

IV. СЕЙСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ВУЛКАНОВ

УДК 550.348.438(517.66)

СЕЙСМИЧНОСТЬ ВУЛКАНИЧЕСКИХ РАЙОНОВ КАМЧАТКИ в 2020 году

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 2020 г. 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. В районе Северной группы вулканов в 2020 г. лоцировано 3945 землетрясений с $K_s=1.6-8.6$, Авачинской – 337 с $K_s=1.6-6.0$, Мутновско-Гореловской – 498 с $K_s=1.6-6.8$, в районе влк. Кизимен – 55 землетрясений с $K_s=2.4-7.8$, влк. Жупановский – 41 с $K_s=2.6-7.3$ и влк. Карымский – четыре с $K_s=5.4-6.6$. 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 2020 г.: интенсивная вулканическая деятельность влк. Шивелуч, связанная с ростом нового купола, эксплозивное извержение 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 2020 году // Землетрясения Северной Евразии. – 2024. – Вып. 27 (2020). – С. 347–363. <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2024.27.31> EDN: XPLRMS

Введение. В 2020 г. 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) Камчатского филиала (КФ) ФИЦ ЕГС РАН [Прил. 1]. Сеть КФ, осуществляющая контроль сейсмической активности вулканов в 2020 г. [3, 4], сохранилась без изменений по сравнению с таковой в 2019 году. Сеть РТСС позволяла проводить детальные наблюдения в режиме, близком к реальному времени, для Северной (влк. Шивелуч, Ключевской, Безымянный, Плоский Толбачик, Ушковский и Крестовский), Авачинской (влк. Авачинский и Корякский), Мутновско-Гореловской (влк. Горелый и Мутновский) групп вулканов, а также для влк. Кизимен, влк. Жупановский, влк. Карымский и Камбальный.

Методика обработки вулканических землетрясений, локальные годографы не изменились по сравнению с таковыми в предыдущие годы и изложены в [1, 5]. Как и прежде, для определения параметров землетрясений применялась программа DIMAS [6] с использованием различных одномерных скоростных моделей среды [1, 7], а исследование представительных классов и углов наклона графиков повторяемости для выборок вулканических землетрясений проводилось с помощью пакета программ ZMAP [8].

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. Карымский»: $\varphi=53.90-54.40^\circ\text{N}$, $\lambda=159.20-159.80^\circ\text{E}$. Все события сгруппированы в шесть каталогов [Прил. 7–12]. 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, а также ниже по тексту статьи в соответствующих

таблицах оно обозначается «вне вулканов». Следует отметить, что каталоги, опубликованные ранее в [9], немного 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, 8, 11, 12) и обычно показывают возможный, ожидаемый, минимальный уровень 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 ежесуточно 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 [10]. Подробные результаты мониторинга активных вулканов Камчатки в 2020 г. 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 2000–2018 гг. (среднегодовые значения) и отдельно в 2019 и 2020² гг.

Вулкан\Код	2000–2018 гг.					2019 г.					2020 г.				
	Б	З	Ж	О	К	Б	З	Ж	О	К	Б	З	Ж	О	К
Шивелуч	12	80	159	108	6	–	24	125	198	18	–	33	310	21	2
Ключевской	5	227	106	25	2	45	237	69	13	1	–	65	109	187	5
Безымянный	73	258	31	2	1	–	200	155	8	2	160	108	96	1	1
Пл. Толбачик	47	267	37	13	1	–	306	59	–	–	152	180	34	–	–
Авачинский	1	362	2	–	–	62	277	26	–	–	6	328	32	–	–
Корякский	2	357	6	–	–	–	364	1	–	–	2	363	1	–	–
Мутновский	37	268	60	–	–	85	264	16	–	–	4	122	240	–	–
Горелый	39	107	219	–	–	2	236	127	–	–	1	351	14	–	–
Кизимен	14	208	67	75	1	37	325	3	–	–	22	344	–	–	–
Жупановский	2	262	53	11	–	3	355	7	–	–	2	350	14	–	–
Камбальный	75	228	17	5	–	4	355	6	–	–	1	362	3	–	–
Карымский	49	84	108	123	1	49	88	135	93	–	13	167	89	97	–

Как следует из табл. 1, на основании комплексных наблюдений в течение 2000–2019 гг. лидирующее положение по активности занимал влк. Шивелуч. Следующими по активности в этот период были влк. Ключевской и влк. Безымянный. В 2020 г. наибольшая активность наблюдалась на влк. Ключевской, для него 192 раза выставлялся оранжевый и красный код опасности. Далее рассмотрим каждый вулкан в отдельности.

Северная группа вулканов. Каталог землетрясений Северной группы вулканов за 2020 г. содержит 3945 землетрясений ($\Sigma E = 13.7 \cdot 10^8$ Дж), что $\sim$ в 5.3 раза меньше, чем было в 2019 г. ($N=20753$), и $\sim$ в 2 раза меньше среднего значения за период 2000–2019 гг. Энергия, выделенная в очагах землетрясений, $\sim$ в 18.1 раза меньше таковой в 2019 г. и $\sim$ в 11.1 раза меньше среднего значения за период 2000–2019 гг. (табл. 2) [Прил. 12].

Распределение количества землетрясений по K_s [11] для районов отдельных вулканов Северной группы приведено в табл. 3. Карта эпицентров землетрясений и условные зоны сейсмичности рассматриваемых вулканов показаны на рис. 1. Наиболее активной по числу землетрясений в 2020 г. была зона влк. Ключевской. Здесь произошло 71.7 % землетрясений от общего числа событий, вошедших в каталог. Также высокая сейсмическая активность регистрировалась

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

² Здесь и в таблице 5 имеется в виду, что комплексный мониторинг вулканов Мутновско-Гореловской группы и влк. Кизимен проводился с 2009 г., влк. Жупановский с 2013 г., влк. Камбальный с 2017 г.

в зонах влк. Безымянный (12.2 %) и влк. Плоский Толбачик (8.5 %) (табл. 2) [Прил. 12]. Представительность землетрясений и угол наклона графика повторяемости для района Северной группы вулканов в 2020 г. ($K_{пред}=3.5$, $\gamma=0.47$) и в 2019 г. ($K_{пред}=4.0$, $\gamma=0.53$) близки по своим значениям, но ниже, чем за весь период 2000–2019 гг. ($K_{пред}=4.5$, $\gamma=0.87$) (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 2000–2020 гг.

Название вулкана	2000–2019 гг.				2019 г.				2020 г.			
	$N_{ср}/\text{год}$	$\Sigma E_{ср}/\text{год}, 10^8 \text{ Дж}$	$K_{пред}$	γ	N	$\Sigma E, 10^8 \text{ Дж}$	$K_{пред}$	γ	N	$\Sigma E, 10^8 \text{ Дж}$	$K_{пред}$	γ
Северная группа	7725	152.05	4.5	0.87	20753	248.15	4.0	0.53	3945	13.7	3.5	0.47
Шивелуч	2992	8.75	4.5	0.87	13424	38.79	5.3	1.25	165	0.58	4.7	0.56
Ключевской:	3933	405.03	4.5	0.96	5835	4.0	4.0	0.67	2828	5.1	3.6	0.46
I горизонт	1087	3.45	4.0	0.56	351	0.17	3.7	0.66	1724	4.35	3.5	0.35
II горизонт	66	399.49	4.0	0.58	12	0.009	–	–	183	0.58	3.9	0.43
III горизонт	2779	2.1	4.7	1.42	5472	3.82	4.0	0.66	921	0.16	3.8	1.0
Безымянный	247	0.44	4.0	0.83	207	0.02	3.4	0.91	481	0.13	3.3	0.6
Пл. Толбачик	287	124.31	4.0	0.48	987	140.71	3.9	0.49	334	6.87	5.0	0.6
Крестовский и Ушковский	75	7.41	4.0	0.5	29	0.01	–	–	11	0.001	–	–

