

III. СЕЙСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ВУЛКАНОВ

УДК 550.348.435 (517.66)

ВУЛКАНЫ КАМЧАТКИ

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

Т.Ю. Кожевникова, С.Л. Толокнова

*Камчатский филиал Геофизической службы РАН,
г. Петропавловск-Камчатский, ssl@emsd.iks.ru.*

По современным представлениям на Камчатке выделено 29 действующих вулканов (рис. 1). Мониторинг действующих вулканов на Камчатке 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-ова Камчатка [1, 2, 3].

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

- сейсмический мониторинг;
- визуальные и видеонаблюдения;
- спутниковый мониторинг термальных аномалий и пепловых выбросов.

Наиболее информативными и надежными являются данные наблюдений за сейсмической активностью. Их качество не зависит от погодных условий, а высокая информативность доказана многочисленными исследованиями как на Камчатке, так и во всем мире.

В 2000 г. радиотелеметрическая сеть сейсмических станций Камчатского филиала ГС (рис. 1) не изменилась, по сравнению с таковой 1999 г. [4], и позволила проводить сейсмический мониторинг вулканов Камчатки в реальном режиме времени. Наиболее детальные наблюдения проводились для Авачинской и Ключевской групп вулканов (Ключевская группа входит в Северную группу вулканов). На вулканах Шивелуч, Карымский, Горелый работало только по одной станции, которые были в состоянии фиксировать слабые локальные землетрясения, но не было возможности корректно локализовать их. Для остальных вулканов регистрировались только сильные ($K_S=7-9$) сейсмические события по удаленным станциям (K_S – энергетический класс землетрясений $K_{S1,2}^{\Phi 68}$, определяемый по номограмме С.А. Федотова [5]). Пересчет энергетического класса в локальную магнитуду выполнен по формуле А.А. Гусева $M_L = K_S/2 - 0.75$ [6]. Характеристика сети сейсмических станций дана в [7].

В 2000 г. применялись такие же методы обработки сейсмических данных, как и в 1999 г. [4]. Определение кинематических параметров землетрясений в вулканических районах № 1, 2 выполнялось на основе одномерных скоростных моделей [4, 8] с помощью программы Ю.Ю. Мельникова [9]. В 2000 г. благодаря внедрению современных технологий сбора и обработки сейсмологической информации и большой работе по организации оперативного режима контроля сейсмичности вулканов все землетрясения в вулканических районах были обработаны в режиме, близком к реальному времени. Ниже приведены данные анализа сейсмической активности в районах Северной (№ 1) и Авачинской (№ 2) групп вулканов (рис. 1).

Сейсмичность Северной группы вулканов. Землетрясения, регистрируемые в этой группе, отличаются от тектонических землетрясений большим разнообразием. На Камчатке для классификации вулканических землетрясений используется классификация П.И. Токарева [10], согласно которой все землетрясения делятся на пять типов [4]. Землетрясения I–III типов,

имеющие вступления P - и S -волн, обрабатываются, как правило, по стандартной методике: определяются времена вступлений P и S -волн, максимальные амплитуды (A_{\max}) и периоды T для S -волн, энергетические классы и координаты гипоцентров.

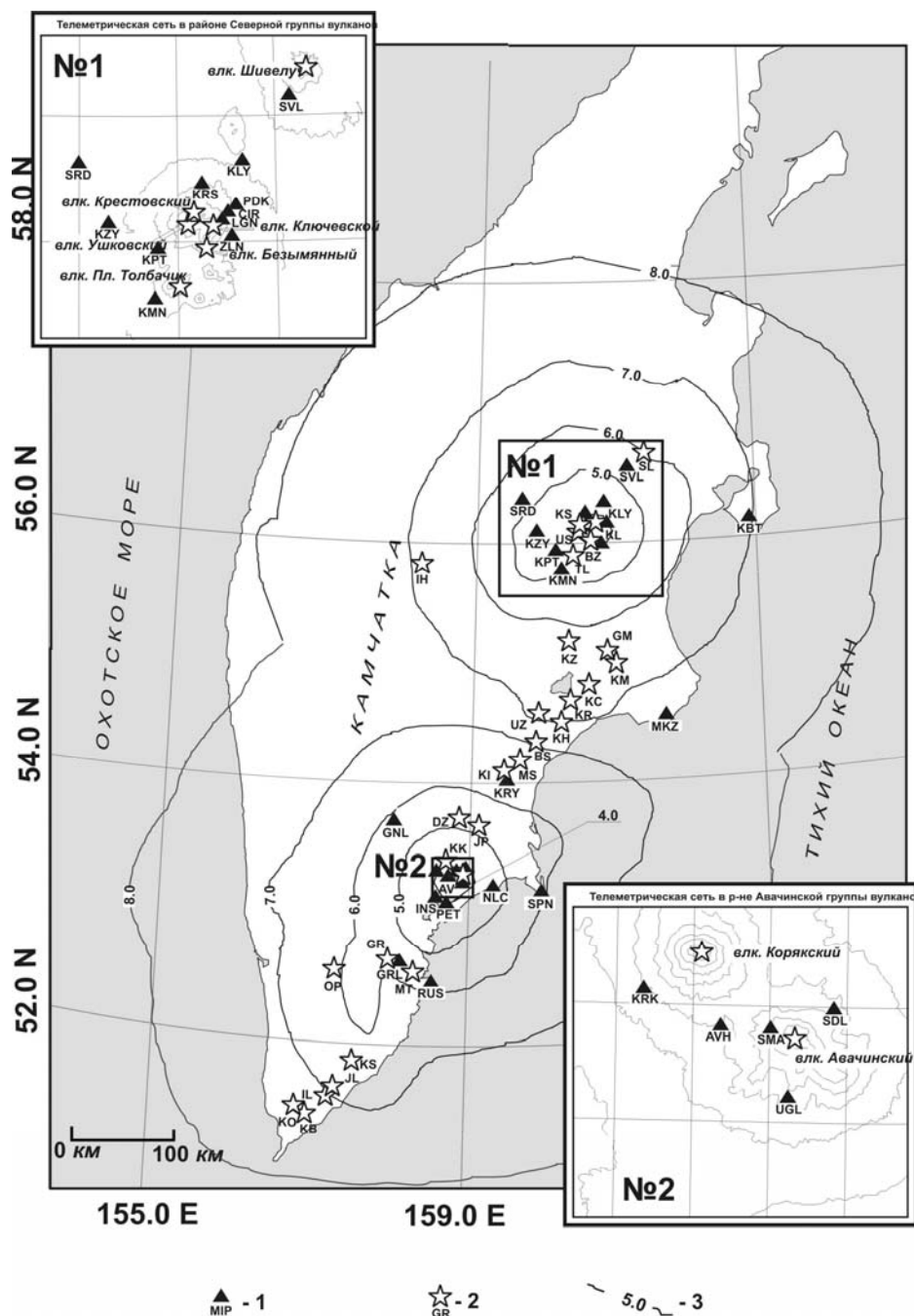


Рис. 1. Карта активных вулканов Камчатки, радиотелеметрических станций и изолинии энергетической представительности K_{\min}

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

Названия вулканов и их коды: Шивелуч (SL), Ключевской (KL), Ушковский (US), Безымянный (BZ), Плоский Толбачик (TL), Новые Толбачинские вулканы (TE), Ичинский (IH), Кизимен (KZ), Гамчен (GM), Комарова (KM), Кроноцкий (КС), Крашенинникова (KR), Кихпинич (KH), Узон (UZ), Большой Семячик (BS), Малый Семячик (MS), Карымский (KI), Дзензур (DZ), Жупановский (JP), Корякский (KK), Авачинский (AV), Горелый (GR), Мутновский (MT), Опала (OP), Ксудач (KS), Желтовский (JL), Ильинский (IL), Кошелевский (КО), Камбальный (КВ). Код и название телеметрических станций: SVL – «Шивелуч», KLY – «Ключи», SRD – «Срединный», KRS – «Крестовский», PDK – «Подкова», CIR – «Цирк», LGN – «Логонов», 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.

