

IV. СЕЙСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ВУЛКАНОВ

УДК 550.348.438(517.66)

ВУЛКАНЫ КАМЧАТКИ

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

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

Камчатка является зоной активного вулканизма, и по современным представлениям здесь выделено 29 действующих вулканов (рис. 1) [1]. В 2004 г. был продолжен мониторинг их сейсмической и вулканической активности с целью своевременного предупреждения населения и административных органов о возможности извержения, для уменьшения последствий катастрофических событий, для обеспечения безопасности авиapolетов в районе п-ва Камчатка [1–3].

Мониторинг проводился по данным следующих трех наблюдений:

- сейсмический мониторинг по данным радиотелеметрических сейсмических станций в режиме, близком к реальному времени;
- визуальные и видеонаблюдения (три видеосистемы наблюдали за вулканами Ключевской, Шивелуч и Безымянный);
- спутниковый мониторинг термальных аномалий и пепловых выбросов. Обработка данных сенсора AVHRR спутников NOAA16 и NOAA17 проводилась сотрудниками лаборатории ИСВА. Прием данных осуществлял Камчатский центр связи и мониторинга. Данные спутников NOAA12, NOAA14, NOAA15, TERRA и MODIS предоставлялись Аляскинской вулканологической обсерваторией.

Ежедневная информация о состоянии вулканов публикуется в Интернете (<http://emsd.iks.ru/~ssl/monitoring/main.htm>).

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.

В 2004 г. сеть сейсмических станций в вулканических районах (рис. 1) и ее характеристика [4, 5] не изменились. Сейсмический мониторинг, как и в предыдущие годы, для разных вулканов проводился 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

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

В 2004 г. применялись такие же методы обработки сейсмических данных, как и в предыдущие годы [10–13]. Определение кинематических параметров землетрясений в вулканических районах выполнялось на основе одномерных скоростных моделей [10, 14] с помощью программы Ю.Ю. Мельникова [15]. Ниже приведены данные о сейсмической активности в 2004 г. в районах Северной (рис. 1, район № 1) и Авачинской групп вулканов (рис. 1, район № 2).

Северная группа вулканов (№ 1). Записи землетрясений в районах вулканов отличаются от тектонических землетрясений большим разнообразием. Согласно классификации П.И. Токарева [16], все вулканические землетрясения делятся на пять типов – I–V. Землетрясе-

ния 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.).

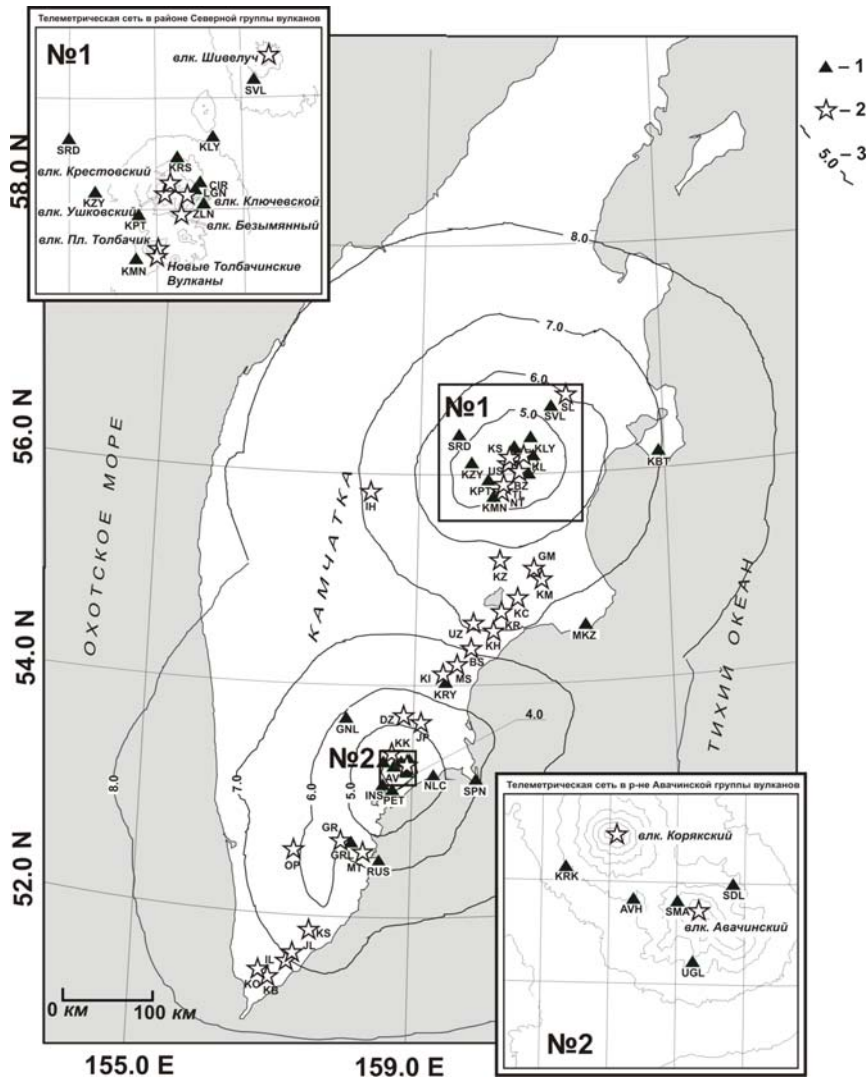


Рис. 1. Карта активных вулканов Камчатки, радиотелеметрических станций и изолинии энергетической представительности K_{min} землетрясений

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

Код и название вулканов: SL – Шивелуч, KL – Ключевской, US – Ушковский, BZ – Безымянный, TL – Плоский Толбачик, NT – Новые Толбачинские вулканы, ИН – Ичинский, KZ – Кизимен, GM – Гамчен, KM – Комарова, KC – Кроноцкий, KR – Крашенинникова, KH – Кихпинич, UZ – Узон, BS – Большой Семячик, MS – Малый Семячик, KI – Карымский, DZ – Дзензур, JP – Жупановский, KK – Корякский, 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», CIR – «Цирк», LGN – «Логинов», KPT – «Копыто», KZY – «Козыревск», ZLN – «Зеленая», KMN – «Каменистая», KRY – «Карымский», KRK – «Коряка», AVH – «Авача», SDL – «Седловина», SMA – «Сомма», UGL – «Угловая», GRL – «Горелый».