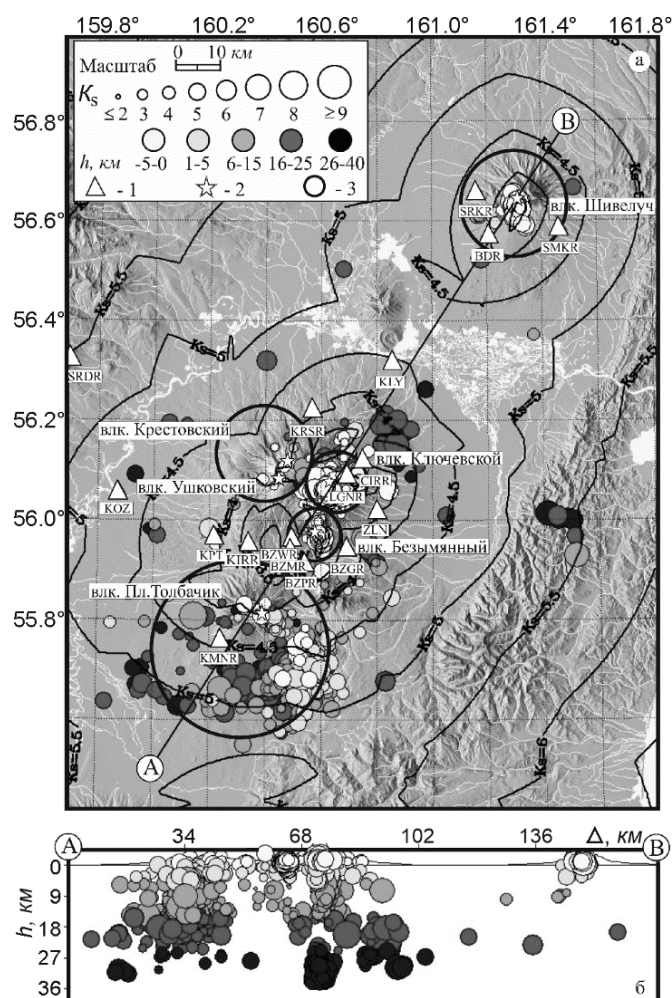


Рис. 1. Карта эпицентров (а) землетрясений Северной группы вулканов за 2020 г. и проекция гипоцентров (б) на вертикальную плоскость, проходящую по линии А–В

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.

Таблица 3. Распределение числа землетрясений по энергетическим классам K_S для Северной группы вулканов в 2020 г.

Название вулкана	$R_{\text{зоны}},$ <i>км</i>	K_s								N_Σ	$\Sigma E,$ 10^8 Дж
		2	3	4	5	6	7	8	9		
Шивелуч	12	–	11	56	66	28	4	–	–	165	0.58
Ключевской	7	20	650	1134	774	244	4	2	–	2828	5.097
Безымянный	6	65	178	161	72	5	–	–	–	481	0.129
Плоский Толбачик	20	–	69	115	98	41	9	1	1	334	6.869
Крестовский и Ушковский	10.1	–	7	3	1	–	–	–	–	11	0.001
Вне вулканов	–	1	27	39	37	17	4	1	–	126	1.023
Всего	–	86	942	1508	1048	335	21	4	1	3945	13.699

В 2020 г. землетрясение с максимальным классом $K_{S\text{max}}=8.6$ произошло 24 ноября в 16^h19^m на глубине $h=5.3$ км в зоне влк. Плоский Толбачик [Прил. 12].

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

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

В 2020 г. на влк. Шивелуч продолжалось экстрезивно-эксплозивное извержение, связанное с ростом нового купола. Извержение сопровождалось вулканическим дрожанием, мощными газо-пепловыми выбросами, сходом пирокластических потоков и горячих лавин. В районе влк. Шивелуч установлено три РТСС (рис. 1), поэтому в период с января по июль отсутствие данных даже с одной РТСС «Сорокина» (SRKR) не позволило локализовать слабые землетрясения ($K_S < 4.0$) (рис. 2) [Прил. 12].

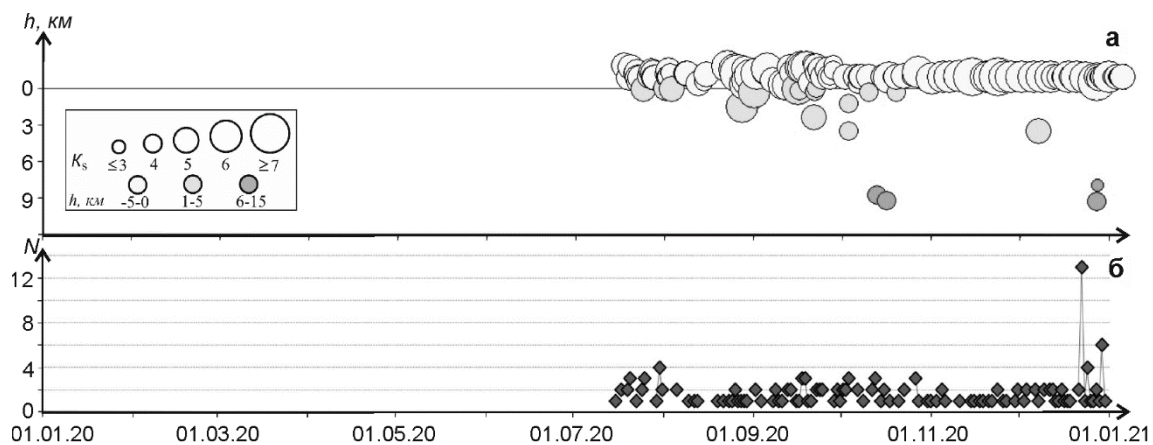


Рис. 2. Изменение во времени глубины гипоцентров h (а) и количества N (б) вулканических землетрясений, лоцированных в радиусе 12 км от влк. Шивелуч в 2020 г.

Количество землетрясений $N=165$ с $3.3 \leq K_S \leq 6.7$ (табл. 3, [Прил. 12]), произошедших в 2020 г. в радиусе 12 км от влк. Шивелуч и в диапазоне глубин $h=-2.0-9.3$ км (рис. 2 а, б), меньше $\sim$ в 81 раз, чем в 2019 г., и $\sim$ в 18 раз – среднего значения за период 2000–2019 гг. Высвобождено энергии в очагах землетрясений $\sim$ в 15.1 раза меньше среднего значения за период 2000–2019 гг. (табл. 2). Землетрясения с максимальным классом $K_{S\text{max}}=6.7$ произошли в постройке вулкана 18 ноября в 21^h18^m ($h=-0.9$ км) и 22 декабря в 00^h31^m ($h=-0.5$ км) (рис. 2 а) [Прил. 12].

Представительность землетрясений в 2020 г. близка к таковой за период 2000–2019 гг. (табл. 2). Наклон графика повторяемости землетрясений в 2020 г. более пологий по сравнению с таковым за предыдущий 2019 г. и немного ниже среднего значения за весь период наблюдений (табл. 2).

В течение всего года на спутниковых снимках регистрировалась термальная аномалия (рис. 3 а), свидетельствующая о постоянном присутствии на поверхности горячего материала, сопровождающего экстрезивный рост купола. По данным видеонаблюдений, регистрировались пепловые выбросы и сход пирокластических потоков. Самый большой в 2020 г. пепловый выброс

высотой 5 км над уровнем моря был зафиксирован 13 июня (рис. 3 б). В исследуемый период высокий «Красный» (на стр. 2 коды указаны с маленькой буквы, далее – так же, как тут, с заглавной. Нужно единство стиля.) код опасности присваивался вулкану два дня (табл. 1), когда высота пеплового выброса превышала 8 км над уровнем моря: 8 апреля – 10 км по спутниковым и 7.5 км по сейсмическим данным, а 22 декабря – 10 км по сейсмическим и 8.5 км по спутниковым данным. Видео подтверждений этих выбросов не было, так как вулкан был закрыт облачностью. Поэтому на рис. 3 б эти пепловые выбросы не показаны.