Таблица 1. Распределение землетрясений в районе № 1 по энергетическим классам K_S в 2000 г.

K_S	3	4	5	6	7	8	9	N_{Σ}	$\Sigma E \cdot 10^9, Дж$
$N(K)$	165	1285	1128	279	25	4	1	2882	1.573

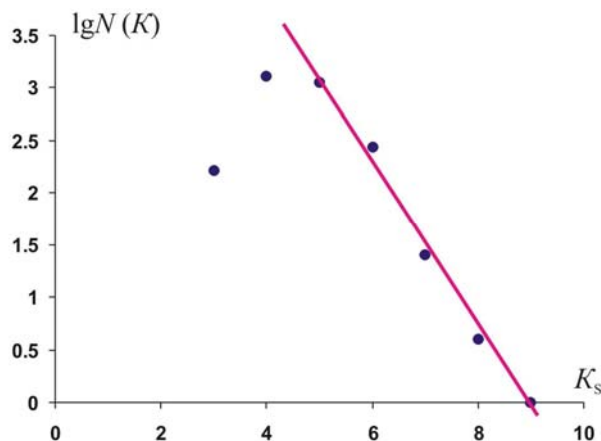


Рис. 2. График повторяемости землетрясений Северной группы вулканов (район № 1) за 2000 г.

Все землетрясения I–III типов, зарегистрированные тремя и более станциями, включены в каталог [11], содержащий 2882 землетрясения с $K_S=2.6–8.8$. Минимальный класс $K_S=2.6$ имеют два толчка, локализованные 11 июня в 00^h54^m и 16 декабря в 17^h23^m ; максимальный $K_S=8.8$ – одно землетрясение, отмеченное 27 февраля в 16^h25^m . Суммарная энергия всех землетрясений, включенных в каталог, равна $\Sigma E=1.573 \cdot 10^9 Дж$. Распределение их по классам дано в табл. 1, график повторяемости – на рис. 2. Из графика следует, что представительными в каталоге являются землетрясения с $K_S \geq 5$; значение параметра $\gamma=0.78$.

Однако каталог, содержащий стандартные характеристики (время в очаге, координаты гипоцентра и энергию) вулканических землетрясений, позволяет проводить пространственно-временной анализ сейсмичности, но не отражает всего многообразия сейсмических явлений. Поэтому для всех других, более слабых землетрясений I–III и IV типов (в IV типе S-волну выделить невозможно) измеряется отношение A_{max}/T , характеризующее их энергию (для велосиграфов измеряется только A_{max}). Для вулканического дрожания (тип V) измеряются A_{max} , T и продолжительность τ цугов колебаний. Результаты измерений заносятся в таблицы, вычисляются производные параметры $(A/T)_{cp}$, $(A/T)_{max}$, $\Sigma A/T$ и др., которые служат главным образом для целей краткосрочного сейсмического прогноза по методикам П.И. Токарева [10].

Вулкан Шивелуч – самый северный действующий вулкан Камчатки. Координаты активного кратера – $56^{\circ}38' N$, $61^{\circ}19' E$, абсолютная высота нового купола – около 2500 м. Вулкан находится в 45 км к северо-востоку от г. Ключи (рис. 3). Ближайшая телеметрическая станция «Шивелуч» расположена в 8.5 км от активного кратера вулкана. Активность вулкана Шивелуч в 2000 г. была достаточно высокой, со слабыми и умеренными извержениями. По визуальным наблюдениям сотрудников сейсмической станции «Ключи» было зафиксировано 10 газопепловых выбросов высотой до 17 км над уровнем моря (табл. 2). Фотоснимок одного из них приведен на рис. 4.

Таблица 2. Время возникновения и высота h_y газопепловых выбросов вулкана Шивелуч по визуальным наблюдениям на сейсмической станции «Ключи» в 2000 г.

Дата, д м	t_0 , ч мин	h_y , км	Дата, д м	t_0 , ч мин	h_y , км
07.02	04 53	4.0	28.08	22 30	16.5
17.03	05 52	3.5	12.09	18 15	10.0
29.06	15 46	8.5	12.09	19 00	6.0
01.07	03 44	6	12.09	19 30	5.5
22.08	23 43	17.5	12.09	21 00	4.8

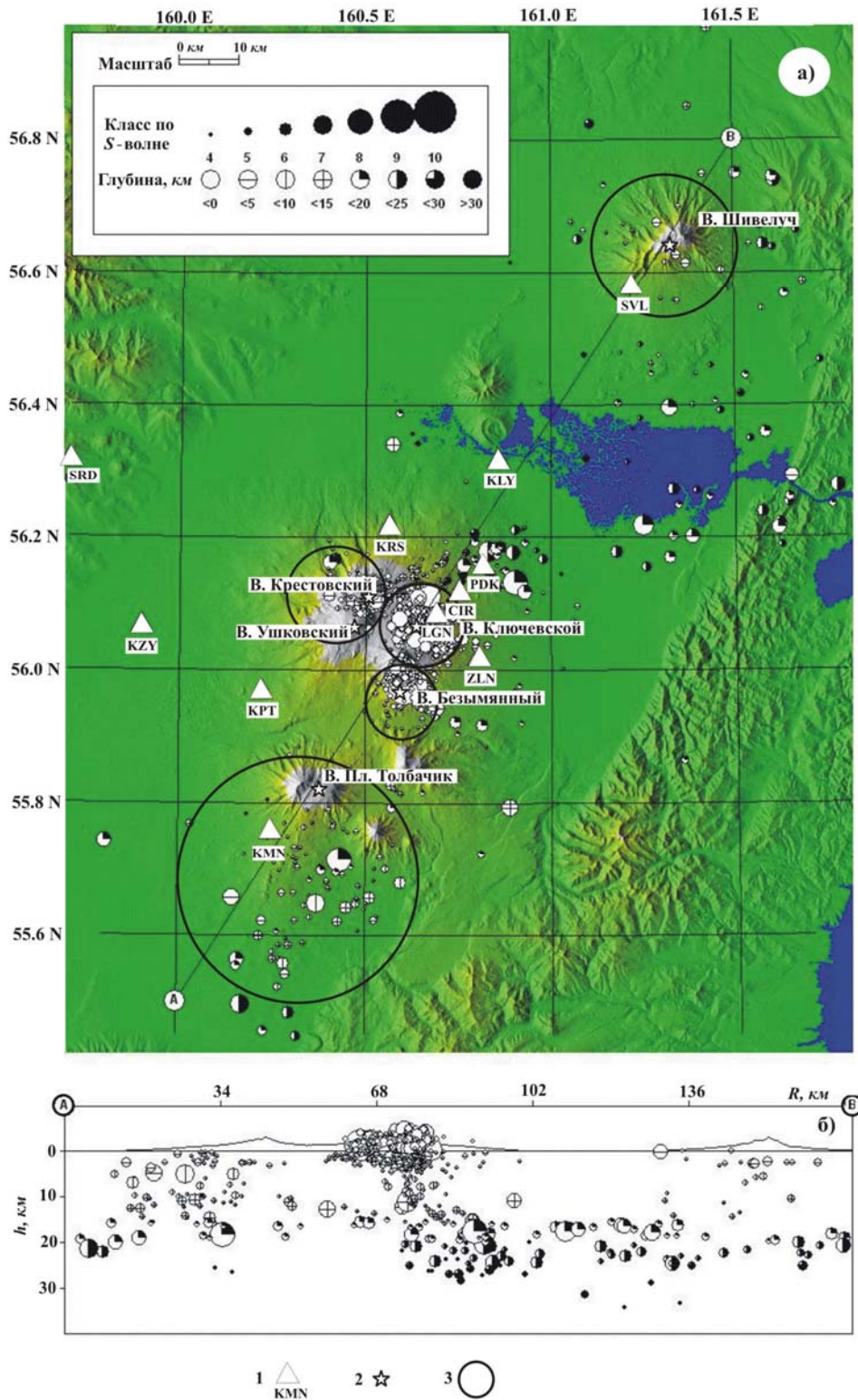


Рис. 3. Карта эпицентров (а) и вертикальный разрез вдоль линии А–В (б) для землетрясений района № 1
 1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан; 3 – окружность вокруг вулкана обозначает область выборки землетрясений, для которой построены графики сейсмической активности. Радиусы областей, соответственно, равны: Шивелуч (12 км), Ключевской (7 км), Крестовский и Ушковский (10 км), Безымянный (6 км), Плоский Толбачек (20 км).



