

IV. СЕЙСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ВУЛКАНОВ

УДК 550.348.438(517.66)

ВУЛКАНЫ КАМЧАТКИ

С.Л. Сеников, В.Т. Гарбузова, С.Я. Дроздина, И.Н. Нуждина, Т.Ю. Кожневникова,

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). Их мониторинг проводится с целью своевременного предупреждения населения и административных органов о возможности их извержения, для уменьшения последствий катастрофических событий, для обеспечения безопасности авиаполетов в районе п-ва Камчатка [1–3].

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

- сейсмический мониторинг по данным радиотелеметрических сейсмических станций в режиме, близком к реальному времени;
- визуальные и видеонаблюдения (в 2001 г. была только одна видеосистема по наблюдениям за вулканом Ключевской);
- спутниковый мониторинг термальных аномалий и пепловых выбросов. Результаты спутникового мониторинга в 2001 г. предоставлялись Аляскинской вулканологической обсерваторией (США) в рамках международного проекта по безопасности авиаполетов (KVERT).

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 2001 г. она практически не изменилась, по сравнению с таковой в 2000 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 локализовались. 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

$$M_L = K_S/2 - 0.75 [9].$$

В 2001 г. применялись такие же методы обработки сейсмических данных, как и в 1999–2000 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 2001 г. в районах Северной (рис. 1, район № 1) и Авачинской групп вулканов (рис. 1, район № 2), при этом используется Гринвичское время, которое отличается от местного времени на -12^h зимой и на -13^h – летом.

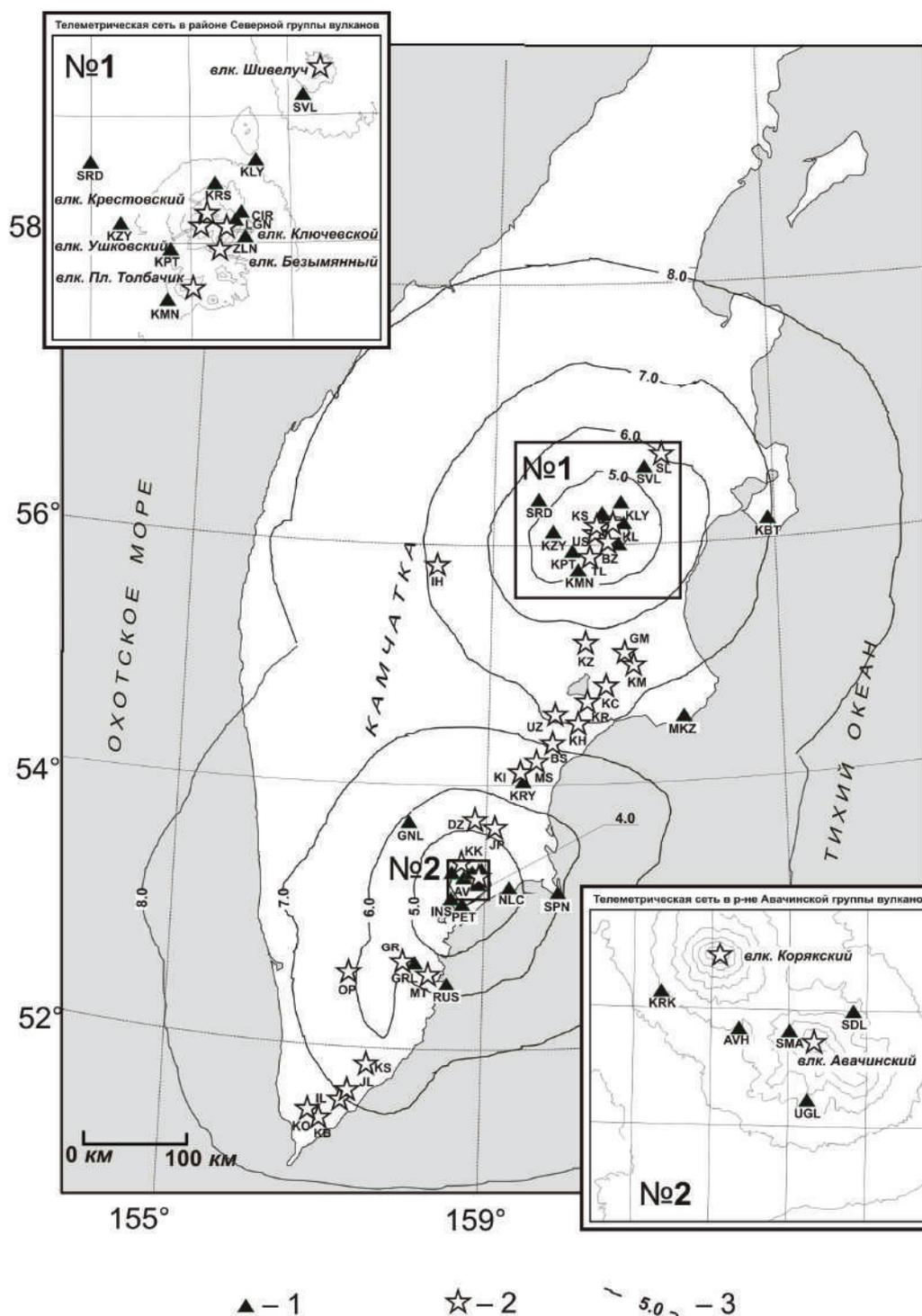


Рис. 1. Карта активных вулканов Камчатки, радиотелеметрических станций и изолинии энергетической представительности K_{\min}

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

Названия вулканов и их коды: SL – Шивелуч, KL – Ключевской, US – Ушковский, BZ – Безымянный, TL – Плоский Толбачик, NT – Новые Толбачинские вулканы, IH – Ичинский, KZ – Кизимен, GM – Гамчен, KM – Комарова, KC – Кроноцкий, KR – Крашенинникова, KH – Кихпиньч, UZ – Узон, BS – Большой Семячик, MS – Малый Семячик, KI – Карымский, DZ – Дзензур, JP – Жупановский, KK – Коряжский, AV – Авачинский, GR – Горелый, MT – Мутновский, OP – Опала, KS – Ксудач, JL – Желтовский, IL – Ильинский, KO – 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). 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). Землетрясения 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, максимальные амплитуды A_{max} *S*-волн и соответствующие периоды T , рассчитываются их энергетические классы и координаты гипоцентров. 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)_{ср}, $\Sigma A/T$ и др.).

Все землетрясения I–III типов, зарегистрированные тремя и более станциями, включены в каталог [7], содержащий 6849 землетрясений, что более чем в два раза выше, нежели в 2000 г. (табл. 1). При этом возросло не только число землетрясений, но и расширился их динамический диапазон до $K_S=2.5-11.9$. Минимальный класс $K_S=2.5$ имеет землетрясение, локализованное 20 апреля в 06^h45^m, максимальный – $K_S=11.9$ и $h=11$ км у события 12 апреля в 23^h59^m. Отметим также четыре события 10-го класса, произошедшие 5 января в 05^h44^m с $K_S=9.6$ и $h=9.4$ км, 16 апреля в 20^h59^m с $K_S=9.9$ и $h=11.1$ км, 11 июня в 15^h38^m с $K_S=9.8$ и $h=11.6$ км, 24 декабря в 06^h05^m с $K_S=10.4$ и $h=3$ км. Наличие землетрясений с $K_S>9$ привело к значительному увеличению суммарной сейсмической энергии, составившей $\Sigma E=8.52 \cdot 10^{11}$ Дж, что на 2.5 порядка выше таковой в 2000 г. ($\Sigma E=1.573 \cdot 10^9$ Дж [11]). Распределение их по классам дано в табл. 1, график повторяемости – на рис. 2. Из графика следует, что представительными в каталоге являются землетрясения с $K_S \geq 6$; значение его наклона $\gamma = -0.757 \pm 0.033$.

Таблица 1. Распределение землетрясений в районе № 1 по энергетическим классам K_S в 2001 г.

K_S	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	N_Σ	$\Sigma E \cdot 10^9, \text{ Дж}$	γ
$N(K)$	119	2544	2934	1033	182	25	6	4	–	1	6849	852.0	0.734

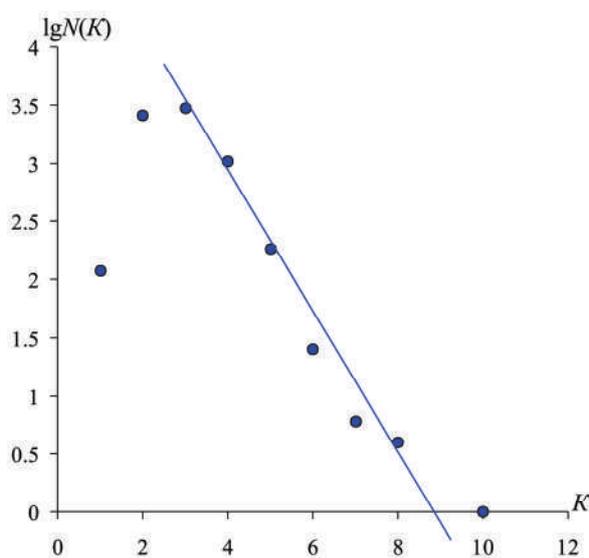


Рис. 2. График повторяемости землетрясений Северной группы вулканов (район № 1) за 2001 г.