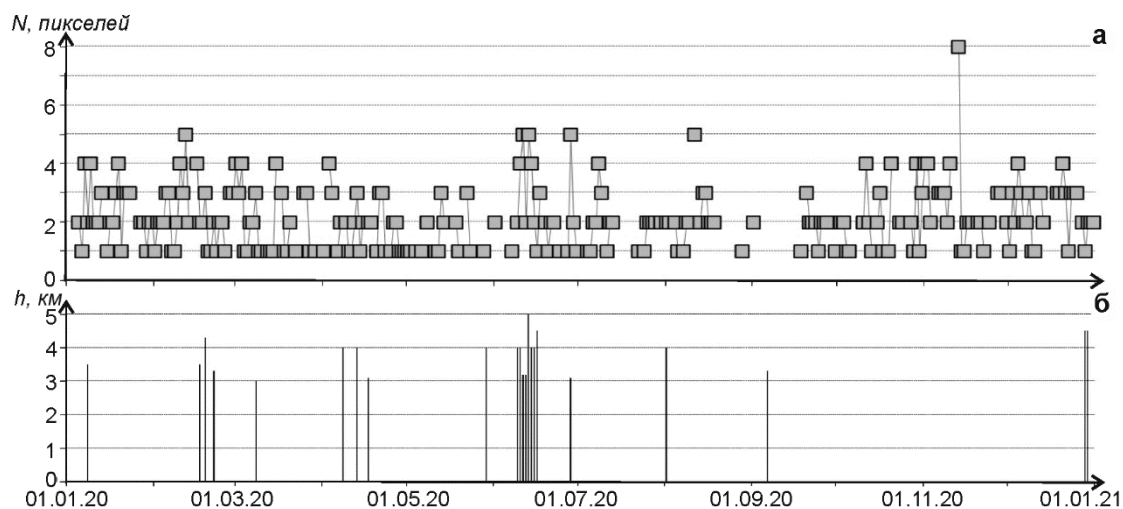


Рис. 3. Изменение во времени размера термальной аномалии на влк. Шивелуч по данным спутников NOAA 17-19 (а); высота газо-пепловых выбросов над уровнем моря по видеоданным (б) в 2020 г.

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 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 течение всего 2020 г., за исключением периода с августа по сентябрь, на влк. Ключевской наблюдалось эксплозивно-эффузивное извержение, сопровождавшееся высокой сейсмической активностью в виде вулканического дрожания (рис. 4). В 2020 г. в радиусе 7 км от вулкана и диапазоне глубин $h=4.6-35.3$ км было лоцировано 2828 землетрясений с $2.0 \leq K_s \leq 8.1$, суммарная энергия которых составила $\Sigma E = 5.1 \cdot 10^8$ Дж. (табл. 2, 3) [Прил. 12]. Представительный класс землетрясений и угол наклона графика повторяемости в 2020 г. ниже значений в 2019 г. и за период 2000–2019 гг. (табл. 2). Надо отметить, что в периоды регистрации сильного вулканического дрожания (рис. 4 б), сопровождавшего эффузивное извержение вулкана, представительный класс землетрясений повышался до $K_{\text{пред}}=5.0$ и наклон графика повторяемости был более крутым ($\gamma=1.07$). 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. 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 [12–15]. В работе [14] было показано на примере пяти вершинных извержений, что перед всеми ними наблюдалась следующая последовательность предвестников: подъем центра сейсмической энергии с глубины примерно 30 км к кратеру, появление и увеличение количества землетрясений четвертого типа, появление и нарастание амплитуды вулканического дрожания, появление и рост температуры термальной аномалии. Во время вершинных извержений землетрясения на глубине 30 км обычно не регистрируются. После вершинных извержений наблюдалась миграция сейсмичности от поверхности до глубины примерно 30 км. В 2020 г. на влк. Ключевской практически вся сейсмичность, как и ранее, была сосредоточена в верхнем (I) и нижнем (III) горизонтах (рис. 4 а, в).

В 2020 г. было лоцировано около 920 глубоких длиннопериодных землетрясений с $2.8 \leq K_s \leq 5.6$, что в 6 раз меньше, чем в предыдущий 2019 г., и ~ 3 раза меньше среднегодового значения (табл. 2). Максимальное количество $N=59$ за сутки было лоцировано 3 сентября 2020 г. (рис. 4 б) [Прил. 12]. 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 2020 г. в каталог вошло $N=1724$ поверхностных (горизонт I) землетрясений с $2.0 \leq K_s \leq 8.1$, это ~ 4.9 раза больше, чем в 2019 г. ($N=351$, $2.7 \leq K_s \leq 5.9$) (табл. 2, 3). Максимальное количество $N=48$ за сутки было лоцировано 15 сентября (рис. 4 б) [Прил. 12]. Землетрясение с $K_{s\max}=8.1$ произошло 16 сентября в 09^h04^m на глубине $h=2.6$ км под постройкой вулкана (рис. 4 а) [Прил. 12].

В табл. 2 приведены значения ΣE , $K_{\text{пред}}$ и γ для всех трех горизонтов за 2000–2020 гг.

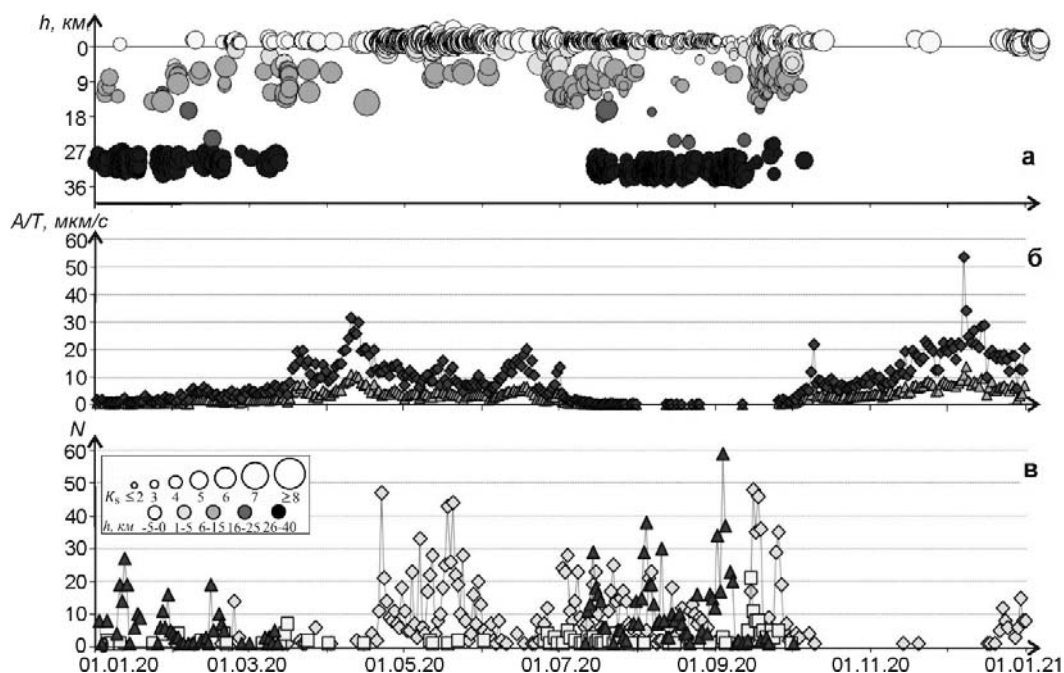


Рис. 4. Изменение во времени глубины гипоцентров h вулканических землетрясений (а); ежесуточного максимального (ромб) и среднего (треугольник) вулканического дрожания по РТСС «Цирк» (CIRR) (б); ежесуточного числа поверхностных (ромб), промежуточных (квадрат) и глубоких (треугольник) землетрясений (в), произошедших в радиусе 7 км от влк. Ключевской в 2020 г.

В исследуемый период «Красный» код опасности на влк. Ключевской выставлялся два дня, когда были зафиксированы два мощные эксплозивные извержения с высотой пеплового столба 8 км над уровнем моря – 9 апреля и 18 ноября 2020 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).

Сейсмическая активизация, сопровождавшая подготовку мощного извержения влк. Безымянный 21 октября, началась в сентябре (рис. 5), когда сейсмичность превышала фоновый уровень трое суток подряд. Согласно алгоритму прогноза [14], для влк. Безымянный уровень «выше фона» означает, что количество землетрясений с глубинами $h=-5.0 - 5.0$ км и с $K_s \geq 4$ не равно нулю ($N \geq 1$), или количество всех лоцированных событий в районе вулкана $N \geq 10$ (раздел «Пояснения» <http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>). Максимальное число событий ($N=114$) за сутки было лоцировано 21 октября (рис. 5 б) [Прил. 12]. Всего в 2020 г. в радиусе 6 км от вулкана и в диапазоне глубин $h=-2.5 - 13.3$ км было лоцировано 481 землетрясение с $1.6 \leq K_s \leq 6.1$ [Прил. 12]. Это ~ 2 раза больше, чем среднее значение за период 2000–2019 гг. Суммарная энергия, выделенная в очагах землетрясений, составила $\Sigma E=0.13 \cdot 10^8$ Дж (табл. 2, 3). $K_{\text{пред}}$ не изменился по сравнению с 2019 г., но стал немного ниже, чем за весь период 2000–2019 гг. Наклон графика повторяемости γ в 2020 г.

