

#### IV. СЕЙСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ВУЛКАНОВ

УДК 550.348.438(517.66)

##### **СЕЙСМИЧНОСТЬ ВУЛКАНИЧЕСКИХ РАЙОНОВ КАМЧАТКИ в 2016–2017 гг.**

**С.Л. Сеньюков, И.Н. Нурждина**

*Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН», г. Петропавловск-Камчатский, ssl@emsd.ru*

**Аннотация.** Приведены результаты мониторинга активности действующих вулканов Камчатки по данным следующих наблюдений: 1) непрерывное слежение за сейсмичностью вулканов по данным радиотелеметрических сейсмических станций в режиме, близком к реальному времени; 2) визуальные и видеонаблюдения; 3) контроль термальных аномалий и пепловых выбросов по спутниковым данным. Информация об активности вулканов с февраля 2000 г. доступна в Интернете по адресу: <http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>.

Дан анализ сейсмической активности в районах Северной (Шивелуч, Ключевской, Безымянный, Плоский Толбачик, Ушковский и Крестовский), Авачинской (Авачинский и Корякский), Мутновско-Гореловской (Мутновский и Горелый) групп вулканов и вулканов Кизимен, Жупановский и Камбальный за 2016–2017 гг. За два года в районе Северной группы лоцировано 8152 землетрясения с  $K_s=1.6-8.5$ , Авачинской – 616 с  $K_s=1.6-7.2$ , Мутновско-Гореловской – 357 с  $K_s=2.0-6.2$ , 144 землетрясения с  $K_s=2.3-9.4$  вблизи влк. Кизимен, 322 с  $K_s=1.8-8.1$  – влк. Жупановский и 90 с  $K_s=5.0-8.6$  из района влк. Камбальный. Приведены карты эпицентров, дано распределение землетрясений по энергетическим классам, рассчитано общее количество выделившейся сейсмической энергии.

По данным всех видов наблюдений зафиксированы и детально прослежены все периоды активизаций вулканов в 2016–2017 гг.: интенсивная вулканическая деятельность влк. Шивелуч, связанная с ростом нового купола, три эксплозивных извержения влк. Безымянный, вершинное эксплозивно-эффузивное извержение влк. Ключевской, начавшееся в апреле 2016 г. и продолжавшееся до сентября 2017 г., эксплозивная деятельность влк. Жупановский, сейсмическая подготовка и извержение влк. Камбальный, наблюдавшееся впервые в историческое время.

**Ключевые слова:** сейсмический мониторинг действующих вулканов, визуальные и видеонаблюдения, энергетический класс  $K_s$ , сейсмическая энергия, график повторяемости землетрясений.

**DOI:** 10.35540/1818-6254.2022.25.34 **EDN:** OFOFMZ

**Для цитирования:** Сеньюков С.Л., Нурждина И.Н. Сейсмичность вулканических районов Камчатки в 2016–2017 гг. // Землетрясения Северной Евразии. – 2022. – Вып. 25 (2016–2017 гг.). – С. 361–377. DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.34. EDN: OFOFMZ

В 2016–2017 гг. был продолжен мониторинг активности вулканов Камчатки. Положение активных вулканов, описание различных видов наблюдений, с помощью которых проводился мониторинг, его цели и задачи представлены в работах [1, 2]. Для сейсмического мониторинга вулканов использовались станции радиотелеметрической сети (РТСС) КФ ФИЦ ЕГС РАН [Прил. 1]. Сеть РТСС, осуществляющая контроль сейсмической активности вулканов в 2016–2017 гг., практически не изменилась по сравнению с 2015 г. [3], добавилась только станция «Безымянный-перевал» (ВЗР) в районе влк. Безымянный 01.09.2016 [Прил. 1]. Сеть позволяла проводить детальные наблюдения в режиме, близком к реальному времени, для Северной (влк. Шивелуч, Ключевской, Безымянный, Плоский Толбачик, Ушковский и Крестовский), Авачинской (влк. Авачинский, Корякский), Мутновско-Гореловской (влк. Горелый и Мутновский) групп вулканов, а также для влк. Кизимен, влк. Жупановский и влк. Камбальный.

Методика обработки вулканических землетрясений, локальные годографы не изменились по сравнению с таковыми в предыдущие годы и изложены в [1, 3]. Как и прежде, для определения параметров землетрясений применялась программа DIMAS [4] с использованием различных одномерных скоростных моделей среды [1, 5], а исследование представительных классов и углов наклона графиков повторяемости для выборок вулканических землетрясений проводилось с помощью пакета программ ZMAP [6].

Ниже приведены данные о сейсмической активности вулканов. Анализируются сейсмические события из районов, ограниченных координатами для «Северной группы» вулканов:  $\varphi=55.54-56.80^{\circ}\text{N}$ ,  $\lambda=159.82-161.60^{\circ}\text{E}$ ; «Авачинской группы»:  $\varphi=53.10-53.40^{\circ}\text{N}$ ,  $\lambda=158.50-159.00^{\circ}\text{E}$ ; «Мутновско-Гореловской группы»:  $\varphi=52.30-52.70^{\circ}\text{N}$ ,  $\lambda=157.70-158.40^{\circ}\text{E}$ ; «района влк. Кизимен»:  $\varphi=54.90-55.54^{\circ}\text{N}$ ,  $\lambda=159.82-160.80^{\circ}\text{E}$ , «района влк. Жупановский»:  $\varphi=53.40-53.90^{\circ}\text{N}$ ,  $\lambda=158.70-159.65^{\circ}\text{E}$  и «района влк. Камбальный»:  $\varphi=51.20-51.50^{\circ}\text{N}$ ,  $\lambda=156.50-157.10^{\circ}\text{E}$ . Все события сгруппированы в шесть каталогов [Прил. 6–11]. Каждому землетрясению в каталогах присвоено название соответствующего вулкана, если оно произошло в пределах установленного радиуса выборки для этого вулкана. Если землетрясение находится в вулканическом районе, но вне радиусов выборок, то в каталогах и, также, ниже по тексту статьи в соответствующих таблицах оно обозначается «вне вулканов». Следует отметить, что каталоги, опубликованные ранее в [7, 8], отличаются от публикуемых в настоящем издании вследствие корректировки данных. Также важно обратить внимание на то, что далее по тексту будут приводиться значения теоретического уровня надежной регистрации  $K_{\min}$ , рассчитанные с помощью программы «Kam\_tst» (автор Д.В. Дроздин) для сложившейся конфигурации сети. Эти величины отмечены изолиниями на картах (рис. 1, 7, 11, 12, 14) и обычно показывают возможный, ожидаемый, минимальный уровень надежной регистрации при условии работы всех станций, что не всегда выполняется. Поэтому фактический представительный класс  $K_{\text{пред}}^1$  обычно получается несколько выше.

Для каждого вулкана ежедневно выставлялся цветовой код опасности, учитывающий сейсмические, видео и спутниковые данные. Цветовая шкала имеет четыре основные градации активности: «красный», «оранжевый», «желтый» и «зеленый». Дополнительный «белый» код обозначает, что опорная сейсмическая станция не работала в эти сутки. Уровень сейсмической и вулканической активности, соответствующий цветовому коду, описан в [9]. Подробные результаты мониторинга активных вулканов Камчатки в 2016–2017 гг. опубликованы в режиме, близком к реальному времени, на официальной странице КФ ФИЦ ЕГС РАН по адресу: <http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>. Краткие сведения об активности вулканов приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Распределение суммарного числа дней с определенным цветовым кодом активности на вулканах Камчатки за период 2000–2015 гг. и отдельно в 2016 и 2017 гг.

Вулкан\Код	2000–2015 (сред/год)					2016					2017				
	Б	З	Ж	О	К	Б	З	Ж	О	К	Б	З	Ж	О	К
Шивелуч	14	72	177	96	6	–	1	66	294	5	4	86	68	193	14
Ключевской	3	217	115	28	2	–	66	111	177	12	–	167	138	56	4
Безымянный	73	263	26	2	1	196	148	19	3	–	12	216	126	8	3
Пл. Толбачик	51	259	39	16	1	62	294	10	–	–	9	340	16	–	–
Авачинский	1	363	2	–	–	6	359	1	–	–	3	362	–	–	–
Корякский	2	358	6	–	–	8	355	3	–	–	2	362	1	–	–
Мутновский	44	272	48	–	–	55	308	3	–	–	75	221	69	–	–
Горелый	43	95	227	–	–	2	252	112	–	–	–	102	263	–	–
Кизимен	13	148	95	108	1	1	362	3	–	–	31	334	–	–	–
Жупановский	1	201	127	34	3	6	320	33	3	4	–	330	31	4	–
Камбальный											–	257	17	9	–

Как следует из табл. 1, на основании комплексных наблюдений влк. Шивелуч сохранял лидирующее положение по активности в течение 2000–2017 гг. В 2016–2017 гг. для него 506 раз выставлялся оранжевый и красный код опасности. Следующими по активности в исследуемый период были влк. Ключевской и влк. Безымянный. Далее рассмотрим каждый вулкан в отдельности.

**Северная группа вулканов.** Каталог землетрясений Северной группы вулканов за 2016 г. содержит 3243 землетрясения ( $\Sigma E=5.107 \cdot 10^8$  Дж), табл. 2. В 2017 г. было лоцировано ~ в 1.5 раза больше событий ( $N=4909$ ), выделенная ими энергия ~ в 1.7 раз превысила таковую в 2016 г., но меньше ~ в 75.5 среднего значения за период 2000–2015 гг. (табл. 3), [Прил. 11].

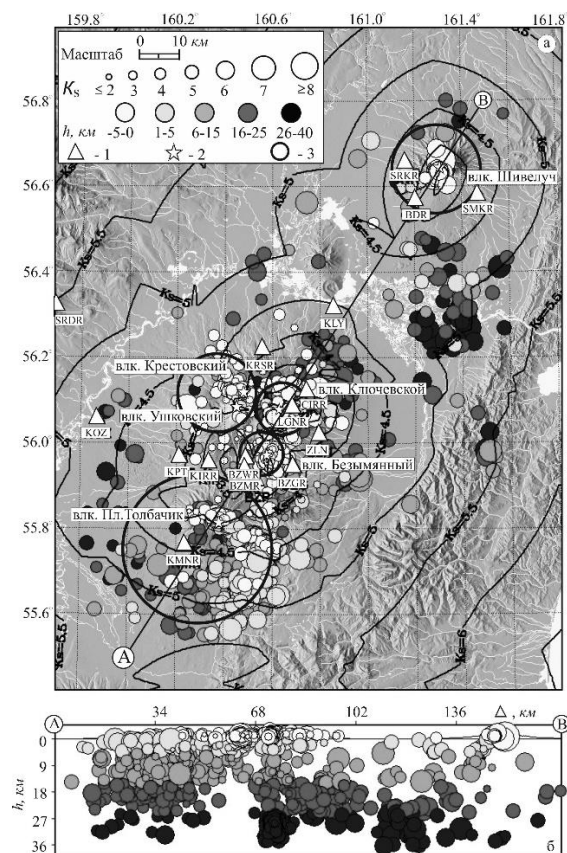
Распределение количества землетрясений по  $K_s$  [10] и их суммарная энергия для районов отдельных вулканов Северной группы приведены в табл. 2. Карта эпицентров землетрясений

<sup>1</sup> Здесь и далее под  $K_{\text{пред}}$  понимается значение представительного класса для выборки землетрясений из определенной области за определенный промежуток времени.

