

IV. СЕЙСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ВУЛКАНОВ

УДК 550.348.438(517.66)

СЕЙСМИЧНОСТЬ ВУЛКАНИЧЕСКИХ РАЙОНОВ КАМЧАТКИ в 2021 году

С.Л. Сеньюков, И.Н. Нуждина

Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия, 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 в 2021 году. В районе Северной группы вулканов в 2021 г. лоцировано 7599 землетрясений с $K_S=1.6-10.6$, Авачинской – 385 с $K_S=1.6-9.4$, Мутновско-Гореловской – 295 с $K_S=1.9-6.9$, в районе влк. Кизимен – 3397 землетрясений с $K_S=1.8-12.0$, влк. Жупановский – 17 событий с $K_S=3.0-6.1$. Приведены карты эпицентров, дано распределение землетрясений по энергетическим классам, рассчитано общее количество выделившейся сейсмической энергии. По данным всех видов наблюдений в 2021 г. зафиксированы: интенсивная вулканическая деятельность влк. Шивелуч, связанная с ростом нового купола; завершение вершинного эксплозивно-эффузивного извержения влк. Ключевской и образование нового «несубтерминального» побочного прорыва на его склоне. Все периоды активизаций вулканов детально прослежены и описаны.

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 2021 году // Землетрясения Северной Евразии. – 2025. – Вып. 28 (2021). – С. 328–343. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2025.28.31> EDN: XYSAJX

Введение. В 2021 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. В 2021 г. в сеть РТСС были добавлены три новые станции [Приложение 1]. В районе Северной группы вулканов были установлены станции «Удина» (UDINA) и «Юлия Куганенко» (YKUG), данные с которых стали использовать с 30 сентября. В районе Авачинской группы вулканов 25 октября была введена в эксплуатацию РТСС «Козельский» (KZL) [3, 4]. 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.

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].

Каталоги вулканических землетрясений. 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»: $\varphi=53.90-54.40^\circ\text{N}$, $\lambda=159.20-159.80^\circ\text{E}$, а также «района влк. Камбальный»: $\varphi=51.20-51.50^\circ\text{N}$, $\lambda=156.50-157.10^\circ\text{E}$. Все

события сгруппированы в пять каталогов [Приложение 7–11]. Каждому землетрясению в каталогах присвоено название соответствующего вулкана, если оно произошло в пределах установленного радиуса выборки для этого вулкана. Если землетрясение находится в вулканическом районе, но вне радиусов выборок, то в каталогах, а также ниже по тексту статьи в соответствующих таблицах оно обозначается как «вне вулканов». Следует отметить, что каталоги, опубликованные ранее в сборнике «Землетрясения России в 2021 году» [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, 11, 12) и обычно показывают возможный, ожидаемый уровень на площади, оконтуренной соответствующей изолинией, при условии работы всех станций, что не всегда выполняется. Поэтому фактический представительный класс $K_{\text{пред}}$ обычно получается несколько выше. Под $K_{\text{пред}}$ понимается значение представительного класса для выборки землетрясений из определенной области за определенный промежуток времени.

Анализ данных. Как и в предыдущие годы, для каждого вулкана ежедневно выставлялся цветовой код опасности, учитывающий сейсмические, видео- и спутниковые данные. Цветовая шкала имеет четыре основные градации активности: «Красный», «Оранжевый», «Желтый» и «Зеленый». Дополнительный «Белый» код обозначает, что опорная сейсмическая станция не работала в эти сутки. Уровень сейсмической и вулканической активности, соответствующий цветовому коду, описан в [10]. Подробные результаты мониторинга активных вулканов Камчатки в 2021 г. публикуются 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 в году с определенным цветовым кодом активности на вулканах Камчатки за период 2000–2019 гг. и отдельно в 2020 и 2021 гг.

Вулкан\Код	2000–2019 (среднегодовое)					2020					2021				
	Б	З	Ж	О	К	Б	З	Ж	О	К	Б	З	Ж	О	К
Шивелуч	13	85	157	103	7	–	33	310	21	2	1	82	217	65	–
Ключевской	6	211	111	34	3	–	65	109	187	5	–	232	73	58	2
Безымянный	69	253	36	2	1	–	200	155	8	2	36	224	105	–	–
Пл. Толбачик	24	306	23	13	0	152	180	34	–	–	27	307	31	–	–
Авачинский	5	357	3	–	–	9	325	32	–	–	17	348	–	–	–
Корякский	2	358	5	–	–	2	363	–	–	–	17	348	–	–	–
Мутновский	42	266	56	1	–	4	122	240	–	–	128	108	129	–	–
Горелый	36	119	210	–	–	–	291	75	–	–	–	345	20	–	–
Кизимен	16	219	61	68	1	21	345	–	–	–	3	357	5	–	–
Жупановский	2	278	46	10	2	2	350	14	–	–	11	352	2	–	–
Камбальный	57	272	13	3	–	1	362	3	–	–	1	363	1	–	–
Карымский	49	87	111	117	1	13	167	89	97	–	11	155	71	128	–

В таблицах 1, 5 и далее по тексту приведены результаты комплексного мониторинга вулканов Горело-Мутновской группы и влк. Кизимен, начиная с 2009 г., влк. Жупановский – с 2013 г., влк. Камбальный – с 2017 г.