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

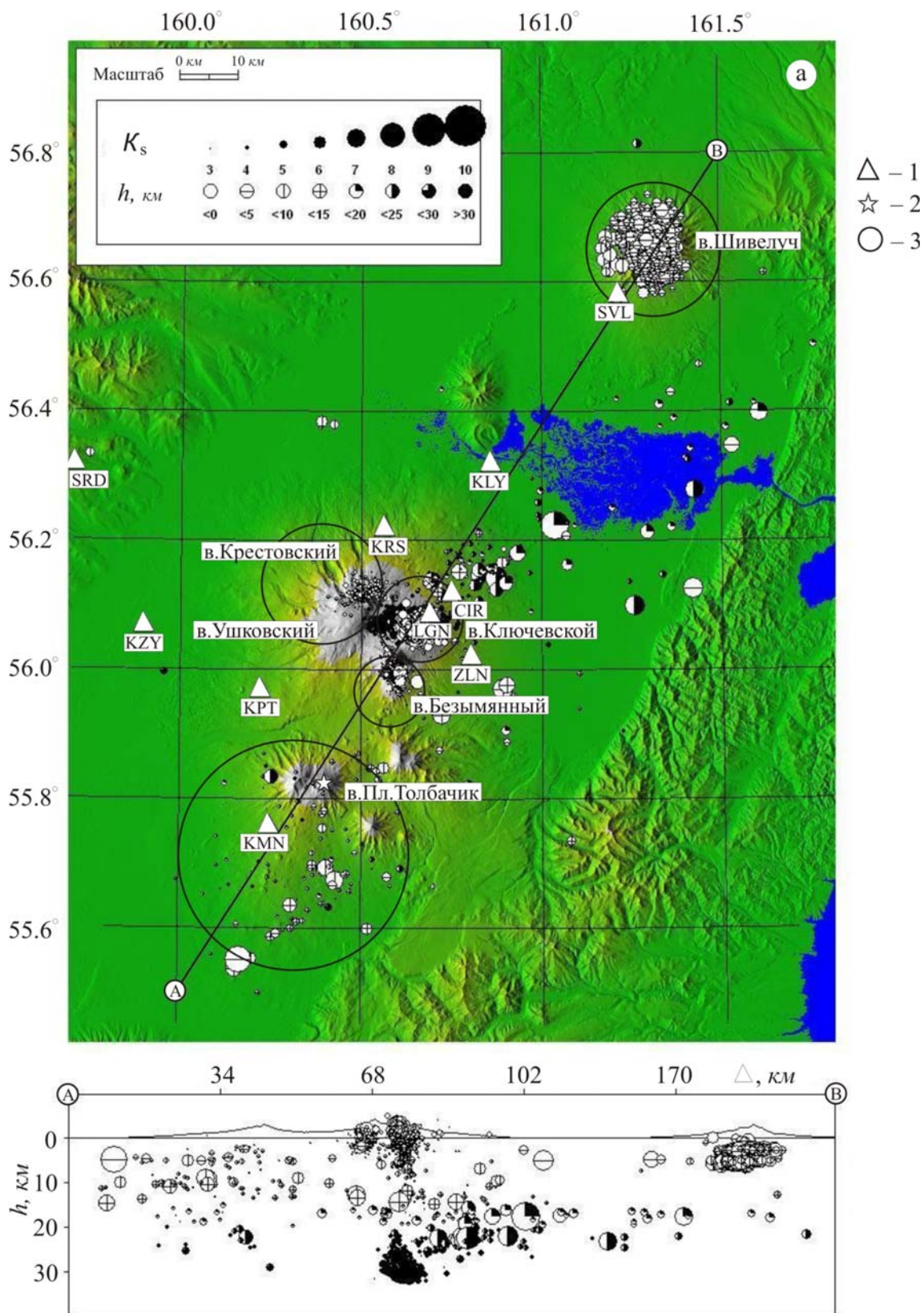


Рис. 2. Карта эпицентров (а) и вертикальный разрез вдоль линии А–В (б) для землетрясений района № 1

1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан; 3 – окружность вокруг вулкана оконтуривает область выборки землетрясений, для которой построены графики параметров сейсмичности. Радиусы областей для разных вулканов равны: Шивелуч – 12 км, Ключевской – 7 км, Крестовский и Ушковский – 10.1 км, Безымянный – 6 км, Плоский Толбачик – 20 км.

Все землетрясения I–III типов, зарегистрированные тремя и более станциями, включены в каталог [7], содержащий 9357 землетрясений (табл. 1). Минимальный класс $K_S=2.3$ имеет землетрясение, локализованное 29 февраля в 06^h14^m на глубине $h=6.9$ км, максимальный – $K_S=8.5$ и $h=12.5$ км у события 22 ноября в 09^h17^m [7]. Отсутствие землетрясений с $K_S>8.5$ привело к значительному уменьшению суммарной сейсмической энергии, составившей $\Sigma E=2.211 \cdot 10^9$ Дж, что примерно в 3.7 раза меньше, по сравнению с таковой в 2003 г. ($\Sigma E=8.284 \cdot 10^9$ Дж). Распределение землетрясений по классам дано в табл. 1. Был построен график повторяемости с помощью широко известного в мире пакета программ ZMAP [17], в котором по методу максимального правдоподобия автоматически определяется представительный класс, а потом угол наклона графика повторяемости. В результате получено: представительными в каталоге являются землетрясения с $K_S \geq 4.0$, значение его угла наклона $\gamma=0.57 \pm 0.01$.

Таблица 1. Распределение землетрясений в районе № 1 по энергетическим классам K_S в 2004 г.

K_S	2	3	4	5	6	7	8	N_Σ	$\Sigma E,$ 10^9 Дж	γ
ΔK_S	1.6–2.5	2.6–3.5	3.6–4.5	4.6–5.5	5.6–6.5	6.6–7.5	7.6–8.5			
$N(K)$	2	540	4115	3291	711	40	5	9357	2.211	0.57

Ниже описаны шесть вулканов Северной группы (Шивелуч, Ключевской, Безымянный, Плоский Толбачик, Ушковский, Крестовский) по инструментальным и визуальным наблюдениям за 2004 г.

Вулкан Шивелуч – самый северный действующий вулкан Камчатки (координаты активного кратера – $56^\circ 38' N$, $161^\circ 19' E$, абсолютная высота нового купола, обнаруженного 12.05.2001 г., составила $h_y \sim 2500$ м). Вулкан находится в 45 км северо-восточнее 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 2004 г. представлена в табл. 2. Теоретический уровень надежной регистрации по трем станциям соответствует $K_{S_{\min}}=5.5$. В 2004 г. были определены стандартные параметры для 834 землетрясений.

В 2004 г. на вулкане Шивелуч наблюдалась интенсивная вулканическая деятельность, связанная с продолжением роста нового купола [18]. Рост нового купола сопровождался высокой сейсмической активностью, имеющей пульсирующий характер (рис. 3, а). Наибольшая активность регистрировалась в январе и мае 2004 г. [7]. В течение всего года наблюдалась термальная аномалия, свидетельствующая о постоянном выходе на поверхность горячего магматического материала (рис. 4, б). На рис. 4, а представлены данные о газопепловых выбросах. При отсутствии видимости предположение о возможности газопеплового выброса делалось на основании изучения спектральных особенностей сейсмического сигнала, а возможная высота выброса определялась по амплитуде и продолжительности сейсмического сигнала с использованием базы эталонов [19]. В течение всего года регистрировалось вулканическое дрожание (рис. 4, в).

Самым значительным событием по сейсмическим данным была зарегистрированная 9 мая 2004 г. с 06^h14^m до 20^h10^m серия поверхностных землетрясений с амплитудой до $15 \mu/c$, вероятно, сопровождавшая мощную парогазовую эмиссию до 8000–10000 м над уровнем моря с отдельными пепловыми выбросами. По данным видеонаблюдений, до 16^h30^m было темное время суток, а с 16^h30^m до 22^h40^m наблюдалась парогазовая эмиссия с отдельными пепловыми выбросами до 7500 м над куполом. Также наблюдалось парение у подножия склона вулкана, что свидетельствовало о возможном сходе грязевых потоков. По спутниковым данным удалось проследить распространение пеплового облака на восток на расстояние более 300 км.

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 – «Логоинов», регистрирующая землетрясения с $K_S \geq 2.2$, распо-

ложена в 4 км от кратера. Сеть станций позволяет локализовать при благоприятных условиях землетрясения, начиная с $K_S \geq 4.0$. Уровень надежной регистрации для землетрясений, локализованных на глубинах от 20 до 35 км, совпадает с теоретическим, угол наклона графика повторяемости $\gamma = -0.77 \pm 0.1$. В 2004 г. были определены параметры для 7361 землетрясения, из них 6464 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 вулкана на рис. 5. Также был выполнен традиционный подсчет землетрясений с разбиением по типам, приведенный в табл. 3.