Ниже описаны шесть вулканов Северной группы (Шивелуч, Ключевской, Безымянный, Плоский Толбачик, Ушковский, Крестовский) по инструментальным и визуальным наблюдениям за 2001 г.

Вулкан Шивелуч – самый северный действующий вулкан Камчатки (координаты активного кратера – 56°38' N, 161°19' E, абсолютная высота нового купола, обнаруженного 12 мая, составила $h_y \sim 2500$ м). Вулкан находится в 45 км к северо-востоку от г. Ключи (рис. 3, 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 2001 г. представлена в табл. 2. Расчетный уровень надежной регистрации землетрясений по трем станциям соответствует $K_S \geq 5.5$.

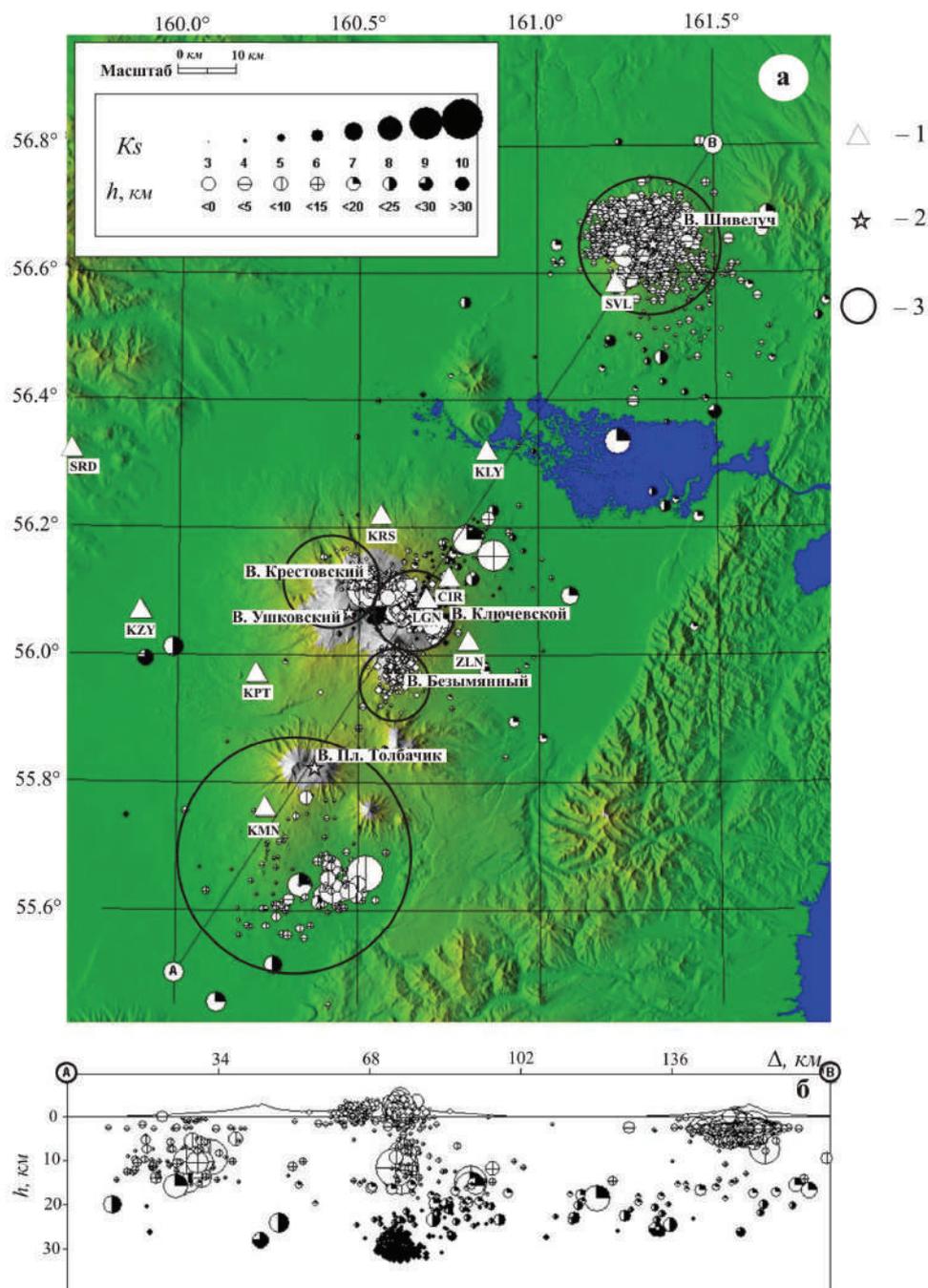


Рис. 3. Карта эпицентров (а) и вертикальный разрез вдоль линии А–В (б) для землетрясений района № 1

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.

В начале 2001 г. в районе вулкана фиксировались одиночные землетрясения III, IV типа по [14], после которых возникали цуги вулканического дрожания продолжительностью до полутора часов (рис. 4). Вулканическое дрожание (рис. 5, а) часто сопровождало газо-пепловые выбросы высотой до 6 км над уровнем моря (рис. 5, б). Накопленный опыт свидетельствует о том, что визуальными данными обычно подтверждаются не более 25% всех выбросов [15], т.к. большинство из них скрыто либо облачностью, либо темным временем суток. Неоценимый вклад для фиксации извержений вулкана Шивелуч внес сотрудник сейсмической станции «Ключи» Ю.В. Демянчук, который зарегистрировал своей личной камерой практически все доступные для наблюдения пепловые выбросы в течение исследуемого года.

Таблица 2. Параметры вулканических землетрясений разных типов, записанных вблизи ($\Delta=12$ км) вулкана Шивелуч на одноименной станции «Шивелуч» в 2001 г.

Месяцы	Типы вулканических землетрясений																
	I			II, III			IV			V							
	N		K_{Smax}	$\Sigma A/T$	N		K_{Smax}	$\Sigma A/T$	N		$\Sigma A/T$	Низкочастотные			Вулканическое дрожание		
	<0.2	≥0.2			<0.2	≥0.2			<0.5	≥0.5		$\Sigma A/T_{cp}$	$\Sigma A/T_{max}$	$\Sigma \tau, \tau$	$\Sigma A/T_{cp}$	$\Sigma A/T_{max}$	$\Sigma \tau, \tau$
Январь	–	7	9.8	182.44	1	11	6.6	8.26	17	49	48.76	1.1	3.9	1.08	0.19	1.84	95.12
Февраль	–	13	6.5	13.62	1	56	7.8	45.55	6	33	28.22	2.41	4.4	0.64	0.6	1.67	2.22
Март	–	9	6.5	4.96	–	26	6.8	15.91	30	69	53.78	1.64	6.56	0.96	0.11	0.22	1.58
Апрель	–	9	7.5	6.76	2	3698	10.9	4573.34	87	212	317.29	0.73	6.28	0.47	0.2	0.41	26.21
Май	9	1	5.2	1.8	–	1973	9.3	3533.11	310	2490	3590.4	6.22	349.8	6.6	0.33	4.82	272.87
Июнь	–	–	–	–	–	317	7.3	307.72	924	715	949	0.91	31.49	8.47	0.19	1.15	104.56
Июль	–	1	7.6	3.07	29	224	8	233.36	78	126	272.64	1.69	25.44	20.24	1.27	6.16	551.2
Август	–	–	–	–	9	447	7.2	347.4	427	525	651.21	1.24	8.41	4.82	2.04	6.31	525
Сентябрь	–	1	7.7	2.84	–	445	7.2	314.87	1342	1432	1820	1.67	106.4	12.02	0.17	0.86	320
Октябрь	–	2	4.8	1.39	–	161	7.4	174.83	765	780	905.94	1.55	38.9	14.78	0.29	3.04	398
Ноябрь	–	4	6.8	3.84	–	468	7.2	473.03	763	739	905.6	2.5	13.97	7.08	0.26	3.61	321.06
Декабрь	–	28	6.8	27.63	–	602	8.4	605.71	2081	1817	1665.7	2.24	20.92	7.05	0.11	0.5	362
Всего	9	75			42	8428		10633.09	6830	8987	11209			84.21			2980.1

Примечание. Здесь и в подобных таблицах ниже $N (A/T < 0.2)$ – число землетрясений с отношением амплитуды к периоду меньше, чем 0.2, а $N (A/T > 0.2)$ – больше чем 0.2.