Как следует из табл. 1, на основании комплексных наблюдений в течение 2000–2020 гг. лидирующее положение по активности занимали влк. Шивелуч и влк. Ключевской. Следующими по активности в этот период были влк. Безымянный и влк. Карымский. В 2021 г. наибольшая активность наблюдалась на влк. Ключевской, для него два раза выставлялся «Красный» код опасности. Далее рассмотрим каждый вулкан в отдельности.

Северная группа вулканов. Каталог землетрясений Северной группы вулканов за 2021 г. содержит 7599 землетрясений, что в ~1.9 раза больше, чем в 2020 г. ($N=3945$), и соответствует среднегодовому значению ($N_{\text{ср}}$) за период 2000–2020 гг. Энергия, выделенная в очагах землетрясений ($\Sigma E=575.16 \cdot 10^8$ Дж), в ~42 раза больше таковой в 2020 г. и в ~1.1 раза больше среднегодового значения ($\Sigma E_{\text{ср}}$) за период 2000–2020 гг. (табл. 2), [Приложение 11].

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 2021 г.

была зона влк. Ключевской. Здесь произошло 55.2% землетрясений от общего числа событий, вошедших в каталог. Также высокая сейсмическая активность регистрировалась в зоне влк. Шивелуч (27.1%) и влк. Плоский Толбачик (6.6%) (табл. 2), [Приложение 11]. Представительность землетрясений и угол наклона графика повторяемости для района Северной группы вулканов в 2021 г. ($K_{пред}=3.5$, $\gamma=0.53$) и в 2020 г. ($K_{пред}=3.5$, $\gamma=0.47$) близки по своим значениям, но ниже, чем за весь период 2000–2020 гг. ($K_{пред}=4.4$, $\gamma=0.87$) (табл. 2).

Таблица 2. Годовые значения числа землетрясений N , их суммарной сейсмической энергии ΣE , угла наклона графика повторяемости γ и представительный энергетический класс $K_{пред}$ для вулканов Северной группы в 2000–2021 гг.

Название вулкана	2000–2020				2020				2021			
	$N_{ср}$	$\Sigma E_{ср}$, 10^8 Дж	$K_{пред}$	γ	N	ΣE , 10^8 Дж	$K_{пред}$	γ	N	ΣE , 10^8 Дж	$K_{пред}$	γ
Северная группа	7545	545.47	4.4	0.87	3945	13.7	3.5	0.47	7599	575.16	3.5	0.53
Шивелуч	2857	6.68	4.5	0.87	165	0.58	4.7	0.56	2062	2.45	4.7	0.99
Ключевской	3880	385.98	4.5	0.95	2828	5.1	3.6	0.46	4197	7.89	3.3	0.46
I горизонт	1117	3.49	4.0	0.56	1724	4.35	3.5	0.35	3017	1.38	3.3	0.69
II горизонт	72	380.5	4.0	0.58	183	0.58	3.9	0.43	42	2.54	–	–
III горизонт	2691	2.01	4.5	0.93	921	0.16	3.8	1.0	1138	3.96	3.8/	0.36
Безымянный	258	0.42	4.0	0.84	481	0.13	3.3	0.6	264	0.01	2.9	0.86
Пл. Толбачик	289	118.72	4.0	0.48	334	6.87	5.0	0.6	502	554.49	4.2	0.42
Крестовский и Ушковский	72	7.05	4.0	0.5	11	0.001	–	–	154	6.32	3.0	0.46

Таблица 3. Распределение числа землетрясений по энергетическим классам K_s для Северной группы вулканов в 2021 году

Название вулкана	$R_{зонн}, км$	K_s										N_{Σ}	ΣE , 10^8 Дж	
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11			
Шивелуч	12	21	326	823	759	128	5						2062	2.45
Ключевской	7	116	1907	1364	502	285	22	1					4197	7.89
Безымянный	6	62	127	72	3								264	0.01
Плоский Толбачик	20	12	149	213	89	26	6	3	2	1	1		502	554.49
Крестовский и Ушковский	10.1	24	106	21	2				1				154	6.32
Вне вулканов		23	155	163	62	9	7	1					420	4.00
Всего		258	2770	2656	1417	448	40	5	3	1	1		7599	575.16

В 2021 г. землетрясение с максимальным среди событий Северной группы вулканов энергетическим классом $K_{Smax}=10.6$ произошло 24 января в 13^h49^m на глубине $h=0.3$ км в зоне влк. Плоский Толбачик [Приложение 11]. Ниже приводится описание активности вулканов Северной группы по инструментальным и визуальным наблюдениям.

