

IV. СЕЙСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ВУЛКАНОВ

УДК 550.348.438(517.66)

ВУЛКАНЫ КАМЧАТКИ

**С.Л. Сеников, В.Т. Гарбузова, С.Я. Дрозина, И.Н. Нуждина,
Т.Ю. Кожевникова, С.Л. Толокнова**

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

По современным представлениям на Камчатке выделено 29 действующих вулканов (рис. 1) [1]. Их мониторинг проводится с целью своевременного предупреждения населения и административных органов о возможности их извержения, для уменьшения последствий катастрофических событий и обеспечения безопасности авиаполетов в районе п-ва Камчатка [1–3].

С февраля 2000 г. оценка состояния вулканов делается ежедневно с публикацией информации в Интернете (<http://emsd.iks.ru/~ssl/monitoring/main.htm>) по данным следующих наблюдений:

- сейсмический мониторинг по данным радиотелеметрических сейсмических станций в режиме, близком к реальному времени;
- визуальные и видеонаблюдения (в 2002 г. две видеосистемы наблюдали за вулканами Ключевской и Шивелуч);
- спутниковый мониторинг термальных аномалий и пепловых выбросов. Результаты спутникового мониторинга сенсора AVHRR спутника NOAA12 в 2002 г. предоставлялись Аляскинской вулканологической обсерваторией в рамках международного проекта (KVERT) по безопасности авиаполетов. Начиная с сентября 2002 г. лаборатория ИСВА Камчатского филиала Геофизической службы (КФГС) начала самостоятельно обрабатывать данные сенсора AVHRR спутника NOAA16. Прием данных осуществлял Камчатский центр связи и мониторинга.

Наиболее информативны и надежны наблюдения за сейсмической активностью. Их качество не зависит от погодных условий, а высокая информативность доказана многочисленными исследованиями как на Камчатке, так и в мире.

Сеть сейсмических станций в вулканических районах представлена на рис. 1 (изолиниями показаны расчетные контуры надежной регистрации землетрясений разных классов), а ее характеристика дана в [4]. В 2002 г. она не изменилась, по сравнению с таковой в 2001 г. [5], и позволяла проводить сейсмический мониторинг вулканов в реальном режиме времени с разной степенью детальности. 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 Шивелуч, Карымский, Горелый работало только по одной станции, поэтому слабые близкие землетрясения лишь фиксировались, но не локализовывались. Для остальных вулканов регистрировались только относительно сильные ($K_S \geq 7$) сейсмические события по удаленным станциям. Здесь K_S – энергетический класс землетрясений $K_{S1,2}^{\Phi 68}$, определяемый по номограмме С.А. Федотова [6], для пересчета которого в локальную магнитуду, приведенную в обоих каталогах вулканических землетрясений [7, 8], использована формула А.А. Гусева

$$M_L = K_S/2 - 0.75 \text{ [9].}$$

В 2002 г. применялись такие же методы обработки сейсмических данных, как и в 1999–2001 гг. [10, 11]. Определение кинематических параметров землетрясений в вулканических районах выполнялось на основе одномерных скоростных моделей [10, 12] с помощью программы Ю.Ю. Мельникова [13]. Ниже приведены данные о сейсмической активности в 2002 г. в районах

Северной и Авачинской групп вулканов (рис. 1, районы № 1, 2). При этом используется только Гринвичское время, которое отличается от местного времени на 12^h зимой и на 13^h – летом.

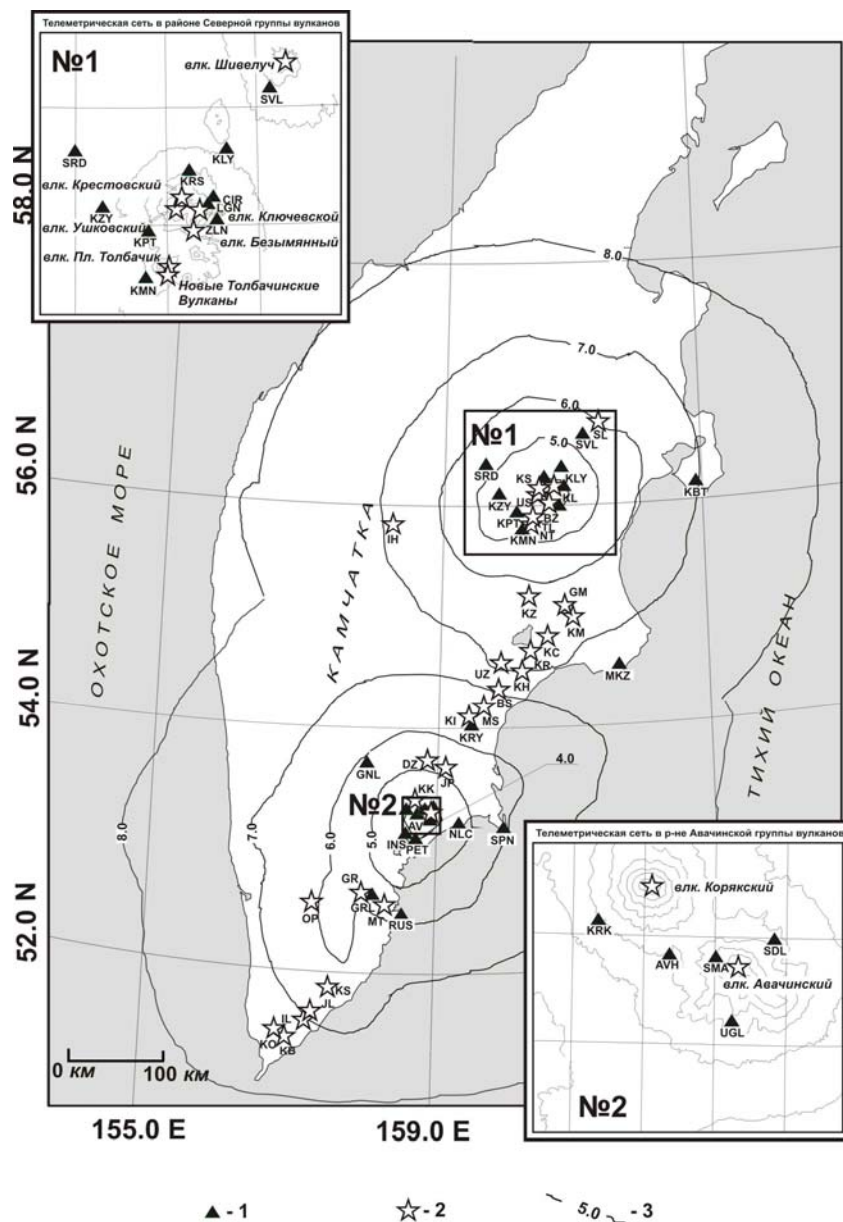


Рис. 1. Карта активных вулканов Камчатки, радиотелеметрических станций и изолинии энергетической представительности K_{min}

1 – телеметрическая сейсмическая станция; 2 – вулкан; 3 – изолиния K_{min} .

Код и название вулканов: SL – Шивелуч, KL – Ключевой, US – Ушковский, BZ – Безымянный, TL – Плоский Толбачик, NT – Новые Толбачинские вулканы, ИИ – Ичинский, КЗ – Кизимен, GM – Гамчен, KM – Комарова, КС – Кроноцкий, KR – Крашенинникова, КН – Кихпинич, UZ – Узон, BS – Большой Семячик, MS – Малый Семячик, KI – Карымский, DZ – Дзензур, JP – Жупановский, КК – Корякский, AV – Авачинский, GR – Горелый, MT – Мутновский, OP – Опала, KS – Ксудач, JL – Желтовский, IL – Ильинский, КО – Кошелевский, KB – Камбальный.

Код и название телеметрических станций: SVL – «Шивелуч», KLY – «Ключи», SRD – «Срединный», KRS – «Крестовский», PDK – «Подкова», CIR – «Цирк», LGN – «Логинов», KPT – «Копыто», KZY – «Козыревск», ZLN – «Зеленая», KMN – «Каменистая», KRK – «Коряка», AVH – «Авача», SDL – «Седловина», SMA – «Сомма», UGL – «Угловая».

На врезках показаны районы Северной (№ 1) и Авачинской (№ 2) групп вулканов.

Сейсмичность Северной группы вулканов (№ 1, рис. 2). Записи землетрясений в районах вулканов отличаются от тектонических землетрясений большим разнообразием. Согласно классификации П.И. Токарева [14], все вулканические землетрясения делятся на пять типов (I–V).