оказался более пологим по сравнению с таковым в 2019 г. и близким к среднему за 2000–2019 гг. (табл. 2). Максимальный энергетический класс землетрясения $K_s=6.1$ зарегистрирован 20 октября в 22^h25^m в постройке вулкана ($h=-0.9$ км) (рис. 5 а) [Прил. 12].

Подготовка к извержению влк. Безымянный в 2020 г. проходила по сценарию, несколько отличающемуся от обычного. Первое превышение фоновой сейсмичности более трех суток подряд началось 6 сентября, после чего на вулкане стали регистрироваться поверхностные землетрясения, количество и суммарная энергия ΣE которых постепенно увеличивались. В то же время такой предвестник, как температура термальной аномалии, по спутниковым данным с достоверностью 50 % [14] перед этим извержением не проявился. Начиная с 1 сентября и до 21 октября по данным Аляскинской вулканологической обсерватории (АВО) температура термальной аномалии превысила пороговое значение ($T_{ан}-T_{ф}$)=20°C только один раз – 21 сентября ($T_{ан}-T_{ф}$)≈22.7°C [14]. Обработка спутниковых снимков (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>) проводилась сотрудниками ЛИСВА.

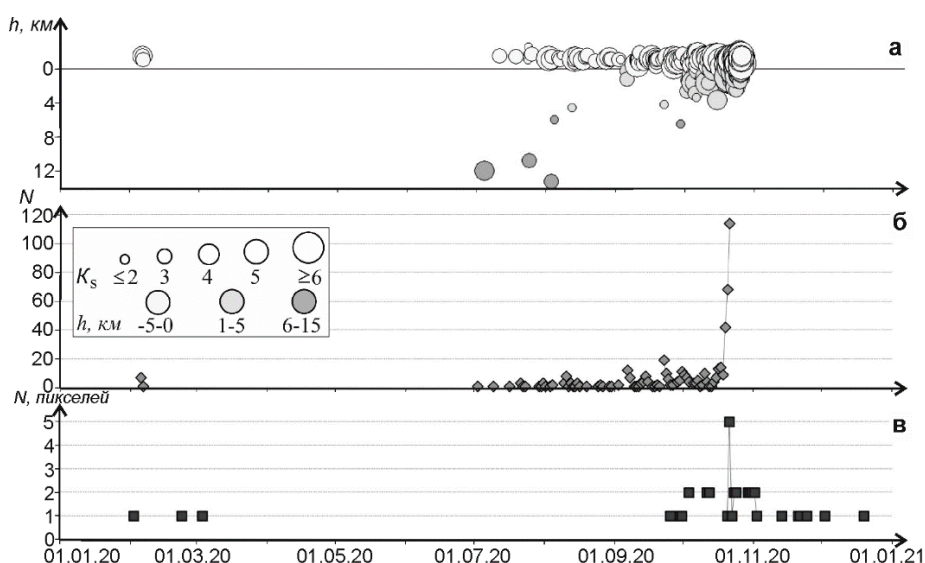


Рис. 5. Изменение во времени глубины гипоцентров h вулканических землетрясений (а); ежесуточного числа землетрясений (б), произошедших в радиусе 6 км от влк. Безымянный и размера термальной аномалии (в) по данным спутников NOAA17-19 в 2020 г.

Первое прогнозное заключение о возможности извержения, без указания его типа и масштаба, было передано в КФ РЭС 10 сентября сотрудниками лаборатории сейсмического мониторинга ЛСМ КФ ФИЦ ЕГС РАН на основе наблюдений за статистически обновленным уровнем сейсмичности [16]. Согласно заключению, вероятность извержения на ближайшую неделю составляла $P=0.13$. По мере поступления новых данных авторы продлевали прогноз, еженедельно уточняя вероятность на следующие семь дней. В заключении от 16 октября вероятность составила $P=0.64$ [17].

Используя алгоритм прогноза эксплозивных извержений влк. Безымянный [14], сотрудники ЛИСВА 4 октября передали в КФ РЭС и МЧС Камчатского края заключение со следующей формулировкой: «Начало возможного извержения (71 % вероятность) – с 4 октября по 4 ноября 2020 года. Масштаб извержения – эксплозивное извержение с высотой пепловых выбросов от 6 до 15 км над уровнем моря с возможным сходом пирокластического потока (несколько километров). Длительность извержения – от нескольких часов до нескольких суток. Ожидается возможное выпадение пепла (несколько миллиметров) в ближайших населенных пунктах (Ключи, Козыревск, Усть-Камчатск) в зависимости от направления ветра». Заключение в срочном порядке было рассмотрено на внеочередном заседании КФ РЭС, по результатам которого о готовящемся извержении влк. Безымянный были оповещены ГУ МЧС России по Камчатскому краю и другие организации согласно списку рассылки. Уточнение возможного времени начала извержения на период 20–30 октября с вероятностью 90 % было сделано 20 октября [17].

По сейсмическим и видеоданным пароксизмальная фаза извержения началась 21 октября в 20^h22^m (22 октября в 08^h22^m местного времени) и продолжалась около часа. Из-за плохих метеоусловий

эксплозивное извержение было зафиксировано только одной камерой из четырех видеосистем. Пепловая колонна поднялась выше верхней границы кадра видеонаблюдений на высоту более 8 км над уровнем моря. Оценка высоты пеплового выброса по интенсивности сейсмического сигнала программой ADAP составила 10 ± 2 км над уровнем моря [18]. Дежурный сотрудник ЛИСВА передал срочное сообщение об эксплозивном извержении через 10 минут после его начала согласно регламенту. По спутниковым данным пепловое облако достигло высоты 10 км над уровнем моря и распространялось в форме дуги от пос. Тигиль на северо-западе через пос. Усть-Камчатск на востоке и до мыса Шипунский на юге. В этот день для влк. Безымянный был выставлен самый высокий «Красный» код опасности.

По заключению КФ РЭС [17], прогнозы по методике статистической оценки уровня сейсмичности [16] и по алгоритму прогноза эксплозивных извержений влк. Безымянный [14] были признаны успешными.

Во время извержения влк. Ключевской, сопровождавшегося мощным вулканическим дрожанием, в периоды февраль–июнь и конец ноября–декабрь корректный сейсмический контроль влк. Безымянный был невозможен. В это время для вулкана выставлялся «Белый» код (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. В 2020 г. в районе вулкана было лоцировано 334 землетрясения с $2.6 \leq K_s \leq 8.6$ (табл. 3) в диапазоне глубин $h = -2.5 - 30.5$ км (рис. 6), [прил. 12].

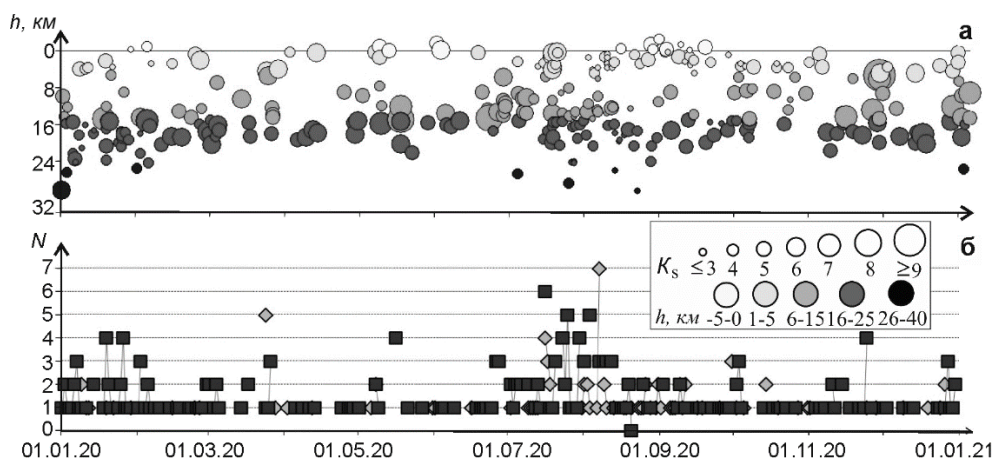


Рис. 6. Изменение во времени глубины гипоцентров h вулканических землетрясений (а); ежесуточного числа поверхностных $-5.0 \leq h \leq 5.0$ км (ромб) и глубоких $5.0 < h \leq 40.0$ км (квадрат) землетрясений (б), произошедших в радиусе 20 км от влк. Плоский Толбачик в 2020 г.

