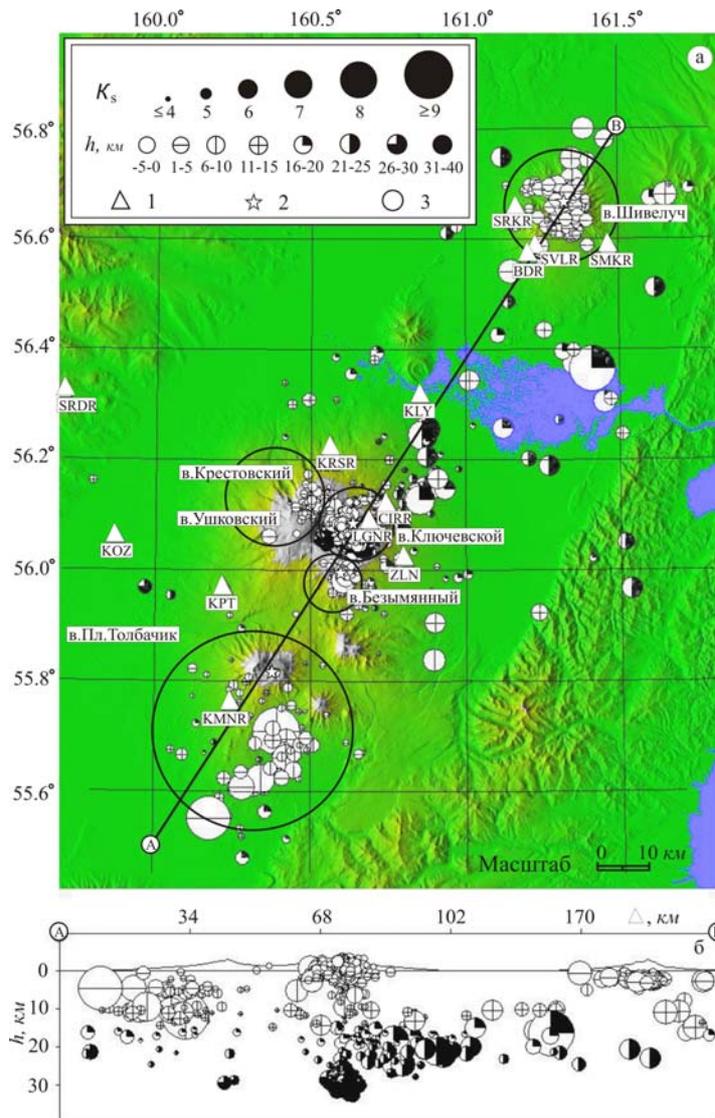


Рис. 2. Карта эпицентров (а) землетрясений Северной группы вулканов за 2005 г. и проекция гипоцентров (б) на вертикальную плоскость, проходящую через линию А–В

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.

распределенному по данным 2000–2003 гг. [12–15]. В 2004 г. величина  $\gamma$  была равна 0.78 [19].

Из анализа табл. 1 следует, что в 2005 г. наиболее активным по числу землетрясений  $N_{\Sigma}$  был влк. Ключевской ( $N_{\Sigma}=4279$ ), а по количеству выделенной сейсмической энергии  $\Sigma E$  – влк. Плоский Толбачик ( $\Sigma E=6.883 \cdot 10^9 Дж$ ), где 9 мая в  $10^h55^m$  произошло максимальное ( $K_S=9.8$ ) в 2005 г. землетрясение с  $h=11.9 км$ . Суммарная сейсмическая энергия, выделенная в очагах вулканических землетрясений района Северной группы вулканов, составила  $\Sigma E=8.3 \cdot 10^9 Дж$ , что примерно в 3.8 раза больше, чем в 2004 г. ( $\Sigma E=2.2 \cdot 10^9 Дж$ ) [19]. Уровень надежной регистрации землетрясений определен по графику повторяемости. Для построения графика и определения угла наклона использовался пакет программ ZMAP [20]. Из графика (рис. 3) следует, что представительными для Северной группы вулканов являются землетрясения с  $K_{min}=4.5$ . 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  $K_S=4.5–8.0$  наклон графика повторяемости  $\gamma=0.97 \pm 0.09$ , что соответствует среднему значению  $\gamma=0.91$ , определенному по данным 2000–2003 гг. [12–15]. В 2004 г. величина  $\gamma$  была равна 0.78 [19].

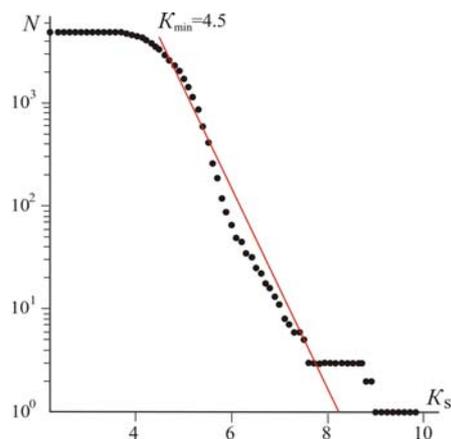


Рис. 3. График повторяемости землетрясений Северной группы вулканов за 2005 г.

Ниже приводится описание активности шести вулканов Северной группы (Шивелуч, Ключевской, Безымянный, Плоский Толбачик, Ушковский, Крестовский) по инструментальным и визуальным наблюдениям в 2005 г.

**Вулкан Шивелуч** – самый северный действующий вулкан Камчатки (координаты активного кратера –  $56^{\circ}38' N$ ,  $161^{\circ}19' E$ , абсолютная высота нового растущего купола составила  $h_{\nu} \sim 2500$  м). Вулкан находится в 45 км к северо-востоку от пос. Ключи (рис. 2 а). Ближайшая телеметрическая станция – «Шивелуч» – была расположена в 8.5 км от активного кратера вулкана и позволяла регистрировать землетрясения с  $K_S \geq 3.1$ . Теоретический уровень надежной регистрации был равен  $K_{\min} = 5.5$ . Как отмечено выше, станция была разрушена 27 февраля. Три телеметрические станции – «Байдарная» (BDR), «Семкарок» (SMKR) и «Сорокина» (SRKR) – были введены в строй действующих только в сентябре–октябре 2005 г. (рис. 2 а). Поэтому сейсмический мониторинг

активности вулкана проводился в течение семи месяцев только по удаленным станциям. Установка новых станций позволила снизить уровень  $K_{\min}$  до 4.5. В исследуемый период в диапазоне глубин  $h=0-11$  км было локализовано 87 землетрясений (рис. 4 а, б). Землетрясение с максимальным классом  $K_S=6.8$  произошло 22 сентября в  $22^{\text{h}}11^{\text{m}}$  на глубине  $h=10.8$  км.