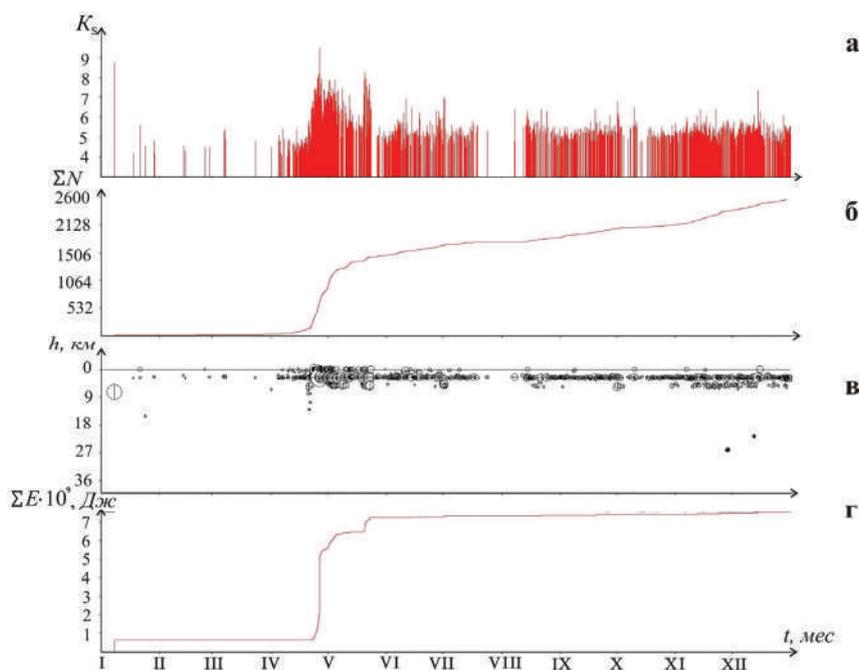


Рис. 4. Изменение во времени энергетического класса K_S (а), кумулятивного числа землетрясений ΣN (б), глубины гипоцентров h (в), кумулятивной сейсмической энергии ΣE (г) совокупности вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 12 км от вулкана Шивелуч в 2001 г.

21 апреля 2001 г. сейсмическая активность резко возросла из-за роя сильных поверхностных землетрясений (рис. 4) [16]. Энергетический класс самого сильного события равен $K_S=9.5$, а число землетрясений за последнюю декаду апреля превысило 1500. Как оказалось впоследствии, этот рой сопровождал выжимание нового экструзивного купола в активном кратере вулкана. Новый купол был обнаружен 12 мая сотрудником Института вулканологии В.Н. Двигало.

Существующая сеть сейсмических станций является удаленной и односторонней по отношению к вулкану Шивелуч. Поэтому определяемые координаты гипоцентров землетрясений имеют большую ошибку, особенно по глубине. На рис. 3, б представлена проекция гипоцент-

тров на вертикальный разрез А–В до глубины 40 км. Можно отметить приуроченность гипоцентров к горизонтам на глубинах 2 и 5 км и отсутствие их в постройке вулкана выше уровня моря, что может быть связано, однако, с ошибками локализации.

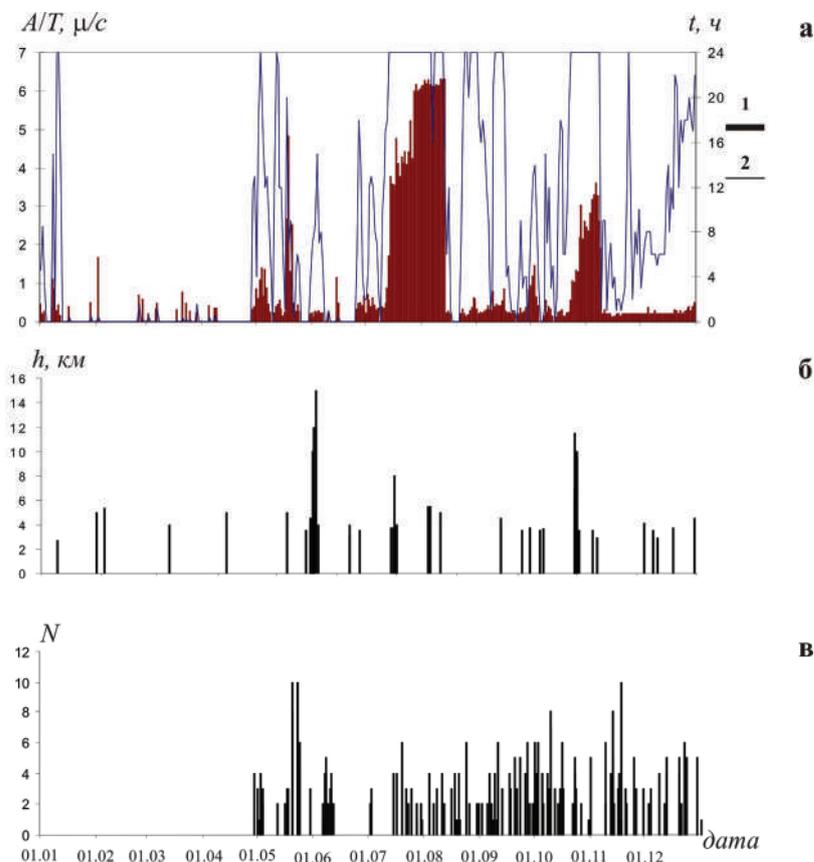


Рис. 5. Графики распределения во времени различных параметров активности вулкана Шивелуч в 2001 г.

а – вулканическое дрожание по станции «Шивелуч», 1 – максимальная амплитуда, 2 – продолжительность дрожания за сутки; б – высота (км) газо-пепловых выбросов по визуальным данным сейсмостанции «Ключи» над уровнем моря; в – число пикселей в термальной аномалии по данным Аляскинской вулканологической обсерватории.

29 апреля была зарегистрирована первая термальная аномалия на спутниковых снимках (рис. 5, в). Наибольших размеров она обычно достигает в периоды извержения горячего материала. Для приблизительной оценки масштабов извержения следует отметить, что один пиксель изображения соответствует на местности квадрату со стороной около 1 км.

Для детального исследования сейсмичности была проведена традиционная обработка землетрясений с разбиением по типам [14] с привлечением более слабых событий, для которых невозможно было определить стандартные параметры. Анализ сейсмичности от начала активизации до извержения (рис. 6) позволил выделить характерные особенности подготовки вулкана к этому извержению:

- землетрясений первого типа мало, их энергия невелика (рис. 6, а);
- наибольший вклад по числу и выделенной энергии по землетрясениям II–III типа, которые обычно происходят в постройке вулкана и на глубинах до 5 км под ней. Пик активности землетрясений II–III типа зафиксирован 26 апреля (рис. 6, б);
- одновременно с уменьшением числа землетрясений II–III типа стал наблюдаться рост числа и суммарной энергии землетрясений IV типа, которые обычно происходят в самой верхней части постройки вулкана и связаны с ее разрушением. Наибольшее их число зафиксировано с 4 по 8 мая (рис. 6, в).

Накануне максимальной фазы извержения с 14 по 17 мая наступило относительное сейсмическое затишье, после которого в течение 18 мая наблюдался быстрый рост амплитуды вулканического дрожания (рис. 6, г).

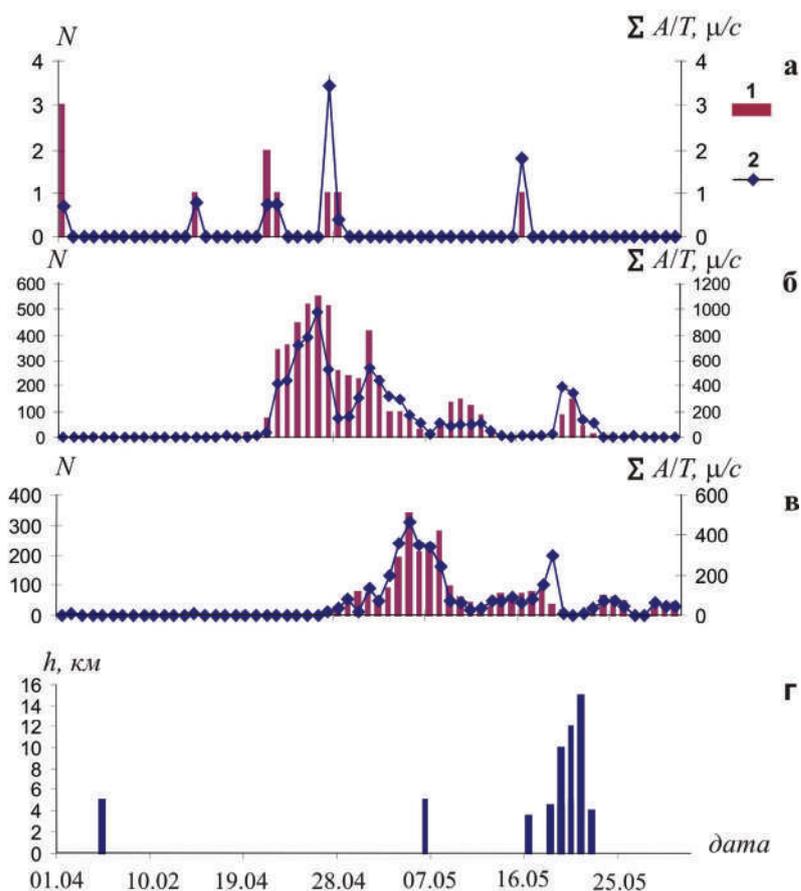


Рис. 6. Распределение во времени вулканических землетрясений различного типа для района вулкана Шивелуч в период наибольшей сейсмической активности, апрель–май 2001 г.