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

В 2021 г. на влк. Шивелуч продолжалось умеренное, а временами сильное экструзивно-эксплозивное извержение, связанное с ростом нового купола в активном кратере вулкана [12, 13]. Новый экструзивный купол был впервые обнаружен 12 мая 2001 г. сотрудником Института вулканологии ДВО РАН Двигало В. Н. Высокая сейсмическая и вулканическая активность наблюдалась в течение всего года. Во время извержения наблюдались умеренные и сильные газо-пепловые выбросы, сопровождающиеся сходом пирокластических потоков и горячих лавин. Все эти явления генерировали сейсмические события и вулканическое дрожание.

Из-за неустойчивой в течение года работы станций в районе влк. Шивелуч (рис. 1), лоцировать слабые землетрясения ($K_s < 4.0$) не всегда было возможно (рис. 2) [Приложение 11]. Всего в 2021 г. в радиусе 12 км от влк. Шивелуч и в диапазоне глубин $h=-2.2-29.0$ км (рис. 2 а, б) было лоцировано 2062 землетрясения, что в ~12.5 раза больше, чем в 2020 г. ($N=165$), но меньше среднегодового значения ($N_{ср}$) за период 2000–2020 гг. в ~1.4 раза. Высвобождено энергии в очагах землетрясений в ~4.2 раза больше, чем в 2020 г., но меньше среднегодового значения ($\Sigma E_{ср}$) за период 2000–2020 гг. (табл. 2, 3). Землетрясение с максимальным классом $K_{Smax}=7.4$ произошло в постройке вулкана 17 июня в 18^h26^m ($h=-0.5$ км) (рис. 2 а) [Приложение 11].

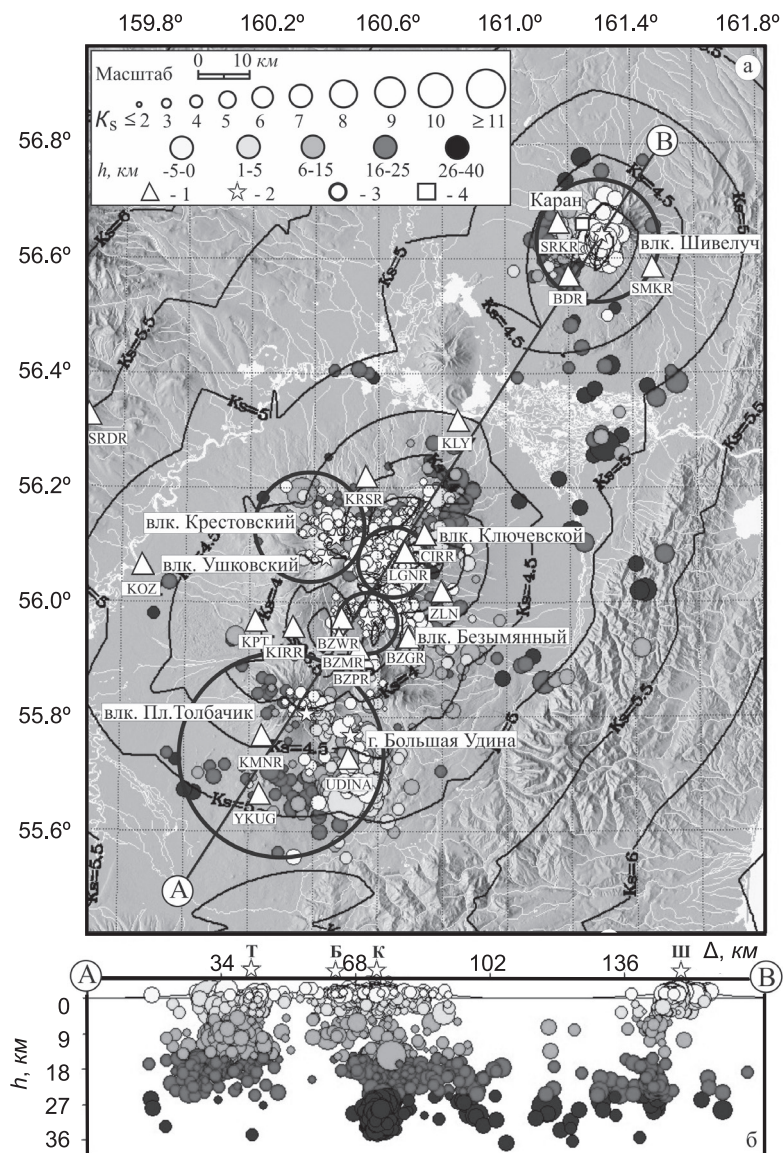


Рис. 1. Карта эпицентров (а) землетрясений Северной группы вулканов за 2021 г. и проекция гипоцентров (б) на вертикальную плоскость, проходящую по линии А–В

1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан; 3 – окружность, оконтуривающая область выборки землетрясений, принадлежащих вулкану; 4 – экструзивный купол Каран. Радиусы областей для разных вулканов равны: Шивелуч (Ш) – 12 км, Ключевской (К) – 7 км, Крестовский и Ушковский – 10.1 км, Безымянный (Б) – 6 км, Плоский Толбачик (Т) – 20 км. Изолиниями отмечен теоретический уровень надежной регистрации K_{min} .

