

IV. СЕЙСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ВУЛКАНОВ

УДК 550.348.438(517.66)

СЕЙСМИЧНОСТЬ ВУЛКАНИЧЕСКИХ РАЙОНОВ КАМЧАТКИ в 2018–2019 гг.

С.Л. Сеньюков, И.Н. Нуждина

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, Карымский и Камбальный за 2018–2019 гг. За два года в районе Северной группы лоцировано 29199 землетрясений с $K_S=1.6–10.1$, Авачинской группы – 714 с $K_S=1.6–7.6$, Мутновско-Гореловской группы – 247 с $K_S=1.7–7.3$, вблизи влк. Кизимен – 116 с $K_S=2.6–8.7$, в окрестностях влк. Жупановский – 315 с $K_S=2.2–10.9$, в районе влк. Камбальный – пять с $K_S=6.2–8.3$ и из района влк. Карымский – четыре с $K_S=5.2–6.7$. 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 2018–2019 гг.: интенсивная вулканическая деятельность влк. Шивелуч, связанная с ростом нового купола, два эксплозивных извержения влк. Безымянный, вершинное эксплозивно-эффузивное извержение влк. Ключевской.

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

Для цитирования: Сеньюков С.Л., Нуждина И.Н. Сейсмичность вулканических районов Камчатки в 2018–2019 гг. // Землетрясения Северной Евразии. – 2023. – Вып. 26 (2018–2019 гг.). – С. 354–370. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2023.26.31> EDN: EADZDV

Введение. В 2018–2019 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 радиотелеметрические сейсмические станции (РТСС) Камчатского филиала (КФ) ФИЦ ЕГС РАН [Прил. 1]. Сеть КФ, осуществляющая контроль сейсмической активности вулканов в 2018–2019 гг. [Прил. 1], практически не изменилась по сравнению с 2017 г. [3]. В 2018 г. на западном побережье полуострова Камчатка были установлены две новые станции, «Соболево» (SBLV) и «Усть-Большерецк» (UBL), которые из-за удаленности и условий установки могут регистрировать только самые сильные вулканические землетрясения с энергетическим классом $K_S > 11$. 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, влк. Камбальный и влк. Карымский.

Методика обработки вулканических землетрясений, локальные годографы не изменились по сравнению с таковыми в предыдущие годы и изложены в [1, 4]. Как и прежде, для определения параметров землетрясений применялась программа DIMAS [5] с использованием различных одномерных скоростных моделей среды [1, 6], а исследование представительных классов и углов наклона графиков повторяемости для выборок вулканических землетрясений проводилось с помощью пакета программ ZMAP [7].

Сейсмическая активность вулканов. Ниже анализируются сейсмические события из районов, ограниченных координатами для «Северной группы» вулканов: $\varphi=55.54^{\circ}–56.80^{\circ}N$,

$\lambda=159.82^{\circ}-161.60^{\circ}\text{E}$; «Авачинской группы»: $\varphi=53.10^{\circ}-53.40^{\circ}\text{N}$, $\lambda=158.50^{\circ}-159.00^{\circ}\text{E}$; «Мутновско-Гореловской группы»: $\varphi=52.30^{\circ}-52.70^{\circ}\text{N}$, $\lambda=157.70^{\circ}-158.40^{\circ}\text{E}$; «района влк. Кизимен»: $\varphi=54.90^{\circ}-55.54^{\circ}\text{N}$, $\lambda=159.82^{\circ}-160.80^{\circ}\text{E}$, «района влк. Жупановский»: $\varphi=53.40^{\circ}-53.90^{\circ}\text{N}$, $\lambda=158.70^{\circ}-159.65^{\circ}\text{E}$, «района влк. Карымский»: $\varphi=53.90^{\circ}-54.40^{\circ}\text{N}$, $\lambda=159.20^{\circ}-159.80^{\circ}\text{E}$ и «района влк. Камбальный»: $\varphi=51.20^{\circ}-51.50^{\circ}\text{N}$, $\lambda=156.50^{\circ}-157.10^{\circ}\text{E}$. Все события сгруппированы в семь каталогов [Прил. 7–13]. Каждому землетрясению в каталогах присвоено название соответствующего вулкана, если оно произошло в пределах установленного радиуса выборки для этого вулкана. Выбор радиуса для каждого вулкана был произведен еще в начале исследований в 2000 г. на основе изучения его исторической деятельности и расположения соседних вулканов. 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 [8, 9], отличаются от публикуемых в настоящем издании в связи с проведенной корректировкой 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, 8, 11, 12) и обычно показывают возможный, ожидаемый, минимальный уровень представительного класса в районе вершины вулкана 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» (К), «оранжевый» (О), «желтый» (Ж) и «зеленый» (З). Дополнительный «белый» (Б) код обозначает, что опорная сейсмическая станция не работала в эти сутки. Уровень сейсмической и вулканической активности, соответствующий цветовому коду, описан в [10]. Подробные результаты мониторинга активных вулканов Камчатки в 2018–2019 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>. Также на этой странице в разделе «Пояснения» и подразделе «Цветовой код» приведено подробное описание «фоновой сейсмичности» для всех контролируемых вулканов. 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 2000–2017 гг. (среднегодовые значения) и отдельно в 2018 и 2019² гг.

Вулкан	2000–2017 гг.					2018 г.					2019 г.				
	Код					Код					Код				
	Б	З	Ж	О	К	Б	З	Ж	О	К	Б	З	Ж	О	К
Шивелуч	13	69	165	112	6	2	269	49	36	9	–	24	125	198	18
Ключевской	5	223	109	26	2	3	300	49	12	1	45	237	69	13	1
Безымянный	77	254	31	2	1	8	325	32	–	–	–	200	155	8	2
Пл. Толбачик	49	265	36	14	1	2	301	62	–	–	–	306	59	–	–
Авачинский	1	362	2	–	–	4	361	–	–	–	62	277	26	–	–
Корякский	2	358	6	–	–	1	362	2	–	–	–	364	1	–	–
Мутновский	47	271	47	–	–	34	139	192	–	–	87	241	37	–	–
Горелый	38	104	223	–	–	35	125	205	–	–	–	232	133	–	–
Кизимен	13	170	85	96	1	14	347	4	–	–	36	326	3	–	–
Жупановский	1	215	116	31	–	–	359	6	–	–	–	358	6	–	–
Камбальный	–	257	17	9	–	149	199	17	–	–	–	259	6	–	–
Карымский	49	86	108	121	1	46	108	137	74	–	48	89	134	94	

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

²Здесь и в таблице 5 комплексный мониторинг вулканов Горело-Мутновской группы и влк. Кизимен проводится с 2009 г., влк. Жупановский с 2013 г., влк. Камбальный с 2017 г.

Как следует из табл. 1, на основании комплексных наблюдений влк. Шивелуч сохранял лидирующее положение по активности в течение 2000–2019 гг. В 2018–2019 гг. для него 261 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 2018 г. содержит 8446 землетрясений ($\Sigma E = 34.5 \cdot 10^8$ Дж). В 2019 г. было лоцировано ~ в 2.5 раза больше событий ($N=20753$), выделенная ими энергия ~ в 7.1 раза превысила таковую в 2018 г., но меньше ~ в 2.5 раза среднего значения за период 2000–2017 гг. (табл. 2) [Прил. 13].

Распределения количества землетрясений по энергетическим классам K_s [11] для районов отдельных вулканов Северной группы приведены в табл. 3. Карта эпицентров землетрясений и условные зоны сейсмичности рассматриваемых вулканов показаны на рис. 1. Наиболее активной по числу землетрясений в 2018 г. была зона влк. Ключевской. Здесь произошло 58.8 % землетрясений от общего числа событий, вошедших в каталог. А в 2019 г. высокая сейсмичность регистрировалась в зоне влк. Шивелуч (64.7 %) (табл. 2) [Прил. 13]. Представительность землетрясений и угол наклона графика повторяемости для района Северной группы вулканов в 2018 г. ($K_{пред} = 3.8, \gamma = 0.59$) и в 2019 г. ($K_{пред} = 4.0, \gamma = 0.53$) близки по своим значениям, но ниже, чем за весь период 2000–2017 гг. ($K_{пред} = 4.5, \gamma = 0.9$) (табл. 2).