а – землетрясения I типа; б – землетрясения II–III типа; в – землетрясения IV типа; г – высота газо-пепловых выбросов над уровнем моря по визуальным данным сейсмической станции «Ключи».

Главная эксплозивная фаза извержения вулкана Шивелуч произошла с 19 по 21 мая и сопровождалась отдельными мощными выбросами пепла с образованием эруптивных колонн высотой более 12 км (рис. 7), сходом пирокластических и грязевых потоков длиной до 18 км в юго-западном направлении вдоль каньона р. Байдарной. В дальнейшем до конца года еще несколько раз фазы относительного затишья сейсмической активности сменялись периодами ее усиления, которые завершались эксплозивными извержениями. Наиболее сильные из них произошли 30 июня, 30 сентября и 1 октября.



Рис. 7. Извержение вулкана Шивелуч 19 мая 17^h06^m местного времени (фото Ю.В. Демянчук)

Вулкан Ключевской – координаты вершины: 56°04' N, 160°38' E; абсолютная высота вулкана $h_v=4750$ м. Диаметр вершинного кратера, венчающего конус, – около 700 м. Ближайшая телеметрическая станция «Логоинов», регистрирующая землетрясения с $K_S \geq 2.2$, расположена в 4 км от кратера. Сеть станций позволяет локализовать при благоприятных условиях землетрясения начиная с $K_S \geq 4.0$, а надежная регистрация – с $K_S \geq 4.5$. В 2001 г. были определены параметры для 2145 землетрясений с $K_S \geq 4.0$, из них 1477 – с $K_S \geq 4.5$. Карта эпицентров и проекция гипоцентров на вертикальный разрез представлены на рис. 3, 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.

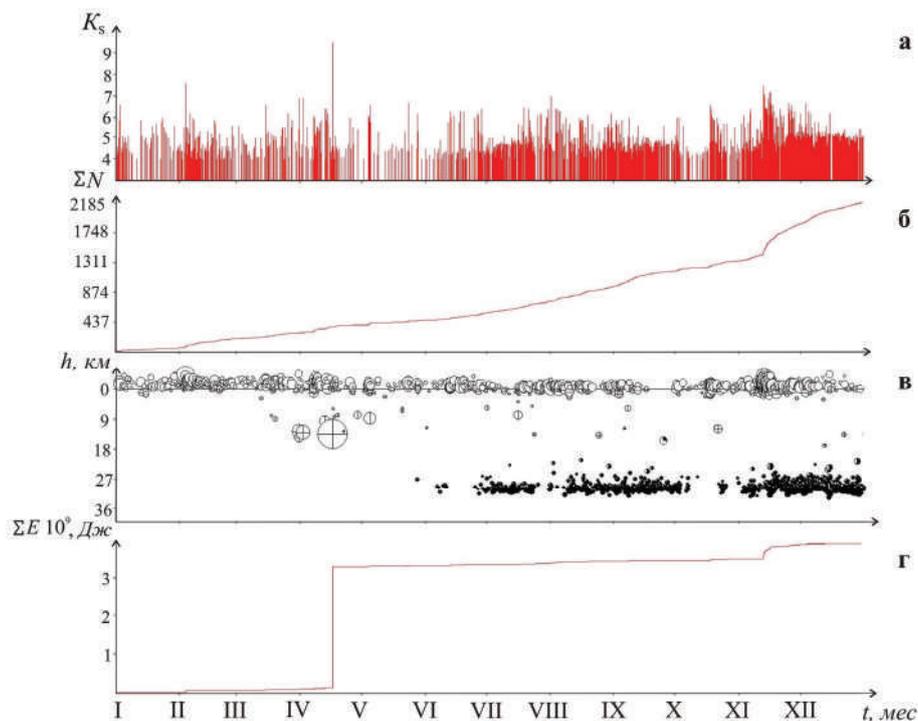


Рис. 8. Изменение во времени энергетического класса K_S (а), кумулятивного числа землетрясений ΣN (б), глубины гипоцентров h (в), кумулятивной сейсмической энергии ΣE (г) совокупности вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 7 км от вулкана Ключевской в 2001 г.

Таблица 3. Параметры вулканических землетрясений разных типов, записанных вблизи ($\Delta=7$ км) вулкана Ключевской на станции «Цирк» в 2001 г.

Месяцы	Типы вулканических землетрясений													
	I				II, III				IV				V	
	N		K_{Smax}	$\Sigma A/T$	N		K_{Smax}	$\Sigma A/T$	N		$\Sigma A/T$	Вулканическое дрожание		
	<0.2	≥0.2			<0.2	≥0.2			<0.5	≥0.5		$\Sigma A/T_{cp}$	$\Sigma A/T_{max}$	$\Sigma \tau, ч$
Январь	9	9	7.5	7.13	228	73	7.7	141.21	13	14	15.74	–	–	–
Февраль	–	15	8.2	36.28	265	174	9.2	334.63	–	36	33.21	0.09	0.15	29.5
Март	–	10	7.8	21.04	97	115	7.9	211.89	–	51	42.12	0.2	1.03	433.5
Апрель	7	70	11.5	873.57	170	134	7.9	274.2	6	43	54.58	0.12	0.71	114.5
Май	1	15	7.3	20.78	60	74	7.8	169.99	5	40	78.7	0.32	1.03	8.25
Июнь	–	38	12.1	816.91	85	116	7.7	193.54	7	30	26.3	0.1	0.3	151.0
Июль	23	125	7	100.93	221	115	7.8	203.03	7	34	49.37	0.1	0.18	376.5
Август	14	120	8.8	76.27	252	123	8.1	288.42	35	39	49.44	0.1	0.18	68.0
Сентябрь	33	261	7.2	107.18	123	46	7.6	82.34	6	45	48.89	0.14	0.41	264.0
Октябрь	20	81	7.4	38.24	252	114	7.9	282.76	14	55	82.96	0.14	0.75	381.5
Ноябрь	124	341	6.5	148.42	297	450	8.4	932.1	6	44	80.68	0.08	0.2	146.0
Декабрь	23	276	7.4	185.75	245	59	7.6	102.77	5	3	7.06	0.12	0.5	70.0
Всего	254	1361		2432.5	2295	1593		3216.88	104	434	569.05			2042.75

В 2001 г. вулкан Ключевской находился в спокойном состоянии. По данным видеонаблюдений за вулканом (в 2000 г. была установлена видеокамера на сейсмической станции «Ключи») не было зафиксировано ни газо-пепловых выбросов, ни лавовых потоков. Сейсмичность можно считать фоновой. За весь год был зарегистрирован один рой поверхностных землетрясений (с 13 по 20 ноября). Следует отметить также рой относительно сильных землетрясений, которые произошли в середине апреля на глубине около 10 км между вулканами Ключевской и Крестовский. Также заслуживает внимания появление глубоких (около 30 км) землетрясений под постройкой Ключевского вулкана, зарегистрированных с июля до конца года (рис. 8, в). В 2000 г. таких землетрясений практически не было. В отдельные промежутки времени регистрировалось слабое вулканическое дрожание, максимальная амплитуда которого не превышала 1.0 мкм/с по станции «Цирк» (рис. 9). К сожалению, с 12 ноября по 19 декабря данные Козыревского приемного центра были не доступны.

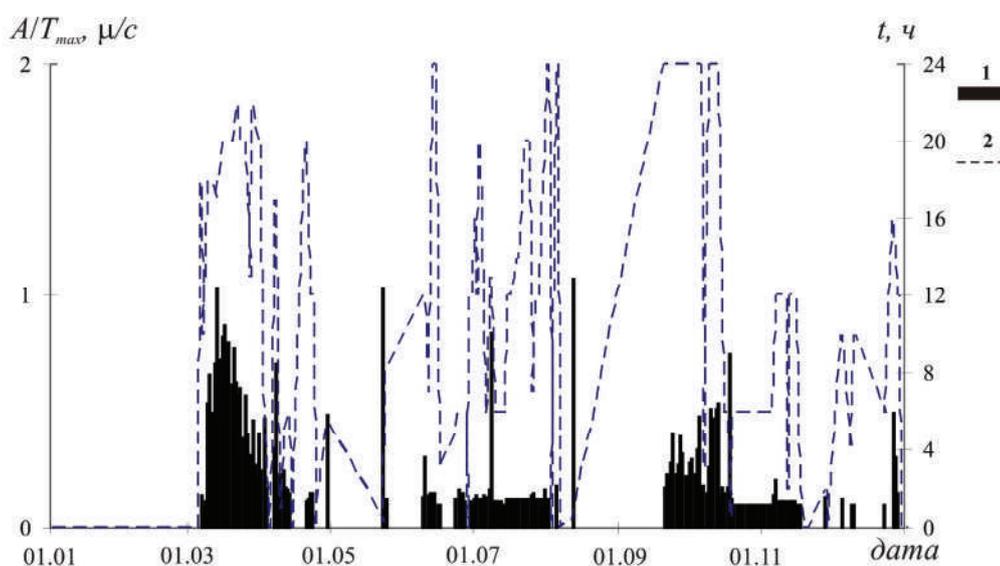


Рис. 9. График вулканического дрожания вулкана Ключевской в 2001 г по станции «Цирк»

1 — максимальная амплитуда; 2 — продолжительность дрожания за сутки.