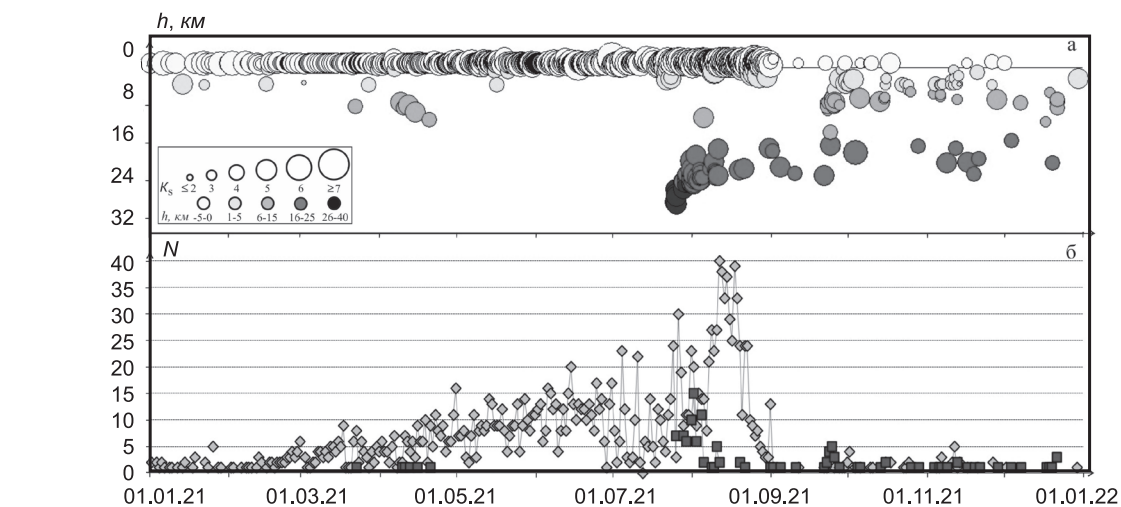


Рис. 2. Изменение во времени глубины гипоцентров h вулканических землетрясений (а); ежесуточного числа поверхностных ($-5.0 \leq h \leq 5.0$ км) (ромб) и глубоких ($5.0 < h \leq 40.0$ км) (квадрат) землетрясений (б), лоцированных в радиусе 12 км от вулк. Шивелуч в 2021 г.

Представительный класс землетрясений в 2021 г. не изменился по сравнению с таковым в предыдущем 2020 г. и близок к среднегодовому значению за период 2000–2020 гг. (табл. 2). Наклон графика повторяемости землетрясений более крутой по сравнению с таковым в 2020 г. и близок среднегодовому значению за весь период наблюдений (табл. 2).

В январе–июле практически вся сейсмичность регистрировалась в постройке влк. Шивелуч в районе активного купола, а единичные землетрясения лоцировались под западным сектором постройки вулкана в районе экструзии Каран [12] на глубине ($h \approx 6\text{--}11$ км). Начиная с 25 июля наблюдался рост количества землетрясений на глубине до $h \approx 29$ км под куполом Каран [12] (рис. 1, 2).

В течение всего года на спутниковых снимках регистрировалась термальная аномалия (рис. 3 а), свидетельствующая о постоянном присутствии на поверхности горячего материала, сопровождающего экструзивный рост купола. По данным видеонаблюдений регистрировались пепловые выбросы и сход пирокластических потоков. По сейсмическим данным пепловые выбросы высотой 6 км над уровнем моря были зарегистрированы 22 июня и 26 июля. По данным видеонаблюдения в 2021 г. максимальная высота пепловых выбросов 5 км над уровнем моря была зафиксирована 17 июля, 11 и 30 августа (рис. 3 б). В исследуемый период высокий «Оранжевый» код опасности присваивался вулкану 65 дней (табл. 1).

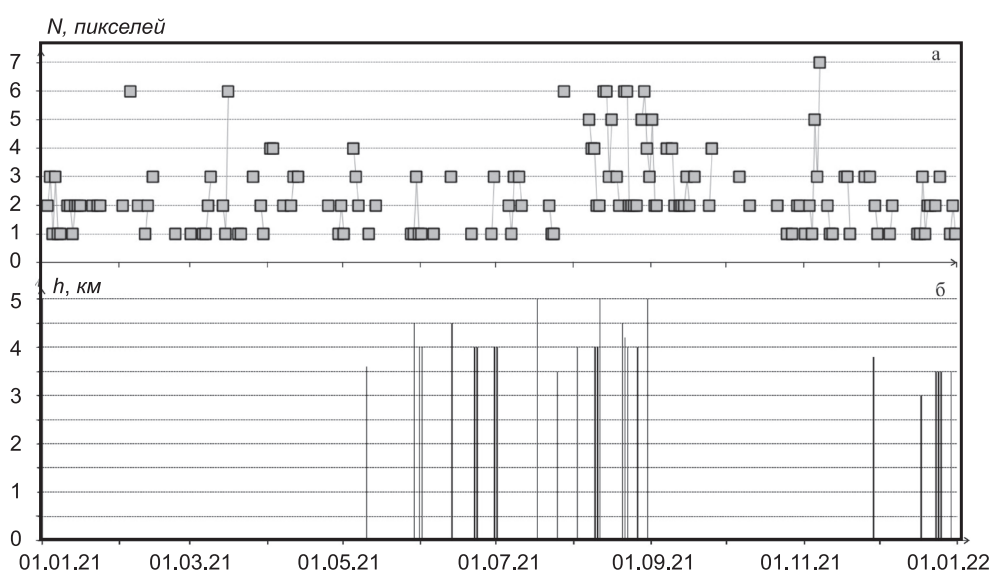


Рис. 3. Изменение во времени размера термальной аномалии на влк. Шивелуч по данным спутников NOAA 17–19 (а) и высота газо-пепловых выбросов над уровнем моря по видеоданным (б) в 2021 г.