Таблица 2. Число землетрясений N , их суммарная сейсмическая энергия ΣE , представительный энергетический класс $K_{пред}$, угол наклона графика повторяемости γ для вулканов Северной группы в 2000–2019 гг. $K_{пред}$ и γ рассчитывались по всему массиву данных за указанный период времени

Название вулкана	2000–2017 гг.				2018 г.				2019 г.			
	$N_{срел/год}$	$\Sigma E_{срел/го}, 10^8$ Дж	$K_{пред}$	γ	N	$\Sigma E, 10^8$ Дж	$K_{пред}$	γ	N	$\Sigma E, 10^8$ Дж	$K_{пред}$	γ
Северная группа	6961	619.91	4.5	0.9	8446	34.49	3.8	0.59	20753	248.15	4.0	0.53
Шивелуч	2654	7.312	4.5	0.99	1122	8.64	5.2	1.01	13424	38.79	5.3	1.25
Ключевской:	3778	449.61	4.5	0.96	4940	3.59	4.0	0.75	5835	4.0	4.0	0.67
I горизонт	1143	3.71	4.3	0.59	1791	2.0	3.9	0.58	351	0.17	3.7	0.66
II горизонт	75	443.88	4.0	0.58	22	0.005	–	–	12	0.009	–	–
III горизонт	2560	2.03	4.7	1.47	3127	1.58	3.9	0.69	5472	3.82	4.0	0.66
Безымянный	261	0.487	4.0	0.83	40	0.001	–	–	207	0.02	3.4	0.91
Пл. Толбачик	170	129.5	4.0	0.45	1681	14.5	3.7	0.54	987	140.71	3.9	0.49
Крестовский и Ушковский	77	8.23	4.0	0.5	68	0.01	–	–	29	0.01	–	–

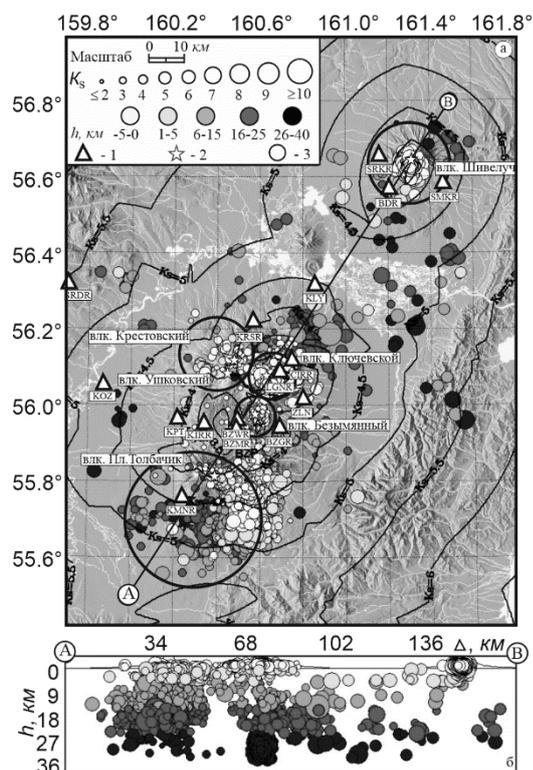


Рис. 1. Карта эпицентров (а) землетрясений Северной группы вулканов за 2018–2019 гг. и проекция гипоцентров (б) на вертикальную плоскость, проходящую по линии А–В

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

Таблица 3. Распределение числа землетрясений по энергетическим классам K_S для Северной группы вулканов в 2018–2019 гг.

Название вулкана	$R_{зоны}, км$	K_S																	
		2018 г.									2019 г.								
		2	3	4	5	6	7	8	9	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Шивелуч	12	–	20	188	614	283	16	–	1	5	543	4455	5624	2730	63	4	–	–	
Ключевской	7	5	661	2467	1645	159	3	–	–	–	308	4154	1048	325	–	–	–	–	
Безымянный	6	24	12	3	1	–	–	–	–	22	111	63	10	1	–	–	–	–	
Пл. Толбачик	20	38	485	763	263	106	22	3	1	3	208	485	183	70	31	5	1	1	
Крестовский и Ушковский	10.1	1	34	27	6	–	–	–	–	1	14	13	–	1	–	–	–	–	
Вне вулканов	–	10	217	259	87	17	2	2	1	2	65	128	50	19	4	2	–	1	
Всего	–	78	1429	3707	2616	565	43	5	3	33	1249	9298	6915	3146	98	11	1	2	

В 2018 г. землетрясение с максимальным классом $K_S=8.8$ произошло 18 августа в $18^{\text{h}}41^{\text{m}}$ на глубине $h=2.9 км$ в зоне влк. Плоский Толбачик [Прил. 13]. В 2019 г. максимальный класс $K_S=10.1$ был зарегистрирован 6 февраля в $19^{\text{h}}57^{\text{m}}$, землетрясение лоцировано также в зоне влк. Плоский Толбачик, район реки Толуд ($h=18.7 км$) [Прил.13].

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 2018–2019 гг. на влк. Шивелуч продолжалось экстремально-эксплозивное извержение, связанное с ростом нового купола. Извержение сопровождалось вулканическим дрожанием, мощными газо-пепловыми выбросами, сходом пирокластических потоков и горячих лавин.

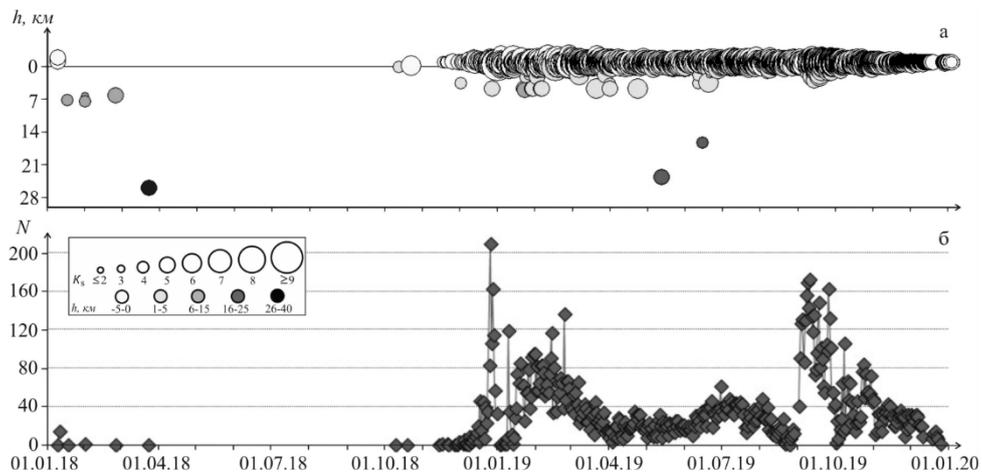


Рис. 2. Изменение во времени глубины гипоцентров h (а) и количества N (б) вулканических землетрясений, лоцированных в радиусе 12 км от влк. Шивелуч в 2018–2019 гг.

В 2018 г. экстремально-эксплозивное извержение влк. Шивелуч чередовалось с периодами покоя. С февраля по декабрь регистрировалась слабая фоновая сейсмичность. Из-за неустойчивой работы станций локализовать события не было возможности. В декабре 2018 г. на вулкане была зарегистрирована сейсмическая активизация ($N=1085$), максимальное количество землетрясений ($N=211$) за сутки зафиксировано 25 декабря (рис. 2 б), [Прил. 13]. Количество землетрясений ($N=1122$, $2.7 \leq K_S \leq 8.6$) (табл. 3), [Прил. 13], произошедших в 2018 г. в радиусе 12 км от влк. Шивелуч и диапазоне глубин $h=-2.7-26.1 км$ (рис. 2 а, б), меньше средних значений за период 2000–2017 гг. \sim в 2.4 раза, но высвобожденная в их очагах энергия больше в 1.2 раза (табл. 2). Землетрясение с максимальным классом $K_S=8.6$ произошло в постройке вулкана ($h=-0.2 км$) 27 декабря в $04^{\text{h}}07^{\text{m}}$ (рис. 2 а) [Прил. 13].

В 2019 г. зафиксировано усиление сейсмической активности на влк. Шивелуч. Количество лоцированных в 2019 г. землетрясений ($N=13424$) больше в 12 раз, а их выделенная суммарная

энергия ($\Sigma E = 38.79 \cdot 10^8$ Дж) – в 4.5 раза, чем таковые значения в 2018 г. (табл. 2). Максимальное количество землетрясений в сутки ($N=173$, $3.7 \leq K_S \leq 6.4$) лоцировано 10 сентября (рис. 2 б). Максимальный класс землетрясения $K_S=8.1$ зарегистрирован 9 февраля в 08^h52^m в постройке вулкана ($h=-0.3$ км) (рис. 2 а) [Прил. 13]. Значения представительности землетрясений за 2018 г. и 2019 г. близки между собой и выше, чем среднегодовое за период 2000–2017 гг. (табл. 2). Наклон графика повторяемости в 2019 г. круче, чем его среднее значение за весь период наблюдений (табл. 2). Возможно, это связано с магматическими процессами во время извержения.

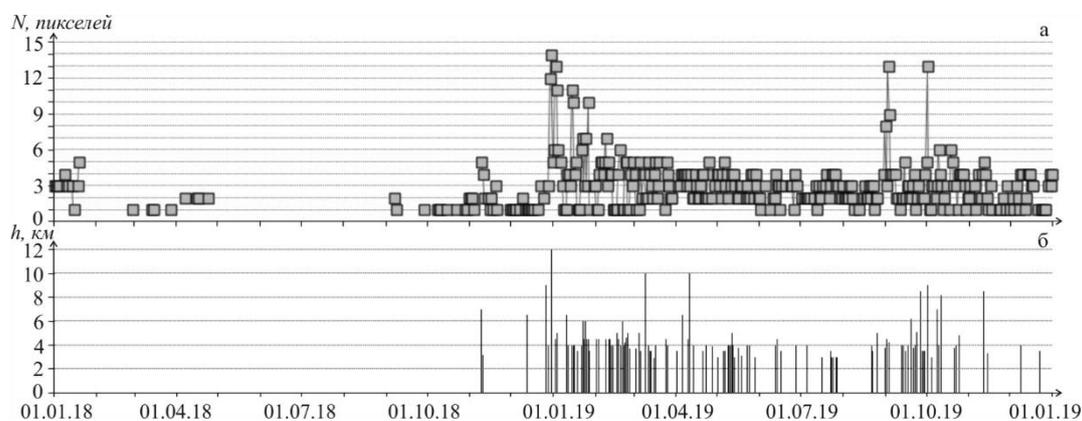


Рис. 3. Изменение во времени размера термальной аномалии на влк. Шивелуч по данным спутников NOAA17-19 (а) и высота газо-пепловых выбросов над уровнем моря по видеоданным (б) в 2018–2019 гг.