Таблица 2. Параметры вулканических землетрясений разных типов, записанных вблизи ($\Delta=12$ км) вулкана Шивелуч на одноименной станции «Шивелуч» в 2004 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			
	$A/T < 0.2$	$A/T \geq 0.2$			$A/T < 0.2$	$A/T \geq 0.2$			$A/T < 0.5$	$A/T \geq 0.5$		$\Sigma A/T_{cp}$	$\Sigma A/T_{max}$	$\Sigma \tau$, час	$\Sigma A/T_{cp}$	$\Sigma A/T_{max}$	$\Sigma \tau$, час
Январь		2	6.7	2.95		1169	8.8	963.7	979	1325	2090.4	1.45	39.62	40.07	0.2	6.14	189.47
Февраль		3	7	4.48		200	6.8	94.13	552	1327	1376.1	1.69	46.49	28.08	0.21	1.4	538.8
Март	19	16	6.5	36.66	17	621	7.4	462.4	547	4301	3779.76	1.75	45.78	31.93	0.2	0.82	539.1
Апрель		3	5	3.12	41	809	7.4	373.3	1927	1934	1536.72	1.25	37.93	39.12	0.14	0.88	249.81
Май	27	28	8.1	235.17	8	534	7.2	346.7	1456	2015	2384.95	2.06	69.6	34.54	0.3	14.79	461.3
Июнь	4	11	8.1	102.98		302	7.5	241.6		13164	83361.9	4.8	21.47	2.59	0.95	5.08	720
Июль		45	8.6	257.21	146	1547	7.4	654.1		11816	34356.8	3.42	9.78	1.35	0.28	1.27	690.5
Август		7	7.7	26.21	597	2951	6.1	847.5		6577	11371.5	1.82	9.26	19.76	0.18	0.91	368.3
Сентябрь		8	7.8	41.93		2314	6.7	738.9	28	7065	13658.3	1.83	58.19	23.51	0.14	0.52	349
Октябрь					101	592	7.4	260.02	235	6296	13776.9	1.79	42.32	34.51	0.18	0.82	548.4
Ноябрь		2	6.6	2.13	3	142	7.4	138.43	2578	1147	812.98	1.64	43.07	25.48	0.11	0.9	94.64
Декабрь		3	5.6	1.8		102	6.9	71.99	908	468	390.41	1.07	44.06	31.99	0.1	0.36	74.73
Всего	50	128		714.64	913	11283		5192.77	9210	57435	168896.7			312.93			4824.1

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.

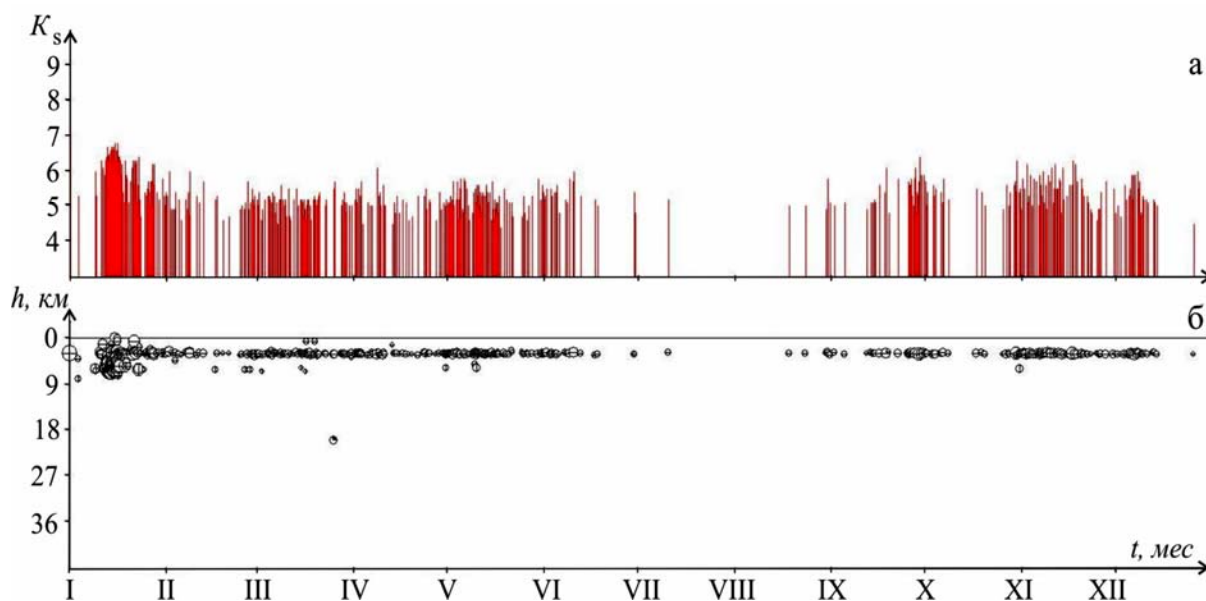


Рис. 3. Изменение во времени энергетического класса K_S (а) и глубины гипоцентров h (б) совокупности вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 12 км от вулкана Шивелуч в 2004 г.

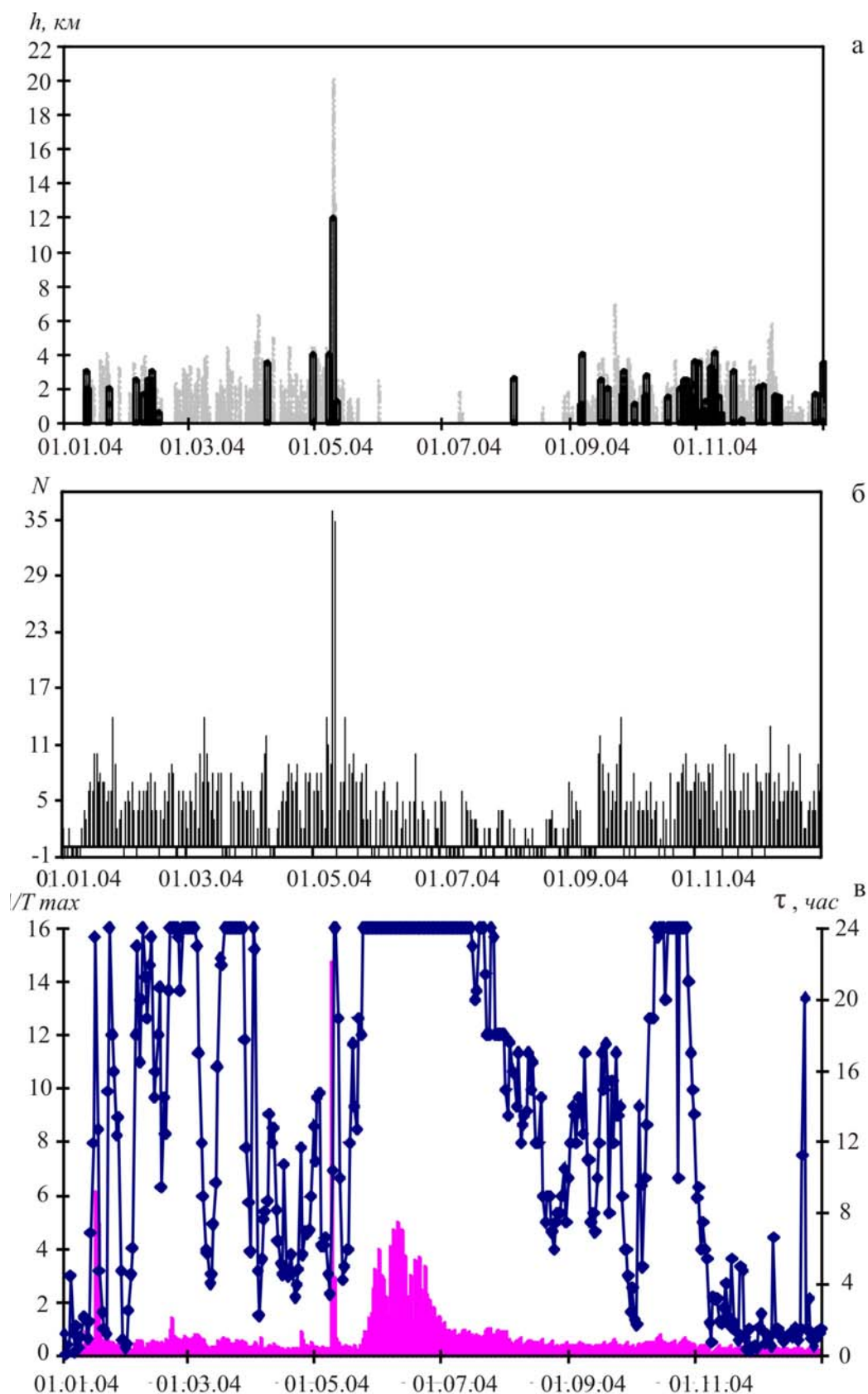


Рис. 4. Графики распределения во времени различных параметров активности вулкана Шивелуч в 2004 г.