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. 3, а) и регистрируют землетрясения с $K_S \geq 3.6$. Надежная локация по трем станциям возможна лишь для землетрясений с $K_S \geq 4.5$. Традиционная обработка землетрясений с разделением по типам, определением их числа и суммарного отношения A/T представлена в табл. 4.

В 2001 г. вулкан Безымянный извергался дважды (рис. 10). Первая активизация вулкана началась 25 июля [16], когда сейсмичность в районе вулкана превысила «нормальный, фоновый» уровень, который для вулкана Безымянный в 2001 г. соответствовал $N \leq 5$ землетрясений за сутки с $K_S \geq 4.0$ или $N \leq 2$ с $K_S \geq 5.0$. Землетрясения, предвещающие извержение, были поверхностными, немногочисленными и слабыми (максимальное имело $K_S=5.1$). На снимках из космоса термальная аномалия появилась впервые также 25 июля. В следующий раз термальная аномалия размером 3 пикселя наблюдалась 30 июля в период прояснения. В остальные дни (с 26 июля по 5 августа) вулкан был закрыт облачностью. 6 августа в 04^h51^m на спутниковом снимке стала вновь наблюдаться термальная аномалия. В этот же день резко увеличилось число слабых локальных поверхностных землетрясений и стала нарастать амплитуда вулканического дрожания. В 22^h28^m началось эксплозивное извержение. По наблюдениям из п. Козыревск через час высота пеплового столба достигла высоты 10 км над уровнем моря. Максимальная фаза извержения продолжалась приблизительно около 1.5 часов, а потом наблюдалось постепенное уменьшение амплитуды вулканического дрожания и числа слабых поверхностных землетрясений. 9 августа сейсмичность вернулась к фоновому уровню.

Таблица 4. Параметры вулканических землетрясений разных типов, записанных вблизи ($r=6$ км) вулкана Безымянный на станции «Зеленая» в 2001 г.

Месяцы	Типы вулканических землетрясений													
	I			II, III			IV		V					
	N ≥ 0.1	K_{Smax}	$\Sigma A/T$	N ≥ 0.1	K_{Smax}	$\Sigma A/T$	N ≥ 0.1	$\Sigma A/T$	Низкочастотные			Вулканическое дрожание		
								$\Sigma A/T_{cp}$	$\Sigma A/T_{max}$	$\Sigma \tau$, ч	$\Sigma A/T_{cp}$	$\Sigma A/T_{max}$	$\Sigma \tau$, ч	
Январь				2	4.1	0.14	1	0.54	–	–	–	–	–	–
Февраль	–	–	–	9	5.9	1.6	–	–	–	–	–	–	–	–
Март	–	–	–	4	5.4	0.96	–	–	–	–	–	–	–	–
Апрель	–	–	–	1	5.1	0.22	1	0.3	–	–	–	–	–	–
Май	–	–	–	1	6	0.77	–	–	–	–	–	–	–	–
Июнь	–	–	–	3	5.8	0.61	3	1.8	–	–	–	–	–	–
Июль	–	–	–	26	5.7	6.17	36	12.13	–	–	–	–	–	–
Август	1	4.9	0.33	35	5.7	9.27	151	60.91	2.6	11.78	2.53	0.22	1.08	25.46
Сентябрь	–	–	–	3	5.7	1.03	3	0.78	–	–	–	–	–	–
Октябрь	–	–	–	–	–	–	1	0.28	–	–	–	–	–	–
Ноябрь	1	5.5	0.35	17	5.6	2.95	13	2.85	–	–	–	–	–	–
Декабрь	2	5.5	0.73	946	6.5	234.14	421	124.58	0.46	0.86	0.1	0.61	1.92	31
Всего	4		1.41	1047		257.86	640	204.17	1.53		2.63	0.42		56.46

Следующая активизация началась 8 декабря и была более интенсивной по числу землетрясений в сравнении с летним периодом. Термальная аномалия, впервые появившаяся 9 декабря, резко увеличилась в размерах – с 4 пикселей 12 декабря до 10 пикселей 13 декабря. Такое количество «горячих» пикселей обычно наблюдается накануне извержения. Однако сопутствующая сейсмичность свидетельствовала только о возможных слабых лавинах. 14 декабря термальная аномалия увеличилась до 14 пикселей. Извержение началось 15 декабря приблизительно в 20^h00^m, когда амплитуда вулканического дрожания стала резко возрастать. По визуальным данным из п. Козыревск в 20^h45^m наблюдался мощный парогазовый шлейф протяженностью 60 км на северо-запад. В 20 км от вулкана шлейф был темный с возможным содержанием пепла, высота – 4000 м над уровнем моря. Далее мощный циклон и продолжительная пурга скрыли вулкан до 20 декабря. Также были значительно осложнены наблюдения со спутников. Единственным источником информации осталась регистрация сейсмичности. Вулканическое дрожание, начавшееся 15 декабря, достигло максимума 16 декабря с 00^h00^m до 14^h00^m. В дальнейшем характер дрожания стал изменяться с непрерывного на спазматический. Средняя амплитуда стала уменьшаться, и к концу суток 16 декабря появилась возможность выделять отдельные землетрясения. Из-за высокого фона вулканического дрожания определить координаты этих землетрясений было невозможно. Они внесены в базу с искусственными параметрами (координаты эпицентров приравнивались к координатам вулкана, глубина гипоцентров к $h=0$ км, время в очаге – ко времени события с точностью до минуты, а энергетический класс определялся по аналогии с другими землетрясениями с точностью до 0.5 K_S). В итоге за 16–19 декабря в базу было внесено около 800 землетрясений с $K_S \leq 4.5$. 20 декабря сейсмичность вернулась к фоновому уровню.

Для кульминационной стадии извержения был построен график огибающей амплитуды сейсмического сигнала, осредненной в 10-секундном интервале (рис. 11, а). Отличительной особенностью извержения в декабре 2001 г. было отсутствие сильного всплеска амплитуды на огибающей сейсмического сигнала (рис. 11, б), обычно наблюдаемый при других извержениях (как, например, на рис. 11, а) и сопровождаемый мощным пепловым выбросом. В данном случае можно предположить, что извержение происходило без значительных (высотой более 10 км) пепловых выбросов и сопровождалось излиянием лавового потока. Ранее на этом вулкане были зафиксированы только вязкие потоки.

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 представлены землетрясения, зарегистрированные этой станцией.

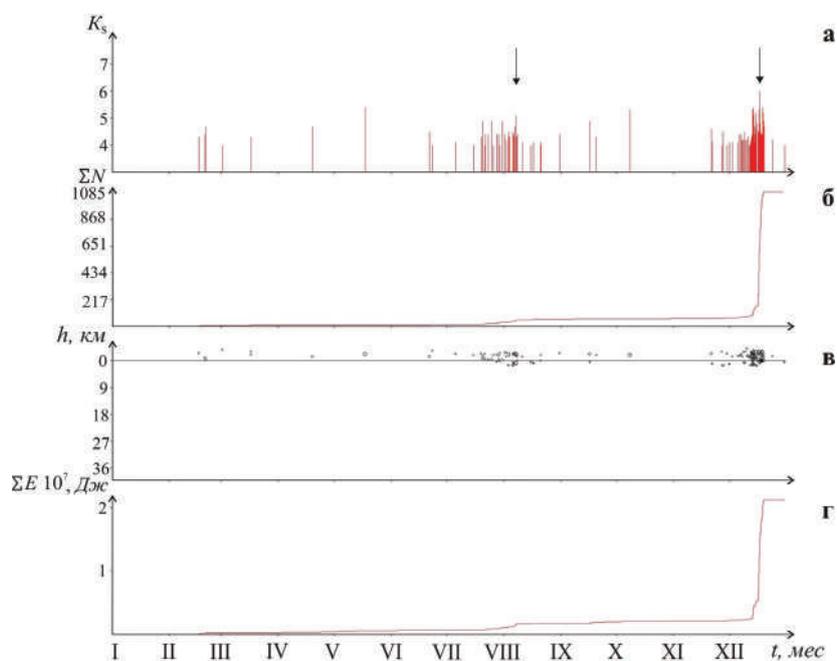


Рис. 10. Изменение во времени энергетического класса K_s (а), кумулятивного числа землетрясений ΣN (б), глубины гипоцентров h (в), кумулятивной сейсмической энергии ΣE (г) совокупности вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 6 км от вулкана Безымянный в 2001 г. (стрелки обозначают извержения вулкана)