По-прежнему в течение 2018–2019 гг. на спутниковых снимках регистрировалась термальная аномалия (рис. 3 а), свидетельствующая о постоянном присутствии на поверхности горячего материала, сопровождающего экструзивный рост купола. По данным видеонаблюдения регистрировались пепловые выбросы (рис. 3 б) и сход пирокластических потоков. Самый большой в 2018 г. пепловый выброс высотой 12 км над уровнем моря был зафиксирован 26 декабря. Максимальная высота пеплового выброса в 2019 г. 10 км над уровнем моря наблюдалась 9 марта и 10 апреля (рис. 3 б). В описываемый двухгодичный период самый высокий «Красный» код опасности присваивался вулкану 27 дней (табл. 1).

Вулкан Ключевской. Существующая сеть станций (рис. 1) позволяет регистрировать при благоприятных условиях землетрясения, начиная с $K_{\min}=3$ 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 2018–2019 гг. на влк. Ключевской наблюдалась высокая сейсмическая активность. В 2018 г. в радиусе 7 км от вулкана и диапазоне глубин $h=-4.6-35.3$ км было лоцировано 4940 землетрясений с $2.4 \leq K_S \leq 6.6$, суммарная энергия которых составила $\Sigma E = 3.59 \cdot 10^8$ Дж. В 2019 г. в каталог вошло в ~ 1.2 раза больше землетрясений ($N=5835$, $2.7 \leq K_S \leq 6.3$, $\Sigma E = 4.0 \cdot 10^8$ Дж) (табл. 2, 3) [Прил. 13]. Представительность землетрясений и угол наклона графика повторяемости в 2019 г. остались на уровне 2018 г., но их значения немного ниже среднегодовых за период 2000–2017 гг. (табл. 2). 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 были разделены по трем горизонтам: поверхностные (I → $-5.0 \leq h \leq 5.0$ км); промежуточные (II → $5.0 < h \leq 20.0$ км) и глубокие (III → $20.0 < h < 40.0$ км) (табл. 2).

Характер сейсмической активности 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 [12–15]. В 2018–2019 гг. на влк. Ключевской наблюдались вершинные эксплозивные и эксплозивно-эффузивные извержения, поэтому практически вся сейсмичность была сосредоточена в нижнем (III) и верхнем (I) горизонтах (табл. 2, рис. 4 а, б).

В 2018 г. было лоцировано $N=3127$ ($2.7 \leq K_S \leq 6.0$), в 2019 г. – $N=5472$ ($2.9 \leq K_S \leq 6.3$) глубоких длиннопериодных землетрясения (табл. 2), в образовании которых активную роль играет магматический расплав [15]. Максимальное количество за сутки ($N=101$) было лоцировано 15 марта

2019 г. (рис. 4 б) [Прил. 13]. 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 [12]. В 2018 г. в каталог вошло $N=1791$ поверхностное (горизонт I) землетрясение с $2.4 \leq K_s \leq 6.6$, это \sim в 5.1 раза больше, чем в 2019 г. ($N=351$, $2.7 \leq K_s \leq 5.9$) (табл. 2, 3). Максимальное количество за сутки ($N=97$) было лоцировано 11 мая 2018 г. (рис. 4 б) [Прил. 13]. Землетрясения с $K_{Smax}=6.6$ произошли в 2018 г. 13 мая в 08^h34^m, 25 августа в 01^h07^m и в 01^h14^m в постройке вулкана (рис. 4 а) [Прил. 13].

В табл. 2 приведены значения ΣE , $K_{пред}$ и γ для всех трех горизонтов за 2000–2017 гг.

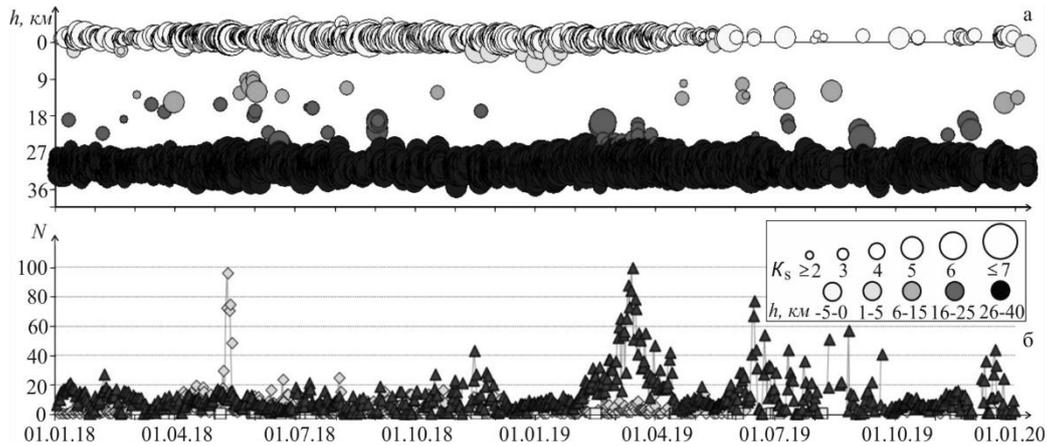


Рис. 4. Изменение во времени глубины гипоцентров h вулканических землетрясений (а) и ежесуточного числа поверхностных (ромб), промежуточных (квадрат) и глубоких (треугольник) землетрясений (б), произошедших в радиусе 7 км от влк. Ключевской в 2018–2019 гг.

В описываемый период «Красный» код опасности на влк. Ключевской выставлялся 2 дня, когда были зафиксированы два мощных эксплозивных извержения с высотой пеплового столба 10 км над уровнем моря 14 мая 2018 г. и 15 км – 20 января 2019 года.

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).

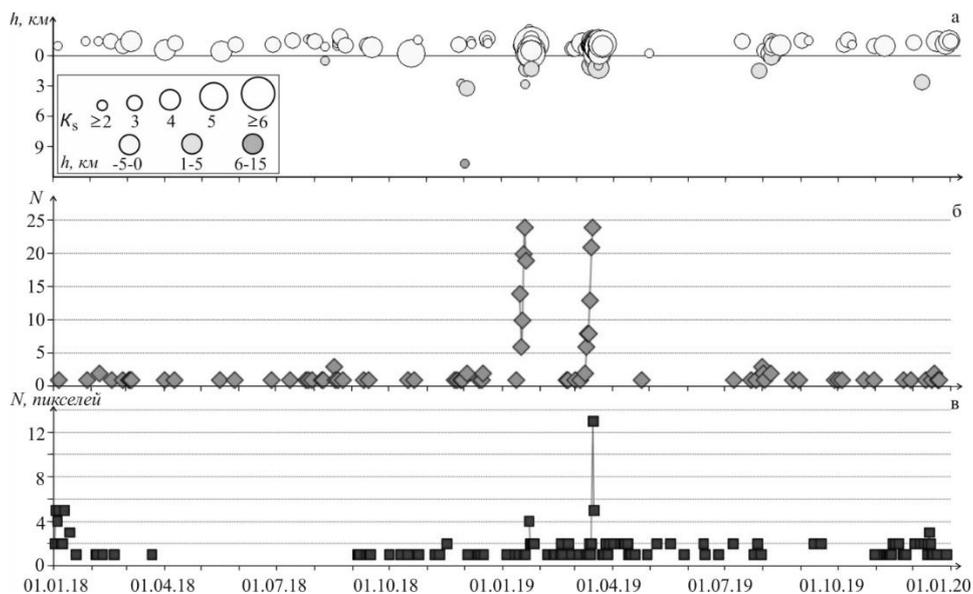


Рис. 5. Изменение во времени глубины гипоцентров h вулканических землетрясений (а); ежесуточного числа землетрясений (б), произошедших в радиусе 6 км от влк. Безымянный, и размера термальной аномалии (в) по данным спутников NOAA16 и NOAA17 в 2018–2019 гг.

В 2018 г. на влк. Безымянный наблюдалась слабая сейсмическая и вулканическая активность (рис. 5). В радиусе 6 км от вулкана и диапазоне глубин $h=-1.8-10.8$ км было лоцировано всего 40 землетрясений с $1.7 \leq K_S \leq 4.7$ (табл. 2, 3) [Прил. 13]. Максимальный класс землетрясения $K_S=4.7$ зарегистрирован 16 октября в 06^h03^m в постройке вулкана ($h=-0.2$ км) (рис. 5 а) [Прил. 13].

В 2019 г. на влк. Безымянный было зафиксировано два пароксизмальных эксплозивных извержения (20 января, 15 марта) с высотой пепловых выбросов до 15 км над уровнем моря. Сейсмическая активизация началась 15 января с роя поверхностных землетрясений, количество и суммарная энергия ΣE которых постепенно увеличивались. Максимальное число событий ($N=24$) за сутки было лоцировано 19 января (рис. 5 б) [Прил. 13]. Также наблюдался рост температуры термальной аномалии в районе купола до (Таномалии-Тфона) $\approx 32^\circ\text{C}$ [14] (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>). На основании повышенной сейсмичности и высокой температуры аномалии на влк. Безымянный, сотрудниками лаборатории исследований сейсмической и вулканической активности (ЛИСВА) был сделан прогноз эксплозивного извержения, переданный в Камчатский филиал Российского экспертного совета (КФ РЭС) 19 января [14, 16]. По сейсмическим данным пароксизмальная фаза извержения началась 19 января в 16^h06^m и продолжалась 17 мин. Оценка высоты пеплового выброса по интенсивности сейсмического сигнала составила 9.5 ± 2 км над уровнем моря [17]. По данным видеонаблюдений, высота пеплового столба достигла 15 км над уровнем моря, по спутниковым – пепловый шлейф распространился в северо-западном направлении на расстояние более 400 км. Всего за период сейсмической подготовки к извержению 15–20 января было лоцировано $N=93$ землетрясения, высвобождено энергии $\Sigma E=0.11 \cdot 10^7$ Дж [Прил. 13].