и условные зоны сейсмичности рассматриваемых вулканов показаны на рис. 1. Наиболее активной по числу землетрясений в 2016 г. была зона влк. Шивелуч. Здесь произошло 55.7 % землетрясений от общего числа событий, вошедших в каталог. А в 2017 г. высокая сейсмичность регистрировалась в зоне влк. Ключевской (62.1 %) (табл. 2), [Прил. 11]. В 2016 г. представительными для района Северной группы вулканов стали землетрясения с  $K_{пред}=3.6$ , при угле наклона графика повторяемости  $\gamma=0.80\pm 0.01$ . В 2017 г. эти значения остались на этом же уровне ( $K_{пред}=3.8$ ,  $\gamma=0.85$ ), но ниже, чем за весь период 2000–2015 гг. ( $K_{пред}=4.5$ ,  $\gamma=0.97$ ) (табл. 3). В 2016 г. землетрясение с максимальным классом  $K_S=8.3$  произошло 11 января в 15<sup>h</sup>56<sup>m</sup> на глубине  $h=30.6$  км северо-восточнее зоны влк. Ключевской, район реки Хапица [Прил. 11]. В 2017 г. максимальный класс  $K_S=8.5$  был зарегистрирован 19 июля в 08<sup>h</sup>19<sup>m</sup>, землетрясение лоцировано в постройке влк. Шивелуч ( $h=-0.7$  км) [Прил. 11].

**Таблица 2.** Распределение числа землетрясений по энергетическим классам  $K_S$  и суммарная сейсмическая энергия землетрясений в районе Северной группы вулканов в 2016 и в 2017 гг.

Название вулкана	$R_{зоны}$ , км	$K_S$																$N_{\Sigma}$		$\Sigma E$ , $10^8$ Дж	
		2016								2017								2016	2017	2016	2017
		2	3	4	5	6	7	8	2	3	4	5	6	7	8						
Шивелуч	12	–	271	1335	192	8	–	–	–	6	16	6	5	1	1	1806	35	0.37	3.39		
Ключевской	7	1	94	732	106	3	2	–	4	436	2299	304	4	–	–	938	3047	0.32	0.54		
Безымянный	6	2	28	12	2	–	–	–	91	618	392	102	30	4	–	44	1237	0.01	0.75		
Пл. Толбачик	20	2	26	108	37	15	5	–	7	93	132	39	16	1	2	193	290	0.88	2.44		
Крестовский и Ушковский	10.1	1	35	90	2	–	–	–	1	26	18	4	–	1	–	128	50	0.01	0.04		
Вне вулканов	–	–	10	45	45	26	6	2	8	59	79	80	18	5	1	134	250	3.93	2.06		
Всего	–	–	6	464	2322	384	52	13	2	111	1238	2936	535	134	12	4	3243	4909	5.52	9.22	



**Рис. 1.** Карта эпицентров (а) землетрясений Северной группы вулканов за 2016–2017 гг. и проекция гипоцентров (б) на вертикальную плоскость, проходящую по линии А–В

1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан; 3 – окружность, оконтуривающая область выборки землетрясений, принадлежащих вулкану. Радиусы областей для разных вулканов равны: Шивелуч – 12 км, Ключевской – 7 км, Крестовский и Ушковский – 10.1 км, Безымянный – 6 км, Плоский Толбачик – 20 км. Изолиниями отмечен теоретический уровень надежной регистрации.

Ниже приводится описание активности вулканов Северной группы по инструментальным и визуальным наблюдениям.

**Вулкан Шивелуч.** Теоретический уровень надежной регистрации  $K_{min}$  изменяется от  $K_{min}=3.0$  в центре до  $K_{min}=4.5$  на краях для области, обозначенной окружностью с радиусом 12 км на рис. 1.

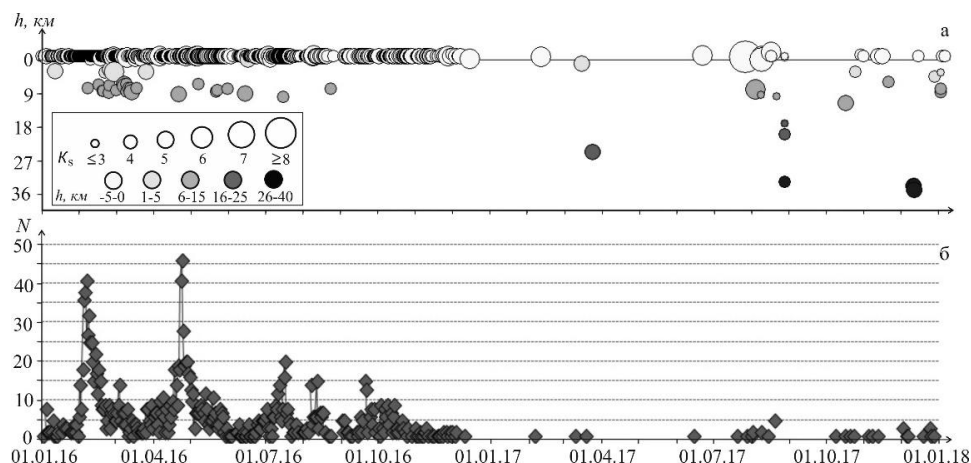
В 2016–2017 гг. на влк. Шивелуч продолжалось экструзивно-эксплозивное извержение, связанное с ростом нового купола. Извержение сопровождалось вулканическим дрожанием, мощными газо-пепловыми выбросами, сходом пирокластических потоков и горячих лавин. Количество землетрясений с  $2.7 \leq K_S \leq 6.2$  [Прил. 11],

произошедших в 2016 г. в радиусе 12 км от вулкана и диапазоне глубин  $h=-1.4-10.0$  км (рис. 2 а, б), и высвобожденная в их очагах энергия практически не изменились по сравнению

с 2015 г. ( $N=1799$ ,  $\Sigma E=0.67 \cdot 10^8$  Дж) [3], но значительно меньше средних значений за период 2000–2015 гг. (табл. 3). Угол наклона графика повторяемости в 2016 г. близок к среднему значению за весь период наблюдений, а представительный класс уменьшился (табл. 3). Для землетрясений в 2017 г. эти параметры не определены из-за недостаточности данных (табл. 3).

**Таблица 3.** Число землетрясений  $N$ , их суммарная сейсмическая энергия  $\Sigma E$ , представительный энергетический класс  $K_{пред}$ , угол наклона графика повторяемости для вулканов Северной группы в 2000–2017 гг.

Название вулкана	2000–2015				2016				2017			
	$N_{\text{сред/год}}$	$\Sigma E_{\text{сред/год}}, 10^8 \text{ Дж}$	$K_{\text{пред}}$	$\gamma$	$N$	$\Sigma E, 10^8 \text{ Дж}$	$K_{\text{пред}}$	$\gamma$	$N$	$\Sigma E, 10^8 \text{ Дж}$	$K_{\text{пред}}$	$\gamma$
Северная группа	7318	696.48	4.5	0.97	3244	5.52	3.6	0.80	4909	9.22	3.8	0.85
Шивелуч	2871	7.99	4.5	0.98	1806	0.379	3.6	0.98	35	3.392	–	–
Ключевской:	4001	505.76	4.6	0.96	938	0.32	3.9	1.09	3047	0.54	4.0	1.49
I горизонт	1137	4.14	4.3	0.63	634	0.29	3.9	1.0	1744	0.29	4.2	1.88
I горизонт	83	499.36	4.0	0.58	9	0.002	–	–	8	0.001		
III горизонт	2781	2.27	4.7	1.43	295	0.03	3.6	1.2	1295	0.24	3.9	1.26
Безымянный	213	0.5	3.7	0.85	44	0.01	–	–	1237	0.75	3.2	0.59
Плоский Толбачик	161	145.48	4.1	0.52	193	0.88	3.5	0.48	290	2.44	3.2	0.51
Крестовский и Ушковский	76	9.25	3.9	0.91	128	0.01	3.6	1.56	50	0.04	–	–



**Рис. 2.** Изменение во времени глубины гипоцентров  $h$  (а) и количества  $N$  (б) вулканических землетрясений, лоцированных в радиусе 12 км от влк. Шивелуч в 2016–2017 гг.

В течение 2016 г. было зарегистрировано три всплеска сейсмической активности 31 января–16 февраля ( $N=383$ ), 5 апреля–2 мая ( $N=403$ ), 8–18 июля ( $N=113$ ). Максимальное количество землетрясений ( $N=46$ ) за сутки зафиксировано 23 апреля (рис. 2 б). Землетрясение с максимальным классом  $K_S=6.2$  произошло в постройке вулкана 9 декабря в 22<sup>h</sup>28<sup>m</sup> ( $h=-0.2$  км) (рис. 2 а) [Прил. 11].

В 2017 г., как и в предыдущий 2016 г., на влк. Шивелуч наблюдалась высокая сейсмическая активность. Но из-за неустойчивой работы РТСС «Сорокин» (SRKR), «Семкарок» (SMKR) и «Байдарная» (BDR) (рис. 1 а) в течение практически всего года было лоцировано лишь 35 событий. Максимальный класс землетрясения  $K_S=8.5$  зарегистрирован 19 июля в 08<sup>h</sup>19<sup>m</sup> в постройке вулкана ( $h=-0.7$  км) (рис. 2 а) [Прил. 11].

По-прежнему в течение 2016–2017 гг. на спутниковых снимках регистрировалась термальная аномалия (рис. 3 а), свидетельствующая о постоянном присутствии на поверхности горячего материала, сопровождающего экструзивный рост купола. По данным видеонаблюдений регистрировались пепловые выбросы (рис. 3 б) и сход пирокластических потоков. Пепловые выбросы высотой 12 км над уровнем моря были зафиксированы 14, 18, 27 июня, 2 июля и 8 августа 2017 года. В исследуемый двухгодичный период самый высокий «красный» код опасности присваивался вулкану 19 дней (табл. 1).

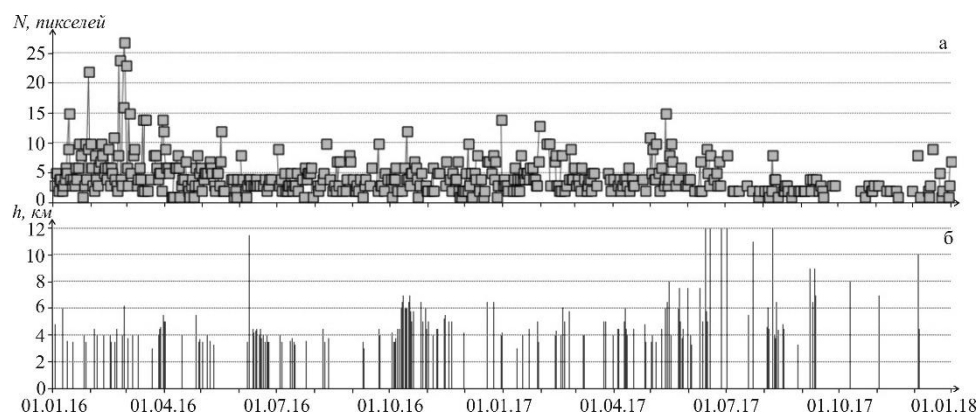


Рис. 3. Изменение во времени размера термальной аномалии на влк. Шивелуч по данным спутников NOAA16 и NOAA17 (а); высота газо-пепловых выбросов над уровнем моря по видеоданным (б) в 2016–2017 гг.

*Вулкан Ключевской.* Существующая сеть станций позволяет регистрировать при благоприятных условиях землетрясения от  $K_{\min}=3.0$  в центре до  $K_{\min}=3.5$  на краях для области, обозначенной окружностью с радиусом 7 км на рис. 1. Ближайшая РТСС «Логинов» (LGNR) расположена в 4 км от кратера и может регистрировать землетрясения в районе кратера с классом  $K_S \geq 2.2$ .