а – высота (км) газо-пепловых выбросов над куполом по визуальным и видеоданным сотрудников сейсмической станции «Ключи» и видеоданным выделена черным цветом, высота возможных газо-пепловых выбросов по сейсмическим данным выделена серым цветом; б – число пикселей в термальной аномалии по данным спутников NOAA16 и NOAA17; в – максимальная амплитуда и продолжительность вулканического дрожания по станции «Шивелуч».

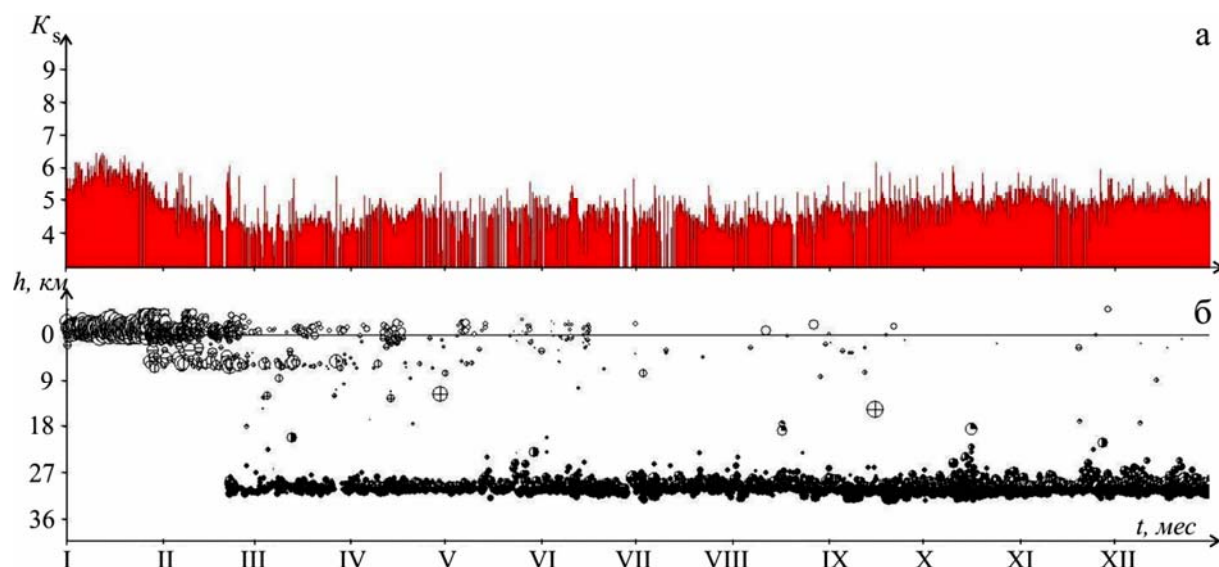


Рис. 5. Изменение во времени энергетического класса K_S (а) и глубины гипоцентров h (б) вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 7 км от вулкана Ключевской в 2004 г.

Таблица 3. Параметры вулканических землетрясений разных типов, записанных вблизи ($\Delta=7$ км) вулкана Ключевской на станции «Цирк» в 2004 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		
	$A/T < 0.2$	$A/T \geq 0.2$			$A/T < 0.2$	$A/T \geq 0.2$			$A/T < 0.5$	$A/T \geq 0.5$		$\Sigma A/T_{cp}$	$\Sigma A/T_{max}$	$\Sigma \tau$, час
Январь		20	7.6	59.96		1216	8	2842.58		4478	43407.3	2.73	20.47	744.0
Февраль	7	139	8.1	294.11	53	2270	7.3	1227.37	983	4883	5954.44	0.24	2.12	453.1
Март	75	347	7.8	169.86	16	126	6.1	49.88	2571	1232	965.92	0.11	0.42	86.6
Апрель	21	296	8.6	172.75	26	88	6.4	46.49	1446	659	490.82	0.09	0.42	65.66
Май	23	127	6.7	75.4	50	44	6	15.32	670	237	170.08	0.07	0.25	28.92
Июнь	300	754	6.8	267.26	7	13	5.5	2.39	187	12	8.79	0.05	0.16	171.4
Июль	208	520	7.8	187.06	9	18	5.9	8.29	89	34	26.25	0.06	0.35	592
Август	102	305	7.8	143.46	37	11	6.8	11.49	57	6	3.84	0.05	0.17	183
Сентябрь	96	397	7.9	250.22	11	16	5.2	3.66	111	12	14.87			
Октябрь	501	1974	7.7	1087.5	49	14	6.7	20.8	52	5	3.4	0.07	0.13	3.7
Ноябрь	132	586	8.1	448.22	75	16	7	17.26	20					
Декабрь	192	1149	7.3	840.62	86	15	5.8	5.22	7	2	1.92			
Всего	1657	6614		3996.42	419	3847		4250.75	6193	11560	51047.63			2328.38

В 2004 г. вулкан Ключевской находился в беспокойном состоянии только в январе–феврале. В это время на вулкане регистрировались поверхностные события и вулканическое дрожание. По спутниковым данным фиксировалась термальная аномалия, свидетельствующая о присутствии магмы в центральном кратере. В январе были зафиксированы пепловые выбросы по визуальным и видеоданным. Обычно выбросы были кратковременные (несколько минут) и слабо нагруженные пеплом. Максимальная зарегистрированная высота пепловых выбросов – 1000 м над кратером. В феврале–марте число поверхностных землетрясений стало постепенно уменьшаться и начали регистрироваться землетрясения сначала с глубин $h=0-15$ км, а затем и с больших глубин – около 30 км. Все это свидетельствовало о постепенном отступлении магмы и прекращении вулканической активности. Начиная с середины мая и до конца года в районе Ключевского вулкана регистрировались практически только землетрясения с глубины около 30 км. Вулкан был спокоен.

Вулкан Безымянный – координаты вершины: 55°58' N, 160° 35' E; абсолютная высота вулкана $h_v=2869$ м. Ближайшие телеметрические станции «Логинов» и «Зеленая» в 13.5 км от

кратера вулкана (рис. 2, а) и регистрируют землетрясения с $K_S \geq 3.6$. Уровень надежной регистрации, рассчитанный по программе ZMAP [17], соответствует $K_{\min}=3.2$, угол наклона графика повторяемости $\gamma = -1.1 \pm 0.06$. 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 ($\Delta=6$ км) вулкана Безымянный на станции «Зеленая» в 2004 г.