Землетрясение с $K_{s\max} = 8.6$ произошло 24 ноября в $16^h 19^m$ на глубине $h = 5.3$ км в районе реки Толуд (рис. 1, 6 а), [прил. 12].

Из табл. 2, где представлены данные по различным параметрам землетрясений, видно, что в 2020 г. в районе влк. Плоский Толбачик лоцировано землетрясений $\sim$ в 3 раза меньше, чем в 2019 году. Суммарная энергия, выделенная в очагах землетрясений, также меньше такового значения в предыдущий год $\sim$ в 20.5 раза. Угол наклона графика повторяемости γ практически не меняется на протяжении всего периода наблюдений, а представительный класс $K_{\text{пред}}$ в 2020 г. выше такового за 2019 г. и период 2000–2019 гг. Возможно, это связано с тем, что в периоды мощного извержения влк. Ключевской слабую сейсмичность лоцировать было сложно.

В 2020 г. на влк. Плоский Толбачик в основном наблюдалась фоновая сейсмическая и вулканическая активность. «Желтый» код опасности выставлялся 34 дня, когда в районе вулкана регистрировалась повышенная сейсмичность (табл. 1). В основном она наблюдалась в районе р. Толуд и потухших вулканов Большая Удина и Малая Удина. «Белый» код выставлялся 152 дня в периоды мощного извержения влк. Ключевской, когда корректный сейсмический мониторинг был невозможен.

На вулканах *Ушковский* и *Крестовский* в 2020 г. наблюдалась слабая сейсмическая активность, никаких проявлений вулканической активности не отмечено. Информация о цветовых кодах и сейсмическом режиме вулканов приведена в табл. 1–3.

Сейсмичность в районах Авачинской и Мутновско-Гореловской групп вулканов показана на рис. 7 и 8.

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.

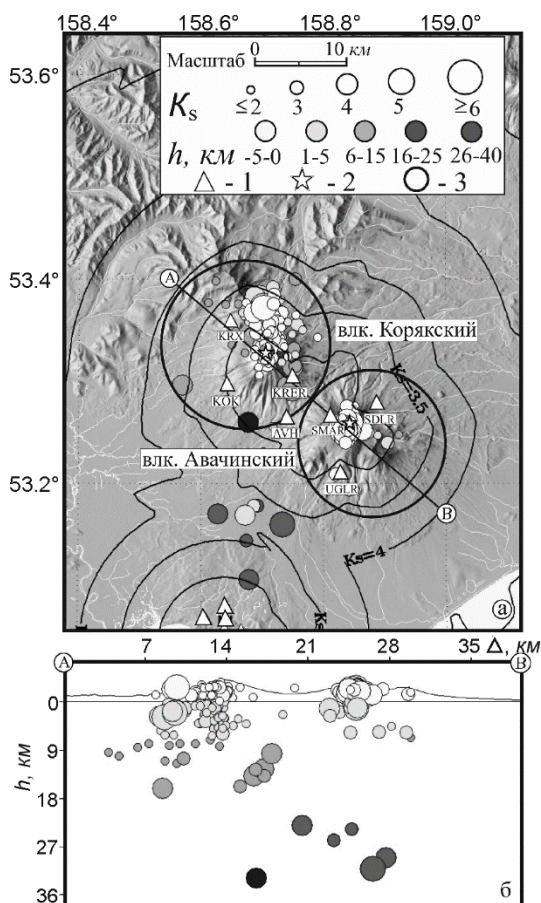


Рис. 7. Карта эпицентров землетрясений Авачинской группы вулканов в 2020 г. (а) и проекция гипоцентров на вертикальный разрез по линии А–В (б)

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.

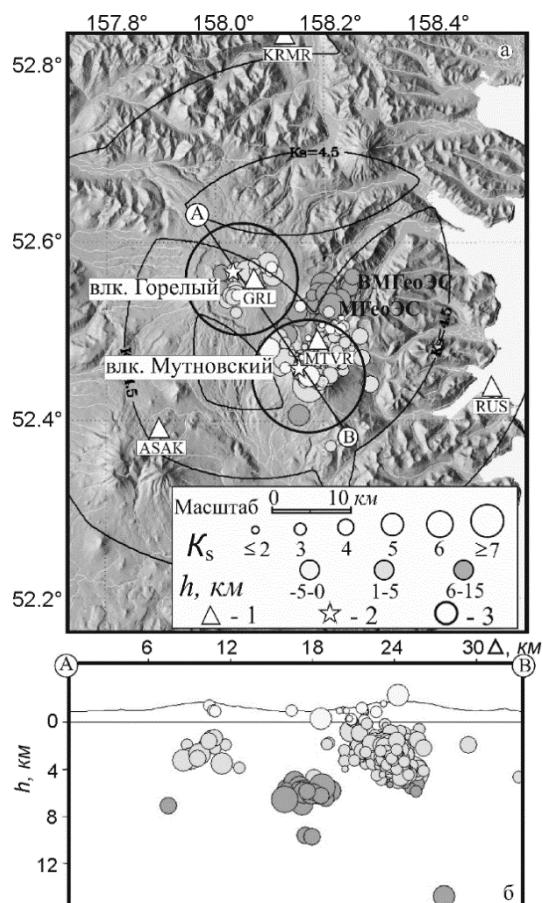


Рис. 8. Карта эпицентров землетрясений Мутновско-Гореловской группы вулканов в 2020 г. (а) и проекция гипоцентров на вертикальный разрез по линии А–В (б)

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

Таблица 4. Распределение землетрясений Авачинской группы вулканов по энергетическим классам K_s в 2020 г.

Название вулкана	$R_{\text{зоны}}, \text{ км}$	K_s					N_{Σ}	$\Sigma E, 10^6 \text{ Дж}$
		2	3	4	5	6		
Авачинский	8	91	74	8	3	1	177	1.353
Корякский	9	111	28	7	2	–	148	0.263
Вне вулканов	–	4	4	3	1	–	12	0.28
Всего	–	206	106	18	6	1	337	1.986

В 2020 г. влк. Авачинский был спокоен, сейсмичность не превышала обычный «фоновый» уровень. В радиусе 8 км от вулкана в 2020 г. в каталог вошло $N=177$ ($1.6 \leq K_S \leq 6.0$, $\Sigma E = 0.014 \cdot 10^8$ Дж) землетрясений в диапазоне глубин $h = -2.6 - 5.2$ км. Это ~ 1.6 раза меньше, чем в предыдущий 2019 год. В 2020 г. землетрясение с $K_{Smax} = 6.0$ было лоцировано в постройке влк. Авачинский ($h = -1.2$ км) 23 августа в 00^h27^m (рис. 7, 9 а) [прил. 7]. Представительность $K_{пред}$ и γ в 2020 г. практически близки значениям за период 2000–2019 гг. (табл. 5).

В январе–августе 2020 г. продолжалось свечение на западной части кромки кратера влк. Авачинский, впервые замеченное 2 декабря 2019 г. на камере видеонаблюдений [19, 20]. Повышенный «Желтый» код активности вулкана выставлялся 32 раза (табл. 1), из них только один по сейсмическим данным, в остальных случаях при наличии свечения. В радиусе 9 км от влк. Корякский в 2020 г. было лоцировано ~ 1.3 раза меньше ($N=148$, $1.6 \leq K_S \leq 4.9$, $h = -2.8 - 25.6$ км) землетрясений, чем среднегодовое количество за период 2000–2019 гг. Угол наклона графика повторяемости γ практически не меняется на протяжении всего периода наблюдений. Представительный класс землетрясений $K_{пред}$ в 2020 г. такой же, как и в 2019 г., но ниже, чем за период 2000–2019 гг. (табл. 5). Землетрясение с $K_{Smax} = 4.9$ произошло на глубине $h = 2.2$ км под постройкой влк. Корякский 8 июля в 19^h24^m (рис. 7, 9 б) [Прил. 7].