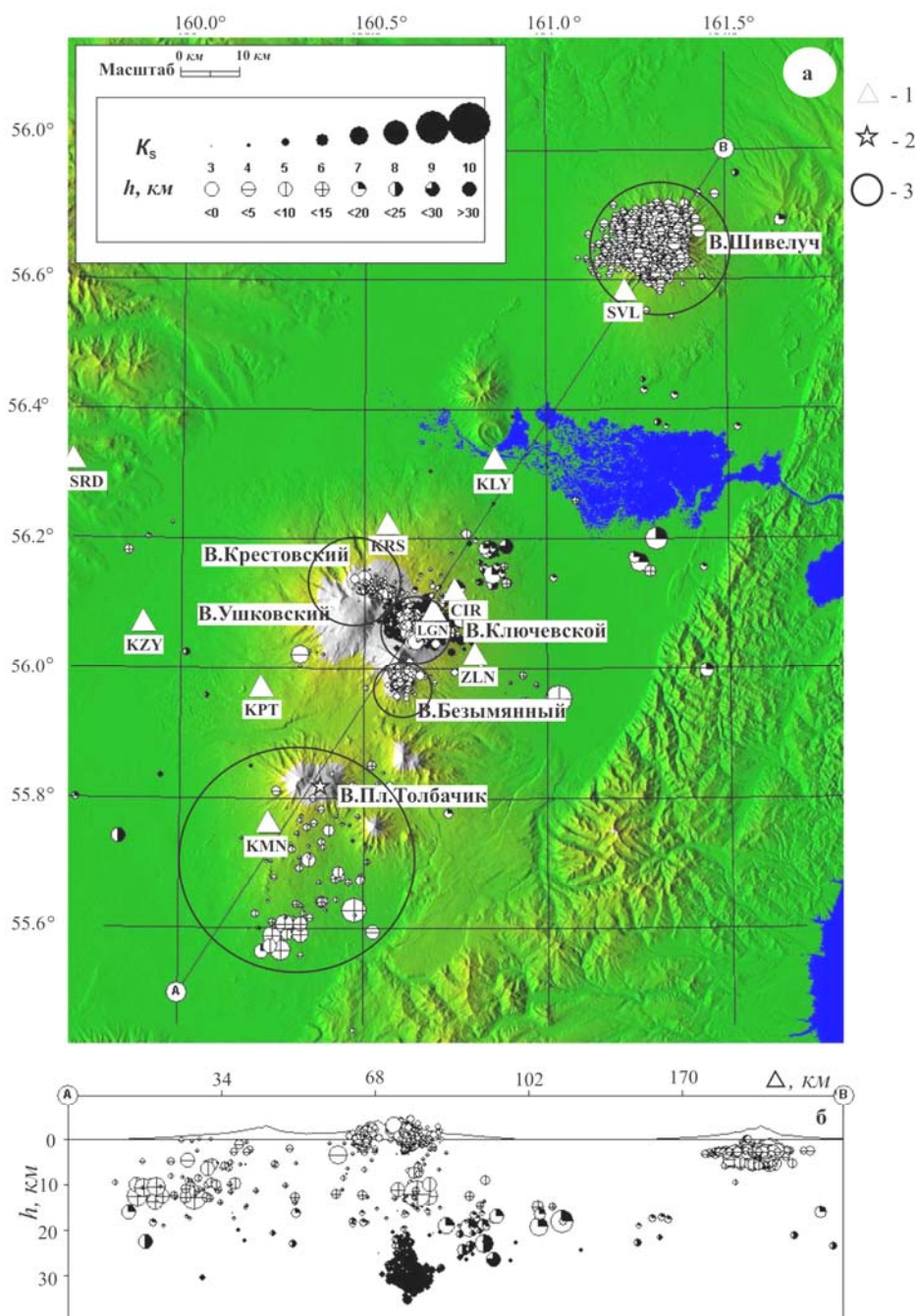


Рис. 2. Карта эпицентров (а) и вертикальный разрез вдоль линии А–В (б) для землетрясений района № 1

1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан; 3 – окружность вокруг вулкана обозначает область выборки землетрясений, для которой построены графики параметров сейсмичности. Радиусы областей равны: Шивелуч – 12 км, Ключевской – 7 км, Крестовский и Ушковский – 10 км, Безымянный – 6 км, Плоский Толбачик – 20 км.

Записи землетрясений I–III типов имеют вступления P - и S -волн и обрабатываются, как правило, стандартно: определяются времена t_p и t_s вступлений P - и S -волн и координаты гипоцентров, максимальные амплитуды A_{\max} и соответствующие периоды T для S -волн, по которым рассчитываются их энергетические классы. Более сильные землетрясения, зарегистрированные тремя и более станциями, локализуются и заносятся в каталог. Каталог, содержащий стандартные кинематические и энергетические параметры за текущий год, ежедневно дополняется и доступен всем пользователям Интернета по адресу: <http://data.emsd.iks.ru/klyquake/index.htm>. 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 велосиграфов измеряется только A_{max}). Для вулканического дрожания (тип V) измеряются амплитуда A_{max} , период T и продолжительность τ цугов колебаний в секундах. Результаты измерений заносят в таблицы и вычисляют производные параметры $(A/T)_{cp}$, $\Sigma A/T$ и др.).

Все землетрясения I–III типов, зарегистрированные тремя и более станциями, включены в каталог [7], содержащий 7111 землетрясений (табл. 1). Минимальный класс $K_S=3.0$ имеют два землетрясения, локализованные 22 мая в 11^h02^m на глубине $h=14.8$ км и 20 июня в 04^h04^m на глубине $h=3.3$ км, максимальный – $K_S=8.4$ и $h=12.1$ км у события 16 июля в 06^h14^m. Отсутствие землетрясений с $K_S>9$ привело к значительному уменьшению суммарной сейсмической энергии, составившей $\Sigma E=1.87 \cdot 10^9$ Дж, что на 2.5 порядка меньше таковой в 2001 г. ($\Sigma E=8.52 \cdot 10^{11}$ Дж [11]). Распределение их по классам дано в табл. 1. График повторяемости (рис. 3) был определен с помощью широко известного в мире пакета программ ZMAP [15], в котором по методу максимального правдоподобия автоматически определяется представительный класс, а потом угол наклона графика повторяемости, которые равны: $K_{S\ min} \geq 4.8$, $\gamma = -1.02$.

Таблица 1. Распределение землетрясений в районе № 1 по энергетическим классам K_S в 2002 г.

| K_S | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | N_Σ | $\Sigma E, Дж$ | γ |
|--------|----|------|------|-----|----|---|---|----|----|----|------------|--------------------|----------|
| $N(K)$ | 31 | 1681 | 4781 | 591 | 22 | 5 | – | – | – | – | 7111 | $1.871 \cdot 10^9$ | 1.02 |

Ниже описаны шесть вулканов (Шивелуч, Ключевской, Безымянный, Плоский Толбачик, Ушковский, Крестовский) Северной группы и два вулкана (Авачинский и Корякский) Авачинской группы по инструментальным и визуальным наблюдениям за 2002 г.

Вулкан Шивелуч – самый северный действующий вулкан Камчатки (координаты активного кратера – 56°38' N, 161°19' E, абсолютная высота нового купола, обнаруженного 12.05.2001 г., составила $h_v \sim 2500$ м). Вулкан находится в 45 км к северо-востоку от пос. Ключи (рис. 2, а). Ближайшая телеметрическая станция «Шивелуч» расположена в 8.5 км от активного кратера вулкана и регистрирует землетрясения с $K_S \geq 3.1$. Традиционная обработка результатов наблюдений этой станции за 2002 г. представлена в табл. 2. Теоретический уровень надежной регистрации по трем станциям должен был соответствовать классу землетрясений $K_S=5.5$. Но фактически он получился равным $K_{min}=5.0$ в 2002 г. (рис. 4) по программе ZMAP [15].

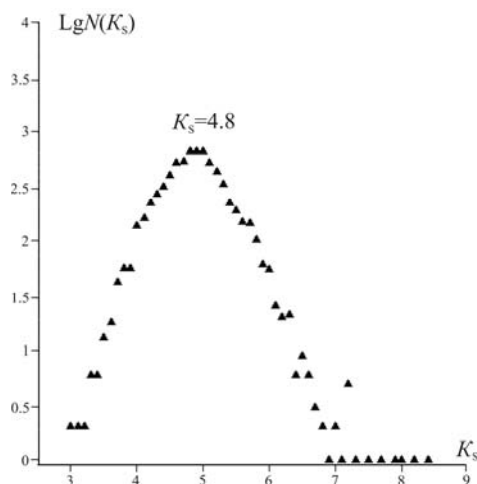


Рис. 3. График повторяемости землетрясений Северной группы вулканов за 2002 г.