Следующая сейсмическая активизация началась 9 марта. Сценарий подготовки к извержению подобен предыдущему (рис. 5). Используя алгоритм прогноза эксплозивных извержений влк. Безымянный [14], сотрудниками ЛИСВА 14 марта было передано в КФ РЭС заключение о возможном эксплозивном извержении вулкана [16]. Пароксизмальная фаза по сейсмическим данным началась 15 марта в 17^h11^m и продолжалась 50 мин (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>). Оценка высоты пеплового выброса по интенсивности сейсмического сигнала составила 16 км над уровнем моря [17]. Высота пеплового столба по данным видеонаблюдений достигла 15 км над уровнем моря. По спутниковым данным, пепловый шлейф распространился в восточном направлении на расстояние более 500 км. Всего за период 9–15 марта было лоцировано $N=82$ землетрясения ($\Sigma E=0.07 \cdot 10^7$ Дж), максимальное количество за сутки ($N=24$) – 15 марта (рис. 5 а, б) [Прил. 13].

Следует отметить, что для этого извержения было сделано предупреждение по методу «СОУС» [18], формулировка предупреждения приведена в работе [16].

По оценке КФ РЭС, оба эксплозивных извержения были успешно спрогнозированы сотрудниками ЛИСВА с использованием алгоритма прогноза [14] без пропусков и ложных тревог.

В каталог 2019 г. вошло $N=207$ ($1.6 \leq K_S \leq 5.6$, $h=-2.6-2.9$ км) землетрясений в радиусе 6 км от влк. Безымянный. Землетрясение $K_{S\text{max}}=5.6$ произошло 20 января в 04^h09^m в постройке вулкана (рис. 1, 5 а) [Прил. 13]. В табл. 2 и 3 представлены данные по различным параметрам землетрясений. Самый высокий код опасности «Красный» присваивался вулкану два 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 $K_{\text{min}}=4.0$ вблизи вершины до $K_{\text{min}}=5.0$ на краях для области, обозначенной окружностью с радиусом 20 км на рис. 1. За период 2018–2019 гг. в районе вулкана было лоцировано 2668 землетрясений с $1.7 \leq K_S \leq 10.1$ (табл. 3) в диапазоне глубин $h=-3.0-35.0$ км (рис. 6) [Прил. 13]. В 2018–2019 гг. на влк. Плоский Толбачик в основном наблюдалась фоновая сейсмическая и вулканическая активность. «Желтый» код опасности выставлялся 121 день, когда в районе вулкана регистрировалась повышенная сейсмичность (табл. 1). В основном она наблюдалась в районе реки Толуд и потухших вулканов Большая Удина и Малая Удина.

Землетрясение с $K_{S\text{max}}=10.1$ произошло 6 февраля 2019 г. в 19^h57^m на глубине $h=18.7$ км в районе реки Толуд (рис. 1, 6 а) [Прил. 13].

В табл. 3 представлены данные по различным параметрам землетрясений. Из таблицы видно, что в 2019 г. лоцировано ~ в 1.7 раза меньше землетрясений, чем в предыдущий год, но выделенная в их очагах энергия превышает ~ в 9.7 раза таковое значение в 2018 году. Если сравнивать суммарную энергию землетрясений в 2019 г. со всем предыдущим периодом 2000–2017 гг., в который вошло извержение имени 50-летия Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (ТТИ-50) [19], то это значение больше ~ в 1.1 раза. Представительность землетрясений $K_{пред}$ и γ практически не изменились в 2019 г. по сравнению с 2018 г. и близки среднегодовым значениям 2000–2017 гг.

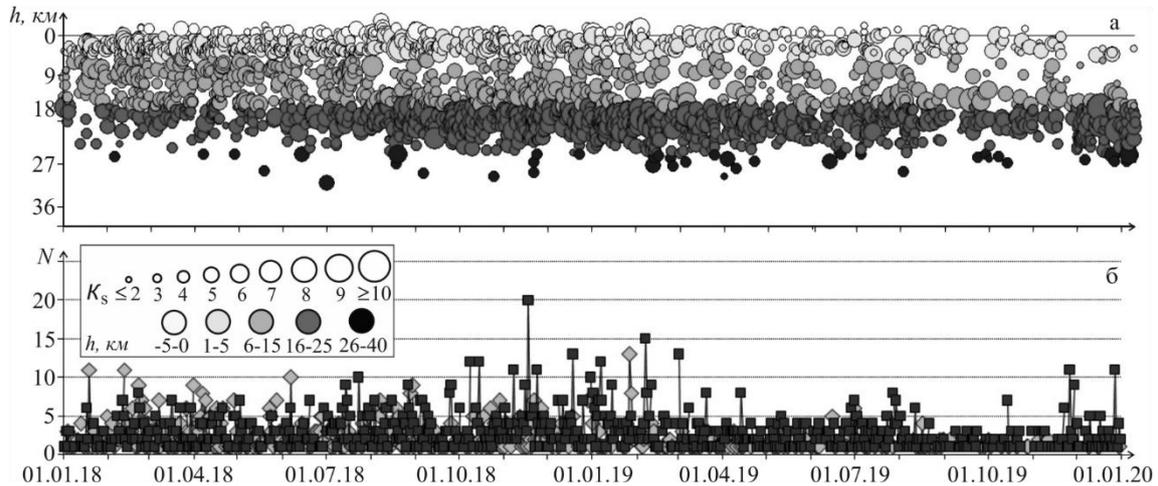


Рис. 6. Изменение во времени глубины гипоцентров h вулканических землетрясений (а); ежесуточного числа поверхностных $-5.0 \leq h \leq 5.0$ км (ромб) и глубоких $5.0 < h \leq 40.0$ км (квадрат) землетрясений (б), произошедших в радиусе 20 км от влк. Плоский Толбачик в 2018–2019 гг.

На вулканах *Ушковский* и *Крестовский* в 2018–2019 гг. наблюдалась слабая сейсмическая активность, никаких проявлений вулканической активности не отмечено. Информация о цветовых кодах и сейсмическом режиме вулканов приведена в табл. 1–3.

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 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).

В табл. 4. представлено распределение землетрясений из района Авачинской группы вулканов по энергетическим классам.

Таблица 4. Распределение землетрясений Авачинской группы вулканов по энергетическим классам K_S в 2018–2019 гг.

Название вулкана	$R_{зоны}, км$	K_S										N_Σ		$\Sigma E, 10^8 Дж$			
		2018						2019				2018	2019	2018	2019		
		2	3	4	5	6	7	8	2	3	4					5	6
Авачинский	8	30	49	22	2	1	–	–	110	99	55	21	1	104	286	0.008	0.053
Корякский	9	121	22	5	1	–	–	–	77	31	8	9	1	149	126	0.001	0.015
Вне вулканов	–	1	13	10	3	–	–	1	2	7	9	3	–	28	21	0.404	0.005
Всего	–	152	–	37	6	1	–	1	189	137	72	33	2	281	433	0.413	0.073

В 2018 г. влк. *Авачинский* был спокоен, сейсмичность не превышала обычный «фоновый» уровень. В радиусе 8 км от вулкана в 2018 г. в каталог вошло $N=104$ ($1.6 \leq K_S \leq 5.6$, $\Sigma E = 0.008 \cdot 10^8 Дж$) землетрясения в диапазоне глубин $h = -2.8 - 3.8$ км. В 2019 г. было лоцировано $N=286$ ($1.6 \leq K_S \leq 6.3$, $h = -2.6 - 9.4$ км) землетрясений, это ~ в 2.8 раза больше, чем в предыдущем году. В 2018–2019 гг. землетрясение с $K_{Smax}=6.3$ было лоцировано в постройке влк. Авачинский

($h=-1.2$ км) 9 декабря 2019 г. в 14^h54^m (рис. 7, 9 а) [Прил. 7]. Представительность $K_{пред}$ и γ в исследуемый период практически близки к среднегодовым за период 2000–2017 гг. (табл. 5).

Отличительной особенностью 2019 г. стало свечение на западной части кромки кратера вулк. Авачинский, впервые замеченное 2 декабря на камере видеонаблюдений, что вызвало обоснованную тревогу среди ученых и населения г. Петропавловска-Камчатского [16, 20]. На основании роста сейсмичности и увеличения интенсивности свечения КФ РЭС составил заключение № 751 от 3 декабря 2019 г. о повышенной вероятности эксплозивного извержения вулкана Авачинский в течение ближайшего месяца.

При изучении видеоархива было обнаружено, что первое слабое свечение появилось 27 октября, а анализ сейсмичности показал, что количество и энергия лоцированных событий начали увеличиваться в ноябре (рис. 9 а). Рост сейсмичности и интенсивности свечения достиг максимума 8–10 декабря, затем стало наблюдаться постепенное снижение активности вулкана [16, 20], и 17 января 2020 г. КФ РЭС снял тревогу о возможности извержения. Повышенный «Желтый» код активности вулкана выставлялся 26 раз (табл. 1), из них только два по сейсмическим данным 9–10 декабря, в остальных случаях при наличии свечения. Более подробно о сейсмичности вулкана Авачинский в 1994–2020 гг. можно прочитать в статье [20].