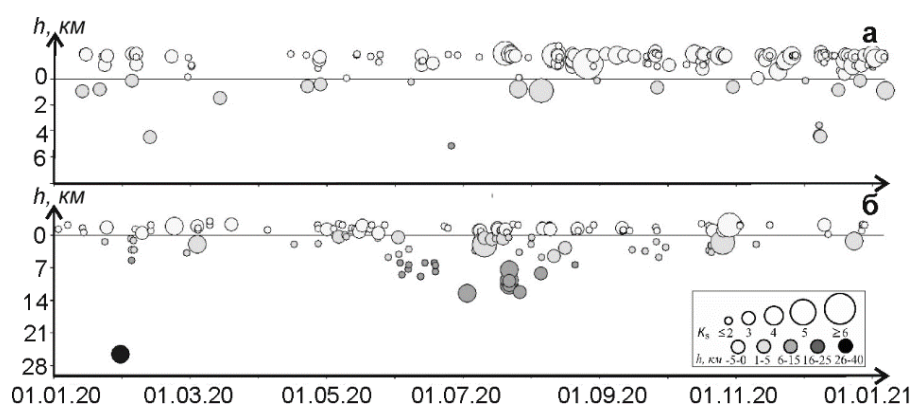


Рис. 9. Изменение во времени глубины гипоцентров вулканических землетрясений Авачинского (а) и Корякского (б) вулканов в 2020 г.

Вулканическая активность влк. Корякский проявлялась только в виде фумарольной деятельности. В 2020 г. «Желтый» код опасности из-за повышенного уровня сейсмичности выставлялся один раз (табл. 1).

Таблица 5. Число землетрясений, их суммарная сейсмическая энергия, представительный класс, угол наклона графика повторяемости для вулканов Авачинский, Корякский, Мутновский, Горелый, Кизимен, Жупановский и Камбальный в 2000–2020 гг.

Название вулкана	2000–2019 гг.				2019 г.				2020 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	178	0.075	2.6	0.59	119	0.04	2.7	0.53	177	0.01	2.2	0.68
Корякский	187	0.67	3.1	0.57	126	0.015	1.8	0.38	148	0.003	1.9	0.63
Мутновский	113	0.006	3.2	0.73	31	0.011	—	0.53	441	0.007	2.9	0.91
Горелый	268	0.08	3.5	0.86	14	0.002	—	—	20	0.01	—	—
Кизимен	4302	1382.6	5.0	0.79	7	0.414	—	—	29	0.117	—	—
Жупановский	78	1.854	4.3	0.45	12	0.39	—	—	20	0.37	—	—
Камбальный	49	12.052	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

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 в районе Мутновско-Гореловской группы вулканов при существующей сети РТСС равен $K_{\min} = 4.5$ [4, 17]. В каталог 2020 г. из этого района вошло $N=498$ землетрясений в диапазоне глубин $h = -2.2 - 14.8$ км с энергетическим классом $K_S = 1.6 - 6.8$ (табл. 6). Землетрясение $K_{Smax} = 6.8$ произошло 11 мая в 11^h36^m на глубине $h = 4.3$ км под постройкой влк. Мутновский (рис. 8) [Прил. 11].

Таблица 6. Распределение землетрясений района Мутновско-Гореловской группы вулканов по энергетическим классам K_S в 2020 г.

Название вулкана	$R_{\text{зоны}},$ <i>км</i>	K_S						N_Σ	$\Sigma E,$ 10^6 Дж
		2	3	4	5	6	7		
Мутновский	7	126	233	78	3	—	1	441	7.411
Горелый	7	—	12	5	3	—	—	20	0.494
Вне вулканов	—	4	10	15	6	2	—	37	2.068
Всего	—	130	255	98	12	2	1	498	9.973

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 2020 г. ею регистрировались спазматическое вулканическое дрожание и слабые локальные сейсмические события от вулкана.

В исследуемый период в радиусе 7 км от вершины влк. Горелый и диапазоне глубин $h=1.3-7.1$ км было лоцировано всего 20 землетрясений (табл. 6) [Прил. 11]. В сравнении со среднегодовым значением за период 2000–2019 гг., когда в 2009 г. регистрировалась высокая сейсмичность, сопровождавшая образование высокотемпературной бокки у основания стенки активного кратера, количество лоцированных в 2020 г. событий $\sim$ в 13.4 раза меньше, а высвобожденная ими суммарная энергия снизилась примерно в 8 раз (табл. 5).

РТСС «Мутновская» (MTVR) 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 2020 г. в радиусе 7 км от вулкана было лоцировано 441 землетрясение с $K_S=1.6-6.8$, $h=2.2-14.8$ км (табл. 6, [Прил. 11], рис. 10), что $\sim$ в 3.9 раза больше среднегодового значения ($N=113$) за период 2000–2019 гг. (табл. 5). Представительный класс ($K_{пред}=2.9$) для них получился близким к значению за период 2000–2019 гг., а наклон графика повторяемости немного круче ($\gamma=0.91$) (табл. 5).

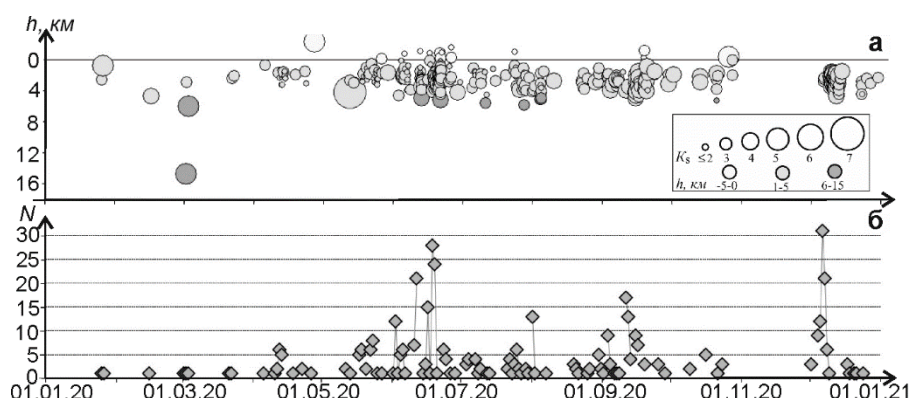


Рис. 10. Изменение во времени глубины гипоцентров h вулканических землетрясений (а) и ежесуточного числа землетрясений (б), произошедших в радиусе 7 км от влк. Мутновский в 2020 г.

«Желтый» код опасности для влк. Горелый и влк. Мутновский (табл. 1) выставлялся в основном из-за повышенного уровня сейсмичности, когда количество слабых локальных сейсмических событий превышало $N=50$ в сутки. Вулканическая активность влк. Горелый и влк. Мутновский в 2020 г. 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 $K_{min}=4.0-4.5$ (рис. 11 а).

Таблица 7. Распределение землетрясений района влк. Кизимен по энергетическим классам K_S в 2020 г.

Название вулкана	$R_{\text{зоны, км}}$	K_S							N_Σ	$\frac{\Sigma E,}{10^8 \text{ Дж}}$
		2	3	4	5	6	7	8		
Кизимен	15	1	7	10	9	1	1		29	0.117
Вне вулкана	—	—	4	4	9	5	3	1	26	1.115
Всего	—	1	11	14	18	6	4	1	55	1.232

На рис. 11 представлена карта эпицентров землетрясений (а) и проекция их гипоцентров на вертикальный разрез (б); в табл. 7. приведено распределение землетрясений из района влк. Кизимен по энергетическим классам в 2020 году. В исследуемый период в радиусе 15 км от вершины вулкана и в диапазоне глубин $h = -1 - 15.1$ км было лоцировано 29 землетрясений ($\Sigma E = 0.12 \cdot 10^8$ Дж), это ~ в 4.1 раза больше, чем в 2019 г. ($N = 7$, $\Sigma E = 0.41 \cdot 10^8$ Дж), но энергии выделено ими ~ в 3.4 раза меньше [Прил. 10], [5] (табл. 7).

Если сравнивать число землетрясений N и высвобожденную ими сейсмическую энергию ΣE со средними значениями за весь период наблюдений с 2009 г. по 2019 г. включительно, в который вошла подготовка и извержение влк. Кизимен в 2010–2011 гг., N снизилось ~ в 148 раз, а ΣE ~ в 11525 раз (табл. 5). Самое сильное землетрясение в радиусе 15 км от вулкана с $K_{Smax} = 7.0$ произошло 4 ноября 2020 г. в 17^h53^m ($h = 8.7$ км) [Прил. 10]. Максимальное на планшете (рис. 11 а) землетрясение с $K_{Smax} = 7.8$ ($h = 5.7$ км) было зарегистрировано 23 июня в 11^h02^m [Прил. 10] вне зоны вулкана в районе Щапинской гидротермальной системы.