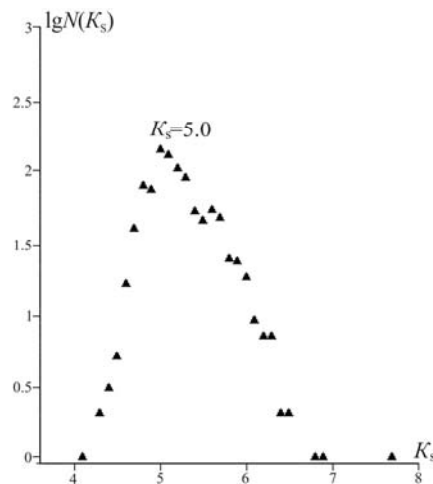


Рис. 4. График повторяемости землетрясений вблизи ($r \leq 12$ км) вулкана Шивелуч за 2002 г.

В 2002 г. на вулкане Шивелуч наблюдалась интенсивная вулканическая деятельность, связанная с продолжением роста нового купола [16]. Рост нового купола сопровождался высокой сейсмической активностью (рис. 2 и 5). В течение всего года наблюдалась термальная аномалия, свидетельствующая о постоянном выходе на поверхность горячего магматического материала (рис. 6, б). На рис. 6, а представлены данные о газо-пепловых выбросах. При от-

сутствии видимости предположение о возможности газо-пеплового выброса делалось на основании изучения спектральных особенностей сейсмического сигнала, а возможная высота выброса определялась по амплитуде и продолжительности сейсмического сигнала [17]. В течение всего года регистрировалось вулканическое дрожание (рис. б, в).

Таблица 2. Параметры вулканических землетрясений разных типов, записанных вблизи ($\Delta=12$ км) вулкана Шивелуч на одноименной станции «Шивелуч» в 2002 г.

| Месяцы | Типы вулканических землетрясений | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|----------------------------------|------------|--------------|-------------|------------|--------------|-------------|--------------|--------------|-------------------|--------------------|----------------------|------------------------|--------------------|----------------------|------|---------|
| | I | | | II, III | | | IV | | | V | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | Низкочастотные | | | Вулканическое дрожание | | | | |
| | N <0.2 | K_{Smax} | $\Sigma A/T$ | N <0.2 | K_{Smax} | $\Sigma A/T$ | N <0.5 | $\Sigma A/T$ | $\Sigma A/T$ | $\Sigma A/T_{cp}$ | $\Sigma A/T_{max}$ | $\Sigma \tau$, ч | $\Sigma A/T_{cp}$ | $\Sigma A/T_{max}$ | $\Sigma \tau$, ч | | |
| Январь | – | 19 | 6.2 | 13.99 | – | 4399 | 6.8 | 2196.79 | 1656 | 3985 | 3565.04 | 2.81 | 31.57 | 17.91 | 0.18 | 0.6 | 218 |
| Февраль | – | 11 | 6.3 | 17.05 | – | 1350 | 7.8 | 1294.68 | 983 | 2248 | 2064.88 | 1.92 | 48.92 | 52.04 | 0.16 | 3.9 | 318 |
| Март | – | 4 | 6.9 | 11.81 | – | 504 | 7.2 | 499.65 | 1661 | 1114 | 1060.61 | 1.84 | 55.68 | 43.88 | 0.11 | 0.5 | 450.26 |
| Апрель | – | 10 | 4.9 | 11.07 | 10 | 159 | 6.9 | 94.18 | 4210 | 3417 | 1704.23 | 1.34 | 6.5 | 8.91 | 0.1 | 0.42 | 116.33 |
| Май | 4 | 4 | 6.9 | 7.74 | 89 | 278 | 7.2 | 220.93 | 2435 | 2125 | 2040.27 | 1.17 | 5.31 | 6.3 | 0.14 | 0.84 | 228.5 |
| Июнь | – | 6 | 6.8 | 31.23 | – | 304 | 7.4 | 346.78 | 1361 | 2137 | 1924.26 | 1.7 | 55.12 | 40.71 | 0.13 | 1.56 | 279.41 |
| Июль | – | 6 | 5.7 | 11.24 | – | 87 | 7.3 | 104.56 | 447 | 2064 | 3349.08 | 2.23 | 40.64 | 19.68 | 0.39 | 2.28 | 679 |
| Август | – | 8 | 6.4 | 19.54 | – | 1903 | 7.4 | 1155.02 | | 7513 | 16358.62 | 2.93 | 42.03 | 20.19 | 0.41 | 2.06 | 718 |
| Сентябрь | – | 1 | 7.2 | 1.76 | – | 467 | 7.1 | 373.03 | 465 | 2346 | 3715.92 | 2.46 | 49.36 | 23.26 | 0.17 | 0.9 | 230 |
| Октябрь | – | 3 | 7.0 | 7.49 | – | 156 | 7.3 | 164.48 | 1713 | 630 | 459.01 | 2.06 | 58.99 | 17.86 | 0.11 | 0.36 | 145 |
| Ноябрь | – | 5 | 5.3 | 4.44 | – | 146 | 7.4 | 181.21 | 2087 | 669 | 494.85 | 1.93 | 55.86 | 14.81 | 0.1 | 0.24 | 50.93 |
| Декабрь | – | 3 | 6.7 | 5.12 | 4 | 180 | 6.7 | 85.9 | 1808 | 665 | 534.93 | 1.75 | 35.42 | 16.66 | 0.1 | 0.53 | 147.1 |
| Всего | 4 | 80 | | 142.48 | 103 | 9933 | 7.8 | 6717.21 | 18826 | 28913 | 37268.7 | 2.01 | 58.99 | 281.91 | 0.18 | 3.9 | 3580.53 |

Примечание. Здесь и в подобных таблицах ниже N с $A/T < 0.2$ равно числу землетрясений с отношением амплитуды к периоду меньше, чем 0.2, соответственно N с $A/T > 0.2$ – больше чем 0.2.

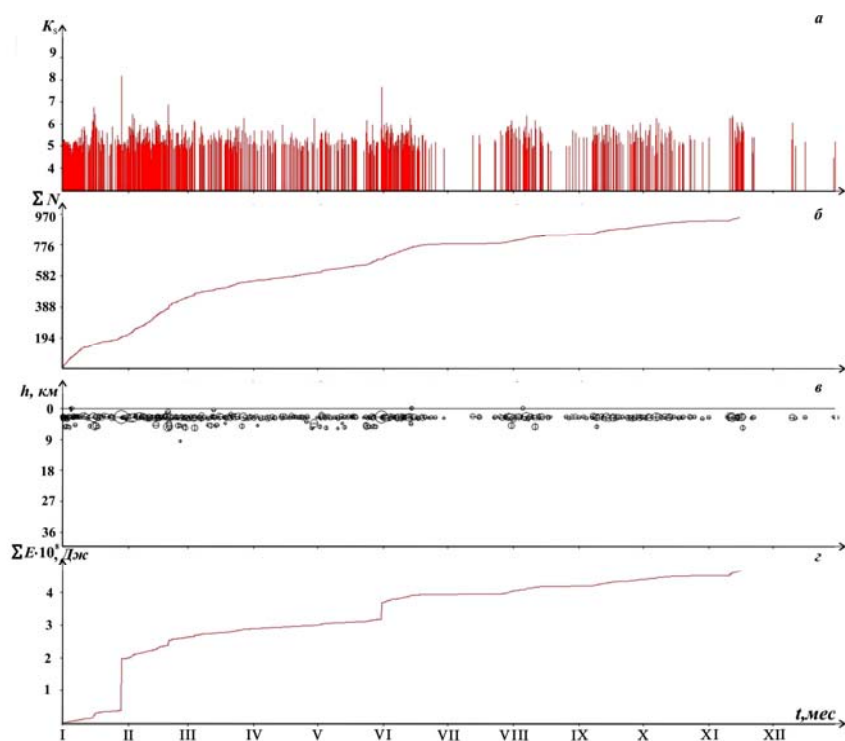


Рис. 5. Изменение во времени энергетического класса K_S (а), кумулятивного числа землетрясений ΣN (б), глубины гипоцентров h (в), кумулятивной сейсмической энергии ΣE (г) совокупности вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 12 км от вулкана Шивелуч в 2002 г.