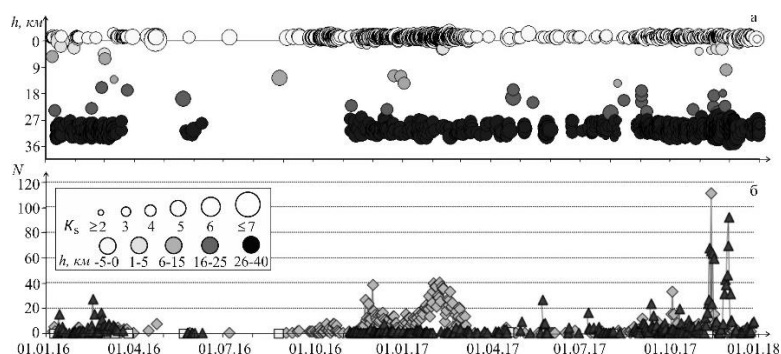
В 2016 г. в радиусе 7 км от влк. Ключевской и диапазоне глубин  $h=-2.3-33.4$  км было лоцировано 938 землетрясений с  $2.4 \leq K_S \leq 6.8$ , суммарная энергия которых составила  $\Sigma E = 0.32 \cdot 10^8$  Дж. В 2017 г. в каталог вошло в  $\sim 3$  раза больше землетрясений ( $N=3047$ ,  $2.2 \leq K_S \leq 5.8$ ,  $\Sigma E = 0.54 \cdot 10^8$  Дж) (табл. 2) [Прил. 11]. Представительность землетрясений в 2017 г. осталась на уровне 2016 г., а вот наклон графика повторяемости стал круче ( $\gamma=1.49$ ) (табл. 3). Карта эпицентров и проекция гипоцентров на вертикальный разрез представлены на рис. 1, а графики изменения во времени параметров сейсмической активности вулкана на рис. 4. Как и в предыдущие годы, все землетрясения зоны влк. Ключевской в 2016–2017 гг. были разделены по трем горизонтам: поверхностные (I  $\rightarrow$ :  $-5.0 < h \leq 5.0$  км); промежуточные (II  $\rightarrow$   $5.0 < h \leq 20.0$  км) и глубокие (III  $\rightarrow$   $20.0 < h < 40.0$  км) (табл. 3).

Характер сейсмичности вулкана связан с притоком мантийных магм в промежуточный магматический очаг на глубинах  $h=20-35$  км и дальнейшим их подъемом в постройку вулкана при вершинном извержении [11–14]. С апреля 2016 г. по январь 2017 г. и периодически в течение 2017 г. на влк. Ключевской наблюдалось вершинное эксплозивно-эффузивное извержение, сопровождающееся сейсмичностью в верхнем (I) горизонте. В периоды, предвещающие вершинные извержения, и после их окончания сейсмичность обычно была сосредоточена в нижнем (III) горизонте (рис. 4 б, в).

В 2016 г. в нижнем горизонте было лоцировано  $N=295$  ( $3.4 \leq K_S \leq 4.8$ ), в 2017 г. –  $N=1295$  ( $2.8 \leq K_S \leq 5.8$ ) глубоких длиннопериодных землетрясений (табл. 3), в образовании которых активную роль играет магматический расплав [14]. Максимальное количество  $N=93$  за сутки было локализовано 6 декабря 2017 г. (рис. 4 б) [Прил. 11]. В горизонтах I и II происходят, главным образом, вулcano-тектонические землетрясения, возникающие в твердой среде в результате хрупкого разрушения пород под действием сдвиговых и растягивающих напряжений, создаваемых активными магматическими процессами [11]. В 2016 г. в каталог вошло  $N=634$  поверхностных (горизонт I) землетрясения с  $2.4 \leq K_S \leq 6.8$ , это  $\sim 2.8$  раза меньше, чем в 2017 г. ( $N=1744$ ,  $2.2 \leq K_S \leq 5.6$ ) (табл. 3). Землетрясение с  $K_{S\max}=6.8$  произошло 23 апреля 2016 г. в 05<sup>h</sup>36<sup>m</sup> в постройке вулкана (рис. 4 а) [Прил. 11].

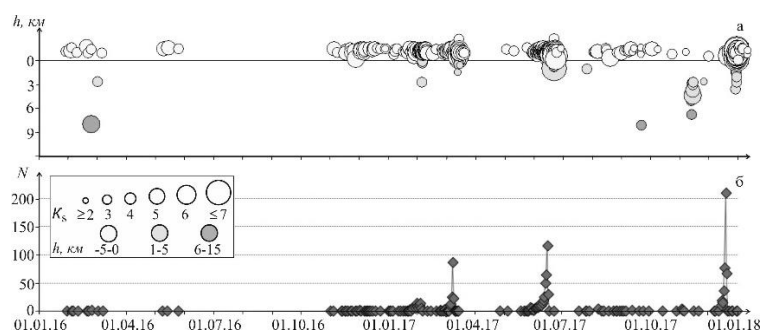
В табл. 3 приведены значения  $\Sigma E$ ,  $K_{\text{пред}}$  и  $\gamma$  для всех трех горизонтов за 2000–2017 гг. Нужно отметить высокое значение угла наклона графика повторяемости ( $\gamma=1.88$ ) в слое I в 2017 г. по сравнению со среднегодовым ( $\gamma=0.63$ ) за период 2000–2015 гг. Причиной этого может быть большое количество землетрясений нетектонического происхождения, связанных с магматическими процессами при вершинном извержении вулкана.

Как следует из табл. 1, в 2016–2017 гг. на влк. Ключевской наблюдалась повышенная сейсмическая и вулканическая активность, связанная с извержением вулкана. «Красный» код опасности выставлялся 16 раз: в 2016 г. – 7 июля, 3, 6, 8, 9, 20, 21 и 23 сентября, 6, 13, 16 и 17 октября; в 2017 г. – 2 марта, 12 и 15 июня, 10 августа.



**Рис. 4.** Изменение во времени глубины гипоцентров  $h$  вулканических землетрясений (а); ежесуточного числа поверхностных (ромб), промежуточных (квадрат) и глубоких (треугольник) землетрясений (б), произошедших в радиусе 7 км от влк. Ключевской в 2016–2017 гг.

**Вулкан Безымянный.** Ближайшая РТСС «Безымянный» (BZMR), расположенная в 7 км от растущего купола, позволяет регистрировать землетрясения с  $K_S \geq 2.9$  (рис. 1). Теоретический уровень надежной регистрации при существующей сети РТСС и благоприятных условиях составляет  $K_{\min} = 3.0$  (рис. 1).



**Рис. 5.** Изменение во времени глубины гипоцентров  $h$  вулканических землетрясений (а) и ежесуточного числа землетрясений (б), произошедших в радиусе 6 км от влк. Безымянный в 2016–2017 гг.

С апреля по октябрь 2016 г. корректный сейсмический мониторинг был невозможен из-за максимальной фазы извержения влк. Ключевской, сопровождавшегося сильным вулканическим дрожанием. С 28 октября стали регистрироваться землетрясения из района влк. Безымянный (рис. 5), а 9 ноября на спутниковых снимках была зафиксирована термальная аномалия на экструзивном куполе вулкана. 12 декабря разница температур земной поверхности в месте аномалии и окружающей среды (фон) достигла  $(T_{\text{ан}} - T_{\text{ф}}) \approx 60^\circ\text{C}$ . На основании высокой температуры аномалии и повышенной сейсмичности на влк. Безымянный был сделан прогноз эксплозивного извержения, переданный в КФ РЭС 13 декабря [15, 16]. Извержение с высотой эруптивного облака до 6 км над уровнем моря произошло 15 декабря. Всего в 2016 г. в радиусе 6 км от вулкана было лоцировано 44 землетрясения с  $2.3 \leq K_S \leq 5.4$  (табл. 2) в диапазоне глубин  $h = -1.7 - 8.0$  км (рис. 5) [Прил. 11].

В 2017 г. на влк. Безымянный были зафиксированы три эксплозивные извержения (9 марта, 16 июня, 20 декабря) и выжимание вязкого потока на растущем куполе 5–12 февраля, предварявшиеся повышенной сейсмичностью [16, 17]. В период с 28 января по 4 февраля (первая сейсмическая активизация, рис. 5) было лоцировано 73 поверхностных землетрясения ( $2.4 \leq K_S \leq 4.1$ ,  $h = -1.5 - 2.7$  км) [Прил. 11]. Разница температур аномалии и фона в этот период оставалась в пределах нормы  $(T_{\text{ан}} - T_{\text{ф}}) \leq 20^\circ\text{C}$  и резко выросла 5 февраля до  $50^\circ\text{C}$ , при этом сейсмичность упала до «фоновой». В период 6–11 февраля влк. Безымянный визуально и на спутниковых снимках был закрыт плотной облачностью, и только 12 февраля на спутниковом снимке MSI (SENTINEL-2A) были измерены параметры лавового потока: длина 550 м, ширина до 120 м, мощность несколько метров и площадь около  $0.06 \text{ км}^2$  [18].

После непродолжительного затишья с 5 по 25 февраля, 26 февраля началась вторая в 2017 г. сейсмическая активизация в районе постройки влк. Безымянный, количество вулканических землетрясений и их энергия увеличивались с каждым днем. В период 5–9 марта было лоцировано 164 землетрясения ( $\Sigma E = 0.03 \cdot 10^8 \text{ Дж}$ ) (рис. 5) [Прил. 11]. Исследования сейсмической подготовки предыдущих извержений вулкана показывают, что подобный скачок сейсмической активности предшествует сильному эксплозивному извержению со временем упреждения до 30 дней с вероятностью 70 % [19]. Поэтому 9 марта в 02<sup>h</sup>00<sup>m</sup> сотрудниками лаборатории ИСВА был подан в КФ РЭС прогноз эксплозивного

извержения влк. Безымянный с высотой пепловых выбросов 6–15 км над уровнем моря в период с 9 марта по 9 апреля 2017 года. Первые отдельные эксплозии были зафиксированы видеокамерой, установленной на месте РТСС «Грива» (BZGR) (рис. 1), 9 марта в 02<sup>h</sup>50<sup>m</sup>. Первый пепловый выброс по сейсмическим данным был выделен автоматически программой ADAP [19] в 03<sup>h</sup>03<sup>m</sup> с оценкой высоты эруптивного облака в 5.6 км над уровнем моря, в 03<sup>h</sup>19<sup>m</sup> высота пепловой колонны достигла 10 км. По данным Tokyo VAAC ([http://ds.data.jma.go.jp/svd/vaac/data/vaac\\_list.html](http://ds.data.jma.go.jp/svd/vaac/data/vaac_list.html), спутник HIMAWARY-8), эруптивный шлейф от влк. Безымянный впервые был зафиксирован 9 марта в 03<sup>h</sup>42<sup>m</sup>. Шлейф распространялся в С–СЗ направлении, 10 марта в 12<sup>h</sup>00<sup>m</sup> его протяженность была более 1500 км.