Месяцы	Типы вулканических землетрясений													
	I			II, III			IV		V					
	N $A/T \geq 0.1$	$K_{S\max}$	$\Sigma A/T$	N $A/T \geq 0.1$	$K_{S\max}$	$\Sigma A/T$	N $A/T \geq 0.1$	$\Sigma A/T$	Низкочастотные			Вулканическое дрожание		
								$\Sigma A/T_{\text{cp}}$	$\Sigma A/T_{\text{max}}$	$\Sigma \tau$, час	$\Sigma A/T_{\text{cp}}$	$\Sigma A/T_{\text{max}}$	$\Sigma \tau$, час	
Январь				2	6.9	5.64			1.77	3.81	0.5			
Февраль														
Март				1	3.9	0.06								
Апрель				8	6.4	3.86								
Май				58	4.9	5.15	27	4.32						
Июнь				386	7.1	49.91	1076	409.5	6.27	24.45	0.67	0.08	0.43	85
Июль							8	2.92						
Август				3	6.6	1.57	7	1.84	0.21	0.32	0.1	0.08	0.18	1
Сентябрь				19	5.8	3.5	12	3.5				0.11	0.3	0.96
Октябрь				1	4.6	0.17								
Ноябрь							1	0.26						
Декабрь				37	7.9	8.86	23	2.46						
Всего				515		78.72	1154	424.8			0.77			86.96

В течение исследуемого периода вулкан Безымянный извергался два раза. Наличие на вулкане постоянной термальной аномалии свидетельствовало о том, что горячий материал находится близко к поверхности и извержение может начаться без сильной предварительной сейсмической подготовки. 9 января перед извержением вулкана удалось зафиксировать только одно землетрясение с $K_S=6.0$ (рис. 6). Более слабые землетрясения из-за сильного вулканического дрожания Ключевского вулкана обработать было невозможно. Это связано с тем, что ближайшие к вулкану Безымянный телеметрические станции расположены на склоне вулкана Ключевской. По данным сейсмического мониторинга, извержение началось 13 января в 22^h53^m и продолжалось несколько часов. По данным видеонаблюдений, с 11^h55^m на вулкане наблюдались газопепловые выбросы на высоту до 6000 м над уровнем моря. По спутниковым данным удалось проследить распространение пеплового облака на восток на расстояние более 500 км.

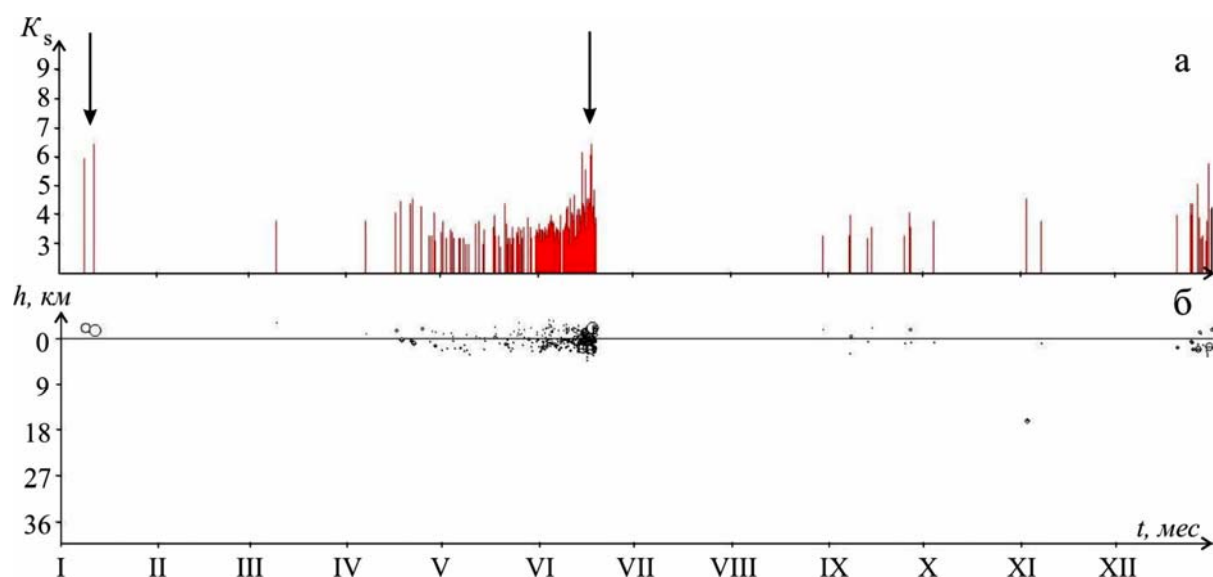


Рис. 6. Изменение во времени энергетического класса K_S (а) и глубины гипоцентров h (б) вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 6 км от вулкана Безымянный в 2004 г.

Второе извержение произошло в июне 2004 г. В это время вулкан Ключевской находился в спокойном состоянии, вулканическое дрожание не фиксировалось, что позволило зарегистрировать сейсмическую подготовку извержения Безымянного (рис. 6). Сейсмическая активность превысила фоновый уровень 2 июня, о чем было дано предупреждение. В дальнейшем наблюдалось постепенное увеличение числа и энергии поверхностных землетрясений. За три дня до извержения (15 июня) стало наблюдаться резкое увеличение амплитуды сейсмических сигналов, которые могли сопровождать сход обломочных лавин. На основании этих данных был дан прогноз о начале возможного извержения в течение ближайших пяти дней, который впоследствии оправдался. По сейсмическим данным извержение произошло 18 июня с 19^h40^m до 20^h20^m. На рис. 7 дана огибающая амплитуды сейсмического сигнала, имеющая форму резкого всплеска с последующим постепенным уменьшением по экспоненциальному закону, характерному для взрывных извержений с мощными газо-пепловыми выбросами. По визуальным данным с 20^h30^m (до этого – темное время суток) на вулкане наблюдались газопепловые выбросы до высоты 8000 м над уровнем моря. Спутниковые данные позволили проследить распространение пеплового облака на расстояние до 2000 км в восточном направлении (рис. 8). Заметного роста термальной аномалии перед обоими извержениями зафиксировано не было.

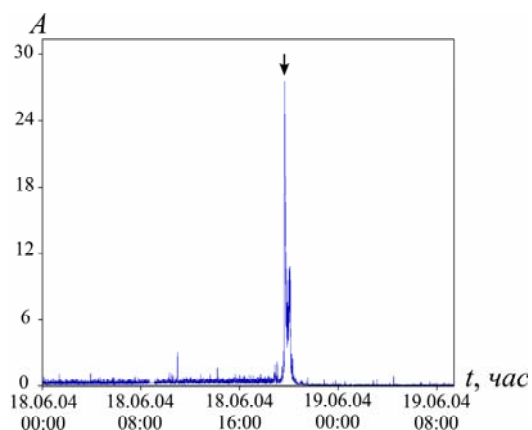


Рис. 7. Амплитуда огибающей сейсмического сигнала (безразмерная единица), осредненная в 10-секундном интервале для извержения вулкана Безымянный 18–19 июня 2004 г. (стрелка обозначает начало мощного пеплового выброса 18 июня в 19^h40^m)