В 2005 г. на вулкане Шивелуч наблюдалась интенсивная вулканическая деятельность, связанная с продолжающимся ростом нового купола, появление которого впервые заметил 12 мая 2001 г. сотрудник Института вулканологии Ю.В. Демянчук. Исследования сейсмической и вулканической активности в предыдущие годы [21] и в 2005 г. (рис. 4) свидетельствуют о неравномерном росте нового купола. Это подтверждается и данными геодезических наблюдений [22]. Периоды затишья сменяются периодами интенсивного роста, во время которого постройка нового купола достигает таких критических размеров, что даже незначительные эксплозивные извержения вызывают его обрушение, обнажая горячий магматический материал. Выход на поверхность горячего магматического материала из-за резкого сброса давления вызывает новое сильное извержение, которое сопровождается мощными пепловыми выбросами и сходом пирокластических потоков [23, 24].

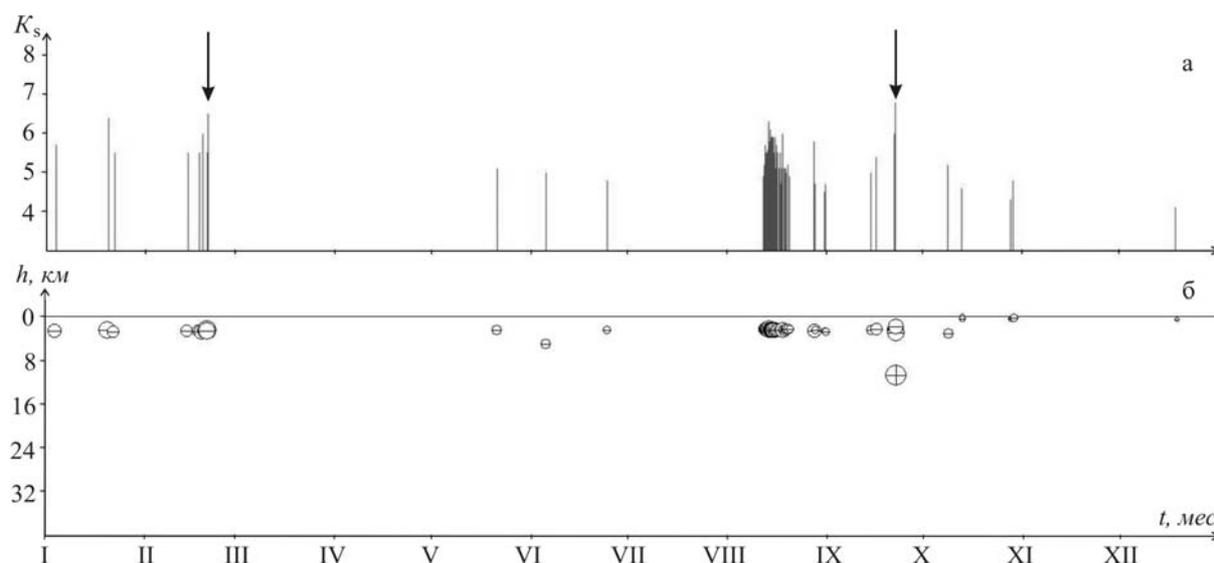
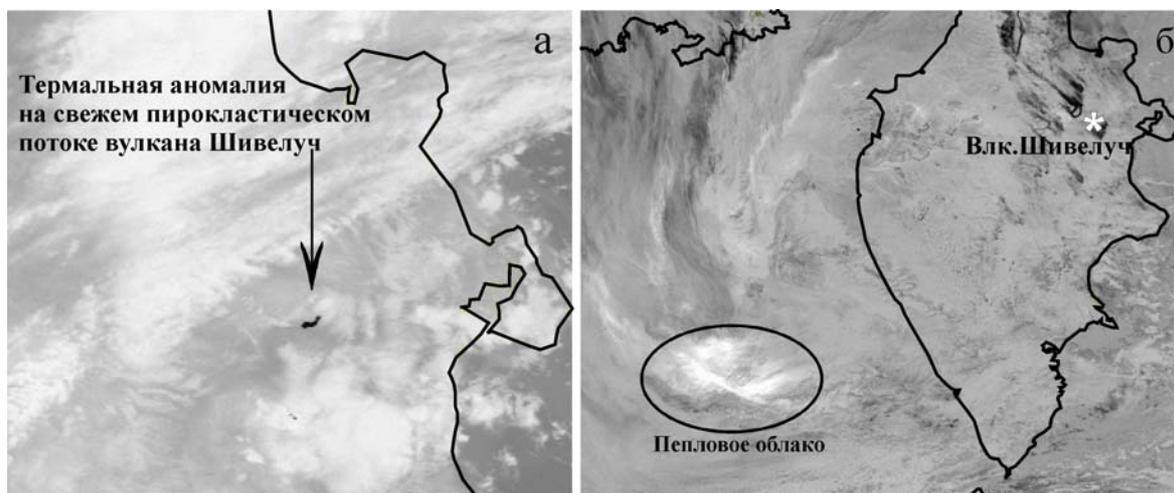


Рис. 4. Изменение во времени энергетического класса  $K_S$  (а) и глубины гипоцентров  $h$  (б) вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 12 км от влк. Шивелуч в 2005 г. (стрелками отмечены моменты извержений)

В 2005 г. можно выделить два наиболее значительных извержения, произошедших в феврале и сентябре.