Вулкан Ключевской. Существующая сеть станций (рис. 1) позволяет регистрировать при благоприятных условиях землетрясения от $K_{\min}=3$ 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 январе продолжалось вершинное эксплозивно-эффузивное извержение, начавшееся 4 октября 2020 г., с излиянием лавового потока по юго-восточному склону. Извержение сопровождалось высокой сейсмической активностью в виде вулканического дрожания (рис. 4). 7 февраля амплитуда вулканического дрожания A/T_{\max} резко упала с 34 мкм/сек до 0.9 мкм/сек по РТСС «CIRR», и вершинное извержение завершилось, а 18 февраля впервые за 30 лет был зафиксирован «несубтерминальный» побочный прорыв на северо-западном склоне в $\sim 3.5\text{--}4$ км от кратера. Впоследствии прорыв был назван именем Г. С. Горшкова. Это побочное извержение не было спрогнозировано в реальном режиме времени. Ретроспективный анализ сейсмичности позволил установить следующие факты. После завершения вершинного извержения 7 февраля средняя амплитуда вулканического дрожания резко уменьшилась в 16 раз. Это позволило зарегистрировать рой поверхностных землетрясений под центральным кратером 7–8 февраля ($N=128$, $2.9 \leq K_s \leq 7.3$, $h = -1.4\text{--}3.8$ км) [Приложение 11]. При этом эпицентры некоторых событий были смещены к северо-западу от вершины. К началу нового побочного извержения, свечение от которого было замечено 18 февраля, уже большая часть эпицентров землетрясений сместилась в этом направлении, хотя значение смещений в большинстве случаев не превышало точности локации этих событий в плане. Центр тяжести эпицентров землетрясений примерно совпал с местом прорыва [14, 15].

В 2021 г. в радиусе 7 км от вулкана и диапазоне глубин $h = -4.4-35.3$ км было лоцировано 4197 землетрясений с $1.6 \leq K_s \leq 8.4$, суммарная энергия которых составила $\Sigma E = 7.89 \cdot 10^8$ Дж. (табл. 2, 3) [Приложение 11]. Представительный класс землетрясений и угол наклона графика повторяемости в 2021 г. близки к таковым в 2020 г., но ниже, чем среднегодовые значения за период 2000–2020 гг. (табл. 2). Надо отметить, что в периоды регистрации сильного вулканического дрожания (рис. 4 б), сопровождавшего эффузивное извержение вулкана, представительный класс землетрясений повышался до $K_{\text{пред}} = 5.8$, и наклон графика повторяемости был более крутым ($\gamma = 1.52$). 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 $\rightarrow -5.0 \leq h \leq 5.0$ км); промежуточные (II $\rightarrow 5.0 < h \leq 20.0$ км) и глубокие (III $\rightarrow 20.0 < h < 40.0$ км) (табл. 3).

Характер сейсмичности вулкана связан с притоком мантийных магм в промежуточный магматический очаг на глубинах $h = 20-35$ км и дальнейшим их подъемом в постройку вулкана при вершинном извержении [16–19, 14]. В 2021 г. на влк. Ключевской практически вся сейсмичность, как и ранее, была сосредоточена в верхнем (I) и нижнем (III) горизонтах (рис. 4 а, в).