Следующая сейсмическая активизация в 2017 г. началась 5 июня и постепенно нарастала вплоть до извержения 16 июня. За это время было лоцировано 383 ( $2.1 \leq K_S \leq 6.8$ ) землетрясения в постройке влк. Безымянный (рис. 5) [Прил. 11]. По данным видео наблюдений сход «горячих» каменных лавин и свечение купола начали фиксироваться с 10 июня. При этом разница температур земной поверхности в месте аномалии и окружающей среды (фона) оставалась в пределах обычных значений и немного выросла накануне извержения 15 июня, достигнув значения (ТанТф)≈21°C. По наблюдаемым параметрам в КФ РЭС был подан прогноз (лаборатория ИСВА) эксплозивного извержения влк. Безымянный с высотой пепловых выбросов 6–15 км над уровнем моря в период с 11 июня по 11 июля 2017 года. Время начала извержения (в течение следующих семи суток) и его вероятность (90 %) были уточнены 15 июня. По сейсмическим данным пароксизмальное извержение произошло 16 июня с 04<sup>h</sup>53<sup>m</sup> до 05<sup>h</sup>06<sup>m</sup>. По видеонаблюдениям пепловый столб достиг высоты ~12 км над уровнем моря, шлейф распространялся на восток.

Сейсмическая активизация, предвзвешивая третье в 2017 г. эксплозивное извержение влк. Безымянный, началась 14 декабря. В период 14–17 декабря в постройке вулкана было лоцировано 86 землетрясений ( $1.8 \leq K_S \leq 5.5$ ,  $\Sigma E = 0.02 \cdot 10^8$  Дж), а 18–20 декабря ~ в 4.2 раза больше ( $N=360$ ,  $1.8 \leq K_S \leq 6.9$ ,  $\Sigma E = 0.39 \cdot 10^8$  Дж) (рис. 5) [Прил. 11]. Такой скачок сейсмической активности мог предшествовать сильному эксплозивному извержению вулкана. Поэтому 18 декабря в КФ РЭС был подан прогноз (лаборатория ИСВА), время начала извержения уточнено 19 декабря в 22 час UTC (в течение семи дней с вероятностью 90 %). Эксплозивное извержение произошло 20 декабря в 03<sup>h</sup>39<sup>m</sup>, когда по сейсмическим данным было зарегистрировано поверхностное событие продолжительностью 20 минут, сопровождавшее газопепловый выброс высотой ~11.5 км над уровнем моря (высота определена автоматической программой ADAP [19]). Видеонаблюдения зафиксировали в это время эксплозивное извержение с высотой пепловой колонны ~15 км над уровнем моря. По спутниковым данным пепловый шлейф протянулся на север на сотни километров.

Следует отметить, что для извержений влк. Безымянный в 2017 г. были сделаны предупреждения по методу «СОУС», формулировки которых приведены в работах [16, 17].

В табл. 2 и 3 представлены данные по различным параметрам землетрясений. Надо отметить, что такой высокой сейсмической и вулканической активности, как в 2017 г., не наблюдалось за весь период комплексного мониторинга. Землетрясение  $K_{S\max}=6.9$  произошло 19 декабря 2017 г. в 22<sup>h</sup>41<sup>m</sup> в постройке вулкана (рис. 1, 5 а). Самый высокий код опасности «красный» присваивался вулкану три раза (табл. 1).

**Вулкан Плоский Толбачик.** Ближайшая РТСС «Каменистая» (KMNR) расположена в 10 км от кратера вулкана (рис. 1) и регистрирует землетрясения с  $K_S \geq 3.3$ . Теоретический уровень надежной регистрации при существующей сети РТСС и благоприятных условиях изменяется от  $K_{\min}=4.0$  вблизи вершины до  $K_{\min}=5.0$  на краях для области обозначенной окружностью с радиусом 20 км на рис. 1. За период 2016–2017 гг. в районе вулкана было лоцировано 483 землетрясения с  $2.0 \leq K_S \leq 8.2$  (табл. 2) в диапазоне глубин  $h=-2.4-31.7$  км (рис. 6) [прил. 11].

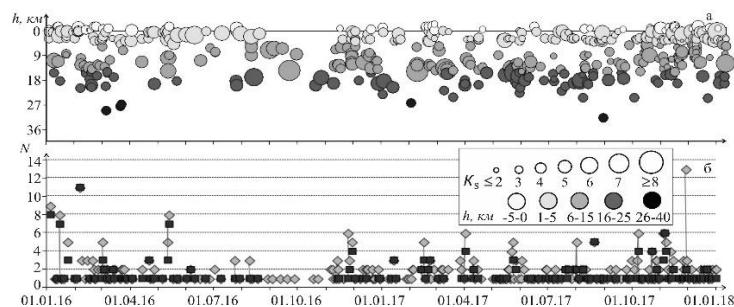


Рис. 6. Изменение во времени глубины гипоцентров  $h$  вулканических землетрясений (а); ежесуточного числа поверхностных  $-5.0 \leq h \leq 5.0$  км (ромб) и глубоких  $5.0 < h \leq 40.0$  км (квадрат) землетрясений (б), произошедших в радиусе 20 км от влк. Плоский Толбачик в 2016–2017 гг.

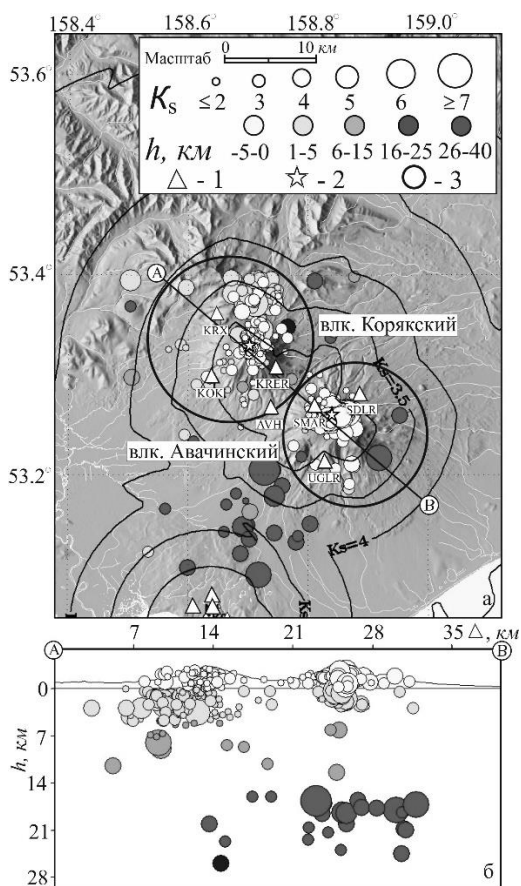
Землетрясение с  $K_{Smax}=8.2$  произошло 3 февраля 2017 г. в 00<sup>h</sup>08<sup>m</sup> на глубине  $h=14.8$  км в районе р. Толуд (рис. 1, б а).

В табл. 3 представлены данные по различным параметрам землетрясений. Из таблицы видно, что в 2017 г. лоцировано ~ в 1.5 раза больше землетрясений, а их суммарная энергия превышает ~ в 2.8 раза таковое значение в 2016 году. Если сравнивать выделенную энергию с периодом 2000–2015 гг., в который вошло извержение имени 50-летия Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (ТТИ-50) [20], то это значение меньше ~ в 60 раз. Представительность землетрясений  $K_{пред}$  и  $\gamma$  практически не изменились в 2017 г. по сравнению с 2016 годом.

В 2016–2017 гг. «желтый» код опасности на влк. Плоский Толбачик выставлялся 26 раз из-за повышенного уровня сейсмичности (табл. 1).

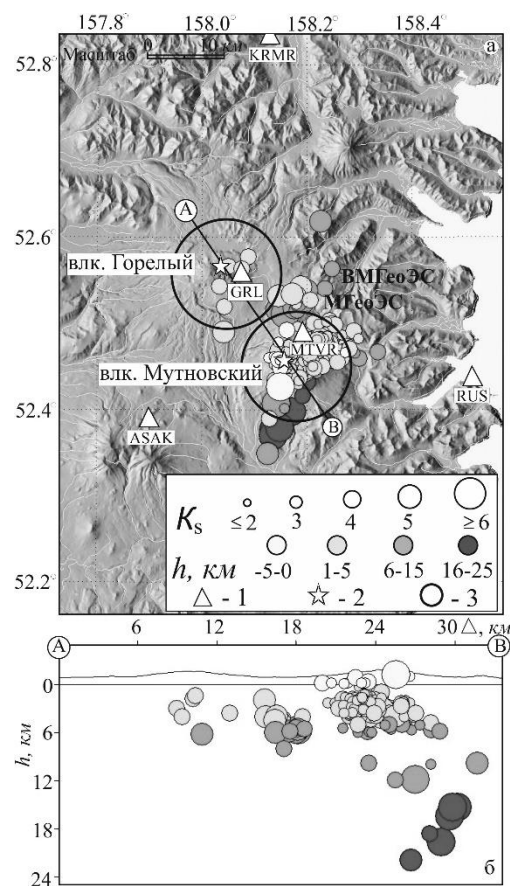
На влк. *Уиковский* и *Крестовский* в 2016–2017 гг. наблюдалась слабая сейсмическая активность, никаких проявлений вулканической активности не отмечено. Информация о цветовых кодах и сейсмическом режиме вулканов приведена в табл. 1 и 3.

**Авачинская группа вулканов.** В Авачинскую группу входят два действующих вулкана: Авачинский и Корякский. Расположены они в 30 км от наиболее густонаселенных городов Камчатки – Петропавловска-Камчатского и Елизово. Поэтому из всех вулканов Камчатки они представляют наибольшую потенциальную опасность. Теоретический уровень надежной регистрации землетрясений из района Авачинской группы изменяется от  $K_{min}=2.5$  вблизи вершин вулканов до  $K_{min}=3.5$  на краях областей, обозначенных окружностями (рис. 7 а).



**Рис. 7.** Карта эпицентров землетрясений Авачинской группы вулканов в 2016–2017 гг. (а) и проекция гипоцентров на вертикальный разрез по линии А–В (б)

1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан; 3 – окружность, оконтуривающая область выборки землетрясений вокруг Авачинского ( $R=8$  км) и Корякского вулканов ( $R=9$  км). Изолинией отмечен теоретический уровень надежной регистрации.



**Рис. 8.** Карта эпицентров землетрясений Гореловско-Мутновской группы вулканов в 2016–2017 гг. (а) и проекция гипоцентров на вертикальный разрез по линии А–В (б)

1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан; 3 – окружность, оконтуривающая область выборки землетрясений вокруг вулканов Мутновский ( $R=7$  км) и Горелый ( $R=7$  км).



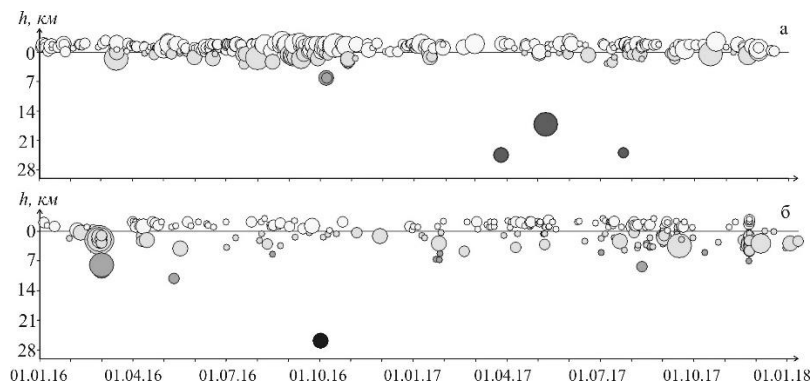
В табл. 4. представлено распределение землетрясений из района Авачинской группы вулканов по энергетическим классам. В 2016–2017 гг. вулканы были спокойны и их сейсмичность не превышала обычный «фоновый» уровень. В радиусе 8 км от влк. Авачинский в 2016 г. в каталог вошло 221 ( $1.8 \leq K_S \leq 5.8$ ,  $\Sigma E = 0.03 \cdot 10^8$  Дж) землетрясение в диапазоне глубин  $h = -2.4 - 31.7$  км, в 2017 г. было лоцировано ~ в 1.9 раза меньше ( $N = 119$ ,  $1.6 \leq K_S \leq 6.4$ ,  $\Sigma E = 0.04 \cdot 10^8$  Дж). Землетрясения с  $K_{Smax} = 5.8$  в 2016 г. зарегистрированы 1 мая в 00<sup>h</sup>09<sup>m</sup> под постройкой ( $h = 1.4$  км) влк. Авачинский и 16 октября в 02<sup>h</sup>02<sup>m</sup> в самой постройке ( $h = -1.6$ ). В 2017 г. землетрясение с  $K_{Smax} = 6.4$  было лоцировано на глубине  $h = 17.3$  км под юго-восточной зоной постройки влк. Авачинский (табл. 4) (рис. 7, 9 а) [прил. 6]. Представительность  $K_{пред}$  и  $\gamma$  в 2017–2016 гг. практически не изменились и близки к среднегодовым за период 2000–2015 гг. (табл. 5).