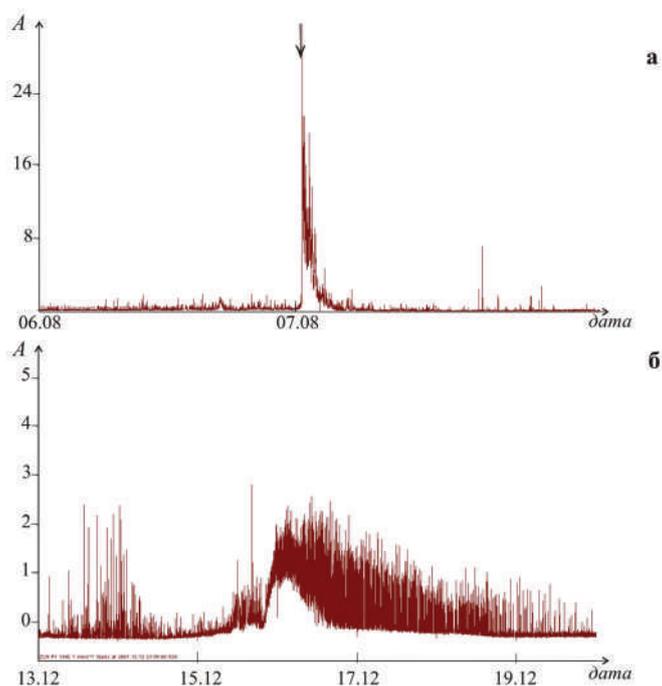


Рис. 11. Амплитуда огибающей сейсмического сигнала (безразмерная единица), осредненная в 10-секундном интервале при извержении вулкана Безымянный в августе (а) и в декабре (б). Стрелка обозначает начало мощного пеплового выброса при извержении вулкана 7 августа.

На рис. 3 представлены карта эпицентров и вертикальный разрез гипоцентров, на рис. 12 – графики изменения во времени параметров активности вулкана. На протяжении 2001 г. наблюдалось некоторое усиление сейсмичности в виде небольших роев землетрясений в январе и в конце декабря. 5 января произошло самое сильное землетрясение $K_s=9.6$ с дальностью регистрации 400 км.

Таблица 5. Параметры вулканических землетрясений разных типов, записанных вблизи ($\Delta=20$ км) вулкана Плоский Толбачик на станции «Каменистая» в 2001 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	10	39	10.3	238.44	4	24	5.3	7.34	6	11	10.78
Февраль	–	9	7.7	19.43	3	41	6.1	19.53	2	11	5.2
Март	–	10	8.9	35.99	–	7	5.5	1.93	–	3	0.89
Апрель	–	1	4.5	0.21	–	1	5.8	0.42	–	–	–
Май	–	2	7.5	6.44	–	–	–	–	–	1	0.16
Июнь	–	7	7.5	7.85	–	6	5.6	1.89	–	–	–
Июль	–	11	8.7	32.05	–	1	7.1	3.16	–	–	–
Август	1	7	5.7	2.29	–	–	–	–	1	1	0.2
Сентябрь	–	9	5.6	2.39	–	–	–	–	–	–	–
Октябрь	1	9	6	3.64	–	1	4.6	0.32	–	1	0.12
Ноябрь	–	3	5.4	0.75	–	–	–	–	–	–	–
Декабрь	–	24	7.8	22.46	–	1	10.7	150	4	–	–
Всего	12	131		371.94	7	82		184.59	13	28	17.35

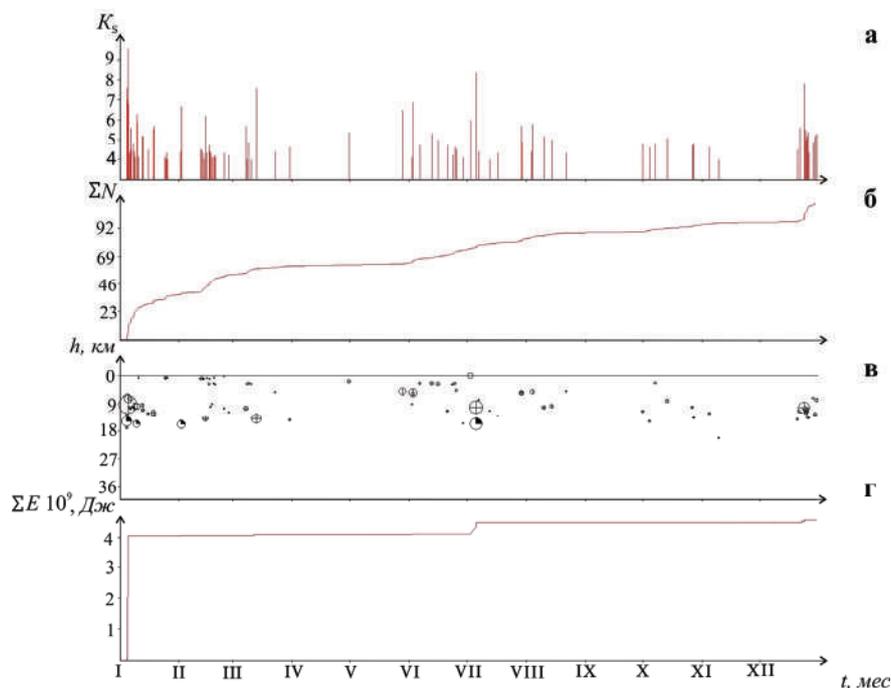


Рис. 12. Изменение во времени энергетического класса K_S (а), кумулятивного числа землетрясений ΣN (б), глубины гипоцентров h (в), кумулятивной сейсмической энергии ΣE (г) совокупности вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 20 км от вулкана Плоский Толбачик в 2001 г.

Вулканы Ушковский и Крестовский образуют единый вулканический массив, осложненный вершинной кальдерой. Этот массив рассечен глубокими ледниковыми ущельями и эрозионными долинами. Вулкан Крестовский – координаты вершины: $56^{\circ}07' N$, $160^{\circ}30' E$, абсолютная высота вулкана $h_v=4108$ м; Ушковский – координаты вершины: $56^{\circ}04' N$, $160^{\circ}28' E$; абсолютная высота вулкана $h_v=3943$ м. Ближайшие телеметрические станции – «Крестовский» и «Логинов» – расположены в 12 км от вершины Крестовского и регистрируют землетрясения с $K_S \geq 3.5$. Сеть позволяет локализовать землетрясения с $K_S \geq 4.0$, но надежно – с $K_S \geq 4.5$. Карта эпицентров и вертикальный разрез гипоцентров представлены на рис. 3, графики изменения во времени параметров активности вулкана – на рис. 13, а традиционный подсчет землетрясений с разбиением по типам – в табл. 6.

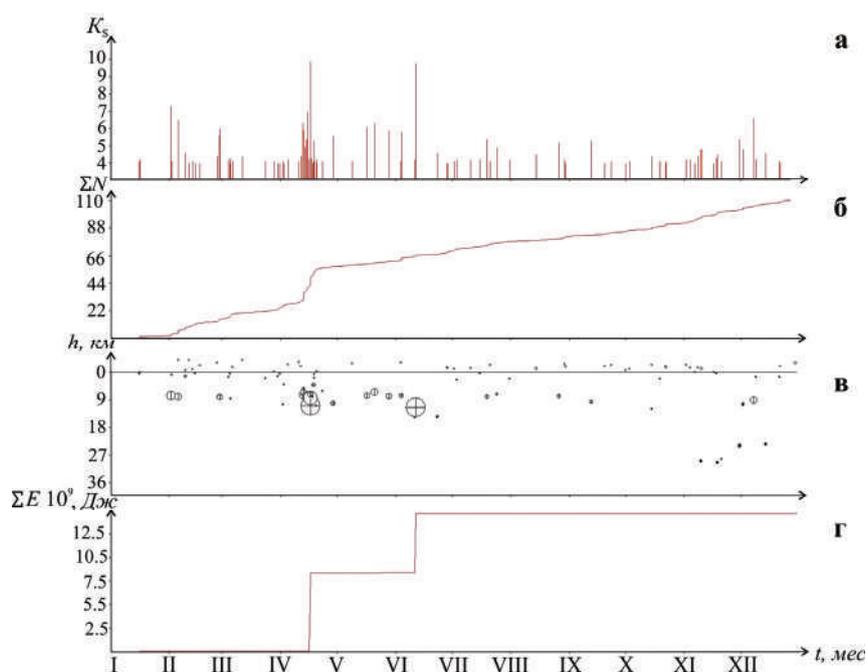


Рис. 13. Изменение во времени энергетического класса K_s (а), кумулятивного числа землетрясений ΣN (б), глубины гипоцентров h (в), кумулятивной сейсмической энергии ΣE (г) совокупности вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 10 км от вулканов Крестовский и Ушковский в 2001 г.