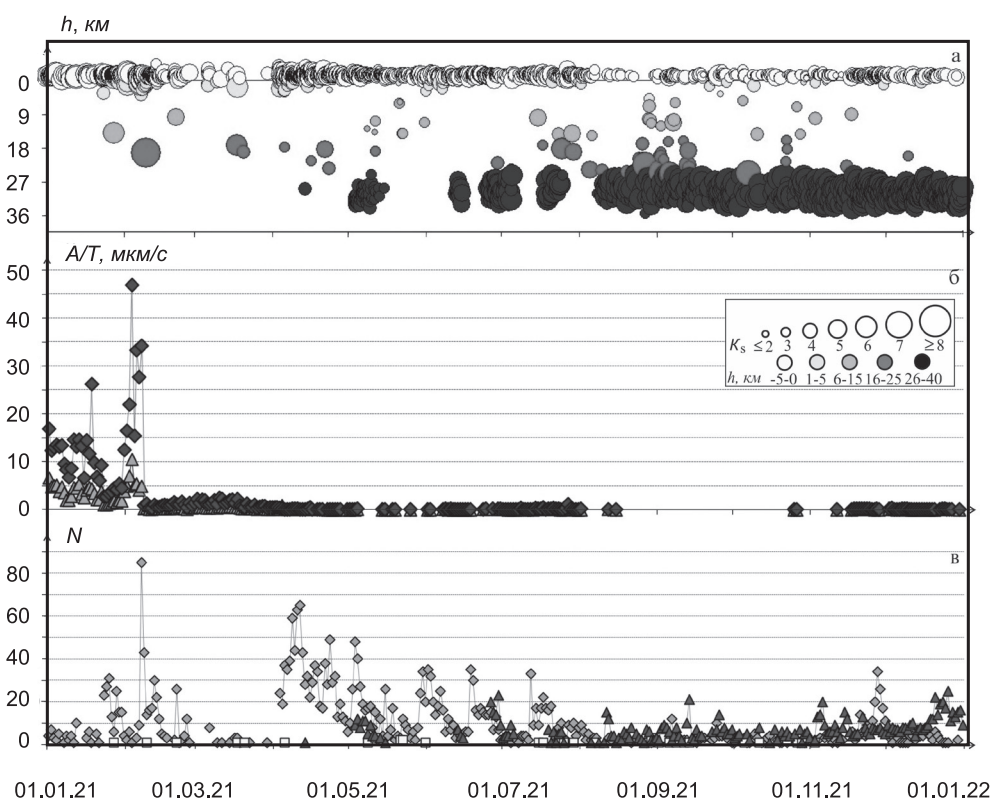


Рис. 4. Изменение во времени глубины гипоцентров h вулканических землетрясений (а); ежесуточного максимального (ромб) и среднего (треугольник) значения отношения A/T вулканического дрожания по РТСС «Цирк» (CIRR) (б); ежесуточного числа поверхностных (ромб), промежуточных (квадрат) и глубоких (треугольник) землетрясений (в), произошедших в радиусе 7 км от влк. Ключевской в 2021 г.

В 2021 г. было лоцировано $N = 1138$ ($2.0 \leq K_s \leq 6.8$) глубоких длиннопериодных землетрясений, что незначительно больше, чем за предыдущий 2020 г., но в ~ 2.4 раза меньше среднегодового значения ($N_{\text{ср}} = 2691$) (табл. 2). Максимальное количество $N = 25$ за сутки было лоцировано 25 декабря 2021 г. (рис. 4 б) [Приложение 11]. В горизонтах I и II происходят, главным образом, вулканотектонические землетрясения, возникающие в твердой среде в результате хрупкого разрушения пород под действием сдвиговых и растягивающих напряжений, создаваемых активными магматическими процессами [16]. В каталог за 2021 г. вошло $N = 3017$ поверхностных (горизонт I) землетрясений с $1.6 \leq K_s \leq 7.3$, что в ~ 1.8 раза больше, чем в 2020 г. ($N = 1724$, $2.0 \leq K_s \leq 8.1$) (табл. 2, 3). Максимальное количество $N = 85$ за сутки было лоцировано 7 февраля (рис. 4 б) [Приложение 11]. Землетрясение с $K_{\text{Smax}} = 8.4$ произошло 9 февраля в $11^{\text{h}}12^{\text{m}}$ на глубине $h = 19.2$ км под постройкой вулкана (рис. 4 а) [Приложение 11].

В табл. 2 приведены значения ΣE , $K_{\text{пред}}$ и γ для всех трех горизонтов за 2000–2021 гг.

В исследуемый период «Красный» код опасности на влк. Ключевской выставлялся два дня, когда были зафиксированы пепловые выбросы до 10 км над уровнем моря – 24 января и 5 февраля 2021 г. (табл. 1).

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).

В 2021 г. в радиусе 6 км от вулкана и в диапазоне глубин $h = -2.7 - 15.2$ км было лоцировано 264 землетрясения с $1.6 \leq K_s \leq 5.1$ (табл. 2, 3) [Приложение 11]. Это в ~ 1.8 раза меньше, чем в 2020 г., но близко к среднегодовому значению за период 2000–2020 гг. Суммарная энергия, выделенная в очагах землетрясений, составила $\Sigma E = 0.01 \cdot 10^8$ Дж (табл. 2, 3). Это в 13 раз меньше, чем в 2020 г. и в 42 раза меньше среднегодового значения за весь предыдущий период наблюдений. $K_{\text{пред}}$ практически не изменился по сравнению с таковым за 2020 г., но стал ниже, чем за период 2000–2020 гг. Наклон графика повторяемости γ в 2021 г. не изменился по сравнению с таковым в 2000–2020 гг., но стал немного круче, чем в 2020 г. (табл. 2). Максимальный класс землетрясения $K_s = 5.1$ зарегистрирован 16 ноября в 22^h51^m в постройке вулкана ($h = -1.0$ км) (рис. 5 а) [Приложение 11].