Рис. 4. Газопепловый выброс на вулкане Шивелуч 28 августа 2000 г. (фото Ю.В. Демьянчук)

В табл. 3 представлены данные землетрясений, зарегистрированные станцией «Шивелуч».

Таблица 3. Параметры вулканических землетрясений разных типов, записанных вблизи ($\Delta=12$ км) вулкана Шивелуч на одноименной станции «Шивелуч» в 2000 г.

Месяцы	Типы вулканических землетрясений															
	I			II, III			IV			V						
										Низкочастотные			Вулканическое дрожание			
	<i>N</i>	<i>K_{Smax}</i>	$\Sigma A/T$	<i>N</i>	<i>K_{Smax}</i>	$\Sigma A/T$	<i>N</i>	$\Sigma A/T$	$\Sigma A/T_{cp}$	$\Sigma A/T_{max}$	$\Sigma \tau, ч$	$\Sigma A/T_{cp}$	$\Sigma A/T_{max}$	$\Sigma \tau, ч$		
<0.2	≥0.2		<0.2	≥0.2		<0.5	≥0.5									
Январь	5	7.2	11.51	22	40	6.4	47.88	29	22	24.35	5.72	9.1	0.25	0.26	1.14	2.51
Февраль	4	6.6	4.58	–	14	5.2	12.4	17	18	21.99	2.11	6.03	0.13	0.19	2.66	2.66
Март	5	6.1	2.62	1	3	5.9	3.22	4	30	20.25	4.75	14	0.23	0.41	1.79	2.83
Апрель	7	7.2	5.76	22	14	5.1	12.47	40	32	25.94	–	–	–	–	–	–
Май	7	6.1	5.17	11	22	5.8	14.56	54	109	87.77	4.97	16.6	0.43	1.1	2.55	2.38
Июнь	–	–	–	–	34	6.1	41.58	77	137	117.73	5.89	8.84	0.05	1.08	6.3	0.21
Июль	4	5.7	2.96	12	20	5.5	15.92	75	81	86.01	1.5	6.05	0.35	0.97	1.77	0.1
Август	5	6.1	3.02	28	30	4.8	44.02	322	178	182.95	4.4	11.42	0.39	0.42	2.04	16.06
Сентябрь	5	6.4	3.15	–	17	7.2	32.58	13	40	38.97	4.8	15.64	0.28	0.55	1.77	29.54
Октябрь	3	6.1	3.11	–	9	6.3	13.84	6	43	38.43	2.31	6	0.72	0.17	1.02	430.83
Ноябрь	6	7.0	5.54	–	–	–	–	1	7	14.89	2.7	5.1	0.08	–	–	–
Декабрь	1	6.0	0.59	2	4	6.7	3.9	8	17	13.63	1.37	2.83	0.3	0.21	0.84	144.72
Всего	52		48.01	98	207	7.2	242.37	646	714	672.91	3.68	16.6	2.91	0.54	6.3	631.84

Локализовать и поместить в каталог удалось только 12 наиболее сильных землетрясений (рис. 5), произошедших в районе вулкана в пределах круга радиусом 12 км, по которым нельзя проследить периоды подготовки к извержениям. Поэтому по-прежнему большую роль в анализе сейсмической обстановки играет традиционная обработка наблюдений ближней к вулкану станции.

Вулкан Ключевской: координаты вершины – 56°04' N, 160°38' E, абсолютная высота вулкана – 4750 м. Диаметр вершинного кратера, венчающего конус, около 700 м. Ближайшая теле-

метрическая станция «Логоинов» расположена в 4 км от кратера. В 2000 г. были определены параметры почти для 1775 землетрясений с $K_S > 4.0$. Карта их эпицентров и вертикальный разрез представлены на рис. 3, а характеристики сейсмичности (K_S , ΣN , ΣE , глубины очагов h) в течение 2000 г. – на рис. 6. Также был выполнен традиционный подсчет результатов измерений параметров землетрясений с разбиением по типам (табл. 4).

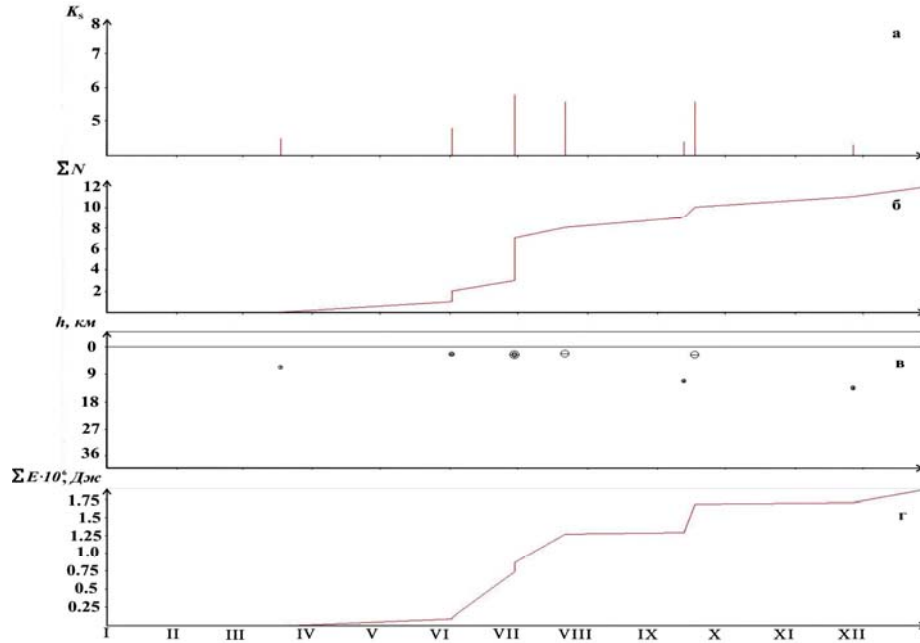


Рис. 5. Изменение во времени энергетического класса K_S (а), кумулятивного числа землетрясений ΣN (б), глубины гипоцентров h (в), кумулятивной сейсмической энергии ΣE (г) совокупности вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 12 км от вулкана Шивелуч

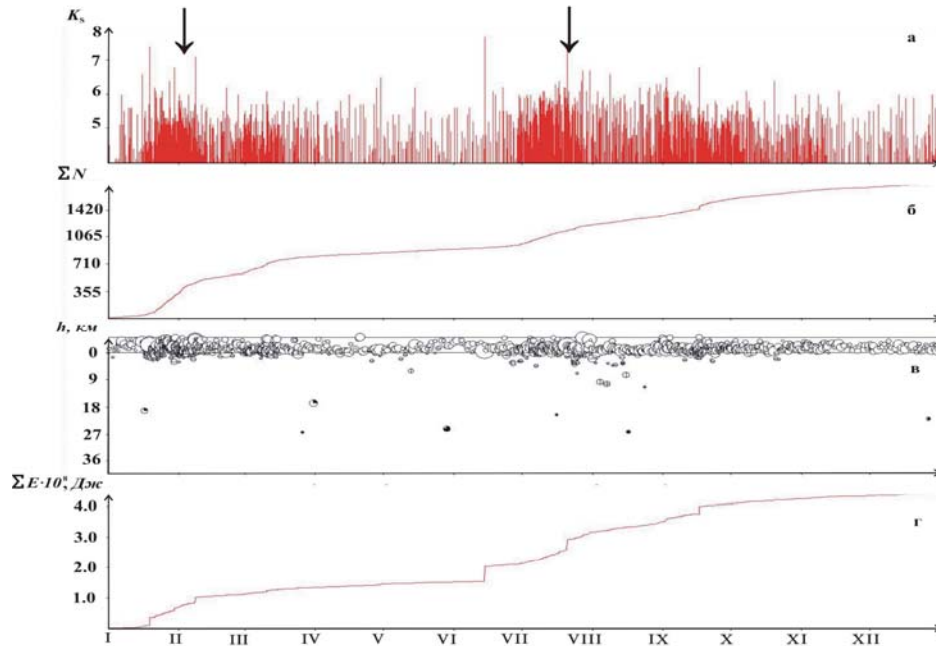


Рис. 6. Изменение во времени энергетического класса K_S (а), кумулятивного числа землетрясений ΣN (б), глубины гипоцентров h (в), кумулятивной сейсмической энергии ΣE (г) совокупности вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 7 км от вулкана Ключевской

Таблица 4. Параметры вулканических землетрясений разных типов, записанных вблизи ($\Delta=7$ км) вулкана Ключевской на станции «Цирк» в 2000 г.