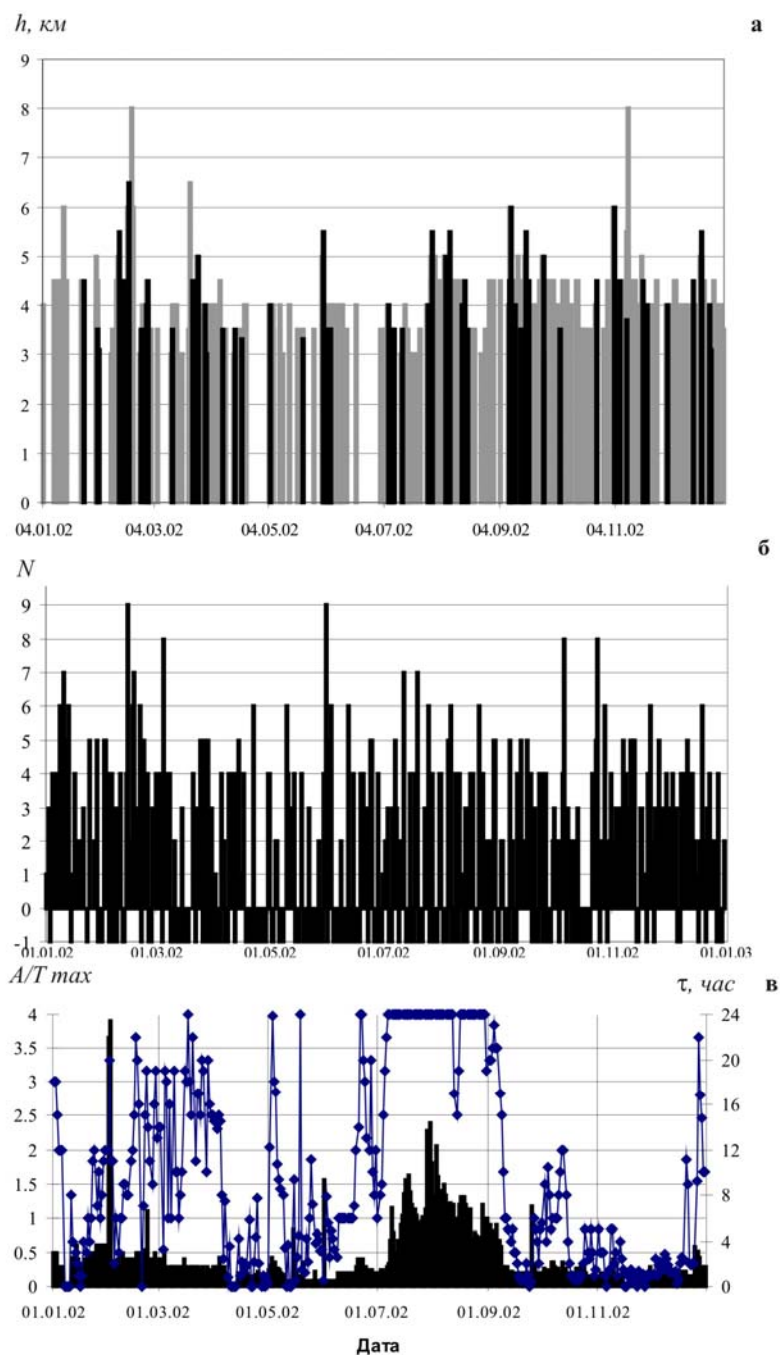


Рис. 6. Графики распределения во времени различных параметров активности вулкана Шивелуч в 2002 г.

а – высота (км) газо-пепловых выбросов по визуальным данным сейсмической станции «Ключи» над уровнем моря; б – число пикселей в термальной аномалии по данным Аляскинской вулканологической обсерватории; в – вулканическое дрожание по станции «Шивелуч».

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 «Логонов», регистрирующая землетрясения с $K_S \geq 2.2$, расположена в 4 км от кратера. Сеть станций позволяет локализовать при благоприятных условиях землетрясения, начиная с $K_S \geq 4.0$, но надежная регистрация получилась равной $K_S \geq 4.8$ (рис. 7). В 2002 г. были определены параметры для более 5000 землетрясений с $K_S \geq 4.0$. Карта эпицентров и проекция гипоцентров на вертикальный разрез представлены на рис. 2, а графики изменения во времени параметров активности вулканов – на рис. 8. Также был выполнен традиционный подсчет землетрясений с разбиением по типам, приведенный в табл. 3.

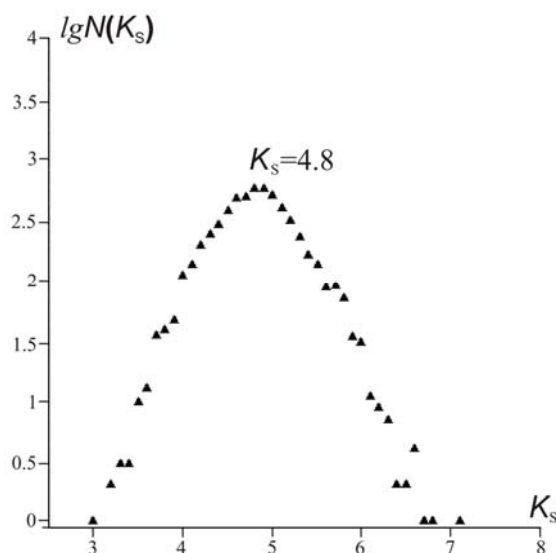


Рис. 7. График повторяемости землетрясений вблизи ($r \leq 7$ км) вулкана Ключевской за 2002 г.

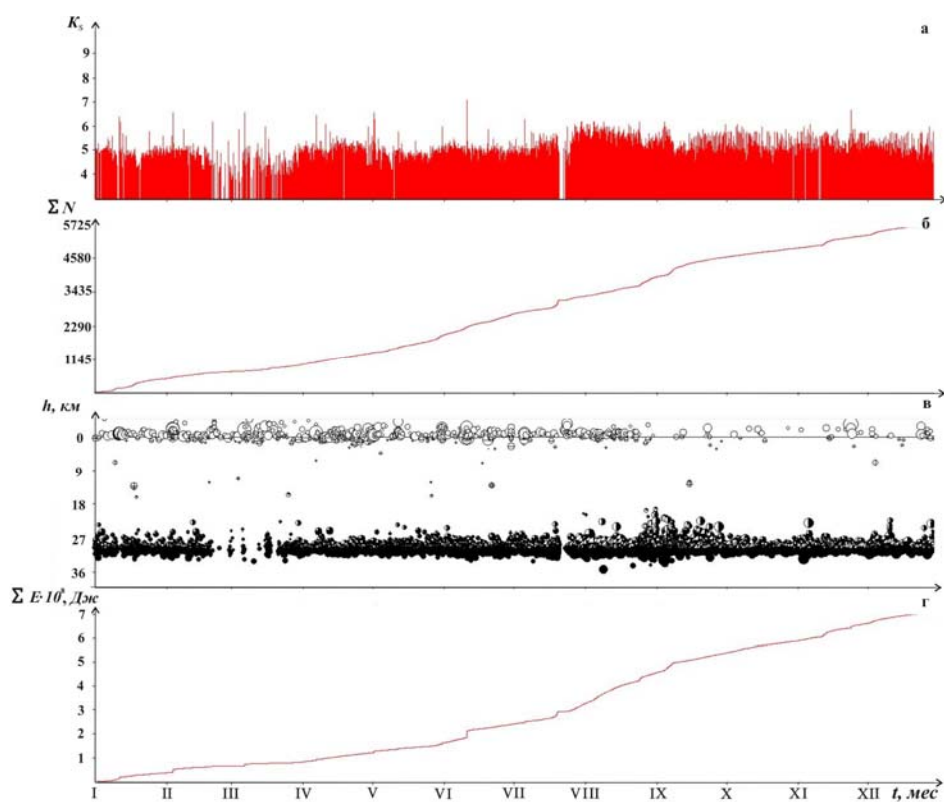


Рис. 8. Изменение во времени энергетического класса K_s (а), кумулятивного числа землетрясений ΣN (б), глубины гипоцентров h (в), кумулятивной сейсмической энергии ΣE (г) совокупности вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 7 км от вулкана Ключевской в 2002 г.

В 2002 г. вулкан Ключевской находился в неспокойном состоянии. Число зарегистрированных землетрясений в 2002 г., по сравнению с таковым в 2001 г., увеличилось в три раза. Практически в течение всего года продолжали происходить события с глубины около 30 км под постройкой вулкана. Число поверхностных событий несколько сократилось к концу года, но в этот период усилилось вулканическое дрожание, амплитуда которого на сейсмической станции «Цирк» достигала величины $1.6 \mu/c$ (рис. 9).