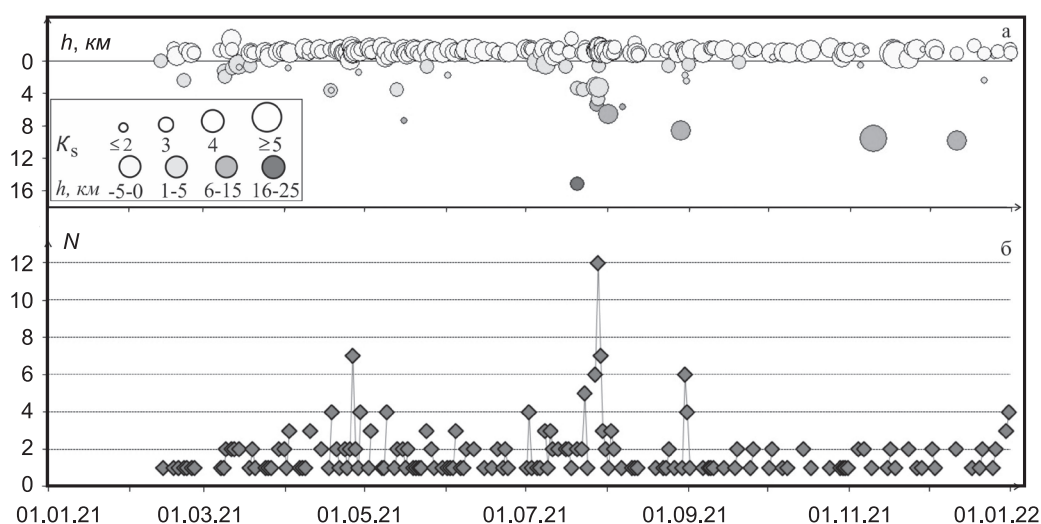


Рис. 5. Изменение во времени глубины гипоцентров h вулканических землетрясений (а) и ежесуточного числа землетрясений (б), произошедших в радиусе 6 км от влк. Безымянный в 2021 г.

В 2021 г. на влк. Безымянный 105 раз выставлялся повышенный код опасности «Желтый», из них 29 раз – при повышенной сейсмичности (раздел «Пояснения» <http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>), а в остальных случаях – при фиксировании свечения, сопровождающего непрерывное экструзивное извержение растущего купола или термальной аномалии. Во время извержения влк. Ключевской, сопровождавшегося мощным вулканическим дрожанием, корректный сейсмический мониторинг влк. Безымянный был невозможен. В эти периоды для него 36 раз выставлялся «Белый» код (табл. 3).

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 на рис. 1 окружностью радиусом 20 км. В районе вулкана в 2021 г. было лоцировано 502 землетрясения с $2.3 \leq K_s \leq 10.6$ (табл. 3) в диапазоне глубин $h = -2.1 - 28$ км (рис. 6, [Приложение 11]). Землетрясение с $K_{\text{Smax}} = 10.6$ произошло 24 января в 13^h49^m на глубине $h = 0.3$ км в районе реки Толуд (рис. 1, 6 а), [Приложение 11]. В табл. 2 представлены данные по различным параметрам сейсмического режима вулкана. Из таблицы видно, что в 2021 г. на влк. Плоский Толбачик лоцировано в 1.5 раза больше землетрясений, чем в 2020 г. и в 1.7 раза больше, чем среднегодовое значение за 2000–2020 гг. Суммарная энергия, выделенная в очагах землетрясений, превышает среднегодовое значение всего периода в ~ 4.7 раза и в ~ 80.7 раза – значение за 2020 год. Угол наклона графика повторяемости γ практически не меняется на протяжении всего периода наблюдений. Представительный класс $K_{\text{пред}}$ в 2021 г. не изменился по сравнению с таковым за период 2000–2020 гг., но он ниже, чем в 2020 г.

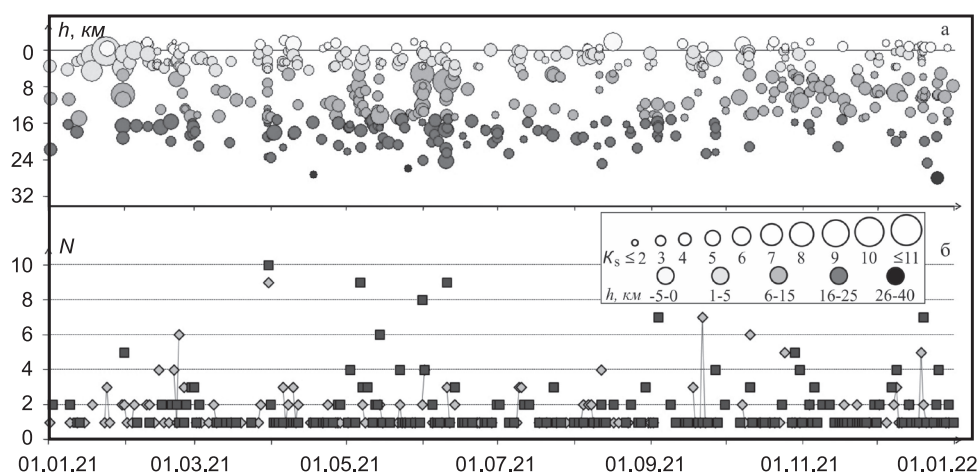


Рис. 6. Изменение во времени глубины гипоцентров h вулканических землетрясений (а) и ежесуточного числа поверхностных ($-5.0 \leq h \leq 5.0$ км) (ромб) и глубоких ($5.0 < h \leq 40.0$ км) (квадрат) землетрясений (б), произошедших в радиусе 20 км от влк. Плоский Толбачик в 2021 г.