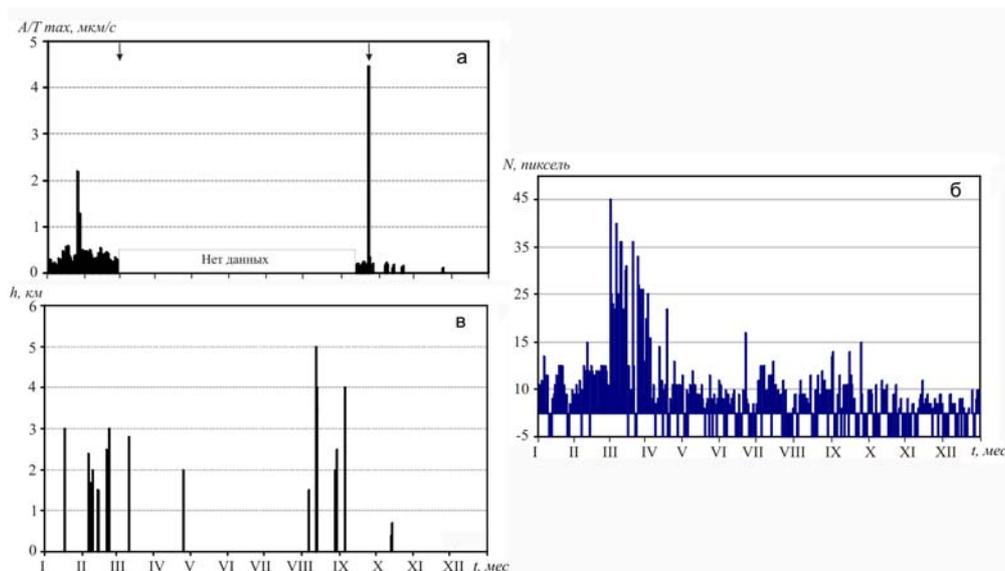
Усиление сейсмической активности, предварявшее первое извержение, началось 14 января. На станции «Шивелуч» наблюдался рост числа землетрясений III и IV типов. Максимальное число ( $N=64$ ) землетрясений III типа было зарегистрировано 26 января, а 30 января – 372 землетрясения IV типа. К сожалению, за этот период в каталог вошло только 9 событий. Локализовать остальные оказалось невозможно, так как удаленные от вулкана станции в это время регистрировали сильное вулканическое дрожание, сопровождавшее извержение Ключевского вулкана. Началом извержения, по сейсмическим данным, считается 27 февраля в 11<sup>h</sup>50<sup>m</sup>, когда пирокластическим потоком станция «Шивелуч» была уничтожена. Сейсмический мониторинг с этого момента стал невозможен. Во время извержения вулкан был закрыт облачностью, но по спутниковым данным удалось зарегистрировать протяженную (до 28 км) термальную аномалию над свежим пирокластическим потоком (рис. 5 а) и проследить за перемещением пеплового облака на расстояние до 700 км к юго-западу от вулкана (рис. 5 б) [25].

В середине августа по данным удаленных станций был зарегистрирован рой землетрясений в районе влк. Шивелуч (рис. 4), свидетельствующий об активизации вулкана и возможности нового сильного извержения. По сейсмическим данным пароксизмальная фаза извержения произошла 22 сентября с 07<sup>h</sup>38<sup>m</sup> до 16<sup>h</sup>00<sup>m</sup>. В это время регистрировались землетрясения IV типа, возможно, сопровождавшие сход пирокластического потока, обломочных лавин и мощные пепловые выбросы. К сожалению, визуальные наблюдения были невозможны из-за плохой погоды. Однако по спутниковым данным удалось оценить высоту пепловых облаков, которая достигала примерно 6.5 км над уровнем моря. Полевым отрядом КФ ГС РАН, устанавливающим в это время на склоне вулкана новую телеметрическую станцию «Байдарная», был отмечен свежий пирокластический поток протяженностью около 15 км вдоль р. Байдарная. В течение нескольких дней после извержения сейсмичность снизилась до фонового уровня, и до конца года вулкан был спокоен.



**Рис. 5.** Спутниковые снимки влк. Шивелуч: а – термальная аномалия 27 февраля в 16<sup>h</sup>56<sup>m</sup> на пирокластическом потоке (спутник NOAA16); б – пепловый шлейф 28 февраля в 00<sup>h</sup>31<sup>m</sup> (спутник NOAA17) [25]

На рис. 6 а представлены данные о вулканическом дрожании за 2005 г., по которым хорошо выделяются отмеченные выше два периода активизации вулкана. В течение всего года наблюдалась термальная аномалия, свидетельствующая о постоянном присутствии вблизи поверхности горячего магматического материала (рис. 6 б). Аномально большое число пикселей в марте–апреле связано со сходом пирокластического потока в начале извержения. Длительное отсутствие станции в районе вулкана не позволило использовать методику [26] для выделения пепловых выбросов и оценки их высоты по сейсмическим данным, поэтому на рис. 6 в представлены данные о газопепловых выбросах только по видео- и визуальным данным.



**Рис. 6.** Изменение во времени для влк. Шивелуч максимальной амплитуды скорости вулканического дрожания по станциям: «Шивелуч» с 1 января по 27 февраля, «Семкарок» с 11 сентября по 19 ноября (стрелками показаны моменты эксплозивных извержений) (а); размера термальной аномалии по данным спутников NOAA16 и NOAA17, где отсутствие данных (вулкан закрыт облачностью) отмечено значениями  $<0$  (б); высоты газо-пепловых выбросов над куполом по видеоданным и визуальным наблюдениям сотрудников сейсмической станции «Ключи» (в)

**Вулкан Ключевской** – координаты вершины:  $56^{\circ}04' N$ ,  $160^{\circ}38' E$ ; абсолютная высота вулкана  $h_y=4750$  м; диаметр вершинного кратера, венчающего конус около 700 м. Ближайшая телеметрическая станция «Логинов», 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 2005 г. в радиусе 7 км от вулкана и диапазоне глубин от вершины до 40 км (изучаемый пространственный объем) было локализовано 4279 землетрясений. 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. Характер сейсмичности Ключевского вулкана напрямую связан с притоком мантийных магм в промежуточный магматический очаг на глубинах 20–35 км и затем подъемом их в постройку вулкана при вершинном извержении. При этом во время вершинного извержения глубокие землетрясения не регистрируются, что связано с оттоком магмы из промежуточного очага [27].

График распределения глубин очагов во времени (рис. 7 б) наглядно демонстрирует, что основная часть землетрясений происходит в верхнем (поверхностном) и нижнем (глубоком) горизонтах, а в промежуточном слое сейсмичность практически отсутствует. Поэтому можно условно разделить всю сейсмичность по трем слоям: I →  $-5.0 \leq h \leq 5.0$  км; II →  $h=5.1 \leq h \leq 20.0$  км; III →  $h > 20$  км), как это было сделано в работе [28]. В двух первых слоях происходят главным образом вулкано-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 [29]. В нижнем слое генерируется множество глубоких длиннопериодных землетрясений, в образовании которых активную роль играет магматический расплав [29]. В 2005 г. были определены параметры для 1361 поверхностного события, 27 – промежуточных и 2891 – глубоких. С помощью пакета программ ZMAP [20] были определены значения  $K_{\min}$  и угол наклона графика повторяемости для поверхностных и глубоких землетрясений. Уровень  $K_{\min}$  для поверхностных событий получился равным  $K_{\min}=4.6$ , угол наклона графика повторяемости –  $\gamma=0.85 \pm 0.02$ . Для глубоких землетрясений представительный класс оказался равным  $K_{\min}=4.5$ ,  $\gamma=0.80 \pm 0.01$ . На рис. 8 а показано изменение представительного класса поверхностных землетрясений во времени. Во время сильного непрерывного вулка-

нического дрожания (рис. 8 б) число локализованных слабых землетрясений резко уменьшается в связи с трудностями их выделения на фоне дрожания, и значение  $K_{\min}$  повышается. Графики, приведенные на рис. 8 а, б, наглядно демонстрируют описанную ситуацию. Начиная с сентября число поверхностных землетрясений значительно уменьшилось и определить представительный класс стало невозможно. Поэтому кривая зависимости  $K_S$  от времени обрывается (рис. 8 а).