**Таблица 4.** Распределение числа землетрясений Авачинской группы вулканов по энергетическим классам  $K_S$  и их суммарная сейсмическая энергия в 2016–2017 гг.

Название вулкана	$R_{зоны},$ км	$K_S$												$N_\Sigma$		$\Sigma E,$ $10^8$ Дж	
		2016						2017									
		2	3	4	5	6	7	2	3	4	5	6	7	2016	2017	2016	2017
Авачинский	8	89	80	39	10	3	–	39	55	17	6	2	–	221	119	0.03	0.04
Корякский	9	50	27	9	2	1	1	115	28	6	1	1	–	90	151	0.13	0.01
Вне вулканов	–	2	4	3	1	1	–	4	8	10	1	–	1	11	24	0.01	0.16
Всего	–	141	111	51	13	5	1	158	91	33	8	3	1	322	294	0.17	0.21

В радиусе 9 км от влк. Корякский в 2017 г. было лоцировано ~ в 1.7 раза больше ( $N = 151$ ,  $1.6 \leq K_S \leq 5.8$ ,  $h = -2.9 - 8.4$  км) землетрясений, чем в 2016 г. ( $N = 90$ ,  $1.7 \leq K_S \leq 7.0$ ,  $h = -2.8 - 26.0$  км). Землетрясение с  $K_{Smax} = 7.0$  произошло на глубине  $h = 2.1$  км под влк. Корякский 28 февраля в 01<sup>h</sup>40<sup>m</sup> 2016 г. (рис. 7, 9 б) (табл. 4) [Прил. 6].

Максимальный класс  $K_{Smax} = 7.2$  землетрясения, произошедшего вне зон влк. Авачинский и влк. Корякский в исследуемый двухгодичный период, был зарегистрирован 29 февраля в 16<sup>h</sup>59<sup>m</sup> 2017 г. (рис. 7) (табл. 4) [Прил. 6]. Для сравнения в табл. 5 представлены данные по различным параметрам землетрясений за 2000–2017 гг.



**Рис. 9.** Изменение во времени глубины гипоцентров вулканических землетрясений Авачинского (в) и Корякского (г) вулканов в 2016–2017 гг.

Вулканическая активность проявлялась только в виде фумарольной деятельности. В 2016–2017 гг. «желтый» код опасности на влк. Авачинский из-за повышенного уровня сейсмичности выставлялся один раз, а на влк. Корякский три раза (табл. 1).

**Таблица 5.** Число землетрясений  $N$ , их суммарная сейсмическая энергия  $\Sigma E$ , представительный класс  $K_{пред}$ , угол наклона графика повторяемости  $\gamma$  для вулканов Авачинский, Корякский, Мутновский, Горелый, Кизимен, Жупановский в 2000–2017 гг.

Название вулкана	2000–2015				2016				2017			
	$N_{сред/год}$	$\Sigma E_{сред/год},$ $10^8$ Дж	$K_{пред}$	$\gamma$	$N$	$\Sigma E,$ $10^8$ Дж	$K_{пред}$	$\gamma$	$N$	$\Sigma E,$ $10^8$ Дж	$K_{пред}$	$\gamma$
Авачинский	176	0.085	2.6	0.55	221	0.03	2.3	0.49	119	0.04	2.4	0.51
Корякский	202	0.831	1.7	0.61	90	0.13	–	–	151	0.01	1.6	0.63

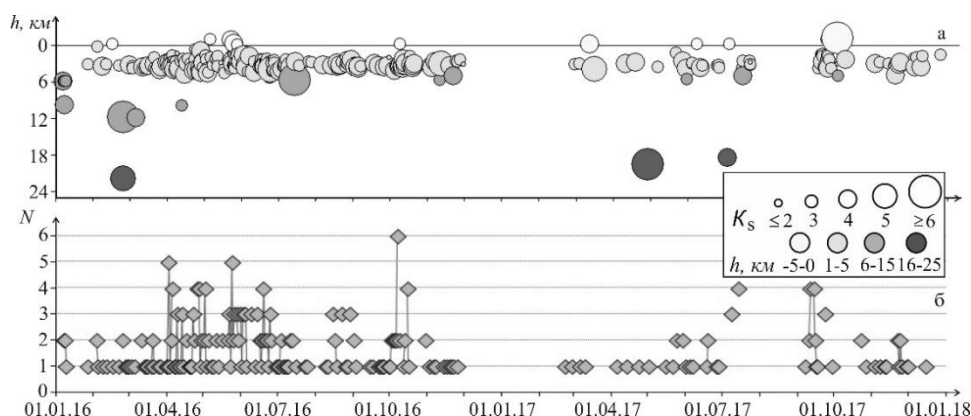
Название вулкана	2000–2015				2016				2017			
	$N_{\text{сред/год}}$	$\Sigma E_{\text{сред/год}}, 10^8 \text{ Дж}$	$K_{\text{пред}}$	$\gamma$	$N$	$\Sigma E, 10^8 \text{ Дж}$	$K_{\text{пред}}$	$\gamma$	$N$	$\Sigma E, 10^8 \text{ Дж}$	$K_{\text{пред}}$	$\gamma$
Мутновский	110	0.087	3.3	0.94	229	0.016	3.2	0.95	64	0.01	–	–
Горелый	417	0.12	3.3	0.64	4	0.001	–	–	2	0.0002	–	–
Кизимен	6749	2172	4.5	0.66	20	0.62	–	–	32	0.387	–	–
Жупановский	121	2.91	4.0	0.44	28	1.52	–	–	70	0.56	–	–
Камбальный	–	–	–	–	–	–	–	–	49	12.05	–	–

**Мутновско-Гореловская группа** находится в 70 км к югу от г. Петропавловска-Камчатского, здесь расположены Мутновская и Верхне-Мутновская геотермальные станции (рис. 8 а). Теоретический уровень надежной регистрации землетрясений из района Мутновско-Гореловской группы вулканов при существующей сети РТСС равен  $K_{\text{min}}=4.5$  [15, 17]. В каталоги 2016–2017 гг. из этого района вошло  $N=357$  землетрясений в диапазоне глубин  $h=-1.2-21.9$  км с энергетическим классом  $K_S=2.0-6.2$  (табл. 6) [Прил. 10]. Землетрясение  $K_{S\text{max}}=6.2$  произошло в 2017 г. 9 сентября в 20<sup>h</sup>52<sup>m</sup> на глубине  $h=16.4$  км вне зон вулканов (рис. 8).

В течение практически всего периода 2016–2017 гг. на ближайшей к вулкану станции «Горелый» (GRL), расположенной в 4 км от кратера, регистрировались спазматическое вулканическое дрожание и слабые локальные сейсмические события с  $K_S \geq 2.2$ . За все это время в радиусе 7 км от вершины влк. Горелый и в диапазоне глубин  $h=1.4-4.1$  км было лоцировано всего шесть землетрясений ( $\Sigma E=0.0012 \cdot 10^8 \text{ Дж}$ ) (табл. 6) [Прил. 10]. В сравнении со среднегодовыми значениями за период 2000–2015 гг., количество лоцированных событий и высвобожденная ими суммарная энергия в 2016 и 2017 гг. оказались меньше  $\sim 70$  и 100 раз соответственно. Это связано с высокой сейсмической активностью, сопровождавшей образование высокотемпературной бокки у основания стенки активного кратера в 2009 г. (табл. 5). Землетрясение с  $K_{S\text{max}}=5.1$  произошло 12 июня 2016 г. в 04<sup>h</sup>54<sup>m</sup> на глубине  $h=3.6$  км под постройкой влк. Горелый [Прил. 10].

**Таблица 6.** Распределение числа землетрясений района Гореловско-Мутновской группы вулканов по энергетическим классам  $K_S$  и их суммарная сейсмическая энергия в 2016–2017 гг.

Название вулкана	$R_{\text{зоны}}, \text{ км}$	$K_S$										$N_{\Sigma}$		$\Sigma E, 10^8 \text{ Дж}$	
		2016					2017					2016	2017	2016	2017
		2	3	4	5	6	2	3	4	5	6				
Горелый	7	–	–	3	1	–	–	–	2	–	–	4	2	0.001	0.0002
Мутновский	7	16	144	65	3	1	3	46	12	1	2	229	64	0.016	0.01
Вне вулканов	–	–	9	14	3	–	–	8	12	9	3	26	32	0.006	0.05
Всего	–	16	153	82	7	1	3	54	26	10	5	259	98	0.023	0.06



**Рис. 10.** Изменение во времени глубины гипоцентров  $h$  вулканических землетрясений (а); ежесуточного числа землетрясений (б), произошедших в радиусе 7 км от влк. Мутновский в 2016–2017 гг.

РТСС «Мутновская» (МТВР) установлена на расстоянии  $\sim 3$  км от активного кратера влк. Мутновский (рис. 8 а). Минимальный уровень регистрируемой сейсмичности по этой станции соответствует  $K_S=2.0$ . В 2016 г. в радиусе 7 км от вулкана было лоцировано 229 землетрясе-

ний ( $K_S=2.2-5.7$ ,  $h=-0.9-21.9$  км) (табл. 6) [Прил. 10] (рис. 10), что  $\sim$  в 2 раза больше среднегодового значения ( $N=110$ ) за период 2000–2015 гг. (табл. 5). Представительный класс для них получился  $K_{пред}=3.2$  при  $\gamma=0.95\pm 0.05$ , т.е. параметры соответствуют среднегодовым значениям 2000–2015 гг. (табл. 5). Здесь следует отметить, что большое значение  $\gamma$  обычно свидетельствует о вулканической природе сейсмических событий и может быть связано с магматической или гидротермальной деятельностью вулкана. Землетрясение с  $K_{Smax}=5.7$  произошло 24 февраля в 13<sup>h</sup>02<sup>m</sup> под постройкой влк. Мутновский ( $h=11.9$  км) [Прил. 10]. В 2017 г. было лоцировано всего 64 землетрясения ( $K_S=2.0-5.6$ ,  $h=-1.2-19.7$  км) (табл. 5) [Прил. 10]. Максимальный класс  $K_{Smax}=5.6$  был зарегистрирован 23 апреля в 03<sup>h</sup>22<sup>m</sup> на глубине  $h=19.7$  км под постройкой влк. Мутновский и 23 сентября в 00<sup>h</sup>57<sup>m</sup> в постройке вулкана ( $h=-1.2$  км) [Прил. 10].

«Желтый» код опасности для влк. Горелый и влк. Мутновский выставлялся в основном из-за повышенного уровня сейсмичности, когда количество слабых локальных сейсмических событий превышало  $N=50$  в сутки (табл. 1). Вулканическая активность влк. Горелый и влк. Мутновский в 2016–2017 гг. проявлялась в основном в виде фумарольной деятельности.