Таблица 3. Параметры вулканических землетрясений разных типов, записанных вблизи ($\Delta=7$ км) вулкана Ключевской на станции «Цирк» в 2002 г.

| Месяцы | Типы вулканических землетрясений | | | | | | | | | | | | V Вулканическое дрожание | | |
|----------|----------------------------------|------|------------|--------------|---------|------|------------|--------------|------|---------|--------------|-------------------|-----------------------------|------------------|--|
| | I | | | | II, III | | | | IV | | | | | | |
| | N | | K_{Smax} | $\Sigma A/T$ | N | | K_{Smax} | $\Sigma A/T$ | N | | $\Sigma A/T$ | $\Sigma A/T_{cp}$ | $\Sigma A/T_{max}$ | $\Sigma \tau, ч$ | |
| | <0.2 | ≥0.2 | | | <0.2 | ≥0.2 | | | <0.5 | ≥0.5 | | | | | |
| Январь | 100 | 508 | 7.3 | 317.02 | 263 | 60 | 7.9 | 150.35 | 2 | 21 | 35.03 | 0.1 | 0.17 | 96.5 | |
| Февраль | 7 | 222 | 6.8 | 144.58 | 228 | 73 | 7.8 | 165.79 | 15 | 51 | 97.05 | 0.09 | 0.35 | 324.5 | |
| Март | 4 | 368 | 7.2 | 248.42 | 151 | 86 | 8.4 | 228.87 | 27 | 142 | 121.08 | 0.1 | 0.15 | 233.0 | |
| Апрель | 18 | 293 | 7.9 | 234.22 | 1725 | 185 | 8.7 | 233.68 | 649 | 77 | 54.47 | 0.09 | 0.38 | 400.51 | |
| Май | 20 | 510 | 7.2 | 307.75 | 339 | 118 | 7.5 | 159.92 | 902 | 119 | 175.66 | 0.11 | 0.45 | 622.68 | |
| Июнь | 2 | 623 | 6.8 | 500.67 | 184 | 95 | 7.7 | 204.03 | 145 | 125 | 178.85 | 0.17 | 1.59 | 713.5 | |
| Июль | 4 | 589 | 7.6 | 628.6 | 200 | 93 | 8.3 | 140.2 | 18 | 48 | 78.54 | 0.11 | 0.35 | 744.0 | |
| Август | – | 598 | 7.3 | 620.17 | 184 | 124 | 7.8 | 173.48 | 14 | 57 | 63.4 | 0.11 | 0.3 | 744.0 | |
| Сентябрь | – | 692 | 7.3 | 608.71 | 90 | 22 | 7.4 | 15.47 | 4 | 26 | 24.13 | 0.12 | 1.2 | 720.0 | |
| Октябрь | – | 301 | 7.9 | 284.01 | 61 | 8 | 6.9 | 12.83 | 7 | 725 | 845.3 | 0.25 | 1.23 | 744.0 | |
| Ноябрь | – | 403 | 7.3 | 408.27 | 47 | 19 | 8.7 | 52.22 | 31 | 4046 | 5962.34 | 0.35 | 1.22 | 720.0 | |
| Декабрь | – | 391 | 7.1 | 334.23 | 52 | 7.3 | 71.25 | 71.25 | 5102 | 4409.25 | 0.23 | 1.24 | 744.0 | | |
| Всего | 155 | 5498 | 7.9 | 4636.65 | 3472 | 935 | 8.7 | 1608.09 | 1814 | 10539 | 12045.1 | 0.15 | 1.59 | 6806.69 | |

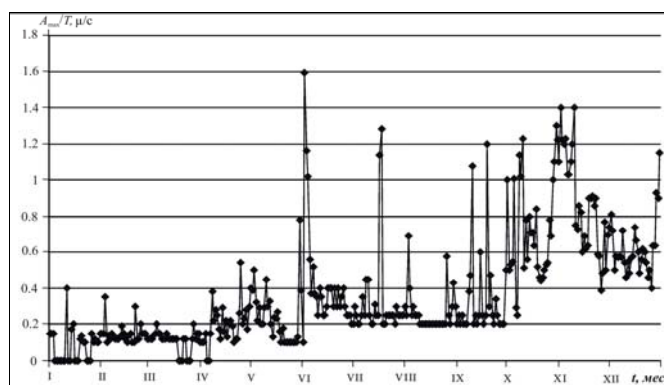


Рис. 9. График вулканического дрожания вулкана Ключевской 2002 г. по станции «Цирк»

Единственным проявлением активности, зафиксированным по видео- и фотонаблюдениям, был пепловый выброс на вулкане Ключевской 24 декабря, начавшийся в 00^h05^m UTC. Выброс наблюдался приблизительно в течение 30^m и достиг высоты 8 км над уровнем моря, (рис. 10).



Рис. 10. Газо-пепловый выброс на вулкане Ключевской 24 декабря 2002 г. (фото Ю.В. Демянчук)

Термальных аномалий в 2002 г. на вулкане Ключевской по данным спутников NOAA 12 (АВО) и NOAA 16 (КФГС) не зафиксировано.

Вулкан Безымянный – координаты вершины: 55°58' N, 160° 35' E; абсолютная высота вулкана $h_v=2869$ м. Ближайшие телеметрические станции «Логинов» и «Зеленая» расположены в 13.5 км от кратера вулкана (рис. 2, а), регистрирующие землетрясения с $K_S \geq 3.6$. По теоретическим расчетам надежная локация по трем станциям возможна лишь для землетрясений с $K_S \geq 4.5$. Но определить точно представительный класс оказалось невозможно из-за недостаточного числа событий. Традиционная обработка землетрясений с разделением по типам, определением их числа и суммарного отношения A/T представлена в табл. 4.

Таблица 4. Параметры вулканических землетрясений разных типов, записанных вблизи ($r=6$ км) вулкана Безымянный на станции «Зеленая» в 2002 г.

| Месяцы | Типы вулканических землетрясений | | | | | | | | | | | | | |
|----------|----------------------------------|------------|--------------|--------------|------------|--------------|--------------|-------------------|--------------------|---------------------|-------------------|------------------------|---------------------|------|
| | I | | | II, III | | | IV | | V | | | | | |
| | $N \geq 0.1$ | K_{Smax} | $\Sigma A/T$ | $N \geq 0.1$ | K_{Smax} | $\Sigma A/T$ | $N \geq 0.1$ | $\Sigma A/T$ | Низкочастотные | | | Вулканическое дрожание | | |
| | | | | | | | | $\Sigma A/T_{cp}$ | $\Sigma A/T_{max}$ | $\Sigma \tau$, час | $\Sigma A/T_{cp}$ | $\Sigma A/T_{max}$ | $\Sigma \tau$, час | |
| Январь | 1 | 5.3 | 0.45 | 6 | 5.3 | 1.52 | 11 | 3.14 | – | – | – | – | – | – |
| Февраль | 1 | 6.6 | 2.17 | 7 | 5.4 | 1.96 | 2 | 0.78 | – | – | – | – | – | – |
| Март | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| Апрель | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| Май | – | – | – | 1 | 6.1 | 0.79 | – | – | – | – | – | – | – | – |
| Июнь | – | – | – | 1 | 5.5 | 0.45 | 1 | 0.34 | – | – | – | – | – | – |
| Июль | – | – | – | 1 | 5.2 | 0.61 | 11 | 8.9 | – | – | – | – | – | – |
| Август | – | – | – | 6 | 6.1 | 2.59 | 7 | 4.26 | – | – | – | – | – | – |
| Сентябрь | – | – | – | 7 | 7.4 | 7.93 | 6 | 3.82 | – | – | – | – | – | – |
| Октябрь | 1 | 4.8 | 0.3 | – | – | – | 1 | 1.21 | – | – | – | – | – | – |
| Ноябрь | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| Декабрь | – | – | – | 80 | 6.1 | 57.68 | 12 | 7.78 | 1.93 | 3.87 | 1.58 | 0.28 | 0.88 | 25.0 |
| Всего | 3 | 6.6 | 2.92 | 109 | | 73.53 | 51 | 30.23 | 1.93 | 3.87 | 1.58 | 0.28 | 0.88 | 25.0 |

За исключением последнего месяца, на протяжении всего 2002 г. вулкан Безымянный находился в спокойном состоянии. В районе вулкана регистрировались отдельные поверхностные землетрясения (рис. 11), а на вулкане наблюдалась фумарольная и парогазовая деятельность. К первым признакам активизации вулкана Безымянный можно отнести три землетрясения, которые произошли 16 и 17 декабря. Но действительным доказательством активизации стал наблюдаемый в дальнейшем рост термальной аномалии сначала по данным спутника NOAA16, а с 23 декабря и спутника NOAA12, без заметной предварительной сейсмичности (рис. 12). По данным спутника NOAA16, слабая термальная аномалия на вулкане Безымянный наблюдалась на всех ночных снимках (без облачности), начиная с первого дня наблюдений (16 сентября). Наличие постоянной термальной аномалии, возможно, свидетельствует о том, что вулкан готов к извержению без сильной предварительной сейсмической подготовки. На снимках NOAA12 термальная аномалия появилась только 23 декабря, до этого она была не видна, что свидетельствует о меньшей чувствительности датчика AVHRR этого спутника. Рост термальной аномалии сопровождался следующей сейсмичностью. С 18 по 22 декабря сейсмичность вулкана Безымянный была ниже уровня регистрации. 23 декабря стали регистрироваться слабые поверхностные события, возможно, сопровождавшие сход лавин. Слабое вулканическое дрожание от вулкана впервые было зарегистрировано 24 декабря в 23^h35^m. В дальнейшем за ~15 часов до извержения с ~04^h00^m 25 декабря начался рой поверхностных землетрясений (более 50 событий, (рис. 12)), который закончился в ~12^h30^m. И после непродолжительной паузы в ~19^h20^m зарегистрировано сильное сейсмическое событие, что свидетельствовало о начале извержения. Огибающая амплитуд сейсмического сигнала имела форму в виде резкого всплеска с последующим постепенным уменьшением по экспоненциальному закону (рис. 12), характерную для взрывных извержений с мощными газо-пепловыми выбросами. К сожалению, как и в декабре прошлого года, мощный циклон не дал возможности получить визуальные или спутниковые доказательства извержения, но через два часа после начала извержения в 21^h10^m в пос. Козыревск начал выпадать пепел серого цвета с запахом серы. Этот факт в сочетании с направлением и скоростью ветра подтверждали возможность извержения вулкана Безымянный. За два часа в пос. Козыревск выпал слой пепла толщиной около 3 мм, после чего пеплопад пре-

кратился. Начиная с 00^h00^m 26 декабря, сейсмичность постепенно стала ослабевать и достигла уровня фона в течение четырех часов (рис. 12).