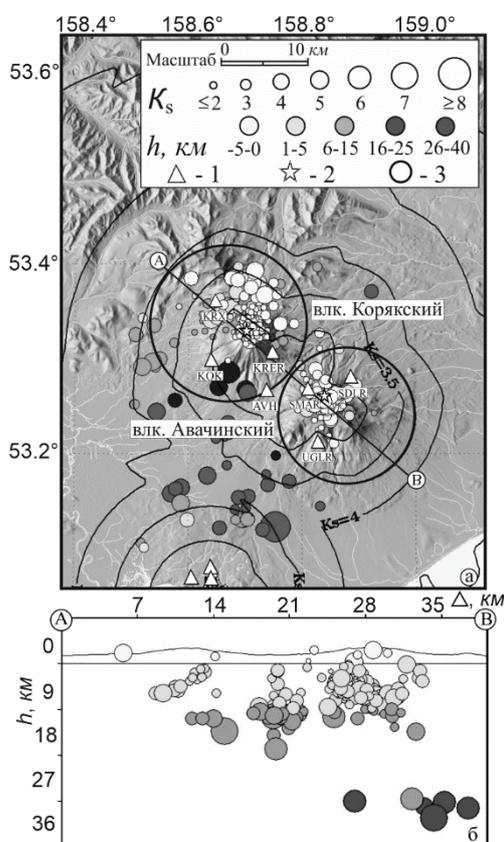


Рис. 7. Карта эпицентров землетрясений Авачинской группы вулканов в 2018–2019 гг. (а) и проекция гипоцентров на вертикальный разрез по линии А–В (б)

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

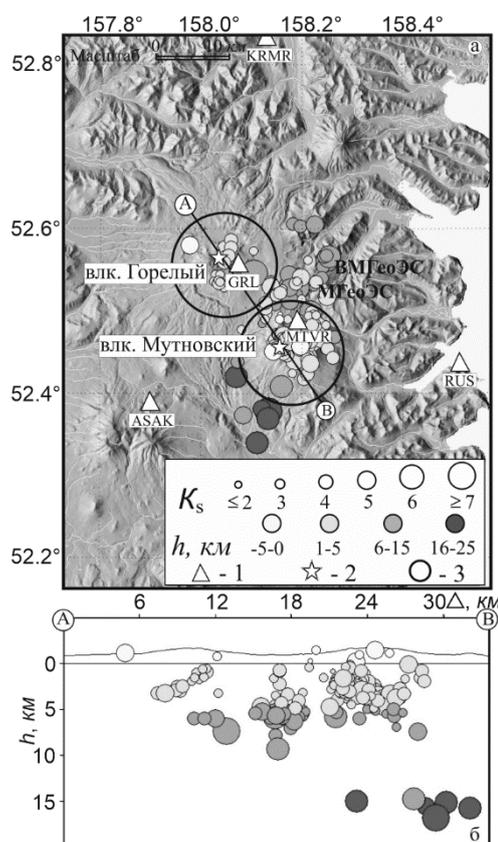


Рис. 8. Карта эпицентров землетрясений Гореловско-Мутновской группы вулканов в 2018–2019 гг. (а) и проекция гипоцентров на вертикальный разрез по линии А–В (б)

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

В радиусе 9 км от вулк. Корякский в 2018 г. было лоцировано ~ в 1.2 раза больше ($N=149$, $1.6 \leq K_s \leq 4.6$, $h = -2.8-21.4$ км) землетрясений, чем в 2019 г. ($N=126$, $1.6 \leq K_s \leq 5.6$, $h = -3.1-36.0$ км). Землетрясение в 2018–2019 гг. с $K_{Smax}=5.6$ произошло на глубине $h=32.2$ км под постройкой вулк. Корякский 17 ноября 2019 г. в 21^h41 (рис. 7, 9 б) (табл. 4) [Прил. 7].

Максимальный класс $K_{Smax}=7.6$ землетрясения ($h=21.4$ км), произошедшего вне зон влк. Авачинский и влк. Корякский в исследуемый двухгодичный период, был зарегистрирован 16 марта в 10^h06^m 2018 г. (рис. 7) [Прил. 7]. Для сравнения в табл. 5 представлены данные по различным параметрам землетрясений за 2000–2017 гг.

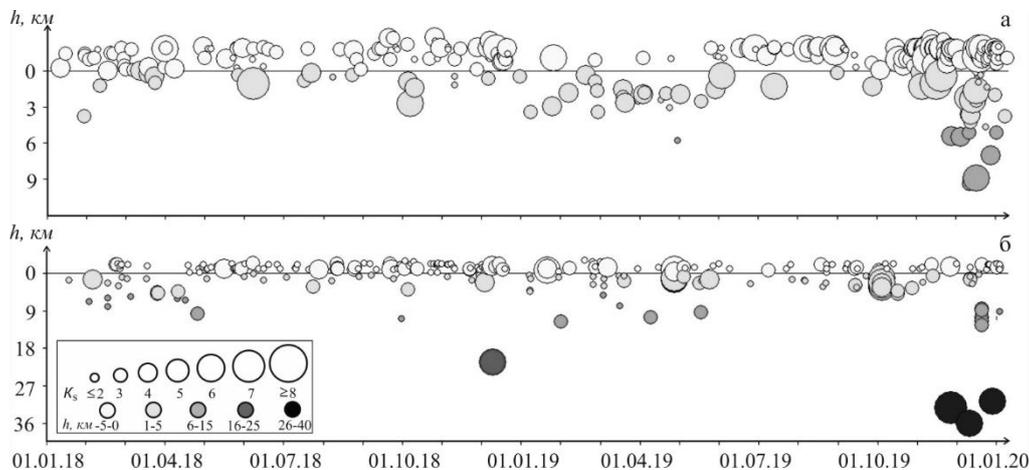


Рис. 9. Изменение во времени глубины гипоцентров вулканических землетрясений Авачинского (а) и Корякского (б) вулканов в 2018–2019 гг.

Вулканическая активность влк. Корякский проявлялась только в виде фумарольной деятельности. В 2018–2019 гг. «желтый» код опасности из-за повышенного уровня сейсмичности выставлялся один раз (табл. 1).

Таблица 5. Число землетрясений в год, их суммарная сейсмическая энергия, представительный класс, угол наклона графика повторяемости для вулканов Авачинский, Корякский, Мутновский, Горелый, Кизи́мен, Жупановский и Камбальный в 2000–2017 гг.

Название вулкана	2000–2017 гг.				2018 г.				2019 г.			
	$N_{\text{сред/год}}$	$\Sigma E_{\text{сред/год}}, 10^8 \text{ Дж}$	$K_{\text{пред}}$	γ	N	$\Sigma E, 10^8 \text{ Дж}$	$K_{\text{пред}}$	γ	N	$\Sigma E, 10^8 \text{ Дж}$	$K_{\text{пред}}$	γ
Авачинский	175	0.079	2.6	0.59	104	0.01	3.1	0.8	119	0.04	2.7	0.53
Корякский	178	0.746	3.1	0.57	149	0.001	1.7	0.76	126	0.015	1.8	0.38
Мутновский	118	0.079	3.2	0.74	147	0.019	3.2	0.56	31	0.011	–	–
Горелый	325	0.107	3.5	0.87	8	0.053	–	–	14	0.002	–	–
Кизи́мен	5255	1930.7	5.0	0.79	12	0.3	–	–	7	0.414	–	–
Жупановский	111	2.675	4.3	0.46	8	0.037	–	–	12	0.39	–	–
Камбальный	49	12.052	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Примечание. $K_{\text{пред}}$ и γ рассчитаны по всему массиву данных за указанный период времени.

Мутновско-Гореловская группа находится в 70 км к югу от г. Петропавловска-Камчатского, здесь расположены Мутновская и Верхне-Мутновская геотермальные станции. Теоретический уровень надежной регистрации землетрясений из района Мутновско-Гореловской группы вулканов при существующей сети РТСС равен $K_{\text{min}}=4.5$ [16, 21] (рис. 8 а). В каталоги 2018–2019 гг. из этого района вошло $N=247$ землетрясений в диапазоне глубин $h=-1.4-16.9$ км с энергетическим классом $K_S=1.7-7.3$ (табл. 6). Землетрясение $K_{Smax}=7.3$ произошло 31 декабря 2019 г. в 15^h29^m на глубине $h=16.9$ км вне зон вулканов (рис. 8) [Прил. 12].

Таблица 6. Распределение землетрясений района Гореловско-Мутновской группы вулканов по энергетическим классам K_S в 2018–2019 гг.

Название вулкана	$R_{\text{зоны}}, \text{ км}$	K_S												N_{Σ}		$\Sigma E, 10^8 \text{ Дж}$	
		2018 г.						2019 г.									
		2	3	4	5	6	7	2	3	4	5	6	7	2018	2019	2018	2019
Горелый	7	–	2	4	1	–	1	1	6	5	2	–	–	8	14	0.053	0.002
Мутновский	7	20	83	31	13	–	–	4	14	9	3	1	–	147	31	0.019	0.011
Вне вулканов	–	–	9	8	6	2	–	–	2	11	6	2	1	25	22	0.024	0.222
Всего	–	20	94	43	20	2	1	5	22	25	11	3	1	180	67	0.096	0.235

Ближайшая к влк. Горелый РТСС «Горелый» (GRL) расположена в 4 км от кратера и позволяет регистрировать землетрясения с $K_S \geq 2.2$. В течение практически всего периода 2018–2019 гг. ею регистрировались спазматическое вулканическое дрожание и слабые локальные сейсмические события от вулкана. За все это время в радиусе 7 км от вершины влк. Горелый и диапазоне глубин $h = -1.4 - 7.4$ км было лоцировано всего 22 землетрясения ($\Sigma E = 0.057 \cdot 10^8$ Дж) (табл. 6) [Прил. 12]. В сравнении со среднегодовыми значениями за период 2000–2017 гг. (табл. 5), когда в 2009 г. регистрировалась высокая сейсмичность, сопровождавшая образование высокотемпературной боки у основания стенки активного кратера, количество лоцированных событий меньше ~ в 15 раз, а высвобожденная ими суммарная энергия – только ~ в два раза. Возможным объяснением этого может быть землетрясение с $K_{Smax} = 6.7$, произошедшее на глубине $h = 7.4$ км под постройкой влк. Горелый 3 января 2018 г. в 10^h23^m [Прил. 12].