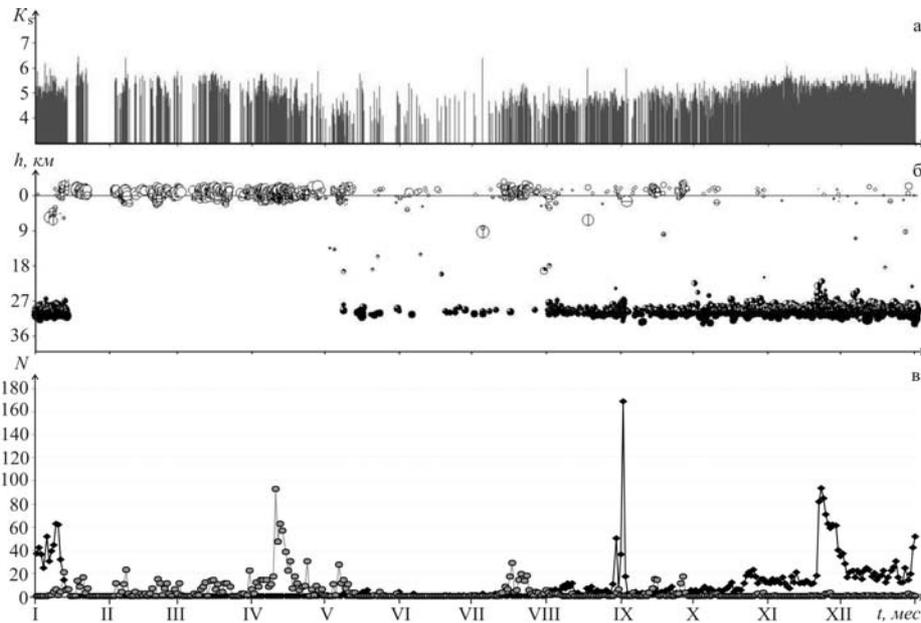


Рис. 7. Изменение во времени энергетического класса  $K_S$  (а), глубины гипоцентров  $h$  (б), ежесуточного числа землетрясений (в) [поверхностных (серый цвет) и глубоких (черный цвет)], произошедших в радиусе 7 км от влк. Ключевской

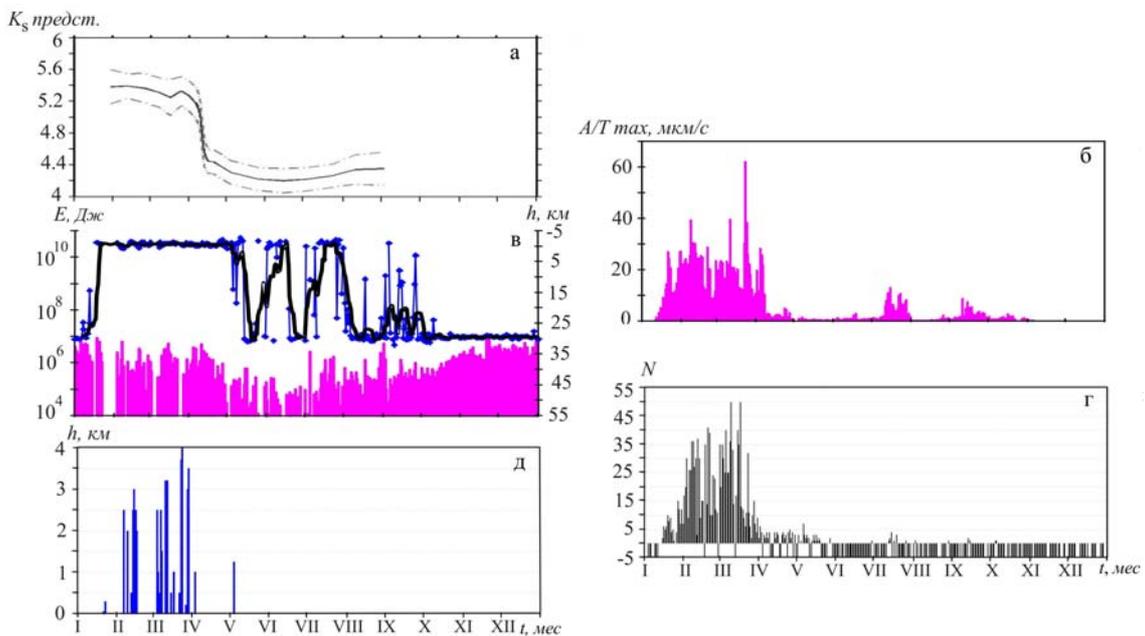


Рис. 8. Изменение во времени для территории вокруг ( $R=7$  км) Ключевского вулкана значений  $K_{S\min} \pm \delta K$  поверхностных землетрясений (а); максимальной амплитуды скорости вулканического дрожания на станции «Цирк» (б); параметров ( $E, h$ ) центра выделенной сейсмической энергии с осреднением  $h$  (сплошная линия) в скользящем окне по семи точкам с шагом  $\Delta=1$  (в); размера термальной аномалии в пикселях, где отсутствие данных (вулкан закрыт облачностью) отмечено значениями  $<0$  (г); высоты газо-пепловых выбросов над кратером по видеоданным и визуальным наблюдениям сотрудников сейсмической станции «Ключи» (д)

В 2005 г. влк. Ключевской находился в стадии вершинного извержения с января по апрель. Можно считать, что сейсмическая активизация перед этим извержением началась с середины сентября 2004 г. с роев землетрясений на глубине 30 км под вулканом [30]. Число событий постепенно увеличивалось, и 12 октября 2004 г. было зарегистрировано 204 землетрясения – максимум за этот период. В дальнейшем число землетрясений в рое снизилось до фонового уровня [30]. С 29 ноября 2004 г. по 10 января 2005 г. число глубоких землетрясений вновь постепенно увеличилось до 60 событий в сутки (рис. 7 в). С 11 января начали регистрироваться землетрясения с глубины 5 км и выше (рис. 7. в), а также землетрясения IV типа – поверхностные вулканические события, для которых характерны относительно большие периоды продольных волн и интенсивные поверхностные волны. Вступления поперечных волн в таких землетрясениях выделить невозможно. С увеличением числа поверхностных событий число глубоких землетрясений резко уменьшилось. Также 11 января было зафиксировано появление вулканического дрожания (рис. 8 б).