Таблица 6. Параметры вулканических землетрясений разных типов, записанных вблизи ($\Delta=10$ км) вулканов Крестовский и Ушковский на станции «Цирк» в 2001 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	–	1	8.2	12.07	15	29	4.9	4.15	–	–	–
Февраль	–	1	5.1	0.2	8	21	5.3	2.57	–	–	–
Март	–	1	4.7	0.23	5	21	5.4	3.27	–	–	–
Апрель	–	–	–	–	5	12	5.1	1.64	–	–	–
Май	–	–	–	–	8	6	4.7	0.67	–	–	–
Июнь	–	1	4.4	0.11	–	5	4.6	0.68	–	–	–
Июль	–	–	–	–	10	14	5	1.92	–	–	–
Август	–	–	–	–	3	4	5.2	0.56	–	–	–
Сентябрь	–	–	–	–	2	3	5.2	0.52	–	1	0.21
Октябрь	–	1	5.6	0.48	1	7	4.8	0.84	–	–	–
Ноябрь	–	–	–	–	7	16	5.2	2.03	–	–	–
Декабрь	–	–	–	–	21	8	5.1	1.09	–	–	–
Всего	–	5		13.09	85	146		19.94		1	0.21

В 2001 г. с 12 по 22 апреля был зарегистрирован рой землетрясений на северо-восточном склоне вулкана Крестовский с глубины от 6 до 15 км. Самое сильное ($K_s=10.0$) землетрясение произошло 12 апреля в 23^h59^m и оно ощущалось в г. Ключи, в 30 км от эпицентра с интенсивностью 3–4 балла. Землетрясения этого роя не вошли в табл. 6, т.к. они относятся, по-видимому, к Ключевскому вулкану (табл. 3), вернее, они попали как раз на границу (перевал) между вулканами Крестовский и Ключевской и отражены на рис. 8, 13 в соответствии с тем, в какой круг на рис. 3, а они попали.

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 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, 17]. Общая карта распределения эпицентров и вертикальный разрез гипоцентров представлены на рис. 14. Весь район № 2, изображенный на рис. 1, является областью надежной регистрации для событий энергетического класса $K_S \geq 4.0$.

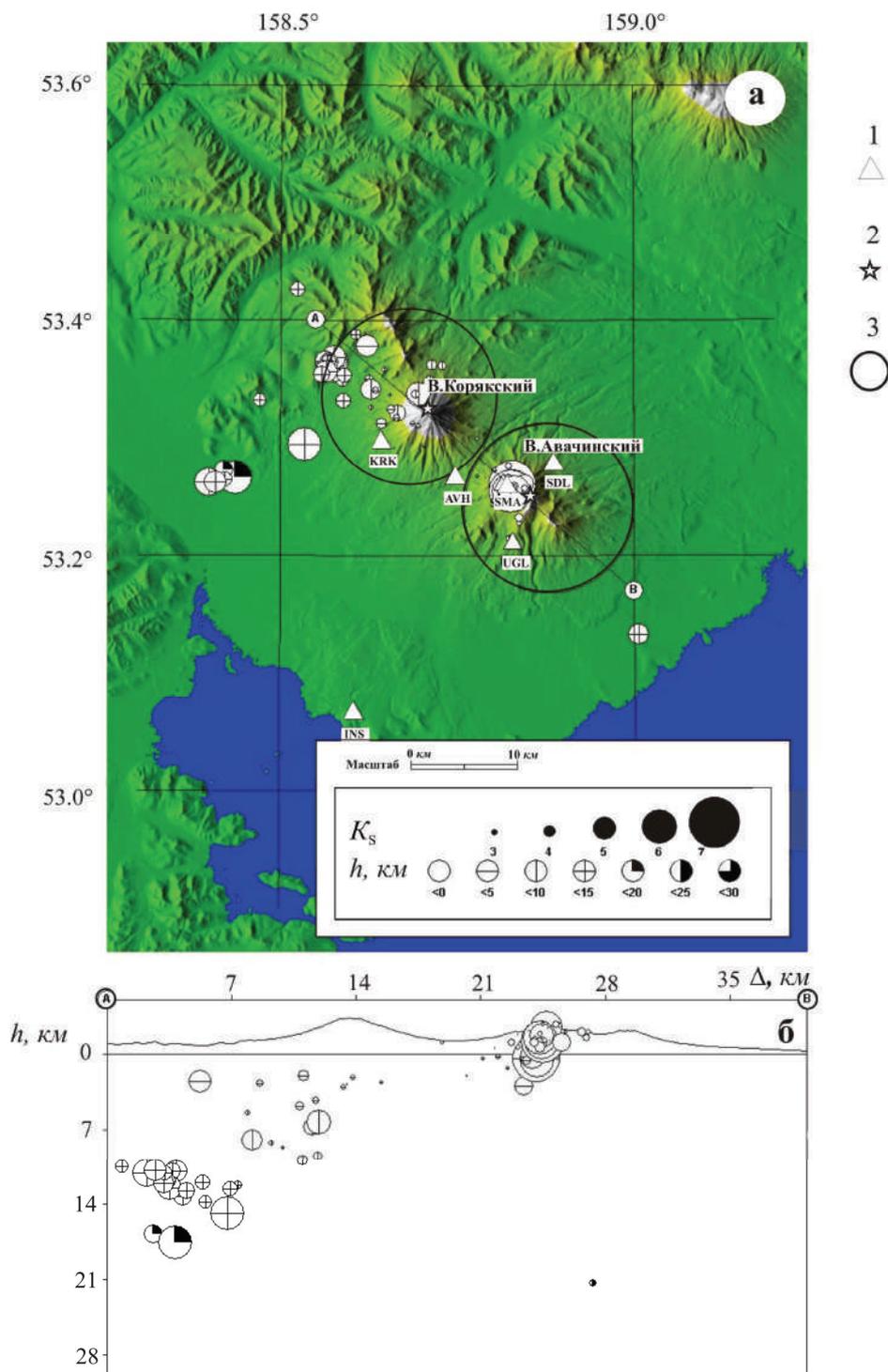


Рис. 14. Карта эпицентров (а) и вертикальный разрез вдоль линии А–В (б) для землетрясений района № 2 в 2001 г.

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 2001 г. содержит параметры для $N_{\Sigma}=255$ землетрясений с $K_S=1.6-6.8$. Из них минимальный класс $K_S=1.6$ имеют три землетрясения. Два из них локализованы 22 января в $13^{\text{h}}51^{\text{m}}$ и в $17^{\text{h}}58^{\text{m}}$, третье – 29 октября в $13^{\text{h}}54^{\text{m}}$. Максимальный класс $K_S=6.8$ имеет землетрясение, отмеченное 31 августа в $08^{\text{h}}05^{\text{m}}$ [8]. Суммарная энергия всех землетрясений, включенных в каталог, равна $\Sigma E=19.445 \cdot 10^6$ Дж, что в три раза больше таковой в 2000 г. ($\Sigma E=6.455 \cdot 10^6$ Дж [11]). Распределение их по классам дано в табл. 7, график повторяемости – на рис. 15; значение параметра $\gamma=-0.496 \pm 0.052$. Из графика следует, что в 2001 г. представительными в каталоге являются землетрясения с $K_S \geq 4$.

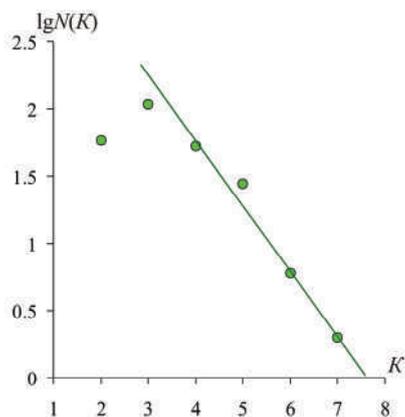


Рис. 15. График повторяемости землетрясений Авачинской группы вулканов (район № 2) за 2001 г.

Таблица 7. Распределение землетрясений в районе № 2 по энергетическим классам K_S в 2001 г.

K_S	1	2	3	4	5	6	7	N_{Σ}	$\Sigma E \cdot 10^6, \text{ Дж}$
$N(K)$	–	58	108	53	28	6	2	255	19.445

В 2001 г. на Авачинском вулкане (рис. 16) наблюдалась активизация в виде роя поверхностных землетрясений и внешнее проявление вулканической активности в виде кратковременного (2 мин) и небольшого (до 1000 м над кратером) паро-газового выброса, содержащего пепел.