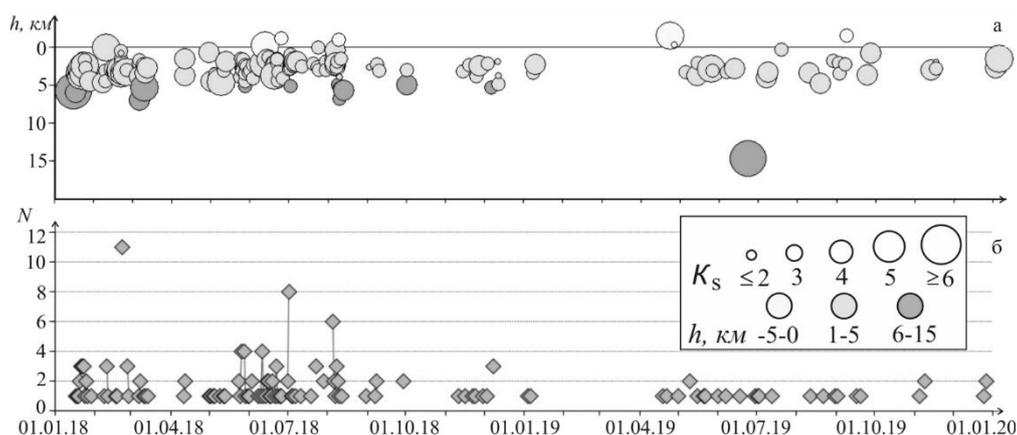


Рис. 10. Изменение во времени глубины гипоцентров h вулканических землетрясений (а) и ежесуточного числа землетрясений (б), произошедших в радиусе 7 км от влк. Мутновский в 2018–2019 гг.

РТСС «Мутновская» (MTRV) установлена на расстоянии ~ 3 км от активного кратера влк. Мутновский (рис. 8 а). Минимальный уровень регистрируемой сейсмичности по этой станции соответствует $K_S = 2.0$. В 2018 г. в радиусе 7 км от вулкана было лоцировано 147 землетрясений ($K_S = 1.7 - 5.5$, $h = -1.1 - 6.9$ км) (табл. 6) [Прил. 12] (рис. 10), что незначительно больше среднегодового значения ($N = 118$) за период 2000–2017 гг. (табл. 5). Представительный класс для них получился $K_{пред} = 3.2$ при $\gamma = 0.56 \pm 0.07$, т.е. параметры соответствуют среднегодовым значениям 2000–2017 гг. (табл. 5). Землетрясение с $K_{Smax} = 5.5$ произошло 16 января 2018 г в 04^h14^m под постройкой влк. Мутновский ($h = 5.8$ км) [Прил. 12]. В 2019 г. было лоцировано всего 31 землетрясение ($K_S = 1.7 - 5.9$, $h = -1.4 - 14.8$ км) (табл. 6) [Прил. 12]. Максимальный класс $K_{Smax} = 5.9$ был зарегистрирован 17 июня в 12^h45^m на глубине $h = 14.8$ км под постройкой влк. Мутновский [Прил. 12].

«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 2018–2019 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 ~ в 2.5 км от вершины. Теоретический уровень надежной регистрации землетрясений для области, обозначенной окружностью с радиусом 15 км от вершины влк. Кизимен, соответствует $K_{min} = 3.5 - 4.0$ (рис. 11 а).

Таблица 7. Распределение землетрясений района влк. Кизимен по энергетическим классам K_S в 2018–2019 гг.

Название вулкана	$R_{зоны}$, км	K_S											N_{Σ}		ΣE , 10^8 Дж	
		2018 г.							2019 г.				2018	2019	2018	2019
		3	4	5	6	7	8	9	4	5	6	7				
Кизимен	15	–	1	6	3	2	–	–	–	3	–	4	12	7	0.3	0.414
Вне вулкана	–	2	16	39	21	7	–	1	2	3	4	2	86	11	6.047	0.415
Всего	–	2	17	45	24	9	–	1	2	6	4	6	98	18	6.347	0.829

На рис. 11 представлена карта эпицентров землетрясений (а), проекция их гипоцентров на вертикальный разрез (б), в табл. 7. приведено распределение землетрясений из района – влк. Кизимен по энергетическим классам в 2018–2019 гг. За двухлетний период в радиусе 15 км от вершины вулкана и в диапазоне глубин $h=-1.6-14.4$ км было лоцировано всего 19 землетрясений, ими выделено энергии $\Sigma E=0.71 \cdot 10^8$ Дж, что \sim в 2.7 и \sim в 1.4 раза меньше, чем в 2016–2017 гг. ($N=52$, $\Sigma E=1.01 \cdot 10^8$ Дж) [Прил. 11] [4] (табл. 7).

По сравнению со всем периодом наблюдений с ноября 2010 г. по 2017 г. включительно, в который вошла подготовка и извержение влк. Кизимен, сейсмичность снизилась \sim в 277 раз, а высвобожденная вулканическими землетрясениями энергия \sim в 2720 раз (табл. 5). В радиусе 15 км от вулкана землетрясения с $K_{Smax}=7.2$ произошли 11 марта 2018 г. в 23^h41^m ($h=-0.9$ км) и 27 июня 2019 г. в 17^h59^m ($h=-1.5$ км) в постройке вулкана. В 2018–2019 гг. практически вся сейсмичность регистрировалась вне зоны вулкана, в районе Щапинской гидротермальной системы (рис. 11). Максимальный класс землетрясения $K_{Smax}=8.7$ ($h=6.6$ км) был зарегистрирован 30 июня 2018 г. в 09^h17^m [Прил. 11].

Вулканическая активность влк. Кизимен в 2018–2019 гг. проявлялась только в виде мощной фумарольной деятельности, а сейсмичность превышала фоновую («Желтый» код) 7 раз, табл. 1.

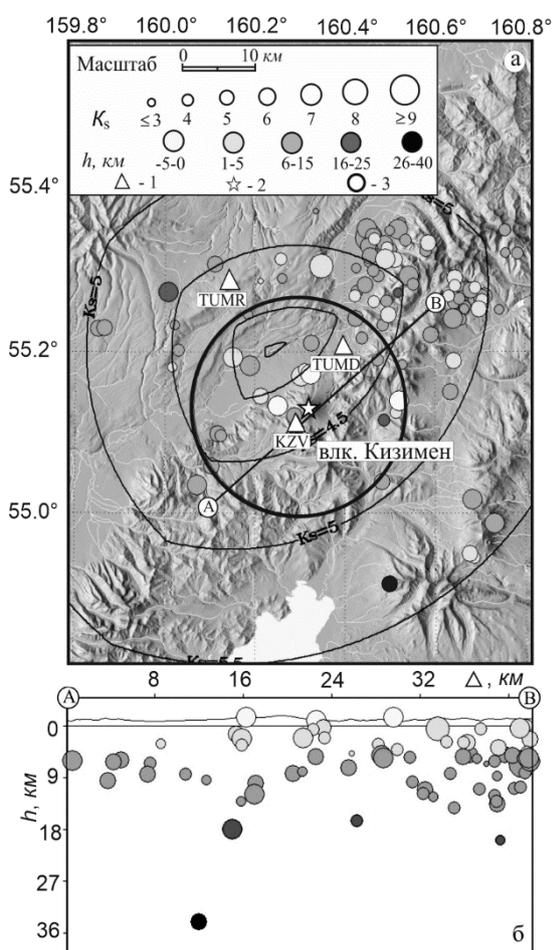


Рис. 11. Карта эпицентров землетрясений влк. Кизимен в 2018–2019 гг. (а) и проекция гипоцентров на вертикальный разрез по линии А–В (б)

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

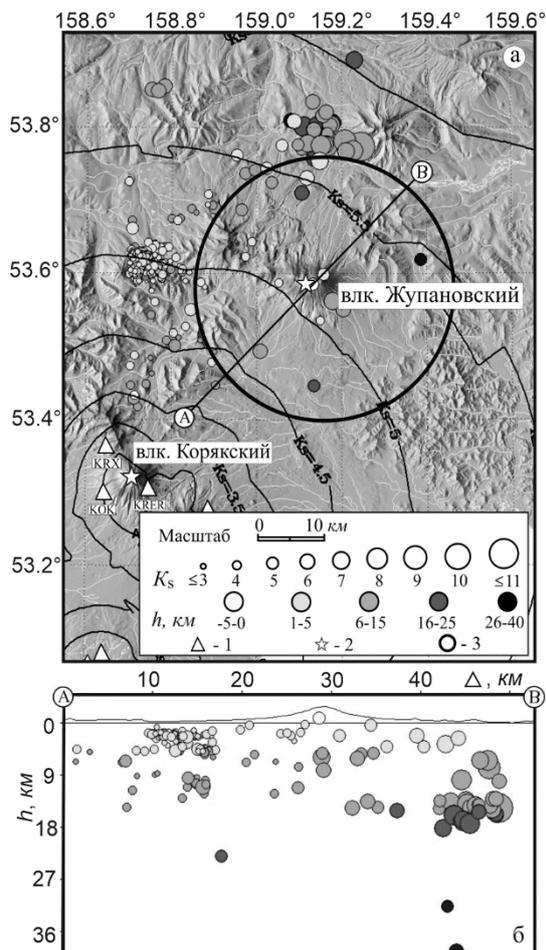


Рис. 12. Карта эпицентров землетрясений влк. Жупановский в 2018–2019 гг. (а) и проекция гипоцентров на вертикальный разрез по линии А–В (б)

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

Вулкан Жупановский расположен в юго-восточном поясе Камчатки и представляет собой восточную часть Дзензур-Жупановского вулканического хребта, образованную четырьмя слившимися конусами стратовулканов [22].