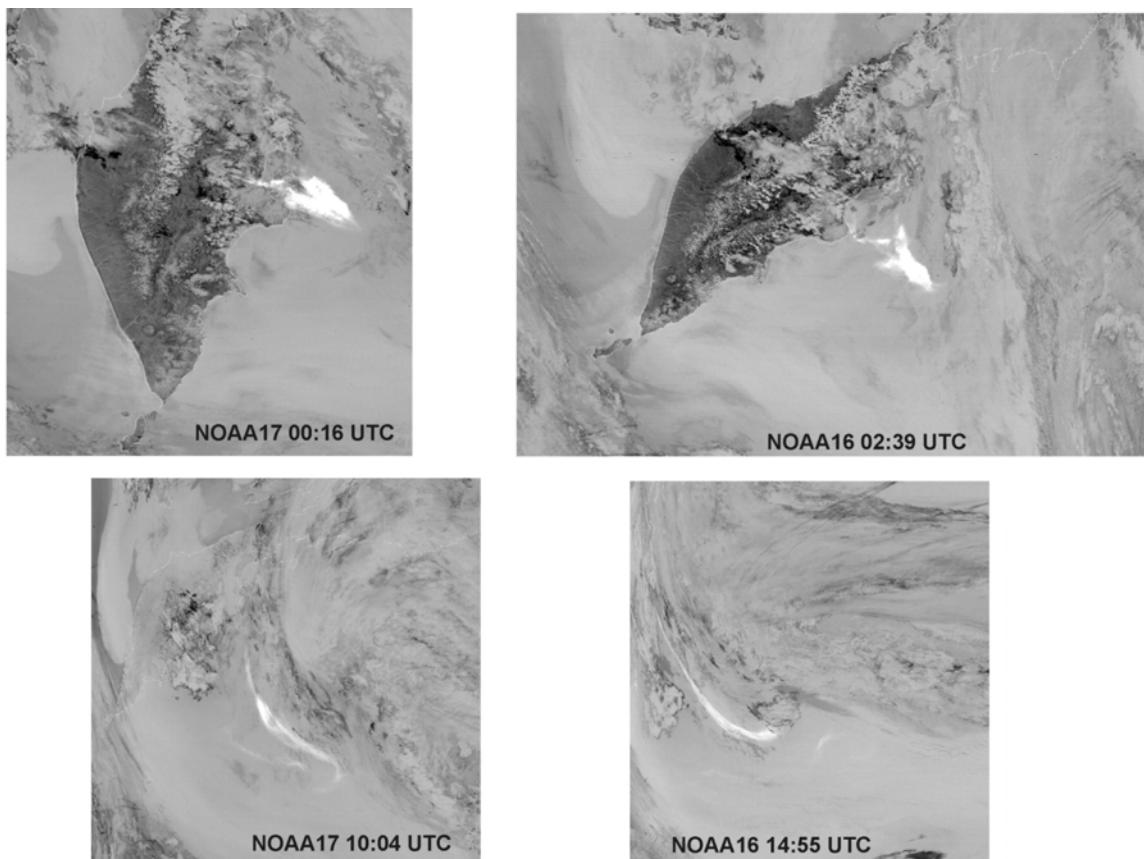


Рис. 8. Распространение пеплового облака от извержения вулкана Безымянный 18–19 июня 2004 г.

Данные предоставлены Камчатским центром связи и мониторинга, обработка – лабораторией ИСВА; все снимки за 19 июня.

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.

Таблица 5. Параметры вулканических землетрясений разных типов, записанных вблизи ($\Delta=20$ км) вулкана Плоский Толбачик на станции «Каменистая» в 2004 г.

Месяцы	Типы вулканических землетрясений													
	I				II, III				IV			Вулканическое дрожание		
	N		K_{Smax}	$\Sigma A/T$	N		K_{Smax}	$\Sigma A/T$	N			(A/N) ср.	(A/N) max	τ , час
	A/T<0.2	A/T≥0.2			A/T<0.2	A/T≥0.2			A/T<0.5	A/T≥0.2	$\Sigma A/T$			
Январь		7	6	3.05		3	4.4	0.75	2					
Февраль		27	7.2	19.66		2	4	0.39						
Март		15	5.4	2.24		2	6.2	2.68						
Апрель	3	17	6.5	7.63		6	5.7	2.35			0.14	0.27	0.5	
Май		13	7.2	6.35	1	2	3.6	0.18			0.15	0.3	0.33	
Июнь		15	7.2	23.71	2				8					
Июль	3	11	6.8	4.8	2	4	5.1	0.69	4					
Август	2	5	7.2	4.58	4				1					
Сентябрь		14	6.3	5.59					2					
Октябрь	1	5	5.4	1.37		1	4.2	0.19	2		0.24	0.36	0.58	
Ноябрь	6	5	5	1.17	5	3	6.2	1.23	2		0.13	0.26	0.93	
Декабрь	1	4	6	1.71	19	14	5.3	2.67	3					
Всего	16	138		81.86	33	37		11.13	24					2.34

На рис. 2 даны карта эпицентров и проекция гипоцентров на вертикальный разрез, на рис. 9 – графики изменения во времени параметров сейсмической активности вулкана. На протяжении 2004 г. в районе вулкана Плоский Толбачик наблюдалась «обычная, фоновая» сейсмичность.

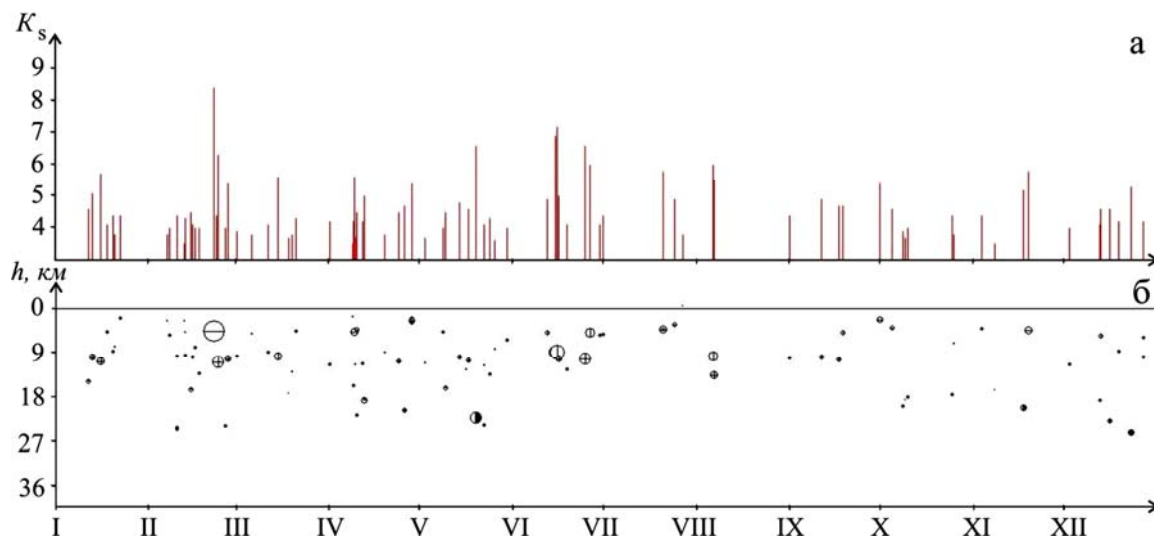


Рис. 9. Изменение во времени энергетического класса K_S (а) и глубины гипоцентров h (б) вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 20 км от вулкана Плоский Толбачик в 2004 г.

Вулканы Ушковский и Крестовский образуют единый вулканический массив, осложненный вершинной кальдерой. Этот массив рассечен глубокими ледниковыми ущельями и эрозионными долинами. Вулкан Крестовский – координаты вершины: 56°07' N, 160°30'E, абсолютная высота вулкана $h_v=4108$ м; Ушковский – координаты вершины: 56°04' N, 160°28'E; абсолютная высота вулкана $h_v=3943$ м. Ближайшие телеметрические станции – «Крестовский» и «Логинов» – расположены в 12 км от вершины Крестовского и регистрируют землетрясения с $K_S \geq 3.5$. Теоретический уровень надежной регистрации по трем станциям соответствует

$K_S=4.5$, однако сеть позволяет обрабатывать землетрясения с занесением в каталог, начиная $K_S=4.0$. Карта эпицентров и проекция гипоцентров на вертикальный разрез представлены на рис. 2, графики изменения во времени параметров активности вулкана – на рис. 10, а традиционный подсчет землетрясений с разбиением по типам – в табл. 6.

Таблица 6. Параметры вулканических землетрясений разных типов, записанных вблизи ($\Delta=10$ км) вулканов Крестовский и Ушковский на станции «Цирк» в 2004 г.