**Вулкан Кизимен** – самый южный из действующих вулканов Центральной Камчатской депрессии. Ближайшая РТСС «Кизимен» (KZV) расположена на склоне вулкана  $\sim$  в 2.5 км от вершины. Теоретический уровень надежной регистрации землетрясений для области, обозначенной окружностью с радиусом 15 км от вершины влк. Кизимен, соответствует  $K_{min}=3.5-5.0$  (рис. 11 а).

**Таблица 7.** Распределение числа землетрясений района влк. Кизимен по энергетическим классам  $K_S$  и их суммарная сейсмическая энергия в 2016–2017 гг.

Название вулкана	$R_{зоны},$ км	$K_S$														$N_{\Sigma}$		$\Sigma E,$ $10^8$ Дж	
		2016							2017										
		3	4	5	6	7	8	2	3	4	5	6	7	8	9	2016	2017	2016	2017
Кизимен	15	–	3	9	5	3	–	1	13	4	8	5	1	–	–	20	32	0.62	0.39
Вне вулкана	–	1	4	10	7	3	1	1	16	11	15	17	3	2	1	26	66	1.34	27.06
Всего	–	1	7	19	12	6	1	2	29	15	23	22	4	2	1	46	98	1.96	27.45

На рис. 11 представлена карта эпицентров землетрясений (а), проекция их гипоцентров на вертикальный разрез (б), в табл. 7 представлено распределение землетрясений из района влк. Кизимен по энергетическим классам в 2016–2017 гг. За двухлетний период в радиусе 15 км от вершины вулкана и в диапазоне глубин  $h=-1.6-14.4$  км было локализовано всего 52 землетрясения, выделено ими энергии  $\Sigma E=1.01 \cdot 10^8$  Дж, это  $\sim$  в 4 и  $\sim$  в 2.3 раза меньше, чем в 2015 г. ( $N=205$ ,  $\Sigma E=2.53 \cdot 10^8$  Дж) [Прил. 9] [3] (табл. 7).

Если сравнивать такие значения со всем периодом наблюдений, в который вошла подготовка и извержение влк. Кизимен с ноября 2010 г. по 2015 г. включительно, сейсмичность снизилась  $\sim$  в 337 раз в 2016 г. и  $\sim$  в 211 раз в 2017 г., а высвобожденная вулканическими землетрясениями энергия  $\sim$  в 3503 и  $\sim$  в 5569 раз соответственно (табл. 5). В радиусе 15 км от вулкана землетрясения  $K_{Smax}=7.5$  произошли 6 ноября 2016 г. в 06<sup>h</sup>15<sup>m</sup> ( $h=3.5$  км) и 5 января 2017 г. в 05<sup>h</sup>03<sup>m</sup> ( $h=2.9$  км). Максимальный класс землетрясения в 2016–2017 гг.  $K_{Smax}=9.4$  был зарегистрирован вне зоны вулкана ( $h=5.9$  км) 5 ноября 2017 г. в 19<sup>h</sup>12<sup>m</sup> [Прил. 9].

Вулканическая активность влк. Кизимен в 2016–2017 гг. проявлялась только в виде мощной фумарольной деятельности, а сейсмичность превышала фоновую (желтый код) три дня в 2016 г., табл. 1.

**Вулкан Жупановский** расположен в юго-восточном поясе Камчатки и представляет собой восточную часть Дзензур-Жупановского вулканического хребта, образованную четырьмя слившимися конусами стратовулканов [21].

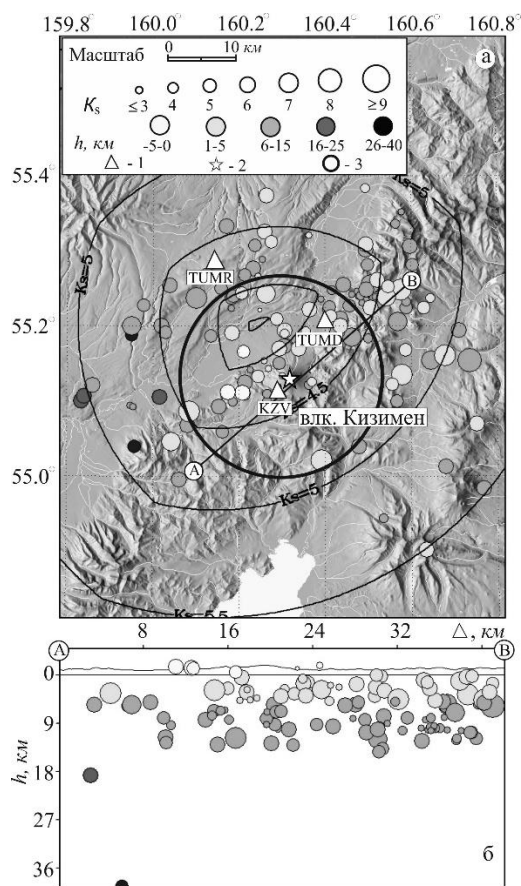
Сейсмический мониторинг влк. Жупановский проводится удаленными РТСС, ближайшие из которых «Седловина» (SDLR), «Корякский ретранслятор» (KRER) и «Арик» (KRX) расположены в 38–40 км от него в районе Авачинской группы вулканов. Теоретический уровень надежной регистрации существующей сети сейсмических станций соответствует  $K_{min}=4.5-5.5$  (рис. 12 а).

**Таблица 8.** Распределение числа землетрясений по энергетическим классам  $K_S$  и их суммарная сейсмическая энергия из района влк. Жупановский в 2016–2017 гг.

Название вулкана	$R_{зоны}, км$	$K_S$														$N_{\Sigma}$		$\Sigma E, 10^8 Дж$	
		2016							2017							2016	2017	2016	2017
		2	3	4	5	6	7	8	2	3	4	5	6	7					
Жупановский	–	1	5	13	2	3	3	1	–	10	26	20	8	6	28	70	1.52	0.56	
Вне вулкана	–	–	7	9	7	1	–	–	1	64	110	22	3	–	24	200	0.02	0.07	
Всего	–	1	12	22	9	4	3	1	1	74	136	42	11	6	52	270	1.54	0.63	

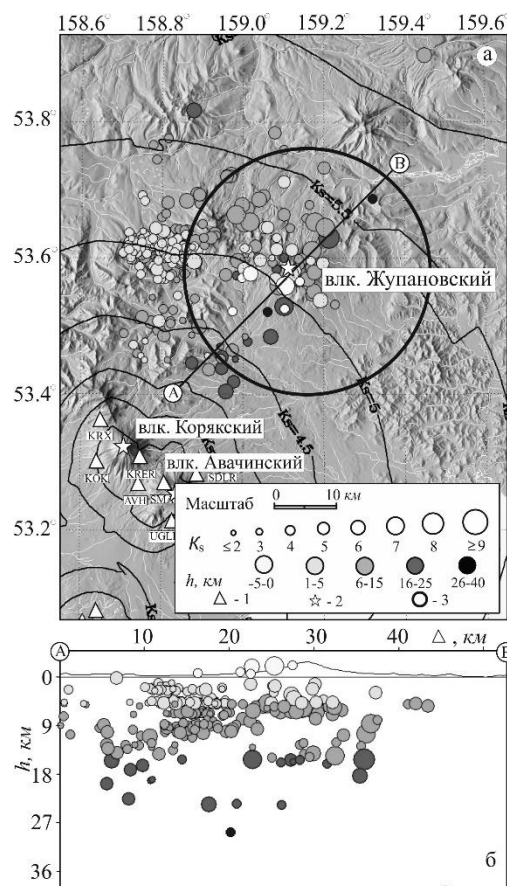
В табл. 8. представлено распределение землетрясений из района влк. Жупановский по энергетическим классам. В 2016–2017 гг. в радиусе 20 км от вершины вулкана в земной коре лоцировано 98 землетрясений ( $1.8 \leq K_S \leq 8.1$ ,  $h = -2.1 - 39.4$  км), суммарная энергия составила  $\Sigma E = 3.9 \cdot 10^8$  Дж [прил. 7]. Землетрясение с  $K_{Smax} = 8.1$  произошло в 2016 г. на глубине  $h = 15.4$  км под постройкой влк. Жупановский 13 октября в 09<sup>h</sup>18<sup>m</sup>. В 2017 г. максимальный класс  $K_{Smax} = 7.3$  был зарегистрирован 7 мая в 19<sup>h</sup>11<sup>m</sup> также под постройкой вулкана [прил. 7].

В 2016–2017 гг. продолжалось извержение влк. Жупановский, сопровождавшееся пепловыми выбросами и селевыми потоками. Самый высокий «красный» код опасности в исследуемый период присваивался вулкану четыре раза (табл. 1.). Пепловый выброс высотой 10 км над уровнем моря произошел 12 февраля 2016 года.



**Рис. 11.** Карта эпицентров землетрясений влк. Кизимен в 2016–2017 гг. (а) и проекция гипоцентров на вертикальный разрез по линии А–В (б)

1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан; 3 – окружность, оконтуривающая область выборки землетрясений вокруг влк. Кизимен ( $R = 15$  км). Изолинией отмечен теоретический уровень надежной регистрации.



**Рис. 12.** Карта эпицентров землетрясений влк. Жупановский в 2016–2017 гг. (а) и проекция гипоцентров на вертикальный разрез по линии А–В (б)

1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан; 3 – окружность, оконтуривающая область выборки землетрясений вокруг влк. Жупановский ( $R = 20$  км). Изолинией отмечен теоретический уровень надежной регистрации.

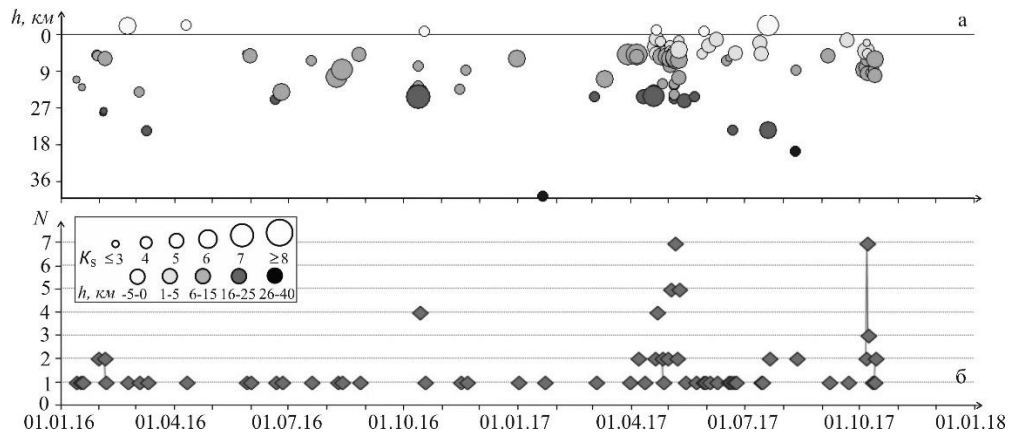


Рис. 13. Изменение во времени глубины гипоцентров  $h$  вулканических землетрясений (а); ежесуточного числа землетрясений (б), произошедших в радиусе 20 км от влк. Жупановский в 2016–2017 гг.