Сейсмический мониторинг влк. Жупановский проводится удаленными РТСС, ближайшие из которых – «Седловина» (SDLR), «Коряжский 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 землетрясений по энергетическим классам K_S из района влк. Жупановский в 2018–2019 гг.

Название вулкана	$R_{\text{зоны}}, \text{ км}$	K_S														N_{Σ}		$\Sigma E, 10^8 \text{ Дж}$	
		2018 г.						2019 г.											
		2	3	4	5	6	3	4	5	6	7	8	9	10	11	2018	2019	2018	2019
Жупановский	20	–	1	3	2	2	1	3	4	2	2	–	–	–	–	8	12	0.037	0.39
Вне вулкана	–	3	162	77	8	–	3	7	7	14	7	5	1	–	1	250	45	0.018	819.46
Всего	–	3	163	80	10	2	4	10	11	16	9	5	1	–	1	258	57	0.055	819.85

В табл. 8. представлено распределение землетрясений из района влк. Жупановский по энергетическим классам. В 2018–2019 гг. в радиусе 20 км от вершины вулкана в земной коре лоцировано всего 20 землетрясений ($3.0 \leq K_S \leq 7.4, h = -0.8-23.1 \text{ км}$), суммарная энергия составила $\Sigma E = 0.43 \cdot 10^8 \text{ Дж}$ [Прил. 8]. Землетрясение с $K_{S\max}=7.4$ произошло в 2019 г. на глубине $h=3.7 \text{ км}$ 3 января в 20^h41^m. В 2018–2019 гг. практически вся сейсмичность была сосредоточена севернее от вулкана, вне его зоны (район Жупановских Востряков) ($N=295, 2.2 \leq K_S \leq 10.9, h = -0.6-39.5 \text{ км}$). Максимальный класс землетрясения $K_{S\max}=10.9$ из этого района был зарегистрирован 10 января в 07^h10^m на глубине $h=14.7 \text{ км}$ [Прил. 8].

Вулканическая активность влк. Жупановский в 2018–2019 гг. проявлялась только в виде фумарольной деятельности, а сейсмичность превышала фоновую всего 12 раз («желтый» код), табл. 1.

Вулкан Камбальный является самым южным вулканом Южно-Камчатской вулканической зоны, расположен на юге Камбального хребта [23]. 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 [23]. 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. Расчетный уровень надежной регистрации землетрясений в районе влк. Камбальный составляет $K_{\min}=6.5$ [4]. Первое в историческое время извержение влк. Камбальный началось 24 марта 2017 г. и продолжалось примерно один месяц. Подготовка и извержение сопровождались высокой сейсмической активностью, не наблюдавшейся в предыдущие годы [4]. В исследуемый период 2018–2019 гг. в радиусе 7 км от вершины влк. Камбальный не было зарегистрировано ни одного землетрясения. Вне зоны вулкана было лоцировано $N=5$ землетрясений ($6.2 \leq K_S \leq 8.3, h = 2.5-19.1 \text{ км}$) [Прил. 9]. На спутниковых снимках вулканическая активность в этот период не наблюдалась. «Желтый» код опасности для влк. Камбальный выставлялся 13 раз в основном из-за повышенного уровня сейсмичности, когда на РТСС «Паужетка» (PAU) регистрировалось даже одно локальное поверхностное событие.

Вулкан Карымский – один из активнейших вулканов, расположен в центральной части Восточной вулканической зоны [24]. Ближайшая РТСС «Карымский» (КП) расположена на юго-восточном склоне, в 1.5 км от кратера [3]. Другие РТСС находятся на расстоянии свыше 100 км и могут обеспечить надежное определение параметров землетрясений по трем станциям с занесением в каталог только с $K_S \geq 6.0$. Поэтому все основные выводы о деятельности вулкана сделаны по одной станции «Карымский» (КП). На РТСС КП регистрировались локальные поверхностные события, большинство из которых – взрывы в кратере, лоцировать которые невозможно из-за удаленности станций [16, 21]. В 2018–2019 гг. продолжалось извержение

влк. Карымский, сопровождавшееся газо-пепловыми выбросами до 5.4 км над кратером по сейсмическим данным (4 августа 2019 г.) и сходом раскаленных лавин. Всего за период 2018–2019 гг. в районе влк. Карымский было лоцировано $N=4$ землетрясения ($5.2 \leq K_s \leq 6.7$, $h=5.5-15.4$ км), одно из них ($K_s=6.5$, $h=13.6$ км) – в радиусе 10 км от вершины вулкана 23 декабря 2019 г. в 07^h10^m [Прил. 9].

В исследуемый двухгодичный период повышенный код опасности «Оранжевый» на влк. Карымский выставлялся 168 дней (табл. 1).

Закключение. Всего за период 2018–2019 гг. в районе Северной, Авачинской и Мутновско-Гореловской групп вулканов, а также в районе вулканов Кизимен, Жупановский, Карымский, Камбальный было лоцировано 30600 землетрясений, высвобожденная в их очагах суммарная сейсмическая энергия составила $\Sigma E = 11.13 \cdot 10^{10}$ Дж.

Наиболее высокая вулканическая активность с эксплозивными извержениями и сходом раскаленных лавин наблюдалась на влк. Шивелуч. В 2018–2019 гг. было локализовано $N=14546$ очагов землетрясений, сопровождавших рост и обрушение купола, что ~ в 8 раз больше, чем за период 2016–2017 гг.

В 2018–2019 гг. на влк. Ключевской регистрировалась высокая сейсмическая и вулканическая активность, связанная с магматическими процессами. В этот период наблюдались вершинные эксплозивные и эксплозивно-эффузивные извержения.

На влк. Безымянный в 2018–2019 гг. было зафиксировано два пароксизмальных эксплозивных извержения (20 января 2019 г. и 15 марта 2019 г.) с высотой пепловых выбросов до 15 км над уровнем моря. Подготовка к извержению сопровождалась высокой сейсмической активностью. Оба эксплозивных извержения были успешно спрогнозированы.

После завершения извержений влк. Плоский Толбачик и влк. Кизимен в 2018–2019 гг. их сейсмическая и вулканическая активность продолжали снижаться. Практически вся сейсмичность регистрировалась вне зоны вулканов. Для района влк. Плоский Толбачик это зоны реки Толуд и потухших вулканов Большая Удина и Малая Удина.

В 2018–2019 гг. на влк. Жупановский вулканическая активность проявлялась только в виде фумарольной деятельности. Практически вся сейсмичность регистрировалась севернее зоны вулкана в районе Жупановских Востряков.

После первого в историческое время извержения влк. Камбальный, которое происходило с 24 марта по 23 апреля 2017 г., сейсмическая и вулканическая активность в 2018–2019 гг. не наблюдались.

На влк. Карымский в исследуемый период продолжалось извержение, сопровождавшееся высокой сейсмичностью. Из-за удаленности сети РТСС в районе влк. Карымский было лоцировано только $N=4$ землетрясения.

В подготовке электронных приложений к данной статье принимали участие Д.В. Чебров, С.Л. Сеньюков, И.Р. Абубакиров, В.М. Павлов, С.Я. Дроздина, И.Н. Нуждина, Е.А. Матвеевко, С.В. Митюшкина, А.А. Раевская, Ю.В. Шевченко, Е.Л. Музуров, Р.А. Кутанов, Е.А. Карпенко, Н.А. Леднева, З.А. Назарова, Е.И. Ромашева, С.Л. Толокнова, Т.Ю. Кожевникова, О.В. Соболевская, Н.А. Напылова, О.А. Напылова, А.Н. Должикова, С.Г. Пойгина, Г.М. Бахтиярова.