Вулканическая активность влк. Кизимен в 2020 г. проявлялась только в виде мощной фумарольной деятельности.

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).

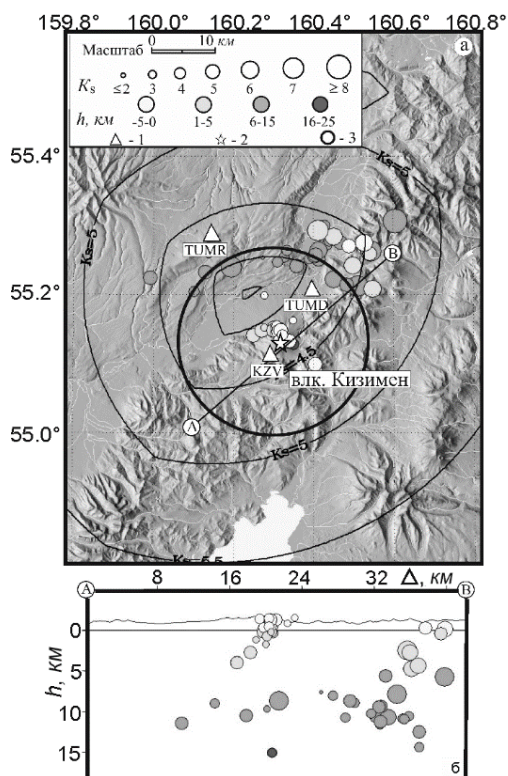


Рис. 11. Карта эпицентров землетрясений влк. Кизимен в 2020 г. (а) и проекция гипоцентров на вертикальный разрез по линии А–В (б)

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

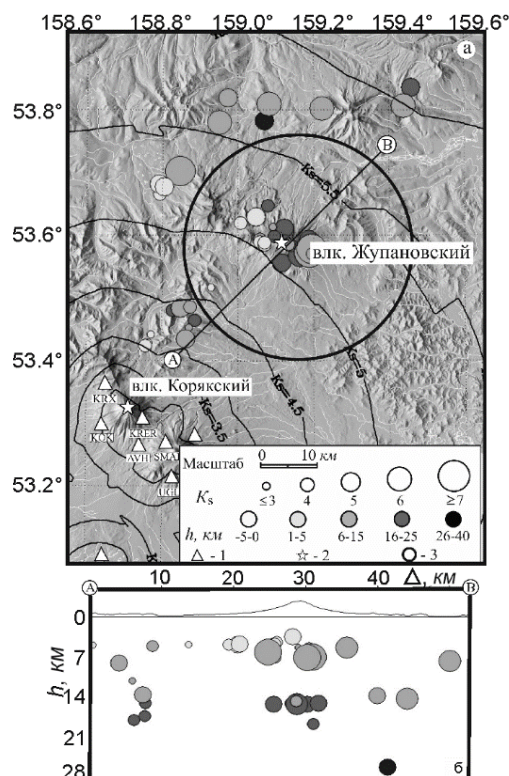


Рис. 12. Карта эпицентров землетрясений влк. Жупановский в 2020 г. (а) и проекция гипоцентров на вертикальный разрез по линии А–В (б)

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

В табл. 8. представлено распределение землетрясений из района влк. Жупановский по энергетическим классам. В 2020 г. в радиусе 20 км лоцировано всего 20 землетрясений ($3.0 \leq K_s \leq 7.3$, $h = 3.5 - 18.9$ км), суммарная энергия составила $\Sigma E = 0.37 \cdot 10^8$ Дж (рис. 12) [Прил. 8]. Землетрясение с $K_{Smax} = 7.3$ произошло на глубине $h = 7.2$ км 1 марта в 15^h59^m.

Вулканическая активность влк. Жупановский в 2020 г. проявлялась только в виде фумарольной деятельности, а сейсмичность превышала фоновую всего в 14 раз (Желтый код), табл. 1.

Таблица 8. Распределение землетрясений по энергетическим классам K_S из района влк. Жупановский в 2020 г.

Название вулкана	$R_{зоны},$ км	K_S					N_{Σ}	$\Sigma E,$ 10^8 Дж
		3	4	5	6	7		
Жупановский	20	3	11	3	1	2	20	0.372
Вне вулкана	—	4	5	7	4	1	21	0.143
Всего	—	7	16	10	5	3	41	0.515

Вулкан Камбальный является самым южным вулканом 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. Ближайшая РТСС «Паужетка» (PAU) находится в 22 км на север от вулкана. Остальные удалены на 100 км и более: «Северо-Курильск» (SKR) в ~101 км на юго-запад; «Ходутка» (KDT) – в 116 км на северо-восток. Расчетный уровень надежной регистрации землетрясений в районе влк. Камбальный составляет $K_{\min}=6.5$. Первое в историческое время извержение влк. Камбальный началось 24 марта 2017 г. и продолжалось примерно один месяц [23]. В 2020 г. в радиусе 7 км от вершины влк. Камбальный не было зарегистрировано ни одного землетрясения. На спутниковых снимках вулканическая активность в этот период не наблюдалась. «Желтый» код опасности для влк. Камбальный выставлялся три раза из-за повышенного уровня сейсмичности, когда на РТСС «Паужетка» (PAU) зарегистрировано 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 [4]. 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) [17].

В 2020 г. продолжалось извержение влк. Карымский, сопровождавшееся газо-пепловыми выбросами до 5.5 км над кратером по сейсмическим данным (9 декабря) и сходом раскаленных лавин. На РТСС КП регистрировались локальные поверхностные события, большинство из которых – взрывы в кратере, лоцировать которые было невозможно из-за удаленности станций.

Всего в 2020 г. в районе влк. Карымский было лоцировано $N=4$ землетрясения ($5.4 \leq K_S \leq 6.6$, $h=6.8-15.0$ км), три из них – в радиусе 10 км от вершины вулкана. Землетрясение с $K_{S\max}=6.6$ произошло 26 сентября в 14^h34^m на глубине $h=6.8$ км под постройкой вулкана [Прил. 9].

В исследуемый период повышенный код опасности «Оранжевый» на влк. Карымский выставлялся 97 дней и «Желтый» – 89 дней (табл. 1).

Закключение. Всего за 2020 г. в районе Северной, Авачинской и Мутновско-Гореловской групп вулканов, а также в районе вулканов Кизимен, Жупановский и Карымский было лоцировано 4880 землетрясений, высвобожденная в их очагах суммарная сейсмическая энергия составила $\Sigma E=1.56 \cdot 10^9$ Дж.

В 2020 г. на влк. Ключевской наблюдались вершинные эксплозивные и эксплозивно-эффузивные извержения, сопровождавшиеся повышенной сейсмической активностью, связанной с магматическими процессами. Несмотря на то, что в 2020 г. было лоцировано землетрясений ($N=2828$, $\Sigma E=5.1 \cdot 10^8$ Дж) меньше ~ в 2.1 раза, чем в 2019 г. ($N=5835$, $\Sigma E=4.0 \cdot 10^8$ Дж), их суммарная энергия ~ в 1.3 раза выше.

Высокая вулканическая активность с эксплозивными извержениями и сходом раскаленных лавин наблюдалась на влк. Шивелуч. Из-за отсутствия данных с РТСС «Сорокина» (SRKR) (с января по октябрь) лоцировать слабую сейсмичность ($K_S < 4.0$), сопровождавшую рост активного купола, было невозможно.

В 2020 г. на влк. Безымянный было зафиксировано одно пароксизмальное эксплозивное извержение 21 октября с высотой пепловых выбросов до 10 км над уровнем моря. Подготовка к извержению сопровождалась высокой сейсмической активностью. Извержению влк. Безымянный был дан успешный прогноз.

На влк. Плоский Толбачик, влк. Кизимен и влк. Жупановский в 2020 г. наблюдалась фоновая сейсмическая активность. Практически все землетрясения регистрировались вне зоны вулканов. Для района влк. Плоский Толбачик это зоны р. Толуд и потухших вулканов Большая Удина и Малая Удина, для района влк. Кизимен это зона Шапинской гидротермальной системы, для влк. Жупановский – район Жупановских Востряков. Вулканическая активность этих вулканов проявлялась только в виде фумарольной деятельности на влк. Жупановский и влк. Кизимен.

После первого в историческое время извержения влк. Камбальный, которое произошло с 24 марта по 23 апреля 2017 г., сейсмическая и вулканическая активность в 2020 г. 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 четыре землетрясения.