Месяцы	Типы вулканических землетрясений													
	I				II, III				IV				V	
	N		K _{Smax}	ΣA/T	N		K _{Smax}	ΣA/T	N		ΣA/T	Вулканическое дрожание		
	<0.2	≥0.2			<0.2	≥0.2			<0.5	≥0.5		ΣA/T _{cp}	ΣA/T _{max}	Στ, ч
Январь	–	3	6.3	2.56	21	436	7.3	449.41	5941	1471	1633.56	0.11	0.35	73.5
Февраль	–	1	5.0	0.22	–	479	8.4	471.99	1007	341	391.81	–	–	–
Март	1	13	6.9	7.14	–	357	7.6	333.83	205	11	19.35	–	–	–
Апрель	2	5	5.8	1.48	4	90	7.8	113.53	53	4	3.47	–	–	–
Май	1	18	7.0	11.04	–	90	7.8	80.62	76	12	9.84	–	–	–
Июнь	2	8	6.6	7.18	–	118	8.5	134.05	39	3	2.99	0.1	0.1	48.0
Июль	1	11	6.4	6.94	125	321	9.8	535.45	194	63	60.83	0.25	1.56	528.0
Август	3	27	7.2	20.5	256	160	7.9	242.2	67	36	28.78	0.24	1.17	32.5
Сентябрь	–	7	8.3	21.93	199	305	7.9	581.52	11	18	19.36	–	–	–
Октябрь	1	5	6.1	2.24	121	116	7.7	239.11	4	3	2.42	–	–	–
Ноябрь	–	2	5.2	0.41	95	71	8.2	150.43	–	1	1.27	–	–	–
Декабрь	–	7	5.5	2.07	136	87	7.6	171.21	2	2	3.81	–	–	–
Всего	11	107	8.3	83.71	957	2630	9.8	3503.22	7599	1965	2177.42	0.18	1.56	682.0

Рис. 6 наглядно представляет, что практически вся сейсмическая активность в 2000 г., в отличие от сейсмической активности 1999 г. [4], была сосредоточена в центральной части вулкана на глубине от 5 км ниже уровня моря до вершины вулкана. По визуальным данным на вулкане Ключевской были зафиксированы 3 февраля в 05^h08^m и 27 июля в 19^h15^m кратковременные (продолжительностью несколько минут) газопепловые выбросы из центрального кратера высотой $h=3$ км. Фотография первого из них дана на рис. 7. Необходимо отметить, что эти выбросы предварялись и сопровождались повышением числа и энергии поверхностных землетрясений в постройке вулкана и слабым вулканическим дрожанием.



Рис. 7. Газопепловый выброс на Ключевском вулкане 3 февраля 2000 г. (фото Ю.В. Демьянчук)

Вулкан Безымянный: координаты вершины – 55°58'N, 160°35'E, абсолютная высота вулкана – 2869 м. Ближайшие телеметрические станции «Логоинов» и «Зеленая» расположены в 13.5 км от кратера вулкана (рис. 3). Традиционная обработка землетрясений с разделением по типам и определением их числа и суммарного отношения A/T представлена в табл. 5 для станции «Зеленая».

Таблица 5. Параметры вулканических землетрясений разных типов, записанных вблизи ($r=6$ км) вулкана Безымянный на станции «Зеленая» в 2000 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		
								$\Sigma A/T_{cp}$	$\Sigma A/T_{max}$	$\Sigma \tau, \text{ч}$	$\Sigma A/T_{cp}$	$\Sigma A/T_{max}$	$\Sigma \tau, \text{ч}$	
Январь	2	6.1	2.49	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Февраль	–	–	–	31	9.0	43.43	28	4.83	–	–	–	–	–	–
Март	–	–	–	153	7.1	56.18	756	275.39	4.03	67.72	7.0	0.91	1.93	2.0
Апрель	–	–	–	16	5.8	2.32	55	14.59	–	–	–	–	–	–
Май	–	–	–	12	5.5	1.89	13	4.18	–	–	–	–	–	–
Июнь	–	–	–	1	4.3	0.21	–	–	–	–	–	–	–	–
Июль	–	–	–	39	6.6	14.56	19	8.74	–	–	–	–	–	–
Август	–	–	–	17	7.5	15.31	34	12.69	–	–	–	–	–	–
Сентябрь	–	–	–	3	5.3	0.74	1	0.41	–	–	–	–	–	–
Октябрь	–	–	–	54	6.7	15.96	341	151.48	–	–	–	0.81	1.4	0.58
Ноябрь	–	–	–	69	7.7	58.42	328	180.41	3.92	10.88	0.17	2.49	4.43	0.67
Декабрь	–	–	–	9	6.1	1.91	4	2.2	–	–	–	–	–	–
Всего	2	6.1	2.49	404	9.0	210.93	1579	654.92	3.98	67.72	7.17	1.4	4.43	3.25

На протяжении всего 2000 г. можно отметить три периода усиления сейсмичности вблизи Безымянного вулкана (рис. 8). В марте и октябре эти активизации закончились извержениями, но повышенная сейсмичность с 20 июля по 24 августа извержениями не сопровождалось.

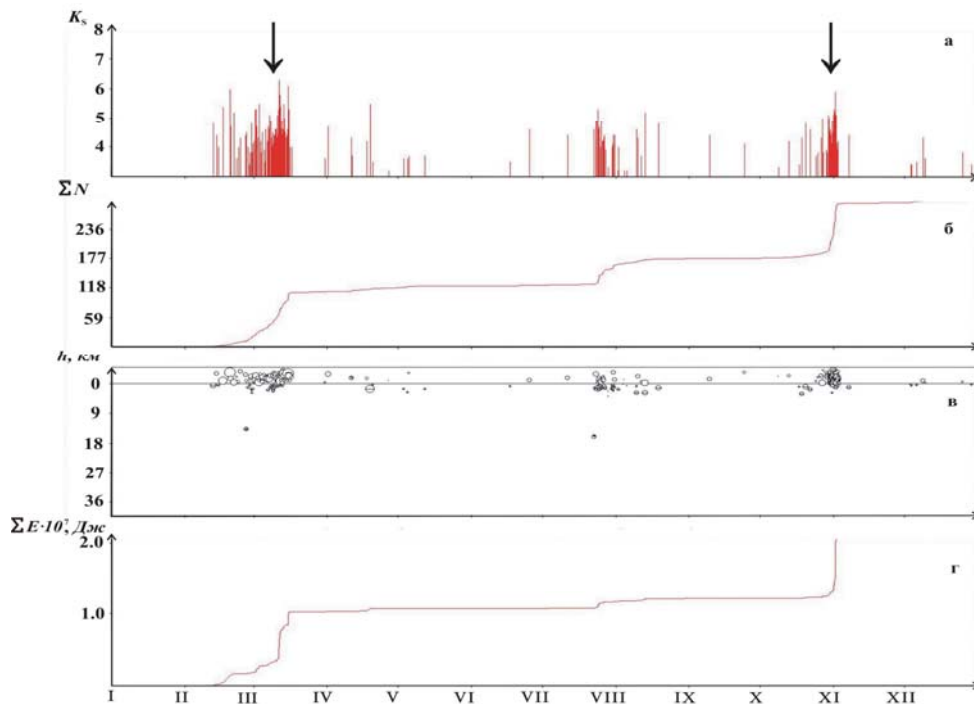


Рис. 8. Изменение во времени энергетического класса K_S (а), кумулятивного числа землетрясений ΣN (б), глубины гипоцентров h (в), кумулятивной сейсмической энергии ΣE (г) совокупности вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 6 км от вулкана Безымянный (стрелки обозначают извержения вулкана)