На рис. 8 в представлено изменение параметров центра выделенной сейсмической энергии (ЦВСЭ) [31]. Он определялся за выбранные сутки как одно эквивалентное землетрясение с координатами очага, вычисленными как среднее из координат землетрясений, зарегистрированных за эти сутки во всем изучаемом пространственном объеме с учетом веса, пропорционального энергии событий. Энергия этого эквивалентного землетрясения равна сумме энергий выбранных событий. Подъем ЦВСЭ, появление и усиление вулканического дрожания, а также наличие на спутниковых снимках термальной аномалии в кратере влк. Ключевской (рис. 8 г) свидетельствовали о приближении возможного извержения. Успешный прогноз времени и масштаба развития активизации вулкана (ожидалось эксплозивно-эффузивное извержение из центрального кратера с высотой пепловых выбросов до 10 км над уровнем моря с возможным излиянием лавового потока длиной до нескольких километров) был сделан 17 января 2005 г. и передан в Камчатское отделение Федерального центра прогноза землетрясений (КамОФЦПЗ) [30]. Извержение продолжалось более двух месяцев с излиянием лавовых потоков по северо-западному склону до отметки 2300 м над уровнем моря и пепловыми выбросами на высоту до 4 км над кратером ([http://www.kscnet.ru/ivs/volcanoes/inform\\_messages/index.html](http://www.kscnet.ru/ivs/volcanoes/inform_messages/index.html)) (рис. 8 д).

К сожалению, большую часть года (начиная с июня) вулкан был закрыт облачностью, и данных о термальных аномалиях не было. Отсутствовали также данные визуальных наблюдений. Наиболее информативным в этом случае оказался спутниковый мониторинг: снимок с пепловым шлейфом от влк. Ключевской представлен на рис. 9.

Сейсмичность начала снижаться с 17 апреля [30] и к 29 апреля ее уровень стал близок к фоновому (рис. 7 в).

**Вулкан Безымянный** – координаты вершины: 55°58' N, 160°35' E; абсолютная высота вулкана  $h_v=2869$  м. Ближайшие телеметрические станции «Логоинов» и «Зеленая», способные регистрировать землетрясения с  $K_S \geq 3.6$ , расположены в 13.5 км от кратера вулкана (рис. 1, 2 а). В 2005 г. в радиусе 6 км от вулкана было локализовано 228 землетрясений на глубинах  $h=2-13.9$  км [8]. Землетрясение с максимальным классом  $K_S=6.9$  произошло 10 января в 20<sup>h</sup>46<sup>m</sup> на глубине  $h=-0.7$  км. Уровень надежной регистрации, рассчитанный по программе ZMAP, соответствует  $K_{\min}=3.8$ , угол наклона графика повторяемости –  $\gamma=0.63 \pm 0.04$ .

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 [32]. В течение 2005 г. влк. Безымянный извергался два раза: в январе и ноябре. При-

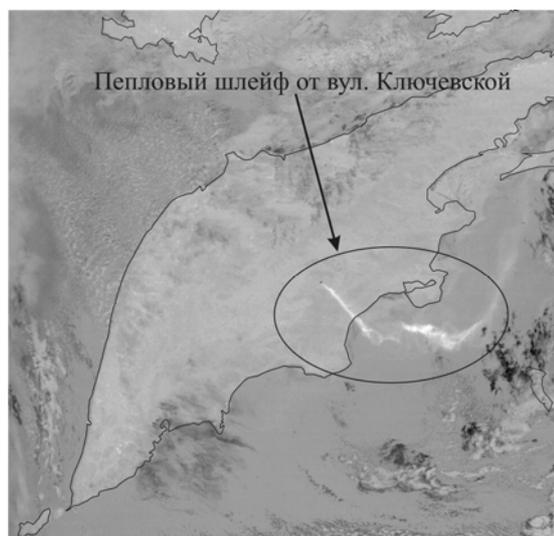
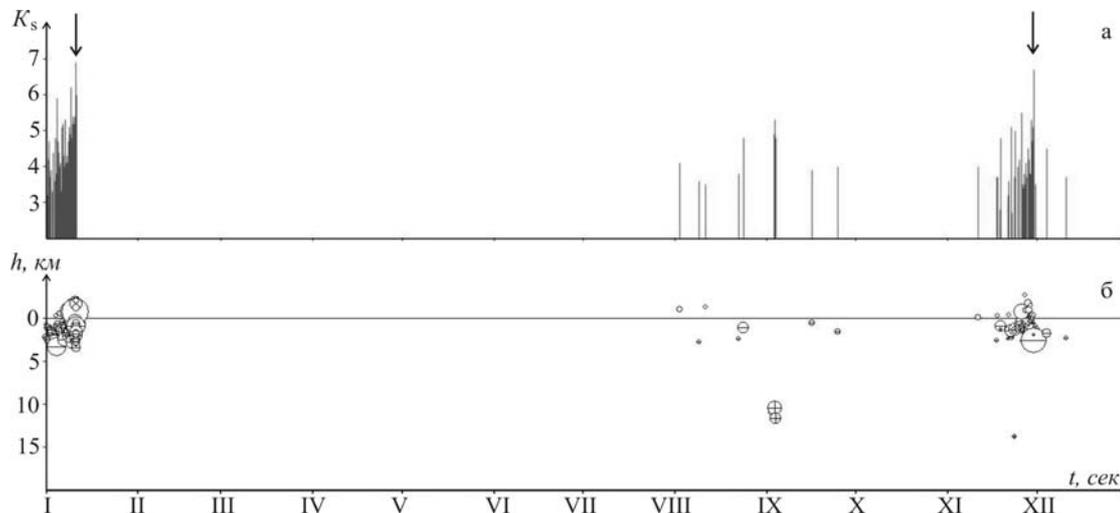


Рис. 9. Спутниковый снимок 17 марта в 10<sup>h</sup>30<sup>m</sup> с пепловым шлейфом (белого цвета) от извержения влк. Ключевской

знаки сейсмической активизации перед январским извержением вулкана были зафиксированы 25 декабря 2004 г., когда были локализованы первые землетрясения и сейсмичность превысила фоновый уровень [33]. В дальнейшем наблюдался рост числа и энергии поверхностных землетрясений (рис. 10). Сейсмическая активность достигла своего максимума 10 января, когда за одни сутки произошло 45 землетрясений. 11 января было зарегистрировано 29 событий, последнее из которых было зафиксировано в 05<sup>h</sup>47<sup>m</sup>. Далее активность резко снизилась [30].