Электронное приложение App11_Kamchatka_2018–2019 (<http://www.gsras.ru/zse/app-26.html>): 1 – Сейсмические станции сети Камчатки и Командорских островов в 2018–2019 гг.; 7 – Каталог землетрясений Авачинской группы вулканов в 2018–2019 гг.; 8 – Каталог землетрясений вулкана Жупановский в 2018–2019 гг.; 9 – Каталог землетрясений вулкана Камбальный в 2018–2019 гг.; 10 – Каталог землетрясений вулкана Карымский в 2018–2019 гг.; 11 – Каталог землетрясений вулкана Кизимен в 2018–2019 гг.; 12 – Каталог землетрясений Мутновско-Гореловской группы вулканов в 2018–2019 гг.; 13 – Каталог землетрясений Северной группы вулканов в 2018–2019 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. Чебров Д.В., Дрознина С.Я., Сеньюков С.Л., Шевченко Ю.В., Митюшкина С.В. Камчатка и Командорские острова // Землетрясения России в 2017 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – С. 67–76.
4. Сеньюков С.Л., Нуждина И.Н. Сейсмичность вулканических районов Камчатки в 2016–2017 гг. // Землетрясения Северной Евразии. – 2022. – Вып. 25 (2016–2017 гг.). – С. 361–377. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2022.25.34>. EDN: OFOFMZ
5. Дрознин Д.В., Дрознина С.Я. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов «DIMAS» // Сейсмические приборы. – М.: ИФЗ РАН, 2010. – Т. 46, № 3. – С. 22–34.
6. Кузин И.П. Фокальная зона и строение верхней мантии в районе Восточной Камчатки. – М.: Наука, 1974. – 145 с.
7. Weimer S. A software package to analyze seismicity: ZMAP // Seismological Research Letters. – 2001. – V. 72, N 2. – P. 374–383.
8. Нуждина И.Н. (отв. сост.); Напылова Н.А., Напылова О.А., Толокнова С.Л., Соболевская О.В., Кожевникова Т.Ю. 2018-ER_APP12_Volcano-regions-of-Kamchatka_2018.xls // Землетрясения России в 2018 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – [Электронное приложение]. – URL: http://www.gsras.ru/zr/app_18.html
9. Нуждина И.Н. (отв. сост.); Напылова Н.А., Напылова О.А., Кожевникова Т.Ю., Должикова А.Н., Соболевская О.В., Толокнова С.Л. 2019-ER_APP12_Volcano-regions-of-Kamchatka_2019.xls // Землетрясения России в 2019 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. – [Электронное приложение]. – URL: http://www.gsras.ru/zr/app_19.html
10. 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: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2020.23.38>
11. Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. – М.: Наука, 1972. – 117 с.
12. 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.
13. Сеньюков С.Л., Дрознина 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.
14. Сеньюков С.Л. Прогноз извержений вулканов Ключевской и Безымянный на Камчатке // Saarbrücken: LAP LAMBERTS AcademicPublishing. – 2013. – 144 с.
15. 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.
16. Сеньюков С.Л., Нуждина И.Н., Чебров Д.В. Вулканы Камчатки // Землетрясения России в 2019 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. – С. 96–105.
17. Близнецов 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.
18. Салтыков В.А. Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. – 2011. – № 2. – С. 53–59.
19. Толбачинское Трещинное Извержение 2012–2013 гг. / Под ред. Е.И. Гордеева, Н.Л. Добрецова – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. – 421 с.
20. Сеньюков С.Л., Нуждина И.Н., Дрознина С.Я., Кожевникова Т.Ю., Назарова З.А., Соболевская О.В. Сейсмичность вулкана Авачинский в 1994–2020 гг. // Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов. [Электронный ресурс]: Труды Восьмой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Петропавловск-Камчатский. 26 сентября–2 октября 2021 г. / Отв. ред. Д.В. Чебров. – Петропавловск-Камчатский: КФ ФИЦ ЕГС РАН, 2021. – С. 221–227.
21. Сеньюков С.Л., Нуждина И.Н., Чебров Д.В. Вулканы Камчатки // Землетрясения России в 2018 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – С. 98–105.
22. Масуренков Ю.П., Флоренский И.В., Мелекесцев И.В. Вулкан Жупановский // Действующие вулканы Камчатки. – М.: Наука, 1991. – Т. II. – С. 218–225.
23. Литасов Н.Е., Важеевская А.А. Вулкан Камбальный // Действующие вулканы Камчатки. – М.: Наука, 1991. – Т. II. – С. 396–405.
24. Иванов Б.В., Брайцева О.А., Зубин М.И. Вулкан Карымский // Действующие вулканы Камчатки. – М.: Наука, 1991. – Т. II. – С. 182–201.

SEISMICITY of the VOLCANIC AREAS of KAMCHATKA in 2018–2019

S.L. Seniukov, I.N. Nuzhdina

*Kamchatka branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences,
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, Krestovskiy and Ushkovskiy), Avacha (Avachinsky and Koryakskiy), Mutnovskiy-Gorely volcano group and Kizimen, Zhupanovskiy, Karymskiy and Kambalny volcanoes for 2018–2019 are presented. Within two years 29199 earthquakes with $K_S=1.6–10.1$ were located for Northern volcano group, 714 earthquakes with $K_S=1.6–7.6$ – for Avacha volcano group, 247 earthquakes with $K_S=1.7–7.3$ – Mutnovskiy-Gorely volcano group, 116 earthquakes with $K_S=2.6–8.7$ for Kizimen volcano, 315 earthquakes with $K_S=2.2–10.9$ for Zhupanovskiy volcano, five earthquakes with $K_S=6.2–8.3$ for Kambalny volcano and four earthquakes with $K_S=5.2–6.7$ for Karymskiy 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 2018–2019: intensive volcanic activity of Sheveluch volcano associated with new cone, two paroxysmal explosive eruptions of Bezymianny volcano and the summit explosive-effusive eruptions of Kluchevskoy volcano.

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

For citation: Seniukov, S.L., & Nuzhdina, I.N. (2023). [Seismicity of the volcanic areas of Kamchatka in 2018–2019]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 26(2018–2019), 354–370. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2023.26.31> EDN: EADZDV

References

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. Chebrov, D.N., Droznina, S.Ya., Senyukov, S.L., Shevchenko, Yu.V., & Mityushkina, S.V. (2019). [Kamchatka and Komandor Islands]. In *Zemletriaseniia Rossii v 2017 godu* [Earthquakes in Russia, 2017] (pp. 67–76). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
4. 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: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2022.25.34>
5. Droznin, D.V., & Droznina, S.Ia. (2010). [Interactive program “DIMAS” of the seismic signal processing]. *Seismic Instruments*, 46(3), 22–34. (In Russ.).
6. Kuzin, I.P. (1974). *Fokal'naya 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.).
7. Weimer, S. (2001). A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seismological Research Letters*, 72(2), 374–383.
8. Nuzhdina, I.N., Napylova, N.A., Napylova, O.A., Toloknova, S.L., Sobolevskaya, O.V., & Kozhevnikova, T.Yu. (2020). [2018-ER_APP12_Volcano-regions-of-Kamchatka_2018.xls]. In *Zemletriaseniia Rossii v 2018 godu* [Earthquakes in Russia, 2018]. Electronic supplement. Retrieved from http://www.gsras.ru/zr/app_18.html (In Russ.).
9. Nuzhdina, I.N., Napylova, N.A., Napylova, O.A., Kozhevnikova, T.Yu., Dolzhikova, A.N., Sobolevskaya, O.V., & Toloknova, S.L. (2021). [2019-ER_APP12_Volcano-regions-of-Kamchatka_2019.xls]. In *Zemletriaseniia Rossii v 2019 godu* [Earthquakes in Russia, 2019]. Electronic supplement. Retrieved from http://www.gsras.ru/zr/app_19.html (In Russ.).
10. Seniukov, S.L., & Nuzhdina, I.N. (2020). [Seismicity of the volcanic areas of Kamchatka in 2014]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), 375–387. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2020.23.38>

11. 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.
12. 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.).
13. Seniukov, S.L., Droznina, S.Ia., Nuzhdina, I.N., Garbuzova, V.T., & Kozhevnikova, T.Iu. (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.).
14. Seniukov, S.L. (2013). *Prognoz izverzhenii vulkanov Kliuchevskoi i Bezymiannyi na Kamchatke* [Forecast of eruptions of Klyuchevskoy and Bezymianny volcanoes in Kamchatka]. Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERTS Academic Publ., 144 p.
15. 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.).
16. Seniukov, S.L., Nuzhdina, I.N., & Chebrov, D.V. (2021). [Volcanoes of Kamchatka]. In *Zemletriaseniia Rossii v 2019 godu* [Earthquakes in Russia, 2019] (pp. 96–105). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
17. 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]. *Seismic Instruments*, 51(3), 46–59. (In Russ.).
18. Saltykov, V.A. (2011). [A statistical estimate of seismicity level: the method and results of application to Kamchatka]. *Vulkanologiya i seismologiya* [Journal of Volcanology and Seismology], 2, 53–59. (In Russ.).
19. Gordeev, E.I., & Dobretsov, N.L. (2017). *Tolbachinskoe Treshinnoe Izverzhenie 2012–2013 gg.* [Tolbachik Fissure Eruption 2012–2013]. Novosibirsk, Russia: SB RUSS Publ., 421 p.
20. Seniukov, S.L., Nuzhdina, I.N., Droznina, S.Ia., Kozhevnikova, T.Iu., Nazarova, Z.A., & Sobolevskaya, O.V. (2021). [Seismicity of Avacha volcano in 1994–2000]. In *Problemy kompleksnogo geofizicheskogo monitoringa sejsmoaktivnykh regionov. [Elektronnyy resurs]: Trudy VIII Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. Petropavlovsk-Kamchatskij. 26 sentyabrya–2 oktyabrya 2021 g.* [Problems of complex geophysical monitoring of seismoactive regions [Electronic resource]: In materialy of the VIII All-Russian Scientific and Technical Conference with international Participation. Petropavlovsk-Kamchatsky. September 26–October 2, 2021] (pp. 221–227). Petropavlovsk-Kamchatsky: KB FRC GS RAS Publ. (In Russ.).
21. Seniukov, S.L., Nuzhdina, I.N., & Chebrov, V.N. (2020). [Volcanoes of Kamchatka]. In *Zemletriaseniia Rossii v 2018 godu* [Earthquakes in Russia, 2018] (pp. 98–105). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
22. Masurenkov, Iu.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.).
23. Litasov, N.Ye., & Vazheyevskaya, A.A. (1991). [Kambalny volcano]. *Dejstvuyushchie vulkany Kamchatki* [Active volcanoes of Kamchatka]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 2, 396–405. (In Russ.).
24. Ivanov, B.V., Braitseva, O.A., & Zubin, M.I. (1991). [Karymsky volcano]. *Dejstvuyushchie vulkany Kamchatki* [Active volcanoes of Kamchatka]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 2, 182–201. (In Russ.).