Первые признаки весенней активизации вулкана появились в середине февраля (рис. 8). График наглядно показывает, что предвещающая извержение сейсмичность состояла из роя немногочисленных слабых землетрясений, число которых постепенно увеличивалось, достигнув максимума 12 марта. По данным регистрации вулканического дрожания извержение

началось 13 марта в 16^h25^m (рис. 9). По спутниковым данным 13 марта в 16^h44^m было зафиксировано наличие термальной аномалии размером 4 пикселя и небольшое пепловое облако в 10 км к западу от вулкана. По визуальным наблюдениям из пос. Козыревск в этот же день в 19^h42^m над вулканом наблюдалась пепловая туча до высоты 5000 м над уровнем моря, которая распространялась на запад. В 20^h15^m отмечено выпадение пепла в Козыревске. В 23^h00^m пепловая туча накрыла поселок и протянулась до Срединного хребта. Наиболее сильное событие за этот период активности произошло 13 марта в 21^h31^m, которое можно интерпретировать как взрыв на куполе. Некоторое снижение активности вулкана наблюдалось 14 марта. На спутниковых снимках отмечалась термальная аномалия меньшей интенсивности, чем за прошедшие сутки. Пепловые облака отсутствовали.

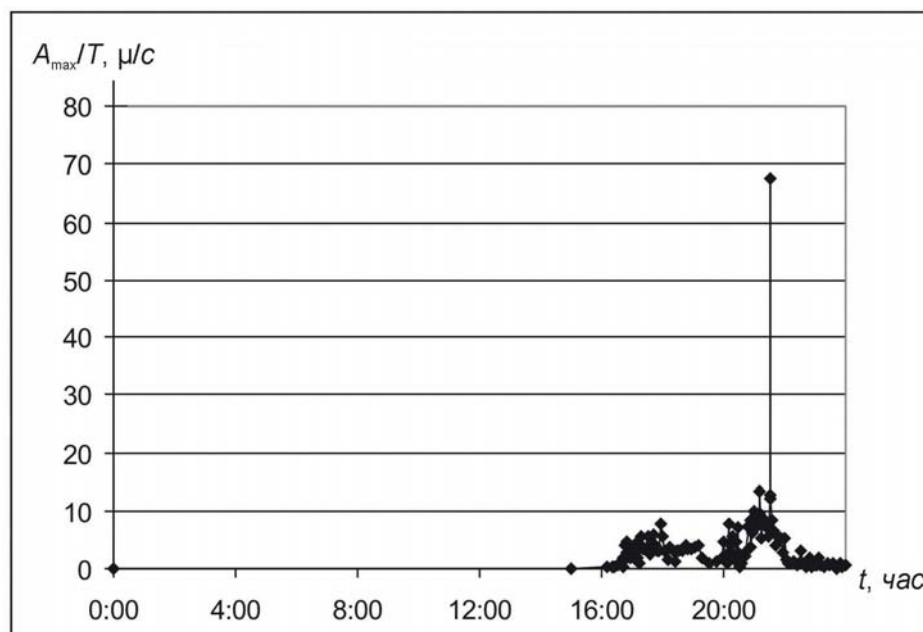


Рис. 9. Изменение во времени амплитуды скорости вулканического дрожания A_{\max}/T на станции «Зеленая» в течение 13 марта 2000 г.

15 марта с 10^h началось довольно быстрое усиление сейсмической активности, связанное, вероятно, с нарастанием интенсивности и мощности обвальных лавин. Поверхностные события и землетрясения из постройки вулкана происходили так часто, что к 12^h22^m слились в спазматическое вулканическое дрожание, продолжавшееся около 1.5 часов. Уровень дрожания 15 марта был приблизительно равен уровню дрожания в период извержения 13 марта, что указывало на возможные пепловые выбросы до высоты 5000 м над уровнем моря. К сожалению, визуальные наблюдения в этот период времени были невозможны из-за темного времени суток, но на спутниковом снимке, сделанном в 17^h50^m отметилось пепловое облако размером 100x60 км в 140 км к западу от вулкана (рис. 10). В дальнейшем происходило постепенное ослабление вулканической активности. На спутниковых снимках продолжала наблюдаться термальная аномалия до 29 марта. Слабая сейсмичность регистрировалась до середины мая.

В период активности с 20 июля по 24 августа были локализованы 54 события. На рис. 8 можно просмотреть графики распределения во времени различных параметров сейсмичности за данный период времени, которые указывают на ослабление сейсмичности. К 25 августа сейсмичность вернулась к фоновому уровню без каких-либо внешних проявлений в деятельности вулкана.

Осенний период активизации вулкана, также как и весенний, начался с сейсмической подготовки. Первые единичные землетрясения из района вулкана Безымянный сейсмические станции зарегистрировали 8 октября (рис. 8). Сейсмическая активность постепенно нарастала до 25 октября. На следующий день с 7^h40^m до 8^h30^m на станции «Зеленая» было зарегистриро-

вано слабое спазматическое вулканическое дрожание с амплитудой $A_{\max}/T=0.84 \mu/c$. С 26 по 29 октября сейсмическая активность вулкана еще увеличилась. По визуальным наблюдениям из пос. Козыревск 29 октября над кратером вулкана появились парогазовые выбросы. 30 октября в 13^h46^m сейсмическими станциями было зарегистрировано поверхностное дрожание продолжительностью около 30^m, которое могло сопровождать эксплозивное извержение. Было темное время суток, когда визуальные наблюдения невозможны. Но на спутниковом снимке в 18^h00^m обнаружено пепловое облако приблизительно на расстоянии 60 км к востоку от вулкана. Следующие события были зафиксированы 31 октября в 07^h50^m и в 09^h46^m, но они были слабыми и кратковременными, продолжительностью несколько минут. Эти сейсмические сигналы могли сопровождать только слабые пепловые выбросы. По сейсмическим данным максимум активности вулкана пришелся на 1 ноября, когда с 15^h20^m до 18^h40^m на станции «Зеленая» регистрировалось вулканическое дрожание с амплитудой до $A_{\max}/T=11 \mu/c$. Это подтвердилось и спутниковыми наблюдениями. На снимке за 1 ноября в 18^h28^m отмечилось пепловое облако в 130 км к западу от вулкана на высоте не более 6.5 км над уровнем моря (рис. 11). В дальнейшем активность вулкана стала снижаться. До 7 ноября продолжали наблюдаться парогазовые выбросы на высоту не более 2 км над кратером. Слабая сейсмичность регистрировалась до середины ноября.

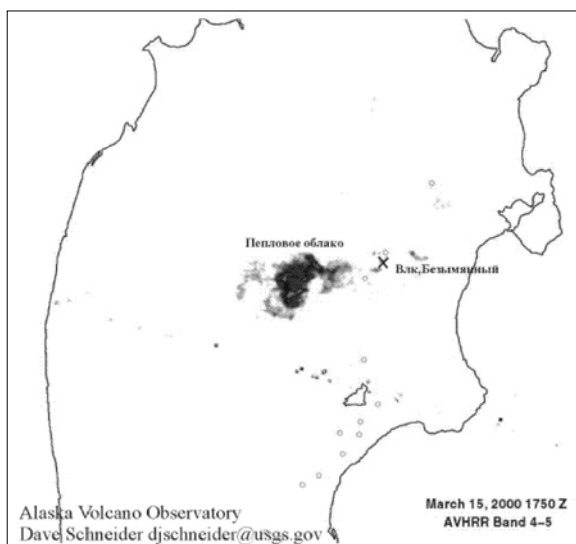


Рис. 10. Пепловое облако от извержения вулкана Безымянный 15 марта в 17^h50^m (снимок предоставлен Аляскинской вулканологической обсерваторией, Dave Schneider)