**Вулкан Камбальный**, самый южный вулкан Южно-Камчатской вулканической зоны, расположен на юге Камбального хребта [22]. Это действующий конусовидный стратовулкан с абсолютной высотой 2156 м, на склонах которого имеется пять шлаковых конусов голоценового возраста. В историческое время извержений отмечено не было, вулканическая активность проявлялась только в виде фумарольной деятельности [22]. Ближайшая РТСС «Паужетка» (PAU) находится в 22 км к северу от вулкана. Остальные удалены на 100 км и более: «Северо-Курильск» (SKR) в ~101 км на юго-запад; «Ходутка» (KDT) – 116 км на северо-восток [Прил. 1]. Расчетный уровень надежной регистрации землетрясений в районе влк. Камбальный составляет  $K_{\min}=6.5$  (рис. 14 а).

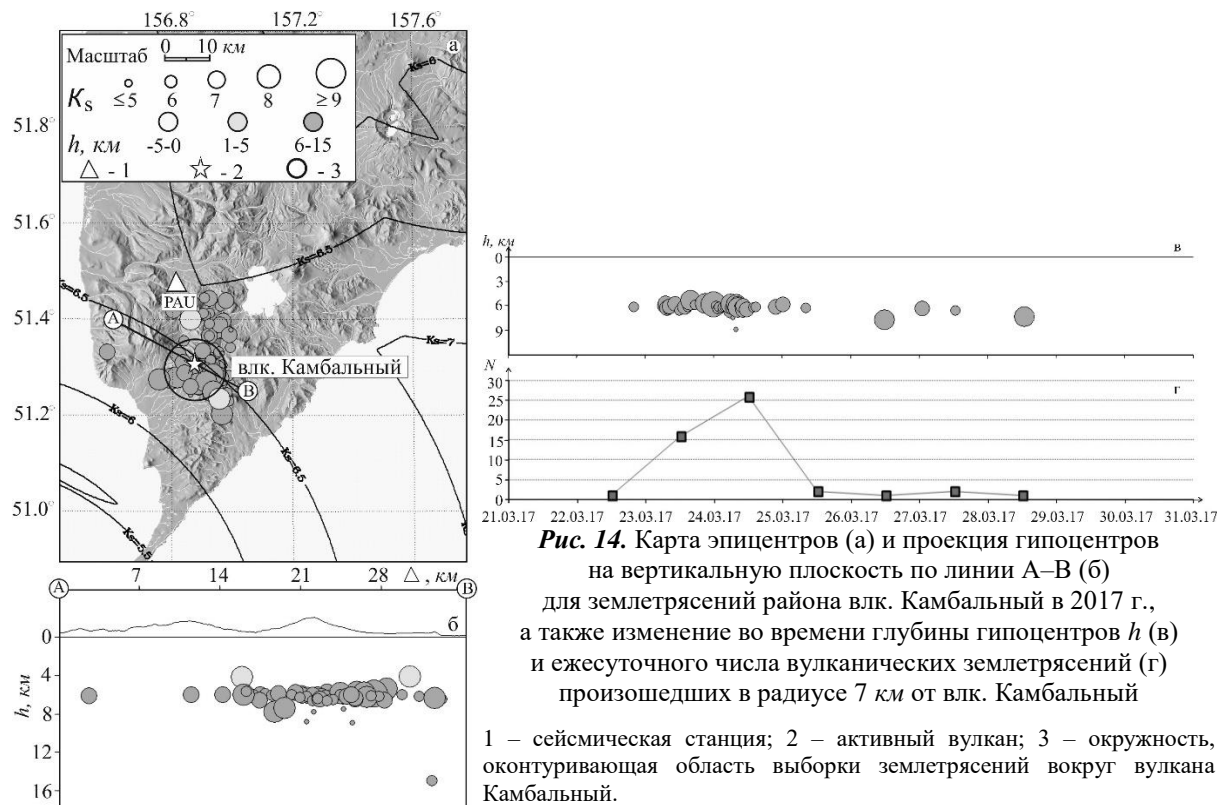


Рис. 14. Карта эпицентров (а) и проекция гипоцентров на вертикальную плоскость по линии А–В (б) для землетрясений района влк. Камбальный в 2017 г., а также изменение во времени глубины гипоцентров  $h$  (в) и ежесуточного числа вулканических землетрясений (г) произошедших в радиусе 7 км от влк. Камбальный

1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан; 3 – окружность, ооконтуривающая область выборки землетрясений вокруг вулкана Камбальный.

Сейсмическая активизация в районе вулкана началась с серии слабых землетрясений 22 марта 2017 г. с 19<sup>h</sup>40<sup>m</sup> до 20<sup>h</sup>12<sup>m</sup> UTC. Количество землетрясений и их сила возрастали с каждым часом. По сейсмическим данным, эксплозивное извержение началось 24 марта 2017 г. в 12<sup>h</sup>22<sup>m</sup>, когда на РТСС «Паужетка» было зарегистрировано поверхностное событие, возможно

сопровождаящее газо-пепловый выброс. По данным кордона «Прибрежный», расположенного ~ в 18 км на юго-запад от подножия вулкана, пепловые выбросы на высоту 3–6 км над уровнем моря наблюдались в течение семи суток, начиная с 21<sup>h</sup>50<sup>m</sup> 24 марта. Все эти дни на спутниковых снимках, предоставляемых Аляскинской Вулканологической Обсерваторией, наблюдались пепловые шлейфы от извержения вулкана протяженностью до 1700 км и отдельные пепловые облака. 29 марта уровень сейсмичности снизился и извержение постепенно прекратилось. Последнее пепловое облако над вулканом по спутниковым наблюдениям было зафиксировано 9 апреля.

**Таблица 9.** Распределение числа землетрясений по энергетическим классам  $K_S$  и их суммарная сейсмическая энергия из района влк. Камбальный в 2017 г.

Название вулкана	$R_{зоны},$ км	$K_S$					$N_{\Sigma}$	$\Sigma E,$ $10^8$ Дж
		5	6	7	8	9		
Камбальный	7	6	23	13	6	1	49	12.052
Вне вулкана	–	8	16	10	5	–	39	7.177
Всего	–	14	39	23	11	1	88	19.229

С 22 по 28 марта в радиусе 7 км от вулкана было локализовано 49 землетрясений под постройкой вулкана ( $h=5.7-9.0$  км) с энергетическим классом  $5.3 \leq K_S \leq 8.6$  [Прил. 8] (рис. 14 в). Всего в 2017 г. в районе влк. Камбальный было лоцировано 88 землетрясений ( $K_S=5.0-8.6$ ,  $\Sigma E=19.23 \cdot 10^8$  Дж) [Прил. 8] (табл. 9). Гипоцентры землетрясений определены в диапазоне глубин  $h=4-15$  км. Средняя ошибка локации для них составила ~11 км в плане и ~5 км по глубине. Землетрясение с  $K_{Smax}=8.6$  зарегистрировано перед извержением вулкана 24 марта в 00<sup>h</sup>03<sup>m</sup> на глубине  $h=5.9$  км под постройкой вулкана.

По данным комплексного мониторинга, в 2017 г. влк. Камбальный девять дней присваивался «оранжевый» код опасности и 17 – «желтый» (табл. 1).

**Заключение.** Всего за период 2016–2017 гг. в районе Северной, Авачинской и Мутновско-Гореловской групп вулканов, а также в районе вулканов Кизимен, Жупановский и Камбальный было локализовано 9681 землетрясение, высвобожденная в их очагах суммарная сейсмическая энергия составила  $\Sigma E=6.61 \cdot 10^9$  Дж.

Наиболее высокая вулканическая активность с эксплозивными извержениями и сходом раскаленных лавин наблюдалась на влк. Шивелуч. Из-за неустойчивой работы РТСС в районе вулкана в 2017 г. удалось лоцировать ~ в 52 раза меньше сейсмических событий, сопровождавших рост и обрушение купола, чем в 2016 году. Но их суммарная энергия превысила ~ в 9.2 раза таковую предыдущего года.

В период 2016–2017 гг. наблюдалось вершинное эксплозивно-эффузивное извержение влк. Ключевской, сопровождавшееся высокой сейсмичностью, связанной с магматическими процессами.

На влк. Безымянный в 2016–2017 гг. были зафиксированы четыре эксплозивные извержения и выжимание вязкого потока на растущем куполе, подготовка которых сопровождалась повышенной сейсмичностью. Все четыре эксплозивные извержения были успешно спрогнозированы.

После завершения извержений влк. Плоский Толбачик и влк. Кизимен в 2016–2017 гг. их сейсмическая и вулканическая активность продолжала снижаться.

В 2016–2017 гг. продолжалось извержение влк. Жупановский, сопровождавшееся пепловыми выбросами и селевыми потоками.

Первое в историческое время извержение влк. Камбальный произошло 24 марта 2017 года. Подготовка и извержение сопровождалась высокой сейсмической активностью, не наблюдавшейся в предыдущие годы.

В подготовке электронных приложений к данной статье принимали участие Е.А. Матвеевко, Д.В. Чебров, Ю.В. Шевченко, Е.Л. Музуров, Р.А. Кутанов, И.Н. Нуждина, С.Л. Толокнова, Т.Ю. Кожевникова, О.В. Соболевская, З.А. Назарова, Н.А. Напылова, О.А. Напылова, С.Я. Дроздина, Н.А. Леднева, М.В. Демянчук.

**Электронное приложение** App11\_Kamchatka\_2016–2017 (<http://www.gsras.ru/zse/app-25.html>): 1 – Сейсмические станции сети Камчатки и Командорских островов в 2016–2017 гг.; 6 – Каталог землетрясений Авачинской группы вулканов в 2016–2017 гг.; 7 – Каталог землетрясений вулкана Жупановский

в 2016–2017 гг.; 8 – Каталог землетрясений вулкана Камбальный в 2016–2017 гг.; 9 – Каталог землетрясений вулкана Кизимен в 2016–2017 гг.; 10 – Каталог землетрясений Мутновско-Гореловской группы вулканов в 2016–2017 гг.; 11 – Каталог землетрясений Северной группы вулканов в 2016–2017 гг.