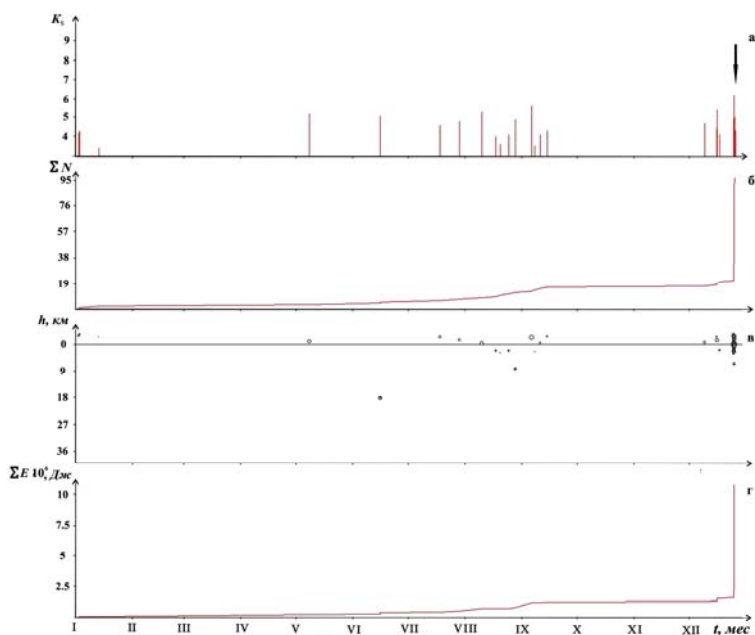


Рис. 11. Изменение во времени энергетического класса K_S (а), кумулятивного числа землетрясений ΣN (б), глубины гипоцентров h (в), кумулятивной сейсмической энергии ΣE (г) совокупности вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 6 км от вулкана Безымянный в 2002 г. (стрелка обозначает извержение вулкана)

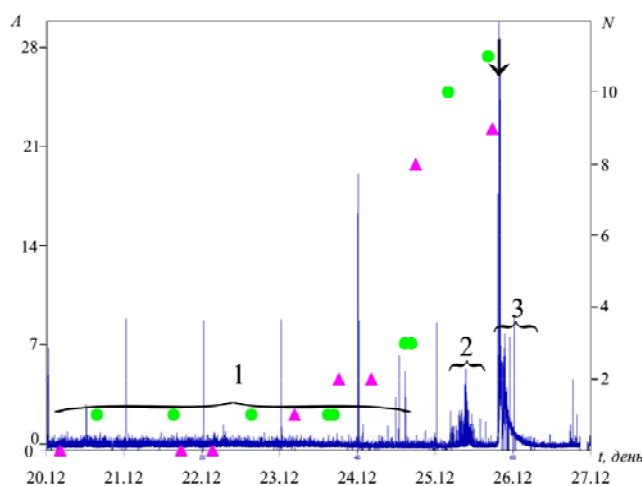


Рис. 12. Амплитуда огибающей сейсмического сигнала (безразмерная единица), осредненная в 10-секундном интервале для извержения вулкана Безымянный в декабре. Стрелка обозначает начало мощного пеплового выброса при извержении вулкана 25 декабря 2002г. Число пикселей в термальной аномалии по данным Аляскинской вулканологической обсерватории.

1 – вулканическое дрожание вулкана Ключевской; 2 – рой поверхностных землетрясений вулкана Безымянный; 3 – сейсмическое событие, сопровождавшее извержение вулкана Безымянный (треугольники обозначают данные NOAA-12 (FDJ), кружки – данные NOAA-16 (КФ ГС РАН), стрелка – начало извержения).

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 $K_S=5.0$. В табл. 5 даны сведения о землетрясениях, зарегистрированных этой станцией.

Таблица 5. Параметры вулканических землетрясений разных типов, записанных вблизи ($\Delta=20$ км) вулкана Плоский Толбачик на станции «Каменистая» в 2002 г.

| Месяцы | Типы вулканических землетрясений | | | | | | | | | | | | Вулканическое дрожание | | |
|----------|----------------------------------|------------|------------|--------------|---------|------------|------------|--------------|------|------------|--------------|--------------|------------------------|-----------------|--|
| | I | | | | II, III | | | | IV | | | | | | |
| | N | | K_{Smax} | $\Sigma A/T$ | N | | K_{Smax} | $\Sigma A/T$ | N | | | (A/N) ср. | (A/N) max | τ , час | |
| | <0.2 | ≥ 0.2 | | | <0.2 | ≥ 0.2 | | | <0.5 | ≥ 0.2 | $\Sigma A/T$ | | | | |
| Январь | 1 | 12 | 8.3 | 18.69 | – | 7 | 5.1 | 2.11 | 5 | 11 | 5.08 | | | | |
| Февраль | – | 2 | 4.8 | 0.52 | – | 7 | 5.4 | 3.34 | | 11 | | | | | |
| Март | – | 5 | 7.3 | 5.22 | – | 1 | 5.7 | 1.0 | 1 | 6 | 6.24 | | | | |
| Апрель | – | 3 | 5.5 | 1.35 | 1 | – | – | – | | | | | | | |
| Май | 1 | – | – | – | 1 | – | – | – | | | | | | | |
| Июнь | – | 10 | 7.2 | 6.92 | – | 1 | 5.2 | 0.54 | 1 | | | | | | |
| Июль | – | 8 | 7.2 | 9.1 | – | – | – | – | | | | | | | |
| Август | – | 6 | 7.3 | 7.39 | – | 2 | 4.4 | 0.47 | | | | | | | |
| Сентябрь | – | 3 | 5.7 | 1.29 | – | 2 | 4.4 | 0.48 | | | | 0.13 | 0.27 | 0.5 | |
| Октябрь | – | 22 | 8.5 | 67.09 | – | 4 | 5.4 | 1.58 | | 2 | 1.72 | 0.14 | 0.30 | 0.6 | |
| Ноябрь | – | 12 | 6.7 | 7.62 | – | 6 | 5.6 | 3.53 | | 2 | 2.14 | 0.21 | 0.83 | 1.4 | |
| Декабрь | – | 10 | 6.9 | 8.54 | – | 4 | 4.2 | 0.82 | | 6 | 1.13 | 0.40 | 0.8 | 1.15 | |
| Всего | 2 | 94 | 8.5 | 133.73 | 2 | 34 | 5.7 | 13.87 | 7 | 38 | 17.63 | 0.22 | 0.83 | 3.65 | |

На рис. 2 представлены карта эпицентров и проекция гипоцентров на вертикальный разрез, на рис. 13 – графики изменения во времени параметров активности вулкана. На протяжении 2002 г. в районе вулкана Плоский Толбачик наблюдалась «обычная, фоновая» сейсмичность. Термальные аномалии на снимках со спутников NOAA12 и NOAA16 не зафиксированы.