Месяцы	Типы вулканических землетрясений										
	I				II, III				IV		
	N		K_{Smax}	$\Sigma A/T$	N		K_{Smax}	$\Sigma A/T$	N		$\Sigma A/T$
	$A/T < 0.2$	$A/T \geq 0.2$			$A/T < 0.2$	$A/T \geq 0.2$			$A/T < 0.5$	$A/T \geq 0.5$	
Январь					1	5.2	0.51				
Февраль		1	6.4	0.73	1	4.2	0.41				
Март		1	6.4	1.71	2	11	4.8	1.03			
Апрель					19	25	5.1	3.5			
Май		2	4.7	0.25	15	45	6	5.6	7		2.01
Июнь					1	58	4.8	4.58	6	1	1.08
Июль						48	5.5	5.7	50	5	9.81
Август					14	43	6	4.7	39	11	7.05
Сентябрь					1	37	6.2	6.61	33	9	9.04
Октябрь					5	68	5.5	10.07	20	4	5.21
Ноябрь					5	75	5.7	10.52	14	4	3.67
Декабрь					5	82	5.5	12.02	1		0.15
Всего		4		2.69	67	494		65.25	170	34	38.02

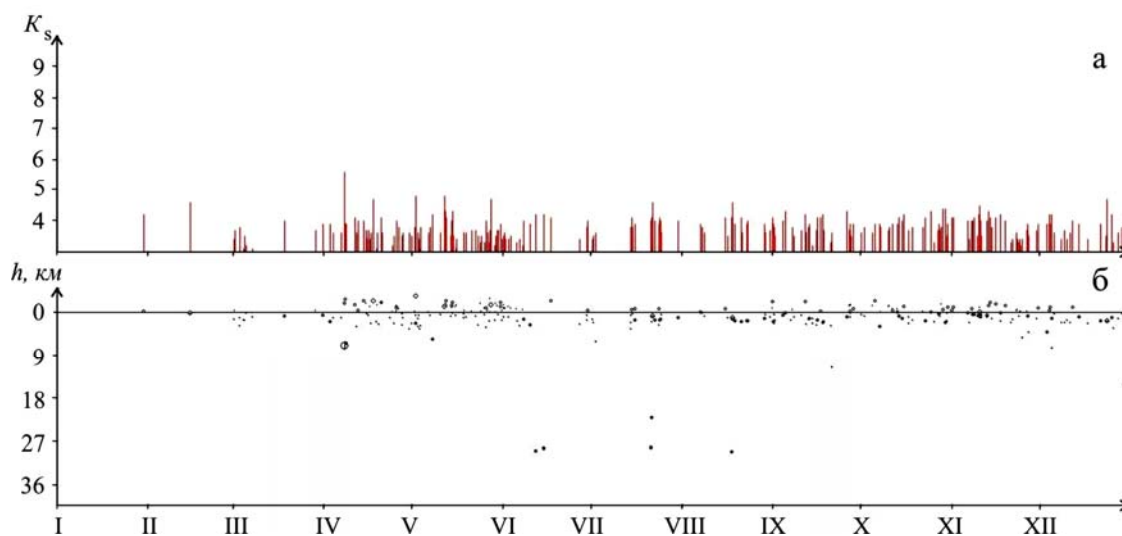


Рис. 10. Изменение во времени энергетического класса K_S (а) и глубины гипоцентров h (б) вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 10.1 км от вулканов Крестовский и Ушковский в 2004 г.

В 2004 г. сейсмичность района вулканов Крестовский и Ушковский была фоновой и никаких проявлений вулканической активности, а также термальных аномалий на снимках из космоса отмечено не было.

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

Вулкан Авачинский – координаты вершины: $53^{\circ}15' N$, $158^{\circ}50' E$, абсолютная высота вулкана $h_y=2741$ м, диаметр кратера – около 350 м. Координаты вершины вулкана Корякский: $53^{\circ}19' N$, $158^{\circ}43' E$; абсолютная высота вулкана $h_y=3456$ м.

Координаты гипоцентров для Корякского и Авачинского вулканов рассчитывались, как и в предшествующие годы, по программе Ю.Ю. Мельникова [15] с использованием двух разных одномерных скоростных моделей среды [14, 20]. Общая карта распределения эпицентров и проекция гипоцентров на вертикальный разрез представлены на рис. 11. Весь район № 2, изображенный на рис. 1, по теоретическим расчетам является областью надежной регистрации для событий с $K_S \geq 4.0$.

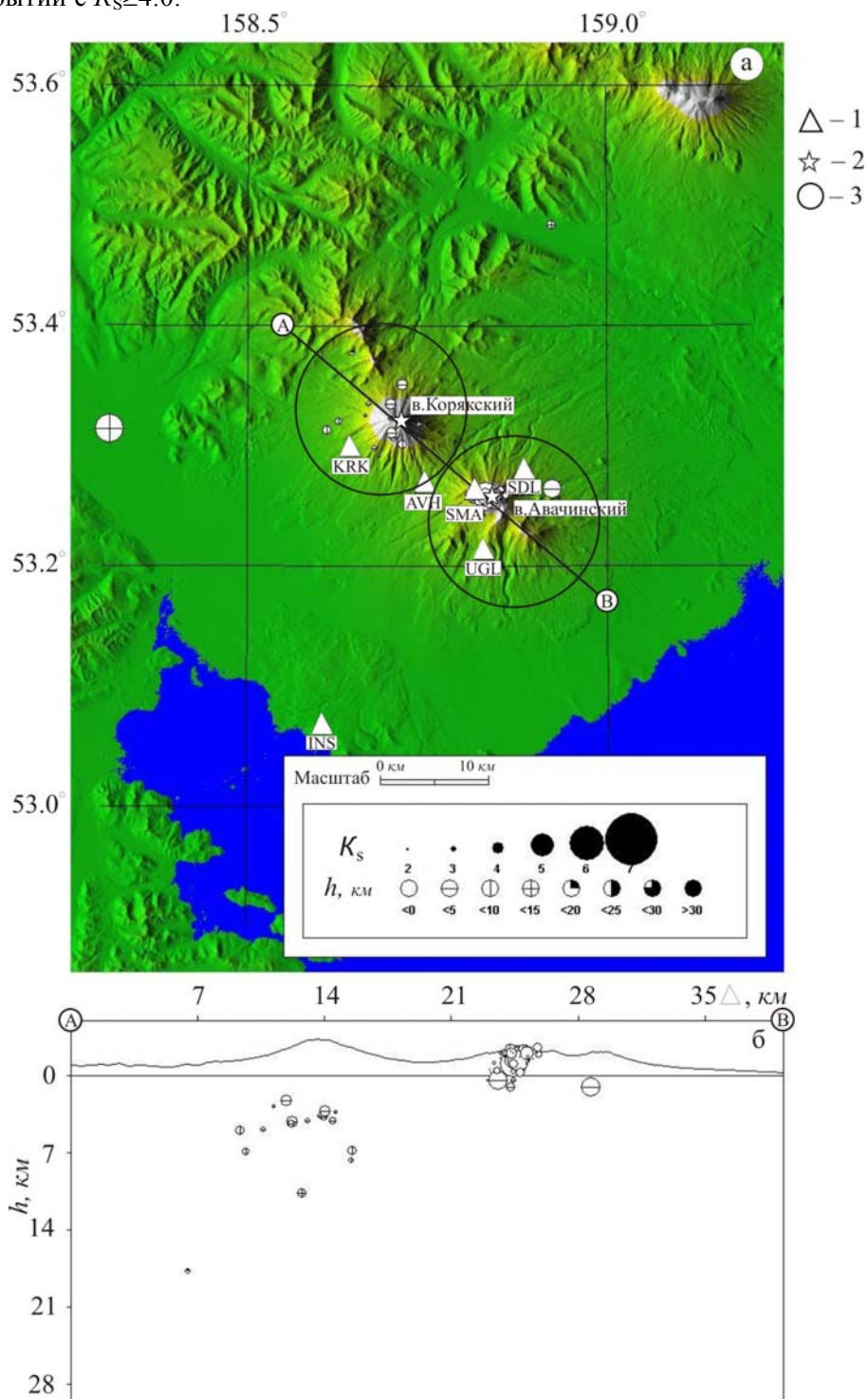


Рис. 11. Карта эпицентров (а) и проекция гипоцентров на вертикальный разрез вдоль линии А–В (б) для землетрясений района № 2.

1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан; 3 – окружность возле вулкана соответствует радиусу (8 км) выборки исходных данных вокруг вулканов Авачинский и Корякский для построения графиков изменения во времени параметров их активности (рис. 12, 13).