**Рис. 10.** Изменение во времени энергетического класса  $K_s$  (а) и глубины гипоцентров  $h$  (б) вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 6 км от влк. Безымянный в 2005 г. (стрелками обозначены моменты эксплозивных извержений вулкана)

Сотрудниками лаборатории ИСВА был сделан краткосрочный прогноз масштабов и времени эксплозивного извержения. Извержение ожидалось в период с 11 по 17 января, продолжительностью от нескольких часов до нескольких суток, с пепловыми выбросами высотой  $h=6-10$  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. Документ о прогнозе был передан в КамОФЦПЗ 10 января, и прогноз был признан успешным [32]. По сейсмическим данным взрывное извержение произошло 11 января с 08<sup>h</sup>02<sup>m</sup> до 08<sup>h</sup>45<sup>m</sup>. В этот период на станции «Зеленая» было зарегистрировано землетрясение с максимальной амплитудой 17.1 мкм/с, вероятно, сопровождавшее эксплозивное извержение с возможной высотой газопепловых выбросов до 8–10 км над уровнем моря. К сожалению, визуальные наблюдения в этот момент были невозможны из-за темного времени суток и плохих погодных условий (пурга). Однако по спутниковым данным оказалось возможным проследить распространение пеплового облака на высоте 7–9 км над уровнем моря на расстоянии более 350 км в юго-западном направлении (рис. 11).

Вторая сейсмическая активизация влк. Безымянный началась 18 ноября, когда в окрестности вулкана был зафиксирован небольшой рой поверхностных землетрясений, который продолжался до 30 ноября. Максимум активности был зафиксирован 29 ноября, в этот день произошло 19 событий [8] (рис. 10). Согласно алгоритму прогноза извержений влк. Безымянный [32] сотрудниками лаборатории ИСВА был дан краткосрочный прогноз времени и масштаба извержения. Начало извержения



**Рис. 11.** Распространение пеплового облака от извержения влк. Безымянный (на спутниковом снимке NOAA17 от 11 января в 11<sup>h</sup>54<sup>m</sup>)

ожидалось с 28 ноября по 4 декабря, а ожидаемые масштабы были аналогичны январскому извержению, так как подготовка к извержению проходила по типичному сценарию. Документ о прогнозе был своевременно передан в КамОФЦПЗ, и прогноз был признан успешным [32]. По сейсмическим данным эксплозивное извержение произошло 30 ноября с 12<sup>h</sup>00<sup>m</sup> до 13<sup>h</sup>15<sup>m</sup>, когда на станции «Зеленая» было зарегистрировано сейсмическое событие с максимальной амплитудой 7.3 мкм/с. К сожалению, и для этого извержения отсутствуют визуальные наблюдения, поскольку оно произошло в темное время суток. Но спутниковые данные позволили проследить распространение пеплового облака на высоте 6 км над уровнем моря на расстояние более 400 км в западном направлении.

**Вулкан Плоский Толбачик** – координаты вершины: 55°49' N, 160°22' E; абсолютная высота вулкана  $h_v=3085$  м. Ближайшая телеметрическая станция «Каменистая» расположена в 10 км от кратера вулкана и регистрирует землетрясения с  $K_S \geq 3.3$ . Теоретический уровень надежной регистрации по трем станциям соответствует  $K_{\min}=5.0$ . В 2005 г. в радиусе 20 км от вулкана было локализовано 88 землетрясений на глубине  $h=0.4-24.7$  км [8]. Событие с максимальным классом  $K_S=9.8$  произошло 9 мая в 10<sup>h</sup>55<sup>m</sup> на глубине  $h=11.9$  км. Уровень  $K_{\min}$ , снятый с графика повторяемости, составил 4.2, угол наклона графика повторяемости –  $\gamma=0.44 \pm 0.06$ . Для периода 2000–2004 гг. наклон графика повторяемости составил  $\gamma=0.50 \pm 0.03$ .

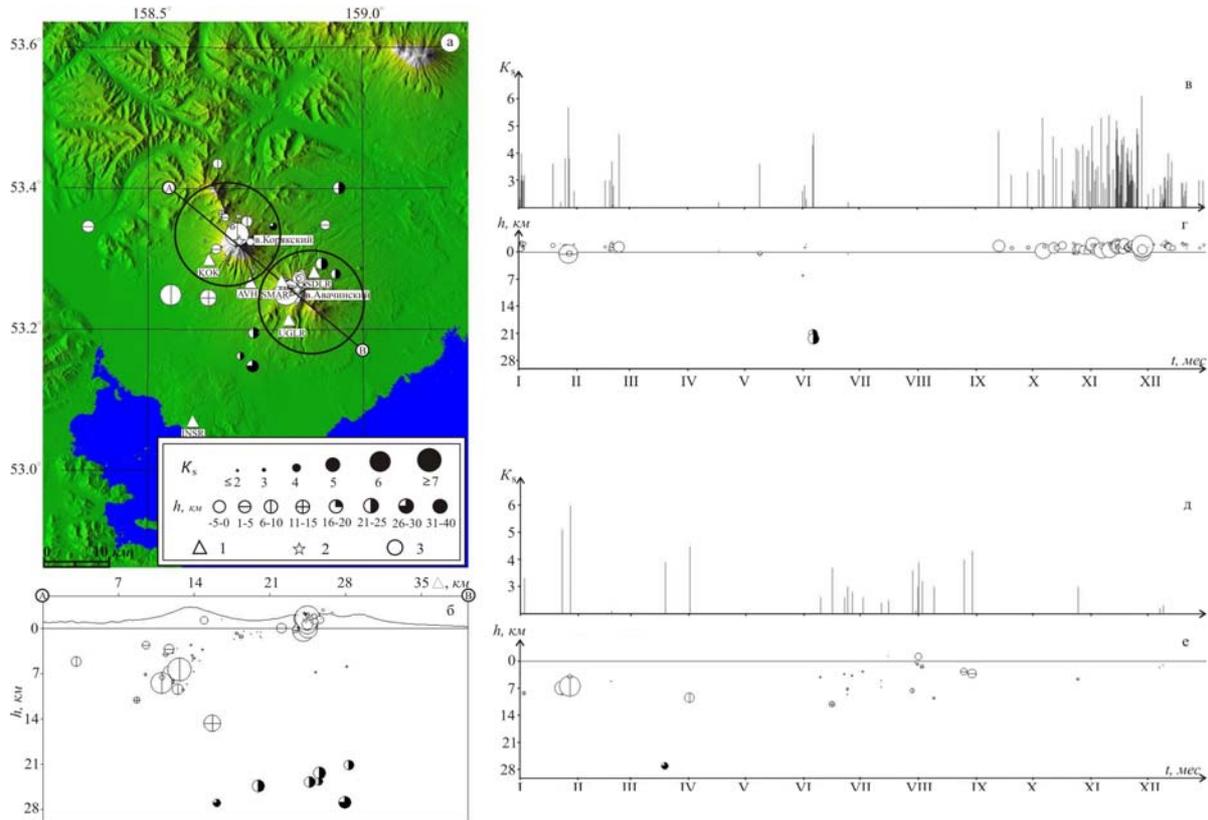
На рис. 2 дана карта эпицентров и проекция гипоцентров на вертикальный разрез. На протяжении 2005 г. в районе влк. Плоский Толбачик наблюдалась «обычная, фоновая» сейсмичность. По данным инфракрасных снимков со спутников NOAA16 и NOAA17, в 2005 г. продолжала наблюдаться термальная аномалия в районе лавового потока второго конуса северного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения 1975 г.