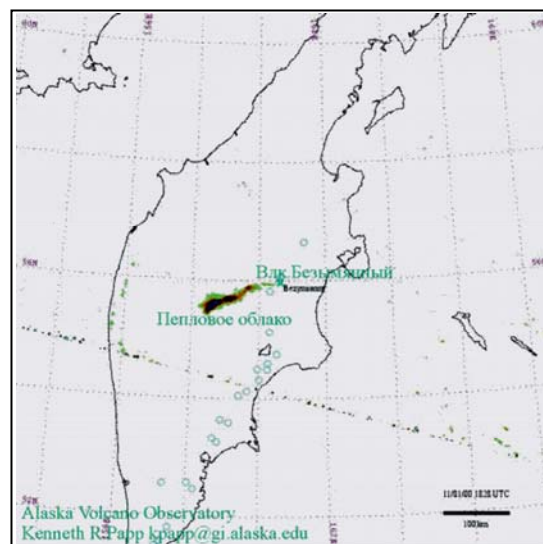


Рис. 11. Пепловое облако от извержения вулкана Безымянный 1 ноября в 16^h28^m (снимок предоставлен Аляскинской вулканологической обсерваторией, Kenneth Papp)

Вулкан Плоский Толбачик: координаты вершины – 55°49'N, 160°22'E, абсолютная высота вулкана – 3085 м. Ближайшая телеметрическая станция «Каменистая» расположена в 10 км от кратера вулкана. Обработка землетрясений по записям этой станции с разделением по типам, числу и суммарному отношению $\Sigma A_{\max}/T$ дана в табл. 6. На рис. 3 представлены карта эпицентров и разрез, на рис. 12 – характеристики сейсмичности (K_s , ΣN , ΣE , глубины очагов h).

В 2000 г. в районе вулкана Плоский Толбачик наблюдалась фоновая сейсмичность. Необходимо отметить, что по причине неисправности режима приема в центре (Козыревск) с 18 апреля по 3 мая и с 16 июня по 7 сентября 2000 г. были безвозвратно утеряны данные станций Козыревского куста – «Каменистая», «Копыто», «Срединный», «Козыревск». Это вполне объясняет «затишье» в июле–августе в районе вулкана Плоский Толбачик (рис. 12).

Вулканы Уиковский и Крестовский образуют единый вулканический массив, осложненный вершинной кальдерой и рассеченный глубокими ледниковыми ущельями и эрозионными доли-

нами. Координаты их вершин, соответственно, равны 56°07'N, 160°30'E и 56°04'N, 160°28'E; а абсолютные высоты – 4108 и 3943 м. Ближайшие телеметрические станции «Крестовский» и «Логинов» расположены в 12 км от кратера Крестовского. Карта эпицентров и разрез представлены на рис. 3, характеристики сейсмичности (K_S , ΣN , ΣE , глубины очагов h) – на рис. 13, традиционный подсчет характеристик землетрясений с разбиением по типам – в табл. 7. В 2000 г. сейсмичность района вулканов Крестовский и Ушковский была фоновой.

Таблица 6. Параметры вулканических землетрясений разных типов, записанных вблизи ($\Delta=20$ км) вулкана Плоский Толбачик на станции «Каменистая» в 2000 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		$\Sigma A/T_{cp}$	$\Sigma A/T_{max}$	$\Sigma \tau$, час
Январь	4	16	6.4	6.7	39	19	6.1	8.63	73	19	6.52	–	–	–
Февраль	1	17	8.0	14.61	14	29	6.3	12.92	81	23	9.55	–	–	–
Март	–	14	7.3	10.57	1	12	6.1	12.95	4	9	8.54	–	–	–
Апрель	–	5	7.9	7.18	–	1	3.7	0.15	–	–	–	–	–	–
Май	–	1	5.0	0.29	–	1	5.1	0.57	2	–	–	–	–	–
Июнь	–	2	6.8	2.88	–	3	7.5	12.26	–	–	–	–	–	–
Июль	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Август	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Сентябрь	–	1	5.2	0.34	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Октябрь	–	3	6.0	1.6	–	2	5.2	0.67	–	–	–	–	–	–
Ноябрь	–	2	6.3	1.83	–	11	6.6	4.08	–	13	3.57	0.09	0.34	1.09
Декабрь	–	17	7.9	10.84	–	16	4.7	1.16	–	36	2.78	0.05	0.13	0.91
Всего	5	78	8.0	56.84	54	94	7.5	53.39	160	100	30.96	0.07	0.34	2.0

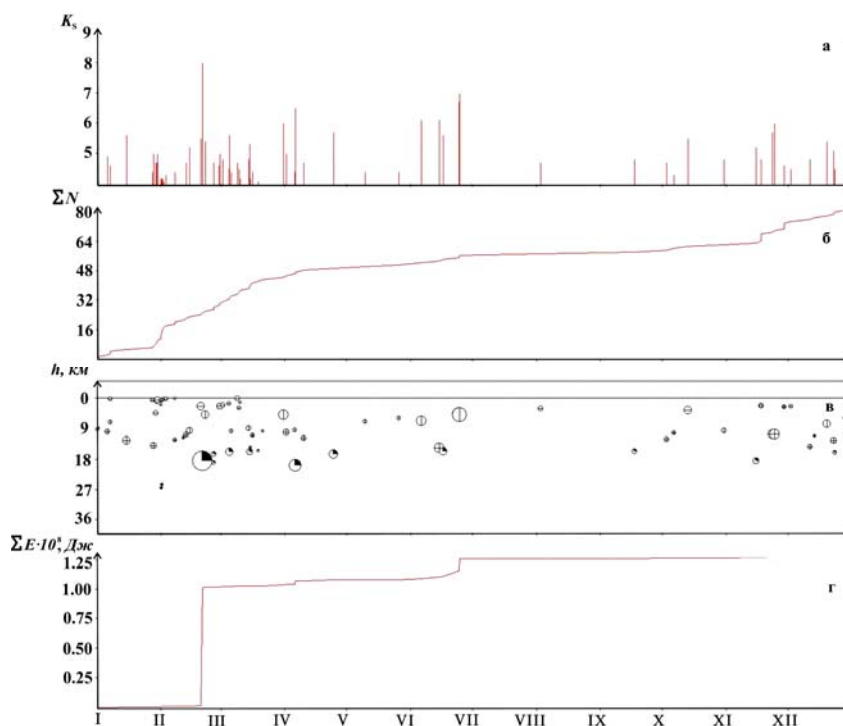


Рис. 12. Изменение во времени энергетического класса K_S (а), кумулятивного числа землетрясений ΣN (б), глубины гипоцентров h (в), кумулятивной сейсмической энергии ΣE (г) совокупности вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 20 км от вулкана Плоский Толбачик

Таблица 7. Параметры вулканических землетрясений разных типов, записанных вблизи ($\Delta=10$ км) вулканов Крестовский и Ушковский на станциях «Крестовский» и «Логинов» в 2000 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	–	–	–	–	–	3	5.3	1.06			
Февраль	–	–	–	–	–	17	6.9	7.42			
Март	–	–	–	–	3	10	4.9	1.00			
Апрель	–	–	–	–	–	37	5.3	4.24			
Май	–	1	7.7	5.56	–	31	5.2	2.88			
Июнь	–	–	–	–	1	18	5.6	3.62			
Июль	–	–	–	–	1	12	7.0	4.78			
Август	–	4	5.3	1.03	–	6	8.2	10.77			
Сентябрь	–	–	–	–	–	3	4.7	0.33			
Октябрь	–	–	–	–	–	10	5.4	1.00			
Ноябрь	–	–	–	–	4	22	7.4	7.08			
Декабрь	–	–	–	–	19	18	6.7	4.15			
Всего	–	5	7.7	6.59	28	187	8.2	48.29			