В подготовке электронных приложений к данной статье принимали участие Должикова А.Н., Кожевникова Т.Ю., Матвеев Е.А., Назарова З.А., Напылова Н.А., Напылова О.А., Соболевская О.В., Толокнова С.Л., Чебров Д.В., Шевченко Ю.В.

Электронное приложение App11_Kamchatka_2020 (<http://www.gsras.ru/zse/app-27.html>): 1 – Сейсмические станции сети Камчатки и Командорских островов в 2020 г.; 7 – Каталог землетрясений Авачинской группы вулканов в 2020 г.; 8 – Каталог землетрясений вулкана Жупановский в 2020 г.; 9 – Каталог землетрясений вулкана Карымский в 2020 г.; 10 – Каталог землетрясений вулкана Кизимен в 2020 г.; 11 – Каталог землетрясений Мутновско-Гореловской группы вулканов в 2020 г.; 12 – Каталог землетрясений Северной группы вулканов в 2020 году.

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., Тихонов С.А., Дроздин Д.В., Дроздина С.Я., Матвеев Е.А., Митюшкина С.В., Салтыков В.А., Сеньюков С.Л., Серафимова Ю.В., Сергеев В.А., Яшук В.В. Камчатка. Система сейсмического мониторинга и прогнозирования на Камчатке и ее развитие. Основные результаты наблюдений в 2016–2020 гг. // Российский сейсмологический журнал. – 2021. – Т. 3, № 3. – С. 28–49. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.3.02>
4. Чебров Д.В., Дроздина С.Я., Сеньюков С.Л., Шевченко Ю.В., Митюшкина С.В. Камчатка и Командорские острова // Землетрясения России в 2020 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022. – С. 73–84.
5. Сеньюков С.Л., Нуждина И.Н. Сейсмический мониторинг вулканов Камчатки // Землетрясения Северной Евразии. – 2023. – Вып. 26 (2018–2019 г.). – С. 354–370. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2023.26.31> EDN: EADZDV
6. Дроздин Д.В., Дроздина С.Я. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов «DIMAS» // Сейсмические приборы. – М.: ИФЗ РАН, 2010. – Т. 46, № 3. – С. 22–34.
7. Кузин И.П. Фокальная зона и строение верхней мантии в районе Восточной Камчатки. – М.: Наука, 1974. – 145 с.
8. Weimer S. A software package to analyze seismicity: ZMAP // Seismological Research Letters. – 2001. – V. 72, № 2. – P. 374–383.
9. 2020-ER_APP19_Volcano-regions-of-Kamchatka_2020.xls // Землетрясения России в 2020 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022. – [Электронное приложение]. – URL: http://www.gsras.ru/zr/app_20.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., 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.
14. Сеньюков С.Л. Прогноз извержений вулканов Ключевской и Безымянный на Камчатке. – Saarbrücken: LAP LAMBERTS Academic Publishing. – 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. Салтыков В.А. Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. – 2011. – № 2. – С. 53–59.
17. Сениуков С.Л., Нуждина И.Н., Чебров Д.В. Вулканы Камчатки // Землетрясения России в 2020 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022. – С. 99–107.
18. Близнецов В.Е., Сениуков С.Л. Программа АДАР для автоматического выделения пепловых выбросов и расчета их высоты по сейсмологическим данным // Сейсмические приборы. – 2015. – Т. 51, № 1. – С. 46–59.
19. Сениуков С.Л., Нуждина И.Н., Чебров Д.В. Вулканы Камчатки // Землетрясения России в 2019 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. – С. 96–105.
20. Сениуков С.Л., Нуждина И.Н., Дроздина 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. Масуренков Ю.П., Флоренский И.В., Мелекесцев И.В. Вулкан Жупановский // Действующие вулканы Камчатки. – М.: Наука, 1991. – Т. II. – С. 218–225.
22. Литасов Н.Е., Вачевская А.А. Вулкан Камбальный // Действующие вулканы Камчатки. – М.: Наука, 1991. – Т. II. – С. 396–405.
23. Сениуков С.Л., Нуждина И.Н. Сейсмический мониторинг вулканов Камчатки // 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
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 2020

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 analysis of seismic activity of the Northern (Shiveluch, Kluchevskoy, Bezymianny, Plosky Tolbachik, Krestovsky and Ushkovsky), Avacha (Avachinsky and Koryaksky), Mutnovsky-Gorely volcano group and Kizimen, Zhupanovsky, Karymsky and Kamalny volcanoes for 2020 are presented. 3945 earthquakes with $K_s=1.6–8.6$ were located for Northern volcano group, 337 earthquakes with $K_s=1.6–6.0$ – for Avacha volcano group, 498 earthquakes with $K_s=1.6–6.8$ – for Mutnovsky-Gorely volcano group, 55 earthquakes with $K_s=2.4–7.8$ for Kizimen volcano, 41 earthquakes with $K_s=2.6–7.3$ for Zhupanovsky volcano, and 4 earthquakes with $K_s=5.4–6.6$ – for Karymsky 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 2020: an intensive volcanic activity of Shiveluch volcano associated with new cone, the paroxysmal explosive eruption 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. (2024). [Seismicity of the volcanic areas of Kamchatka in 2020]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 27(2020), 347–363. (In Russ.). <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2024.27.31> EDN: XPLRMS

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., Tikhonov, S.A., Droznin, D.V., Droznina, Ya., Matveenko, E.A., Mityushkina, S.V., Saltykov, V.A., Senyukov, S.L., Serafimova, Yu.K., Sergeev, V.A., & Yashchuk, V.V. (2021). [Kamchatka seismic monitoring and Earthquake prediction system and its evolution. Main results of observations in 2016–2020]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 3(3), 28–49. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.3.02>
4. Chebrov, D.N., Droznina, S.Ya., Senyukov, S.L., Shevchenko, Yu.V., & Mityushkina, S.V. (2022). [Kamchatka and Komandor Islands]. In *Zemletriaseniia Rossii v 2020 godu* [Earthquakes in Russia, 2020] (pp. 73–84). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
5. 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
6. Droznin, D.V., & Droznina, S.Ya. (2010). [Interactive program “DIMAS” of the seismic signal processing]. *Seismic Instruments*, 46(3), 22–34. (In Russ.).
7. 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.).
8. Weimer, S. (2001). A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seismological Research Letters*, 72(2), 374–383.
9. 2020-ER_APP19_Volcano-regions-of-Kamchatka_2020.xls. (2022). In *Zemletriaseniia Rossii v 2020 godu* [Earthquakes in Russia in 2020]. Obninsk, Russia: GS RAS Publ. Electronic supplement. Retrieved from http://www.gsras.ru/zr/app_20.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. (In Russ.).
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.Ya., 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. Saltykov, V.D. (2011). *Statisticheskaya otsenka urovnya seismichnosti: metodika i rezul'taty primeneniia na primere Kamchatki* [A statistical estimate of seismicity level: the method and results of application of Kamchatka]. *Vulkanologiya i seismologiya* [Journal of Volcanology and Seismology], 2, 53–59. (In Russ.).
17. Seniukov, S.L., Nuzhdina, I.N., & Chebrov, V.N. (2022). [Volcanoes of Kamchatka]. In *Zemletriaseniia Rossii v 2020 godu* [Earthquakes in Russia, 2020] (pp. 99–107). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
18. 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.).
19. Seniukov, S.L., Nuzhdina, I.N., & Chebrov, V.N. (2021). [Volcanoes of Kamchatka]. In *Zemletriaseniia Rossii v 2019 godu* [Earthquakes in Russia, 2019] (pp. 96–105). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).

20. Seniukov, S.L., Nuzhdina, I.N., Droznina, S.Ya., Kozhevnikova, T.Iu., Nazarova, Z.A., & Sobolevskaya, O.V. (2021). [Seismicity of Avacha volcano in 1994–2000]. In *Problemy kompleksnogo geofizicheskogo monitoringa seismoaktivnykh regionov. [Elektronnyy resurs]: Trudy Vos'moj Vserossiyskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* [Problems of complex geophysical monitoring of seismoactive regions [Electronic resource]: Materials of the VIII All-Russian Scientific and Technical Conference with international Participation. Petropavlovsk-Kachatsky] (pp 221–227). Petropavlovsk-Kachatsky, Russia: KB FRC GS RAS Publ. (In Russ.).
21. 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.).
22. 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.).
23. 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> EDN: OFOFMZ
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.).