**Вулканы Ушковский и Крестовский** образуют единый вулканический массив, осложненный вершинной кальдерой. Этот массив рассечен глубокими ледниковыми ущельями и эрозионными долинами. Вулкан Крестовский – координаты вершины: 56°07'N, 160°30'E, абсолютная высота вулкана  $h_v=4108$  м; Ушковский – координаты вершины: 56°04'N, 160°28'E; абсолютная высота вулкана  $h_v=3943$  м. Ближайшие телеметрические станции – «Крестовский» и «Логинов» – расположены в 12 км от вершины Крестовского и регистрируют землетрясения с  $K_S \geq 3.5$ . Теоретический уровень надежной регистрации по трем станциям составил  $K_{\min}=4.5$ . Сеть позволяет локализовать землетрясения с занесением в каталог, начиная с минимального значения  $K_S=3.6$ . В 2005 г. в пределах окружности радиусом 10.1 км, включающей оба вулкана (рис. 2), было локализовано 88 землетрясений на глубине  $-3.3 \leq h \leq 19.4$  км [8]. Событие с максимальным классом  $K_S=5.8$  произошло 10 января в 19<sup>h</sup>01<sup>m</sup> на глубине  $h=2.2$  км. Карта эпицентров и проекция гипоцентров на вертикальный разрез дана на рис. 2.

В 2005 г. сейсмичность района вулканов Крестовский и Ушковский была фоновой и никаких проявлений вулканической активности, а также термальных аномалий на снимках из космоса отмечено не было.

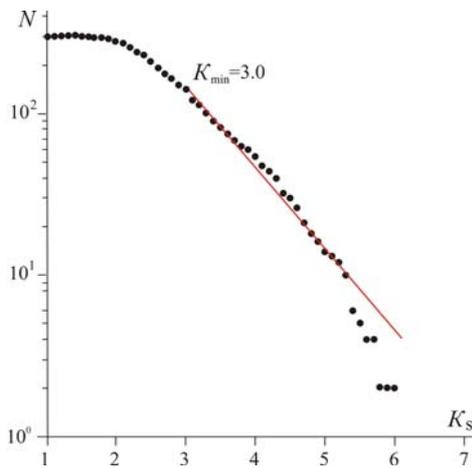
**Авачинская группа вулканов (№ 2).** В Авачинскую группу вулканов входят два действующих вулкана: Авачинский и Корякский. Из всех вулканов они представляют наибольшую потенциальную опасность, так как расположены в 30 км от наиболее густонаселенных городов Камчатки: Петропавловск-Камчатский и Елизово.

**Вулкан Авачинский** – координаты вершины: 53°15'N, 158°50'E, абсолютная высота вулкана  $h_v=2741$  м, диаметр кратера около 350 м. Координаты вершины влк. Корякский: 53°19' N, 158°43' E; абсолютная высота вулкана  $h_v=3456$  м. Координаты гипоцентров землетрясений вблизи Корякского и Авачинского вулканов рассчитывались, как и в предшествующие годы, по программе Ю.Ю. Мельникова [17] с использованием двух разных одномерных скоростных моделей среды [11, 16]. Для сейсмических событий, расположенных вне этих вулканов (за пределами окружностей на рис. 12), использовался в расчетах обычный региональный годограф [34]. Карта эпицентров и проекция гипоцентров землетрясений на вертикальный разрез даны на рис. 12. Весь район № 2, изображенный на рис. 1, по теоретическим расчетам является областью надежной регистрации для событий с  $K_{\min} \geq 4.0$ . Уровень надежной регистрации, рассчитанный по программе ZMAP, составил  $K_{\min}=3.0$  (рис. 13), угол наклона графика повторяемости  $\gamma=0.50 \pm 0.05$ . В 2004 г. угол наклона был равен  $\gamma=0.60$ , а среднее значение  $\gamma$ , рассчитанное для 2000–2004 гг., составило  $\gamma=0.45$ .



**Рис. 12.** 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 2005 г.

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



**Рис. 13.** График повторяемости землетрясений вблизи Авачинской группы вулканов за 2005 г.

Каталог землетрясений Авачинской группы за 2005 г. [9] содержит 294 землетрясения с  $K_S=1.6-6.1$ , из них 244 в районе влк. Авачинский, 33 – влк. Корякский, 17 – расположено вне вулканических построек. Распределение землетрясений по вулканам и по классам представлено в табл. 2. В графе «Примечание» каталога [9] указана принадлежность землетрясения к сейсмоактивной зоне вулкана, выделенной соответствующей окружностью на рис. 12. Максимальное землетрясение с  $K_S=6.1$  произошло 28 ноября в 11<sup>h</sup>58<sup>m</sup> на влк. Авачинский. На рис. 12 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 [9], составила  $\Sigma E=6.355 \cdot 10^6$  Дж.

В 2005 г. на влк. Авачинский наблюдался один период сейсмической активизации. Со второй половины сентября начали регистрироваться землетрясения в постройке вулкана. Происходил постепенный рост числа и энергии землетрясений. Максимум сейсмической активности пришелся на 20–23 ноября. В этот период в каталог было занесено 75 землетрясений с  $K_S=1.8-4.2$ . Кроме этого, регистрировалось большое число слабых землетрясений: до 350 событий за сутки на станции «Сомма». Такого всплеска микросейсмичности не отмечалось, начиная с 1994 г. По данным визуальных наблюдений и снимкам из кос-

моса, усиления активности вулкана отмечено не было. В 2005 г. угол наклона графика повторяемости землетрясений Авачинского вулкана не изменился, с таковым в 2004 г., и составил  $\gamma=0.48\pm 0.03$ , для периода 2000–2004 гг. –  $\gamma=0.55$ . Во время сейсмической активизации на вулкане наблюдалась слабая термальная аномалия.