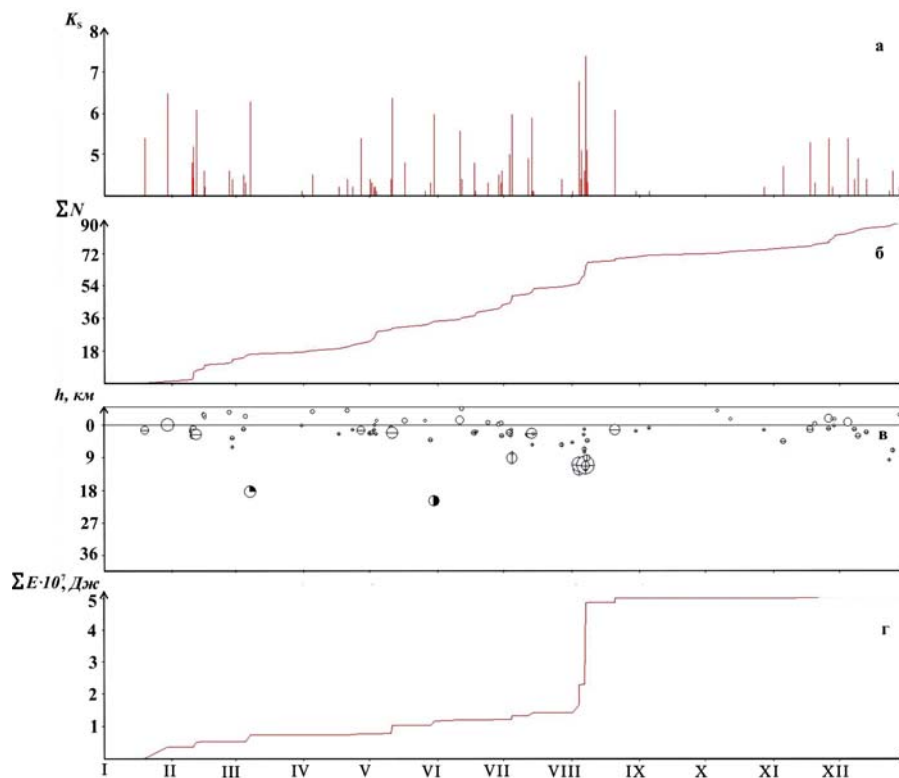


Рис. 13. Изменение во времени энергетического класса K_S (а), кумулятивного числа землетрясений ΣN (б), глубины гипоцентров h (в), кумулятивной сейсмической энергии ΣE (г) совокупности вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 10 км от вулканов Крестовский и Ушковский

Сейсмичность Авачинской группы вулканов. Вулканы Авачинский и Корякский расположены в 30 км к северу от самых больших городов Камчатки (Петропавловск-Камчатский и Елизово) и поэтому представляют наибольшую опасность для населения. В 2000 г., как и в предшествующие годы, координаты гипоцентров для Корякского и Авачинского вулканов рассчитывались по программе Ю.Ю. Мельникова [9] с использованием двух разных одномерных скоростных моделей среды [8, 12]. Общая карта распределения эпицентров и разрез представлены на рис. 14.

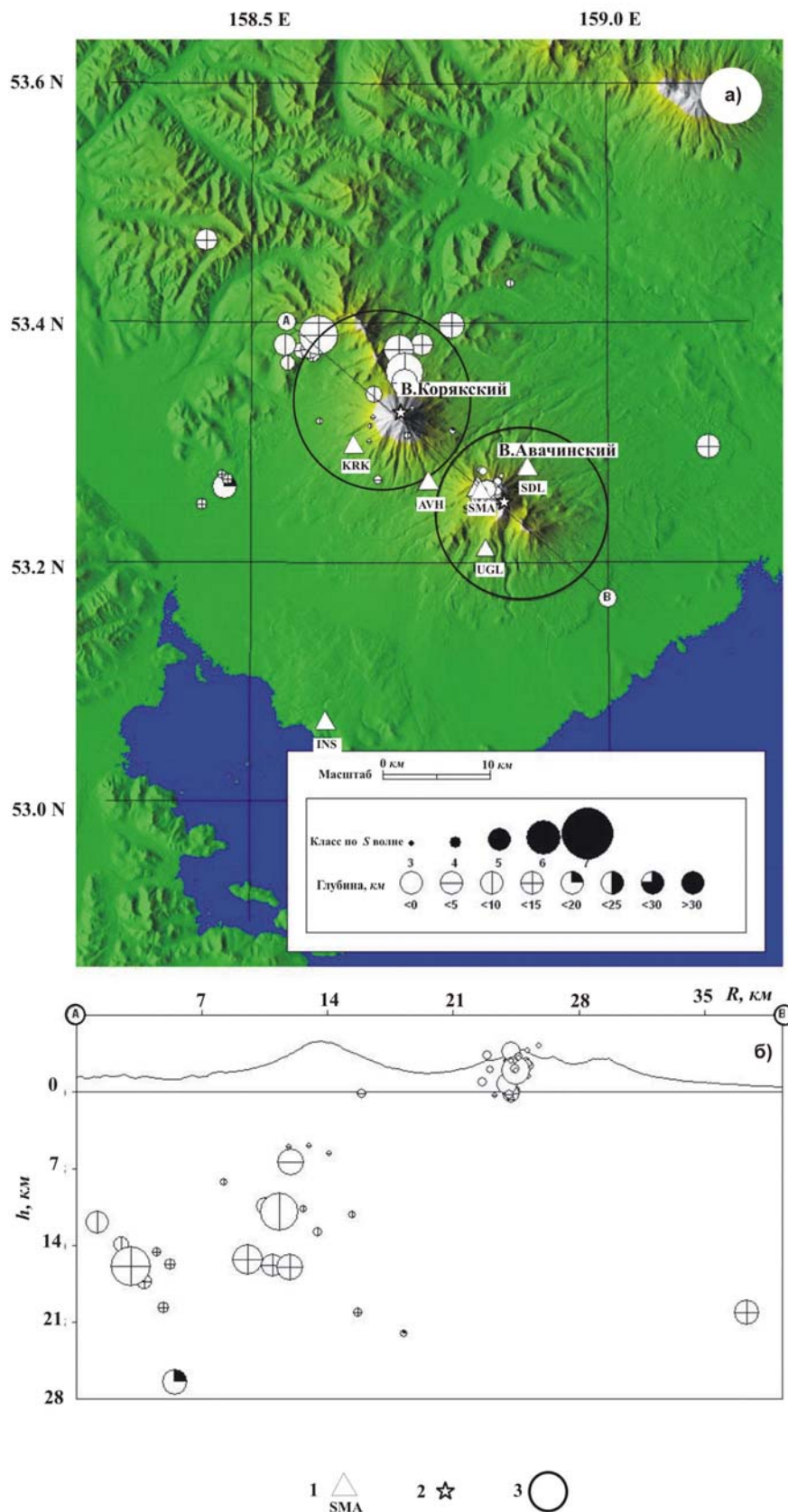


Рис. 14. Карта эпицентров (а) и вертикальный разрез вдоль линии А–В (б) для землетрясений района № 2
 1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан; 3 – окружность возле вулкана соответствует радиусу (8 км)
 выборки исходных данных от вулканов Авачинского и Корякского для построения графиков сейсмической
 активности (рис. 16, 17).

Каталог землетрясений в районе № 2 в 2000 г. содержит параметры для $N_{\Sigma}=149$ землетрясений с $K_S=1.5-6.3$. Из них минимальный класс $K_S=1.5$ имеет землетрясение, локализованное 25 января в 04^h08^m ; максимальный имеет $K_S=6.3$ и был отмечен 18 ноября в 05^h01^m [13]. Суммарная энергия всех землетрясений, включенных в каталог, равна $\Sigma E=6.455 \cdot 10^6$ Дж. Распределение их по классам дано в табл. 8, график повторяемости – на рис. 15; значение параметра $\gamma=0.42$. Из графика следует, что представительными в каталоге являются землетрясения с $K_S \geq 3$, однако на рис. 1 весь район № 2 является областью надежной регистрации для событий с $K_S \geq 4.0$.