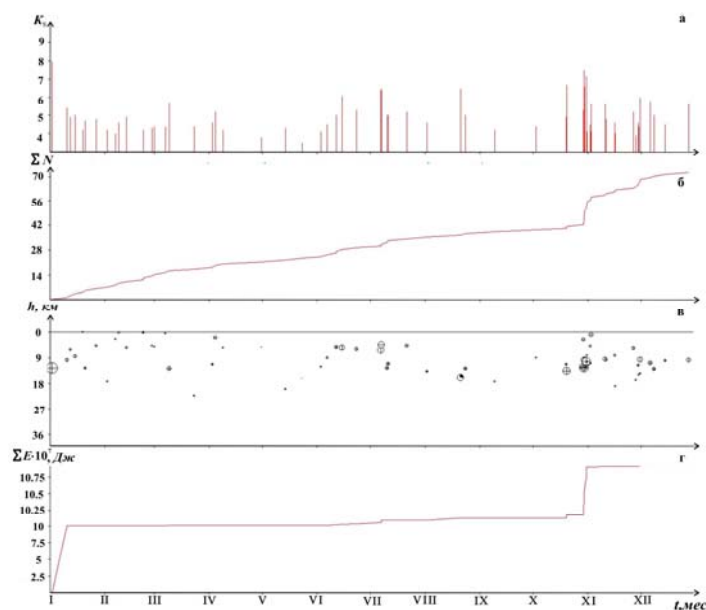


Рис. 13. Изменение во времени энергетического класса K_S (а), кумулятивного числа землетрясений ΣN (б), глубины гипоцентров h (в), кумулятивной сейсмической энергии ΣE (г) совокупности вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 20 км от вулкана Плоский Толбачик в 2002 г. (стрелки обозначают извержения вулкана)

Вулканы Ушковский и Крестовский образуют единый вулканический массив, осложненный вершинной кальдерой. Этот массив рассечен глубокими ледниковыми ущельями и эрозийными долинами. Вулкан Крестовский – координаты вершины: $56^{\circ}07' N$, $160^{\circ}30' E$, абсолютная высота вулкана $h_y=4108$ м; Ушковский – координаты вершины: $56^{\circ}04' N$, $160^{\circ}28' E$; абсолютная высота вулкана $h_y=3943$ 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 соответствует $K_S \geq 4.5$. Карта эпицентров и проекция гипоцентров на вертикальный разрез показаны на рис. 2,

графики изменения во времени параметров активности вулкана – на рис. 14, а традиционный подсчет землетрясений с разбиением по типам – в табл. 6.

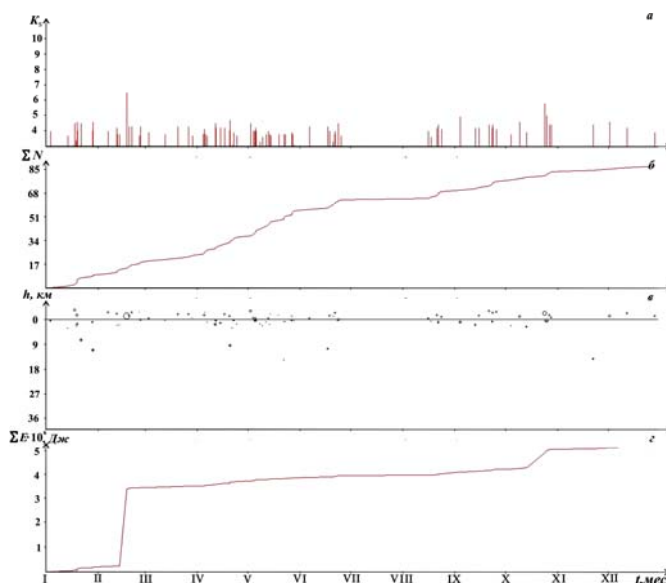


Рис. 14. Изменение во времени энергетического класса K_s (а), кумулятивного числа землетрясений ΣN (б), глубины гипоцентров h (в), кумулятивной сейсмической энергии ΣE (г) совокупности вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 10.1 км от вулканов Крестовский и Ушковский в 2002 г.

Таблица 6. Параметры вулканических землетрясений разных типов, записанных вблизи ($\Delta=10$ км) вулканов Крестовский и Ушковский на станции «Цирк» в 2002 г.

| Месяцы | Типы вулканических землетрясений | | | | | | | | | | |
|----------|----------------------------------|------|------------|--------------|---------|------|------------|--------------|------|------|--------------|
| | I | | | | II, III | | | | IV | | |
| | N | | K_{Smax} | $\Sigma A/T$ | N | | K_{Smax} | $\Sigma A/T$ | N | | $\Sigma A/T$ |
| | <0.2 | ≥0.2 | | | <0.2 | ≥0.2 | | | <0.5 | ≥0.5 | |
| Январь | – | – | – | – | 17 | 12 | 5.2 | 2.39 | – | – | – |
| Февраль | – | – | – | – | 7 | 12 | 7.8 | 6.74 | 1 | – | – |
| Март | – | 1 | 5.3 | 0.46 | 1 | 5 | 5.6 | 0.79 | – | – | – |
| Апрель | – | – | – | – | 8 | 8 | 4.4 | 1.01 | – | – | – |
| Май | – | – | – | – | 48 | 14 | 5.3 | 3.39 | – | – | – |
| Июнь | – | – | – | – | 1 | 8 | 5.8 | 1.99 | – | – | – |
| Июль | – | – | – | – | – | 21 | 5.8 | 4.2 | – | – | – |
| Август | – | – | – | – | 8 | 13 | 6.6 | 3.39 | – | – | – |
| Сентябрь | – | – | – | – | 2 | 21 | 5.9 | 4.4 | – | – | – |
| Октябрь | – | – | – | – | 2 | 24 | 6.7 | 6.47 | – | 5 | 1.74 |
| Ноябрь | – | – | – | – | – | 5 | 6.2 | 1.7 | – | – | – |
| Декабрь | – | – | – | – | 1 | 3 | 5.9 | 1.07 | – | 2 | 0.77 |
| Всего | – | 1 | – | 0.46 | 95 | 146 | 7.8 | 37.54 | 1 | 7 | 2.51 |

В 2002 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). Вулканы Авачинский и Корякский представляют наибольшую опасность для населения, т.к. расположены в 30 км к северу от самых больших городов Камчатки (Петропавловск-Камчатский и Елизово).

Координаты гипоцентров землетрясений вблизи для Корякского и Авачинского вулканов рассчитывались, как и в предшествующие годы, по программе Ю.Ю. Мельникова [13] с использованием двух разных одномерных скоростных моделей среды [12, 18]. Общая карта распределения эпицентров и проекция гипоцентров на вертикальный разрез приведены на рис. 15. Весь район № 2, изображенный на рис. 1, по теоретическим расчетам является областью надежной регистрации для событий энергетического класса $K_s \geq 4.0$.

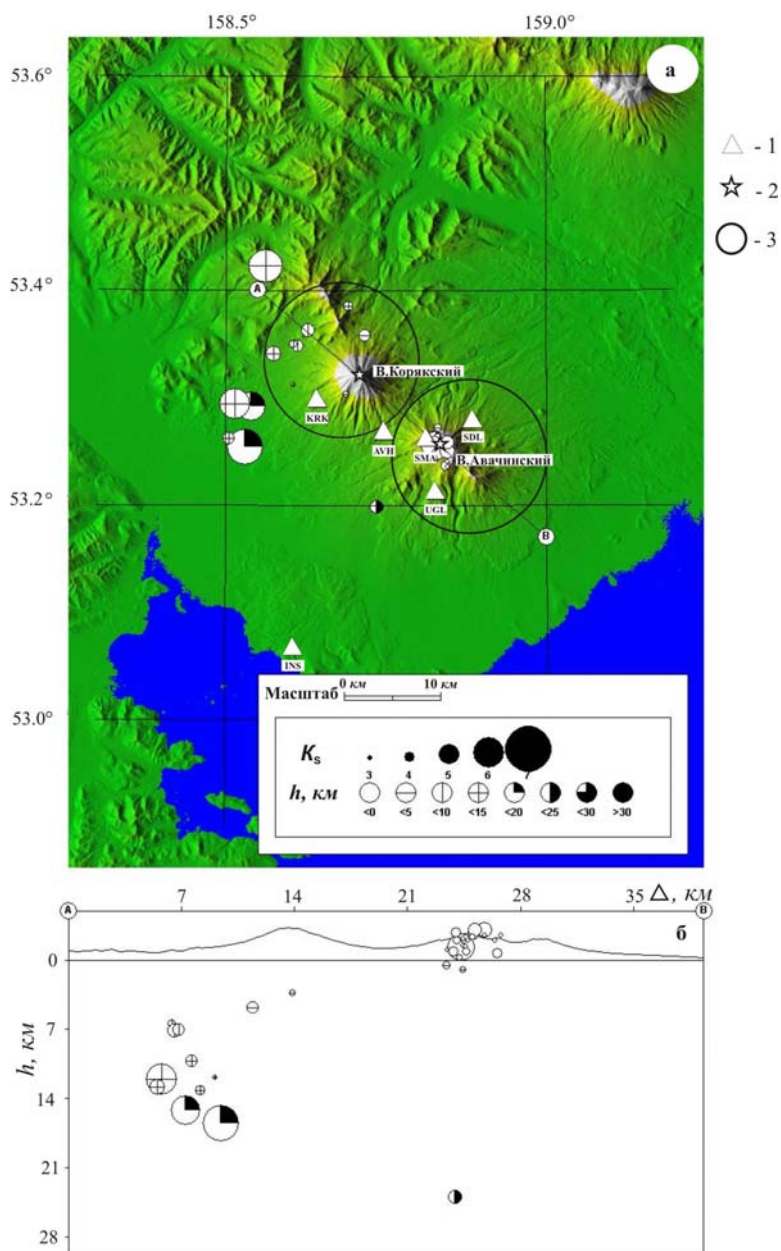


Рис. 15. Карта эпицентров (а) и вертикальный разрез вдоль линии А–В (б) для землетрясений района № 2 в 2002 г.