В 2004 г. никакой заметной сейсмической или вулканической активности отмечено не было. Каталог землетрясений Авачинской группы [8] содержит параметры для $N_{\Sigma}=103$ землетрясений с $K_S=1.4-5.6$ (табл. 7). Землетрясение с минимальным классом $K_S=1.4$ было локализовано 26 декабря в $22^{\text{h}}39^{\text{m}}$. Максимальный класс $K_S=5.6$ имеет землетрясение, произошедшее 8 января в $20^{\text{h}}29^{\text{m}}$. В сравнении с сейсмичностью за все годы детальных однородных наблюдений, начиная с 1994 г., сейсмичность исследуемого периода была относительно спокойной. Суммарная энергия всех землетрясений, включенных в каталог [8], составила $\Sigma E=1.12 \cdot 10^6$ Дж, что на два порядка меньше таковой в 2003 г. ($\Sigma E=5.039 \cdot 10^8$ Дж). Причиной значительного снижения энергии является отсутствие землетрясений с $K_S \geq 5.6$.

Графики распределения во времени различных параметров землетрясений для вулкана Авачинский представлены на рис. 12, а для вулкана Корякский – на рис. 13.

Таблица 7. Распределение землетрясений в районе № 2 по энергетическим классам K_S в 2004 г.

K_S	1	2	3	4	5	6	N_{Σ}	$\Sigma E,$ 10^6 Дж
ΔK_S	0.6–1.5	1.6–2.5	2.6–3.5	3.6–4.5	4.6–5.5	5.6–6.5		
$N(K)$	1	34	40	22	5	1	103	1.120

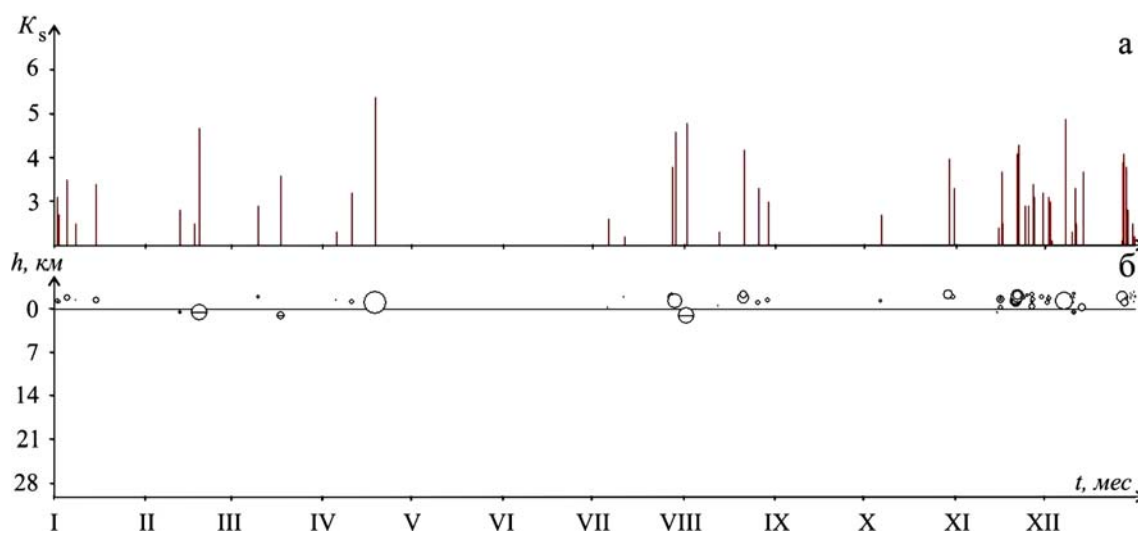


Рис. 12. Изменение во времени энергетического класса K_S (а) и глубины гипоцентров h (б) вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 8 км от вулкана Авачинский в 2004 г.

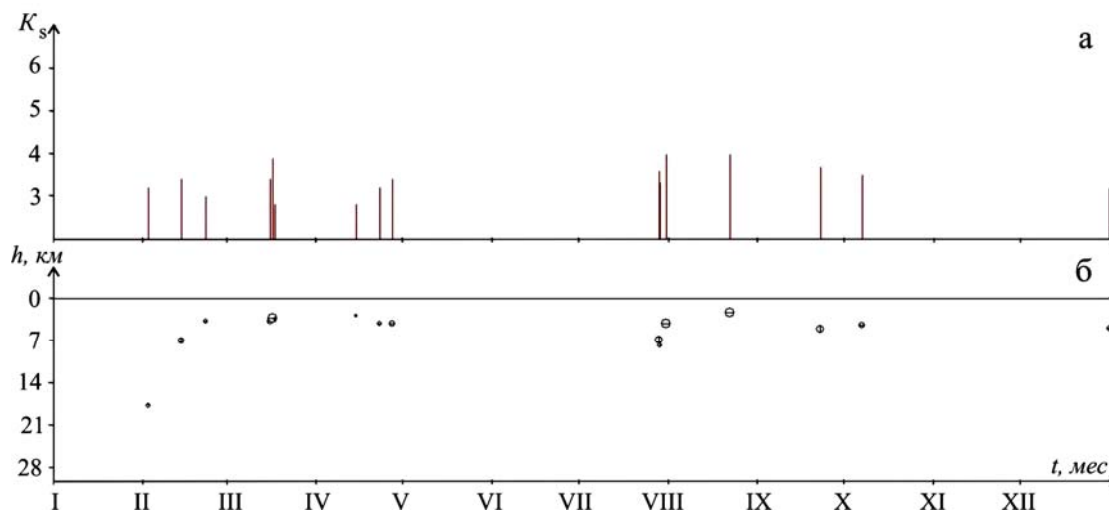


Рис. 13. Изменение во времени энергетического класса K_S (а) и глубины гипоцентров h (б) вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 8 км от вулкана Корякский в 2004 г.

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. **Кириянов В.Ю.** Вулканические пеплы Камчатки как источник потенциальной вулканической опасности для пассажирских авиалиний // Вулканология и сейсмология. – 1992. – № 3. – С. 16–36.
3. **Кириянов В.Ю., Чубарова О.С., 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. **Старовойт О.Е., Мишаткин В.Н.** Сейсмические станции Российской академии наук (состояние на 2001 г.) – М. – Обнинск: ГС РАН, 2001. – 86 с.
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., Толочнова С.Л.** Каталог землетрясений Северной группы вулканов за 2004 год. (См. Приложение к наст. сб. на CD).
8. **Нуждина И.Н. (отв. сост.), Дрознина С.Я., Кожевникова Т.Ю., Толочнова С.Л.** Каталог землетрясений Авачинской группы вулканов за 2004 год. (См. Приложение к наст. сб. на CD).
9. **Детальные сейсмологические исследования Камчатки и Командорских островов (01.01.–31.12.1998 г.).** – Петропавловск-Камчатский: Отчет 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., Толочнова 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., Толочнова С.Л.** Сейсмический мониторинг вулканов Камчатки // Землетрясения Северной Евразии в 2000 году. – Обнинск: ГС РАН, 2006. – С. 321–336.
12. **Сениюков С.Л., Гарбузова В.Т., Дрознина С.Я., Нуждина И.Н., Кожевникова Т.Ю., Толочнова С.Л.** Вулканы Камчатки // Землетрясения Северной Евразии в 2001 году. – Обнинск: ГС РАН, 2007. – С. 360–376.
13. **Сениюков С.Л., Гарбузова В.Т., Дрознина С.Я., Нуждина И.Н., Кожевникова Т.Ю., Толочнова С.Л.** Вулканы Камчатки // Землетрясения Северной Евразии, 2002. – Обнинск: ГС РАН, 2008. – С. 380–394.
14. **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.
15. **Мельников Ю.Ю.** Пакет программ для определения координат гипоцентров землетрясений Камчатки на ЭВМ // Вулканология и сейсмология. – 1990. – № 5. – С. 103–112.
16. **Токарев П.И.** Вулканические землетрясения Камчатки. – М.: Наука, 1981. – 164 с.
17. **Weimer S.** A software package to analyze seismicity: ZMAP // Seism. Res. Lett. – 2001. – 72 – N 2. – P. 374–383.
18. **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.
19. **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.
20. **Сениюков С.Л.** Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений в 2000–2004 гг. // Вулканология и сейсмология. – 2006. – № 3. – С. 68–78.