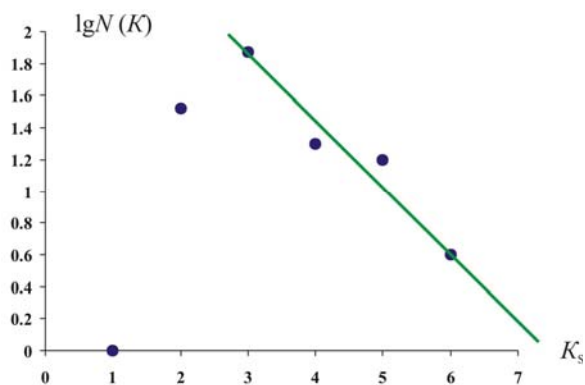


Рис. 15. График повторяемости землетрясений Авачинской группы вулканов (район № 2) за 2000 г.

Таблица 8. Распределение землетрясений в районе № 2 по энергетическим классам K_S в 2000 г.

K_S	1	2	3	4	5	6	N_{Σ}	$\Sigma E \cdot 10^6, \text{ Дж}$
$N(K)$	1	33	75	20	16	4	149	6.455

В 2000 г. вулканической активности на вулканах Авачинский и Корякский отмечено не было. На рис. 16 показаны моменты возникновения землетрясений разных K_S для Авачинского, а на рис. 17 – для Корякского вулканов. Уровень сейсмичности был фоновым.

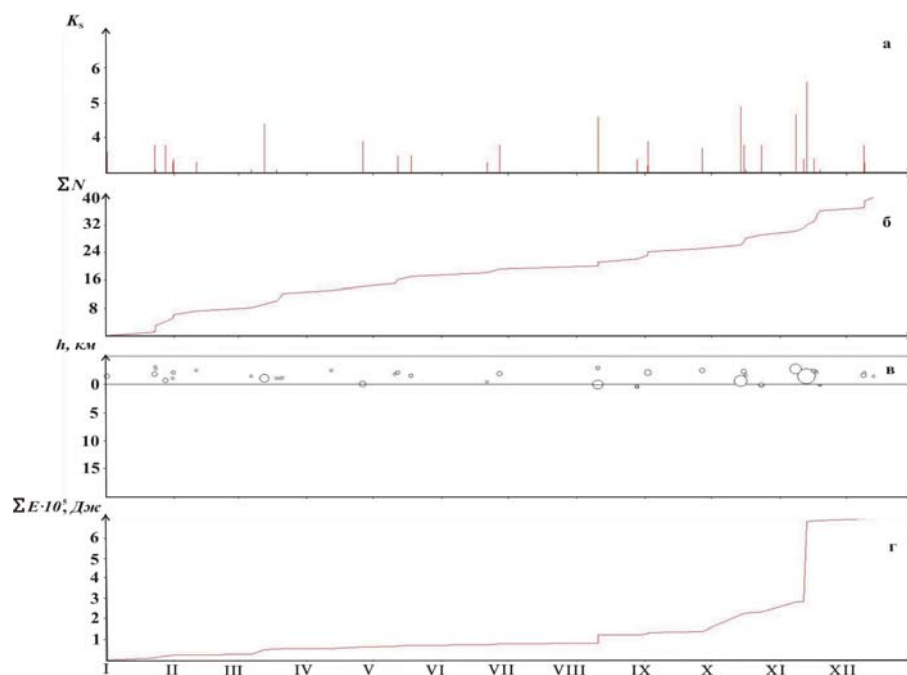


Рис. 16. Изменение во времени энергетического класса K_S (а), кумулятивного числа землетрясений ΣN (б), глубины гипоцентров h (в), кумулятивной сейсмической энергии ΣE (г) совокупности вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 8 км от вулкана Авачинский

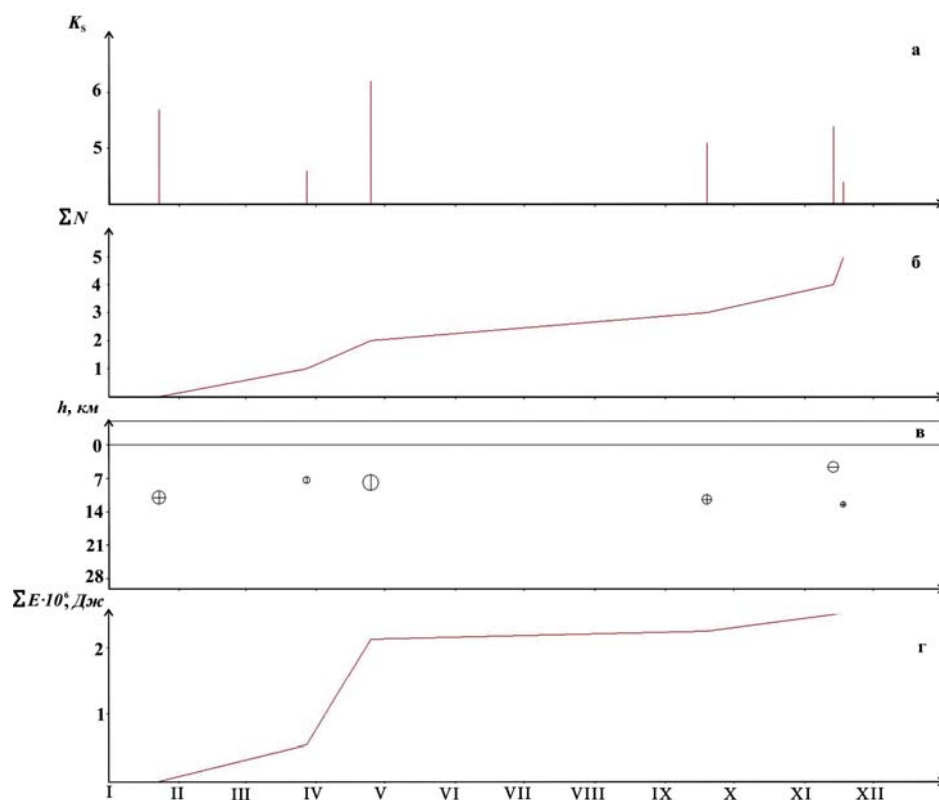


Рис. 17. Изменение во времени энергетического класса K_s (а), кумулятивного числа землетрясений ΣN (б), глубины гипоцентров h (в), кумулятивной сейсмической энергии ΣE (г) совокупности вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 8 км от вулкана Корякский

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. – Т. 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. 6–16.
3. Кирьянов В.Ю., Чубарова О.С., Сеньюков С.Л., Евдокимова О.А., Гарбузова В.Т. Группа по обеспечению безопасности полетов от вулканических пеплов (КВЕРТ): 8 лет деятельности // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. – Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. – С. 408–423.
4. Сеньюков С.Л., Чебров В.Н., Гарбузова В.Т., Дрознина С.Я., Нуждина И.Н., Кожевникова Т.Ю., Толочнова С.Л. Сейсмический мониторинг вулканов Камчатки // Землетрясения Северной Евразии в 1999 году. – Обнинск: ГС РАН, 2005. – С. 323–340.
5. Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. – М.: Наука, 1972. – 117 с.
6. Детальные сейсмологические исследования Камчатки и Командорских островов (01.01.–31.12.1998 г.) – Петропавловск-Камчатский: Отчет КОМСП ГС РАН, 1999. – 259 с.
7. Старовойт О.Е., Мишаткин В.Н. Сейсмические станции Российской академии наук. – Москва-Обнинск: ОИФЗ РАН, 2001. – С. 39–48.
8. Сеньюков С.Л. Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений // Комплексные сейсмологические и геофизические наблюдения на Камчатке. – Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор, 2004. – С. 279–291.
9. Мельников Ю.Ю. Пакет программ для определения координат гипоцентров землетрясений Камчатки на ЭВМ // Вулканология и сейсмология. – 1990. – № 5. – С. 103–112.
10. Токарев П.И. Вулканические землетрясения Камчатки. – М.: Наука, 1981. – 164 с.

11. **Сенюков 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).
12. **Чубарова О.С., Левина В.И., Сенюков С.Л.** Вулканические районы Камчатки // Землетрясения Северной Евразии в 1995 году. – М.: ОИФЗ РАН, 2001. – С. 105–111.
13. **Сенюков 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).