Первые признаки проявления сейсмической активности в 2001 г. были зарегистрированы 31 августа [18, 19], когда в постройке вулкана на высоте уровня моря произошло землетрясение с $K_S=6.8$ и два более слабых. За весь период наблюдений, начиная с 01.01.1994 г., землетрясения с $K_S=6.0 \div 6.5$ были зарегистрированы только в феврале–апреле 1996 г. Логичным следствием регистрации стало объявление тревоги 21 сентября 2001 г., когда сильные землетрясения повторились. Всего в данный период активизации было зарегистрировано четыре всплеска сейсмической активности:

- 1) 25–31 августа – пять землетрясений с $K_S=4.1-6.8$ на глубинах h от 0.5 до -1.0 км от уровня моря;
- 2) 19–22 сентября – семь землетрясений с $K_S=4.1-6.6$, h от 0.33 до -1.14 км;
- 3) 1–5 октября – пять землетрясений с $K_S=4.1-4.7$, h от -1.0 до -1.75 км;
- 4) 19–24 октября – десять землетрясений с $K_S=4.0-5.8$, h от -1.33 до -2.0 км.

Можно отметить тенденцию к некоторому подъему гипоцентров слабых землетрясений в период активизации. 4 октября в $18^{\text{h}}50^{\text{m}}$ было зафиксировано поверхностное сейсмическое событие, синхронное паро-газовому выбросу с некоторым содержанием пепла высотой до 1000 м. Короткая продолжительность события (около 2 мин) и спектральный анализ сигнала хорошо согласуются с характером и типом наблюдавшейся активизации вулкана.

В целом можно констатировать, что вся сейсмическая активность Авачинского вулкана происходила в его постройке и никакого поступления нового магматического материала с глубины не происходило.

На вулкане Корякский в 2001 г. сейсмической и вулканической активности отмечено не было (рис. 17).

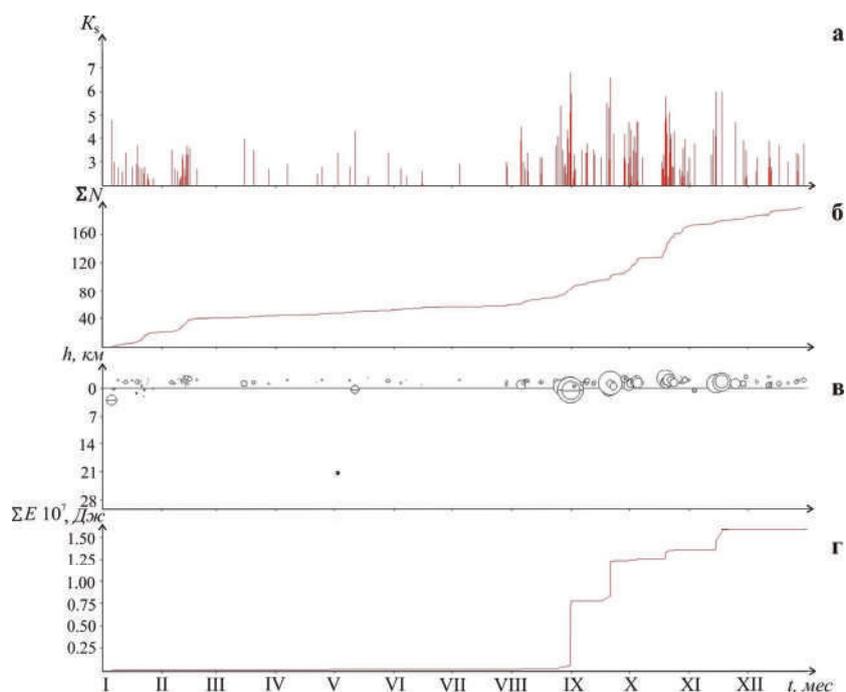


Рис. 16. Изменение во времени энергетического класса K_s (а), кумулятивного числа землетрясений ΣN (б), глубины гипоцентров h (в), кумулятивной сейсмической энергии ΣE (г) совокупности вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 8 км от вулкана Авачинский в 2001 г.

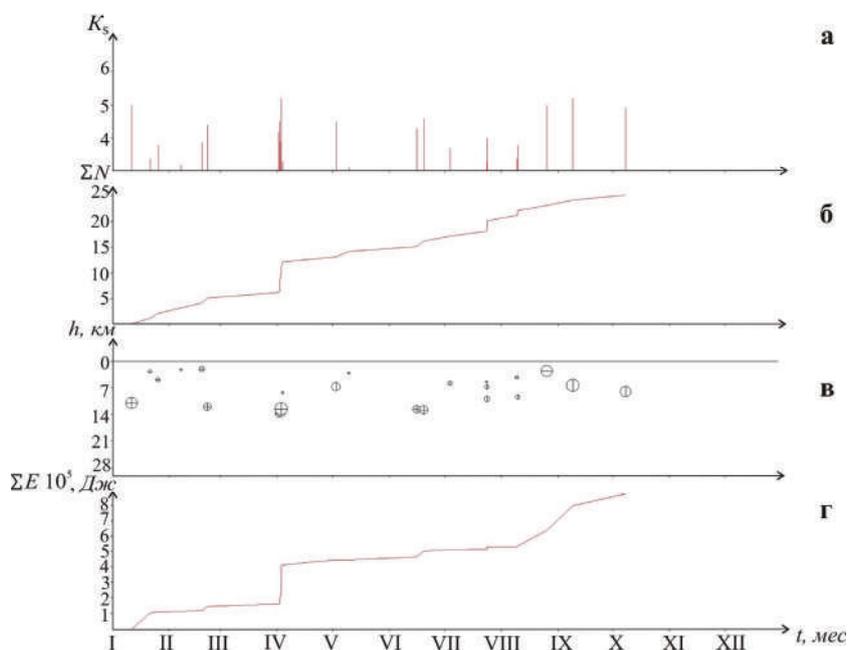


Рис. 17. Изменение во времени энергетического класса K_s (а), кумулятивного числа землетрясений ΣN (б), глубины гипоцентров h (в), кумулятивной сейсмической энергии ΣE (г) совокупности вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 8 км от вулкана Корякский в 2001 г.

Л и т е р а т у р а

1. Действующие вулканы Камчатки / Под ред. С.А. Федотова, Ю.П. Масуренкова – М.: Наука, 1991. – 1. – С. 5–11.
2. Кирьянов В.Ю. Вулканические пеплы Камчатки как источник потенциальной вулканической опасности для пассажирских авиалиний // Вулканология и сейсмология. – 1992. – № 3. – С. 16–36.

3. **Кирьянов В.Ю., Чубарова О.С., 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 2000 году. – Обнинск: ГС РАН, 2006. – С. 175–182.
6. **Федотов С.А.** Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. – М.: Наука, 1972. – 117 с.
7. **Сениюков С.Л. (отв. сост.), Нуждина И.Н., Дрознина С.Я., Кожевникова Т.Ю.** Северная группа вулканов. (См. раздел VI (Каталоги землетрясений) в наст. сб. на CD).
8. **Сениюков С.Л. (отв. сост.), Нуждина И.Н., Дрознина С.Я., Кожевникова Т.Ю.** Авачинская группа вулканов. (См. раздел VI (Каталоги землетрясений) в наст. сб. на CD).
9. **Детальные сейсмологические исследования Камчатки и Командорских островов (01.01–31.12.1998 г.)** – 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., Толочкова С.Л.** Сейсмический мониторинг вулканов Камчатки // Землетрясения Северной Евразии в 1999 году. – Обнинск: ГС РАН, 2005. – С. 253–273.
11. **Сениюков С.Л., Гарбузова В.Т., Дрознина С.Я., Нуждина И.Н., Кожевникова Т.Ю., Толочкова С.Л.** Сейсмический мониторинг вулканов Камчатки // Землетрясения Северной Евразии в 2000 году. – Обнинск: ГС РАН, 2006. – С. 321–336.
12. **Сениюков С.Л.** Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений // Комплексные сейсмологические и геофизические наблюдения на Камчатке. – Петропавловск-Камчатский: 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. **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 наблюдения на Камчатке. – Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2004. – С. 292–300.
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 наблюдения на Камчатке. – Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2004. – С. 301–318.
17. **Чубарова О.С., Сениюков С.Л., Левина В.И.** Землетрясения вулканических районов Камчатки // Землетрясения Северной Евразии в 1995 году. – М.: ГС РАН, 2001. – С. 105–111.
18. **Мелекесцев И.В., Селиверстов Н.И., Сениюков С.Л.** Информационное сообщение об активизации в октябре 2001 вулкана Авачинский на Камчатке и проведенных исследованиях 2001 г. // Вулканология и сейсмология. – 2002. – № 2. – С. 79–80.
19. **Сениюков С.Л., Нуждина И.Н., Дрознина С.Я., Кожевникова Т.Ю.** Сейсмичность Авачинского вулкана в 1994–2005 гг. // Материалы научно-технической конференции 17–18 января 2006 г. «Геофизический мониторинг Камчатки». – Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2006. – С. 101–105.