### Л и т е р а т у р а

1. Сеньюков С.Л. Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений в 2000–2004 гг. // Вулканология и сейсмология. – 2006. – № 3. – С. 68–78.
2. Сеньюков С.Л. Мониторинг и прогноз активности вулканов Камчатки по сейсмологическим данным в 2000–2010 гг. // Вулканология и сейсмология. – 2013. – № 1. – С. 96–108.
3. Сеньюков С.Л., Нуждина И.Н. Сейсмичность вулканических районов Камчатки в 2015 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – С. 349–361. doi: 10.35540/1818-6254.2021.24.33
4. Дроздин Д.В., Дроздина С.Я. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов «DIMAS» // Сейсмические приборы. – 2010. – Т. 46, № 3. – С. 22–34.
5. Кузин И.П. Фокальная зона и строение верхней мантии в районе Восточной Камчатки. – М.: Наука, 1974. – 145 с.
6. Weimer S. A software package to analyze seismicity: ZMAP // Seismological Research Letters. – 2001. – V. 72, N 2. – P. 374–383.
7. Part\_IV-2016. 12\_Volcano-regions-of-Kamchatka\_2016.xls // Землетрясения России в 2016 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – Приложение на CD-ROM.
8. Part\_IV-2017. 12\_Volcano-regions-of-Kamchatka\_2017.xls // Землетрясения России в 2017 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – Приложение на CD-ROM.
9. Сеньюков С.Л., Нуждина И.Н. Сейсмический мониторинг вулканов Камчатки // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 23 (2014 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – С. 375–387. doi: 10.35540/1818-6254.2020.23.38
10. Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. – М.: Наука, 1972. – 117 с.
11. Федотов С.А., Жаринов Н.А., Гонтовая Л.И. Магматическая питающая система Ключевской группы вулканов (Камчатка) по данным об ее извержениях, землетрясениях, деформациях и глубинном строении // Вулканология и сейсмология. – 2010. – № 1. – С. 3–35.
12. Сеньюков С.Л., Дроздина С.Я., Нуждина И.Н., Гарбузова В.Т., Кожевникова Т.Ю. Исследования активности вулкана Ключевской дистанционными методами с 01.01.2001 г. по 31.07.2005 г. // Вулканология и сейсмология. – 2009. – № 3. – С. 50–59.
13. Сеньюков С.Л. Прогноз извержений вулканов Ключевской и Безымянный на Камчатке // Saarbrücken: LAP LAMBERTS Academic Publishing. – 2013. – 144 с.
14. Горельчик В.И., Сторчеус А.В. Глубокие длиннопериодные землетрясения под Ключевским вулканом, Камчатка // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. – Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. – С. 373–389.
15. Сеньюков С.Л., Нуждина И.Н., Чебров В.Н. Вулканы Камчатки // Землетрясения России в 2016 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – С. 88–96.
16. Чебров Д.В., Фирстов П.П., Сеньюков С.Л., Блинецов В.Е., Воропаев П.В., Гарбузова В.Т., Дроздина С.Я., Кожевникова Т.Ю., Кугаенко Ю.А., Назарова З.А., Нуждина И.Н., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К., Сероветников С.С., Соболевская О.В. Активность вулкана Безымянный (Камчатка) в 2016–2017 гг. // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. – 2017. – № 1 (33). – С. 5–11.
17. Сеньюков С.Л., Нуждина И.Н., Чебров В.Н. Вулканы Камчатки // Землетрясения России в 2017 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – С. 93–103.
18. Гирина О.А., Мельников Д.В., Демячук Ю.В., Маневич А.Г. Извержение вулкана Безымянный в 2016–2017 гг. по данным KVERT // Материалы XX региональной научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский, 30–31 марта 2017 г. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2017. – С. 14–17.
19. Блинецов В.Е., Сеньюков С.Л. Программа ADAP для автоматического выделения пепловых выбросов и расчета их высоты по сейсмологическим данным // Сейсмические приборы. – 2015. – Т. 51, № 1. – С. 46–59.
20. Толбачинское Трещинное Извержение 2012–2013 гг. / Под ред. Е.И. Гордеева, Н.Л. Добрецова. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. – 421 с.

21. Масуренков Ю.П., Флоренский И.В., Мелекесцев И.В. Вулкан Жупановский // Действующие вулканы Камчатки. – М.: Наука, 1991. – Т. 2. – С. 218–225.
22. Литасов Н.Е., Важеевская А.А. Вулкан Камбальный // Действующие вулканы Камчатки. – М.: Наука, 1991. – Т. 2. – С. 396–405.

### *SEISMICITY of the VOLCANIC AREAS of KAMCHATKA in 2016–2017*

*S.L. Seniukov, I.N. Nuzhdina*

*Kamchatka branch of the GS RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, ssl@emsd.ru*

**Abstract.** The results of near real-time monitoring of the active Kamchatka volcanoes are described. Continuous monitoring was carried out using three remote methods: 1) seismic monitoring according to automatic telemetric seismic stations; 2) visual and video observation; 3) satellite observation of the thermal anomalies and the ash clouds. Daily information about volcanic activity is published in the Internet (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>) since February 2000.

The results of seismic activity of the Northern (Shiveluch, Kluchevskoy, Bezymianny, Krestovsky and Ushkovsky), Avacha (Avachinsky and Koryaksky), Mutnovsky-Gorely volcano group and Kizimen volcano for 2016–2017 are presented. Within two years 8152 earthquakes with  $K_S=1.6–8.5$  were located for Northern volcano group, 616 earthquakes with  $K_S=1.6–7.2$  – for Avacha volcano group, 357 earthquakes with  $K_S=2.0–6.2$  – Mutnovsky-Gorely volcano group, 144 earthquakes with  $K_S=2.3–9.4$  for Kizimen volcano, 322 earthquakes with  $K_S=1.8–8.1$  for Zhupanovsky volcano and 90 earthquakes with  $K_S=5.0–8.6$  for Kamalny volcano. Maps of epicenters, quantities of seismic energy and earthquake distribution according to class are given.

All periods of activity were fixed and investigated by remote methods in 2016–2017: intensive volcanic activity of Sheveluch volcano associated with new cone, the summit explosive-effusive eruption of Kluchevskoy volcano from April 2016 till September 2017, explosive activity of Zhupanovsky volcano and seismic preparation and volcanic eruption of Kamalny volcano observed for the first time in historical period.

**Keywords:** seismic monitoring of the active volcanoes, visual and video observation, energy class  $K_S$ , seismic energy, earthquake recurrence graph.

**DOI:** 10.35540/1818-6254.2022.25.34 **EDN:** OFOFMZ

**For citation:** Seniukov, S.L., & Nuzhdina, I.N. (2022). [Seismicity of the volcanic areas of Kamchatka in 2016–2017]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 25(2016–2017), 361–377. (In Russ.). DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.34. EDN: OFOFMZ

### **R e f e r e n c e s**

1. Seniukov, S.L. (2006). [Monitoring of Volcanic Activity in Kamchatka by Remote Sensing Techniques in 2000–2004]. *Vulkanologiya i seismologiya* [Journal of Volcanology and Seismology], 3, 68–78. (In Russ.).
2. Seniukov, S.L. (2013). [Monitoring and Forecast of Volcanic Activity in Kamchatka using seismic data in 2000–2010]. *Vulkanologiya i seismologiya* [Journal of Volcanology and Seismology], 1, 96–108. (In Russ.).
3. Seniukov, S.L., & Nuzhdina, I.N. (2021). [Seismicity of the volcanic areas of Kamchatka in 2015]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015), 349–361. (In Russ.). doi: 10.35540/1818-6254.2021.24.33
4. Droznin, D.V., & Droznina, S.Ya. (2010). [The DIMAS interactive program for seismic signal processing]. *Seismicheskie pribory* [Seismic Instruments], 46(3), 22–34. (In Russ.).
5. Kuzin, I.P. (1974). *Fokal'naia zona i stroenie verkhnei mantii v raione Vostochnoi Kamchatki* [Focal zone and upper mantle structure in the region of Eastern Kamchatka]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 145 p. (In Russ.).
6. Weimer, S. (2001). A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seismological Research Letters*, 72(2), 374–383.
7. [Part\_IV-2016. 12\_Volcano-regions-of-Kamchatka\_2016.xls]. (2018). In *Zemletriaseniia Rossii v 2016 godu* [Earthquakes in Russia in 2016]. Obninsk, Russia: GS RAS Publ. Appendix on CD-ROM. (In Russ.).
8. [Part\_IV-2017. 12\_Volcano-regions-of-Kamchatka\_2017.xls]. (2019). In *Zemletriaseniia Rossii v 2017 godu* [Earthquakes in Russia in 2017]. Obninsk, Russia: GS RAS Publ. Appendix on CD-ROM. (In Russ.).
9. Seniukov, S.L., & Nuzhdina, I.N. (2020). [Volcanoes of Kamchatka]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), 375–387. (In Russ.). doi: 10.35540/1818-6254.2020.23.38



10. Fedotov, S.A. (1971). *Energeticheskaya klassifikatsiya Kurilo-Kamchatskikh zemletriasenii i problema magnitudy* [Energy classification of the Kuril-Kamchatka earthquakes and the problem of magnitudes]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 117 p. (In Russ.).
11. Fedotov, S.A., Zharinov, N.A., & Gontovaia, L.I. (2010). [Magmatic feeding system of the Klyuchevskaya group of volcanoes (Kamchatka) according to its eruptions, earthquakes, deformations, and deep structure]. *Vulkanologiya i seismologiya* [Journal of Volcanology and Seismology], 1, 3–35. (In Russ.).
12. Seniukov, S.L., Droznina, S.Ya., Nuzhdina, I.N., Garbuzova, V.T., & Kozhevnikova, T.Yu. (2009). [Studies of the activity of Klyuchevskoy volcano by remote sensing from January 1, 2001 to July 31, 2005]. *Vulkanologiya i seismologiya* [Journal of Volcanology and Seismology], 3, 50–59. (In Russ.).
13. Seniukov, S.L. (2013). *Prognoz izverzhenii vulkanov Klyuchevskoi i Bezymianny na Kamchatke* [Forecast of eruptions of Klyuchevskoy and Bezymianny volcanoes in Kamchatka]. Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERTS Academic Publ., 144 p.
14. Gorel'chik, V.I., & Storcheus, A.V. (2001). [Deep long-period earthquakes under Klyuchevsky volcano, Kamchatka]. *Geodinamika i vulkanizm Kurilo-Kamchatskoi ostrovoduzhnoi sistemy* [Geodynamics and volcanism of the Kuril-Kamchatka island arc system]. Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia: IVGG FED RAS Publ., 373–389. (In Russ.).
15. Seniukov, S.L., Nuzhdina, I.N., & Chebrov, V.N. (2018). [Volcanoes of Kamchatka]. In *Zemletriaseniia Rossii v 2016 godu* [Earthquakes in Russia, 2016] (pp. 88–96). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
16. Chebrov, D.N., Firstov, P.P., Seniukov, S.L., Bliznetsov, V.E., Voropaev, P.V., Garbuzova, V.T., Droznina, S.Ya., Kozhevnikova, T.Yu., Kugaenko, Yu.A., Nazarova, Z.A., Nuzhdina, I.N., Saltykov, V.A., Serafimova, Yu.K., Serovetnikov, S.S., & Sobolevskaya, O.V. (2017). [Activity of the Bezymianny volcano in 2016–2017]. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle* [Bulletin of KRAESC. Earth sciences], 33(1), 5–11. (In Russ.).
17. Seniukov, S.L., Nuzhdina, I.N., & Chebrov, V.N. (2019). [Volcanoes of Kamchatka]. In *Zemletriaseniia Rossii v 2017 godu* [Earthquakes in Russia, 2017] (pp. 93–104). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
18. Girina, O.A., Melnikov, D.V., Demyanchuk, Yu.V., & Manevich, A.G. (2017). [Eruption of the Bezymianny volcano in 2016–2017 according to KVERT data]. In *Materialy XX regional'noj nauchnoj konferencii «Vulkanizm i svyazannye s nim processy», posvyashchyonnoj Dnyu vulkanologa. Petropavlovsk-Kamchatskij, 30–31 marta 2017 g.* [Materials of the XX regional scientific conference «Volcanism and related processes» dedicated to the Volcanologist's Day. Petropavlovsk-Kamchatsky, March 30–31, 2017] (pp. 14–17). Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia: IVS FEB RAS Publ. (In Russ.).
19. Bliznetsov, V.E., & Seniukov, S.L. (2015). [ADAP software for automatic detection of ash emission at active volcanoes and calculations of ash plume height using seismological data]. *Seismicheskie pribory* [Seismic Instruments], 51(3), 46–59. (In Russ.).
20. Gordeev, E.I., & Dobretsova, N.L. (2017). *Tolbachinskoe Treshchinnoe Izverzhenie 2012–2013 gg.* [Tolbachik Fissure Eruption 2012–2013]. Novosibirsk, Russia: SB RAS Publ., 421 p.
21. Masurenkov, Yu.P., Florenskii, I.V., & Melekestsev, I.V. (1991). [Zhupanosky volcano]. *Dejstvuyushchie vulkany Kamchatki* [Active volcanoes of Kamchatka]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 2, 215–225. (In Russ.).
22. Litasov, N.E., & Vazheevskaya, A.A. (1991). [Kambalny volcano]. *Dejstvuyushchie vulkany Kamchatki* [Active volcanoes of Kamchatka]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 2, 396–405. (In Russ.).