1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан; 3 – окружность возле вулкана соответствует радиусу (8 км) выборки исходных данных от вулканов Авачинского и Корякского для построения графиков изменения во времени параметров их активности (рис. 16, 17).

Каталог землетрясений в районе № 2 в 2002 г. содержит параметры для $N_{\Sigma}=93$ землетрясений с $K_S=1.5-6.3$ (табл. 7). Землетрясение с минимальным классом $K_S=1.5$ было локализовано 23 апреля в 09^h05^m . Максимальный класс $K_S=6.3$ имеют два землетрясения, отмеченные 21 марта в 09^h44^m и 28 июля в 00^h50^m [8]. Суммарная энергия всех землетрясений, включенных в каталог, равна $\Sigma E=8.137 \cdot 10^6$ Дж, что в два с половиной раза меньше таковой в 2001 г. ($\Sigma E=19.445 \cdot 10^6$ Дж [11]).

Таблица 7. Распределение землетрясений в районе № 2 по энергетическим классам K_S в 2002 г.

| K_S | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | N_{Σ} | $\Sigma E, Дж$ |
|--------|---|----|----|----|---|---|---|--------------|--------------------|
| $N(K)$ | – | 27 | 41 | 17 | 2 | 6 | – | 93 | $8.137 \cdot 10^6$ |

В 2002 г. никакой заметной сейсмической или вулканической активности отмечено не было. Наоборот, число локализованных землетрясений, по сравнению с таковым в 2001 г., уменьшилось почти в три раза. Сейсмичность следует рассматривать как обычную, фоновую. Графики распределения во времени различных параметров землетрясений для вулкана Авачинский представлены на рис. 16, а для вулкана Корякский – на рис. 17.

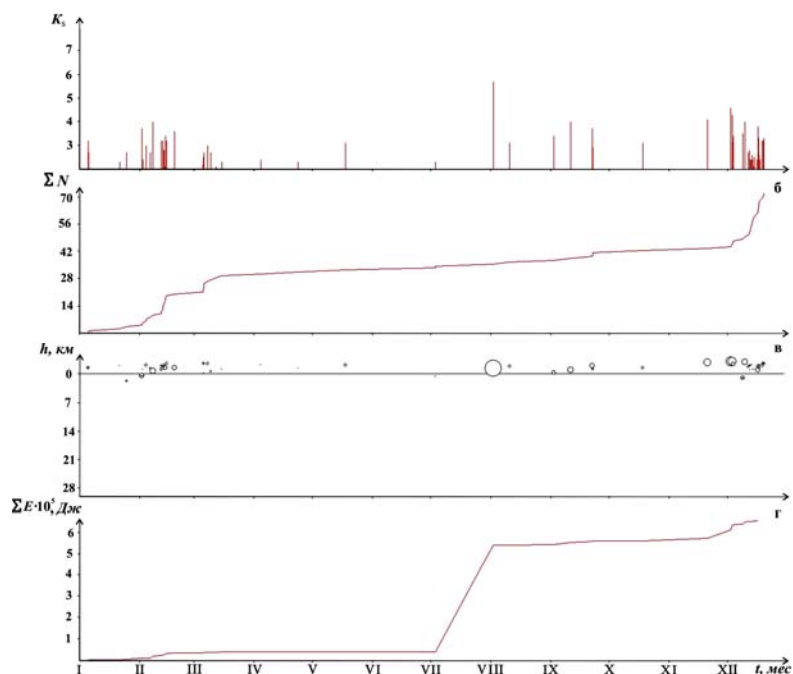


Рис. 16. Изменение во времени энергетического класса K_S (а), кумулятивного числа землетрясений ΣN (б), глубины гипоцентров h (в), кумулятивной сейсмической энергии ΣE (г) совокупности вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 8 км от вулкана Авачинский в 2002 г.

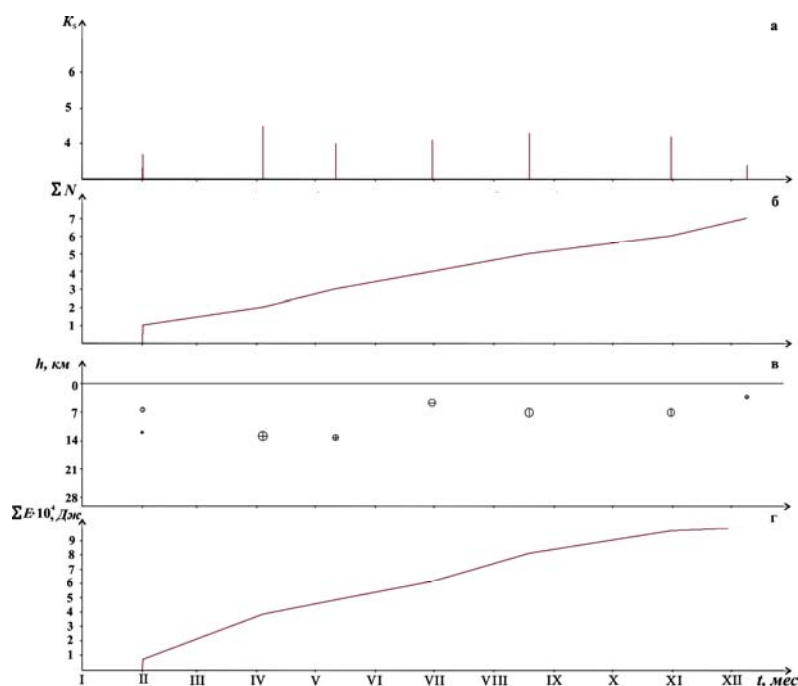


Рис. 17. Изменение во времени энергетического класса K_S (а), кумулятивного числа землетрясений ΣN (б), глубины гипоцентров h (в), кумулятивной сейсмической энергии ΣE (г) совокупности вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 8 км от вулкана Корякский в 2002 г.

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. – 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., Сениюков 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., Иванова Е.И., Гусева Е.И.** Камчатка и Командорские острова. (См. раздел I (Обзор сейсмичности) в наст. сб.).
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. **Федотов С.А.** Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. – М.: Наука, 1972. – 117 с.
7. **Нуждина И.Н. (отв. сост.), Дрознина С.Я., Кожевникова Т.Ю., Толокнова С.Л.** Северная группа вулканов. (См. раздел VI (Каталоги землетрясений) в наст. сб. на CD).
8. **Нуждина И.Н. (отв. сост.), Дрознина С.Я., Кожевникова Т.Ю., Толокнова С.Л.** Авачинская группа вулканов. (См. раздел VII (Каталоги землетрясений) в наст. сб. на CD).
9. **Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки и Командорских островов за 1998 год** (Отчет). – Петропавловск-Камчатский: Фонды КОМСП ГС РАН, 1999. – 259 с.
10. **Сениюков С.Л., Чебров В.Н., Гарбузова В.Т., Дрознина С.Я., Нуждина И.Н., Кожевникова Т.Ю., Толокнова С.Л.** Сейсмический мониторинг вулканов Камчатки // Землетрясения Северной Евразии в 1999 году. – Обнинск: ГС РАН, 2005. – С. 253–273.
12. **Сениюков С.Л.** Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений // Комплексные сейсмологические и геофизические наблюдения на Камчатке за 2003 г. – Петропавловск-Камчатский: Фонды КОМСП ГС РАН, 2004. – С. 279–291.
13. **Мельников Ю.Ю.** Пакет программ для определения координат гипоцентров землетрясений Камчатки на ЭВМ // Вулканология и сейсмология. – 1990. – № 5. – С. 103–112.
14. **Токарев П.И.** Вулканические землетрясения Камчатки. – М.: Наука, 1981. – 164 с.
15. **Weimer S.** A software package to analyze seismicity: ZMAP // Seism. Res. Lett. – 2001. – 72. – № 2. – P. 374–383.
16. **Сениюков 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 исследования Камчатки и Командорских островов за 2003 год (Отчет). – Петропавловск-Камчатский: Фонды КОМСП ГС РАН, 2004. – С. 301–318.
17. **Сениюков 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 исследования Камчатки и Командорских островов за 2003 год (Отчет). – Петропавловск-Камчатский: Фонды КОМСП ГС РАН, 2004. – С. 292–300.
18. **Сениюков С.Л.** Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений в 2000–2004 гг. // Вулканология и сейсмология. – 2006. – № 3. – С. 68–78.