**Таблица 2.** Распределение землетрясений в районе № 2 по энергетическим классам  $K_S$  в 2005 г.

Название вулкана	$R_{зоны},$ км	$K_S$					$N_{\Sigma}$	$\Sigma E,$ $10^6$ Дж
		2	3	4	5	6		
Авачинский	8	84	103	39	16	2	244	4.305
Корякский	8	14	11	6	1	1	33	1.219
Вне вулканов		7	1	5	3	1	17	0.831
Всего		105	115	50	20	4	294	6.355

На **Корякском вулкане** в 2005 г. наблюдалась фоновая сейсмичность. По визуальным данным и по спутниковым наблюдениям никаких проявлений вулканической активности отмечено не было. Для землетрясений, принадлежащих Корякскому вулкану, угол наклона графика повторяемости в 2005 г. равен 0.50, для периода 2000–2004 гг. он имеет такое же значение.

### Л и т е р а т у р а

1. **Действующие вулканы Камчатки** / Под ред. Федотова С.А., Масуренкова Ю.П. – М.: Наука, 1991.. – С. 5–11.
2. **Кириянов В.Ю.** Вулканические пеплы Камчатки как источник потенциальной вулканической опасности для пассажирских авиалиний // Вулканология и сейсмология. – 1992. – № 3. – С. 16–36.
3. **Кириянов В.Ю., Чубарова О.С., Сеников 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. **Левина В.И., Чебров В.Н.** Камчатка и Командорские острова // Землетрясения России в 2005 году. – Обнинск: ГС РАН, 2007. – С. 38–43.
5. **Старовойт О.Е., Мишаткин В.Н.** Сейсмические станции Российской академии наук (состояние на 2001 г.) – Обнинск: ГС РАН, 2001. – 86 с.
6. **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.
7. **Федотов С.А.** Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. – М.: Наука, 1972. – 117 с.
8. **Нуждина И.Н. (отв. сост.), Дрознина С.Я., Кожевникова Т.Ю., Толочнова С.Л.** Каталог землетрясений Северной группы вулканов за 2005 год ( $N=4898$ ). (См. Приложение к наст. сб. на CD).
9. **Нуждина И.Н. (отв. сост.), Дрознина С.Я., Кожевникова Т.Ю., Толочнова С.Л.** Каталог землетрясений Авачинской группы вулканов за 2005 год ( $N=294$ ). (См. Приложение к наст. сб. на CD).
10. **Детальные сейсмологические исследования Камчатки и Командорских островов** (Отчет КОМСП ГС РАН за 1998 г.) – Петропавловск-Камчатский, 1999. – 259 с.
11. **Сеников 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.
12. **Сеников 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.
13. **Сеников 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.
14. **Сеников 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.

15. **Сеньюков С.Л., Гарбузова В.Т., Дрознина С.Я., Нуждина И.Н., Кожевникова Т.Ю., Толокнова С.Л.** Сейсмический мониторинг вулканов Камчатки // Землетрясения Северной Евразии в 2003 году. – Обнинск: ГС РАН, 2008. – С. 382–395.
16. **Сеньюков С.Л.** Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений в 2000–2004 гг. // Вулканология и сейсмология. – 2006. – № 3. – С. 68–78.
17. **Мельников Ю.Ю.** Пакет программ для определения координат гипоцентров землетрясений Камчатки на ЭВМ // Вулканология и сейсмология. – 1990. – № 5. – С. 103–112.
18. **Токарев П.И.** Вулканические землетрясения Камчатки. – М.: Наука, 1981. – 164 с.
19. **Сеньюков С.Л., Нуждина И.Н., Дрознина С.Я., Гарбузова В.Т., Кожевникова Т.Ю.** Вулканы Камчатки // Землетрясения Северной Евразии, 2004 год. – Обнинск: ГС РАН, 2010. – С. 395–408.
20. **Weimer S.** A software package to analyze seismicity: ZMAP // Seism. Res. Lett. – 2001. – 72 – N 2. – P. 374–383.
21. **Сеньюков С.Л., Дрознина С.Я., Гарбузова В.Т., Нуждина И.Н., Дрознин Д.В., Кожевникова Т.Ю.** Исследования активности вулканов Шивелуч и Безымянный в 2000–2003 гг. дистанционными средствами наблюдений // Комплексные сейсмологические и геофизические наблюдения на Камчатке. – Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2004. – С. 301–318.
22. **Жаринов Н.А., Демянчук Ю.В.** Рост экструзивного купола вулкана Шивелуч (Камчатка) в 1980–2007 гг. по геодезическим наблюдениям и видеосъемке // Вулканология и сейсмология. – 2008. – № 4. – С. 3–13.
23. **Федотов С.А., Двигало В.Н., Жаринов Н.А., Иванов В.В., Селиверстов Н.И., Хубуная С.А., Демянчук Ю.В., Марков И.А., Осипенко Л.Г., Смелов Н.П.** Извержение вулкана Шивелуч в мае-июле 2001 г. // Вулканология и сейсмология. – 2001. – № 6. – С. 3–15.
24. **Озеров А.Ю., Демянчук Ю.В.** Пароксизмальное извержение вулкана Молодой Шивелуч 10 мая 2004 г. // Вулканология и сейсмология. – 2004. – № 5. – С. 75–80.
25. **Potts R.J., Ebert E.E.** On the detection of volcanic ash in NOAA AVHRR infrared satellite imagery // 8<sup>th</sup> Australasian Remote Sensing Conference. – Canberra: Committee of the 8<sup>th</sup> Australian Remote Sensing Conference, 1996. – P. 25–29.
26. **Сеньюков С.Л., Дрознина С.Я., Дрознин Д.В.** Опыт выделения пепловых выбросов и оценка их высоты по сейсмическим данным на примере вулкана Шивелуч (Камчатка) // Комплексные сейсмологические и геофизические наблюдения на Камчатке. – Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2004. – С. 292–300.
27. **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.
28. **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», том I. – Петропавловск-Камчатский, 2008. – С. 120–125.
29. **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.
30. **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.
31. **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.
32. **Сеньюков 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», 11–17 ноября 2007 г. – Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2008. – С. 59–63.
33. **Соболевская О.В., Сеньюков С.Л.** Ретроспективный анализ изменения температуры термальной аномалии на вулкане Безымянный в 2002–2007 гг., как предвестника его извержений, по данным сенсора AVHRR спутников NOAA 16 и 17 // Вестник КРАУНЦ. – Науки о Земле. – 2008. – С. 147–157.
34. **Кузин Т.П.** Фокальная зона и строение верхней мантии в районе Восточной Камчатки. – М.: Наука, 1974. – 132 с.