В 2021 г. на влк. Плоский Толбачик в основном наблюдалась фоновая сейсмическая и вулканическая активность. «Желтый» код опасности выставлялся 31 день, 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 27 дней, когда корректный сейсмический мониторинг был невозможен из-за мощного извержения влк. Ключевской.

На вулканах Ушковский и Крестовский в 2020 г. наблюдалась фоновая сейсмичность. В 2021 г. в радиусе 10.1 км от вулкана и диапазоне глубин $h = -1.8 - 31.3$ км было лоцировано 154 землетрясения с $2.0 \leq K_s \leq 8.8$, что в ~ 2 раза превышает среднегодовое количество за период 2000–2020 гг. Высвобождено суммарной энергии в очагах землетрясений немного меньше, чем в среднем за весь период наблюдений (табл. 2, 3) [Приложение 11]. Угол наклона графика повторяемости γ близок к таковому за период 2000–2020 гг., а представительность землетрясений – на класс ниже. В исследуемый период 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 они представляют наибольшую потенциальную опасность среди всех вулканов Камчатки. 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 2021 г.

Название вулкана	$R_{зоны}$, км	K_s								N_{Σ}	ΣE , 10^7 Дж
		2	3	4	5	6	7	8	9		
Авачинский	8	111	71	18	1	1				202	0.12
Корякский	9	129	29	6	1	1				166	0.05
Вне вулканов		8	1	7					1	17	251.2
Всего		248	101	31	2	2			1	385	251.37

Землетрясение с $K_{S_{\max}} = 9.4$ произошло 29 июня в 06^h28^m на глубине $h = 18.2$ км вне построек вулканов.

В 2021 г. влк. Авачинский был спокоен, сейсмичность не превышала обычный «фоновый» уровень. В радиусе 8 км от вулкана было лоцировано $N = 202$ ($1.6 \leq K_s \leq 5.9$, $\Sigma E = 0.012 \cdot 10^8$ Дж) землетрясения в диапазоне глубин $h = -2.6 - 26$ км. Это в ~ 1.1 раза больше, чем в предыдущий 2020 год. Представительный класс землетрясений $K_{\text{пред}}$ и угол наклона графика повторяемости γ в 2021 г. близки к значениям 2020 г. и к среднегодовым за период 2000–2020 гг. (табл. 5). В 2021 г. землетрясение с $K_{S_{\max}} = 5.9$ было лоцировано в постройке влк. Авачинский ($h = -1.4$ км) 27 февраля в 04^h45^m (рис. 7, 9 а) [Приложение 7].

Повышенный «Желтый» код активности вулкана выставлялся один раз (табл. 1) по сейсмическим данным.

Количество лоцированных землетрясений ($N=166$, $1.6 \leq K_s \leq 5.6$, $h = -2.3 - 10.8$ км) в радиусе 9 км от влк. Корякский в 2021 г. близко среднегодовому за период 2000–2020 гг. Угол наклона графика повторяемости γ практически не меняется на протяжении всего периода наблюдений. Представительный класс землетрясений $K_{пред}$ в 2021 г. ниже, чем за период 2000–2020 гг. (табл. 5). Землетрясение с $K_{Smax}=5.6$ произошло на глубине $h=1.8$ км под постройкой влк. Корякский 12 февраля в 11^h45 (рис. 7, 9 б) [Приложение 7].

Таблица 5. Годовые значения числа землетрясений, их суммарной сейсмической энергии, угла наклона графика повторяемости и представительный энергетический класс землетрясений для вулканов Авачинский, Корякский, Мутновский, Горелый, Кизимен, Жупановский и Камбальный в 2000–2021 гг.

Название вулкана	2000–2020				2020				2021			
	$N_{ср}$	$\Sigma E_{ср}, 10^8$ Дж	$K_{пред}$	γ	N	$\Sigma E, 10^8$ Дж	$K_{пред}$	γ	N	$\Sigma E, 10^8$ Дж	$K_{пред}$	γ
Авачинский	178	0.07	2.6	0.59	177	0.01	2.2	0.68	202	0.012	2.4	0.7
Корякский	185	0.66	3.1	0.57	148	0.003	1.9	0.63	166	0.005	1.6	0.62
Мутновский	140	0.06	3.2	0.76	441	0.07	2.9	0.91	254	0.007	3.2	1.38
Горелый	247	0.08	3.5	0.86	20	0.01	–	–	9	0.0006	–	–
Кизимен	3945	1267.41	5	0.79	29	0.117	–	–	247	0.48	3.7	0.49
Жупановский	69	1.64	4.3	0.45	20	0.37	–	–	1	0.00004	–	–
Камбальный	12	3.01	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

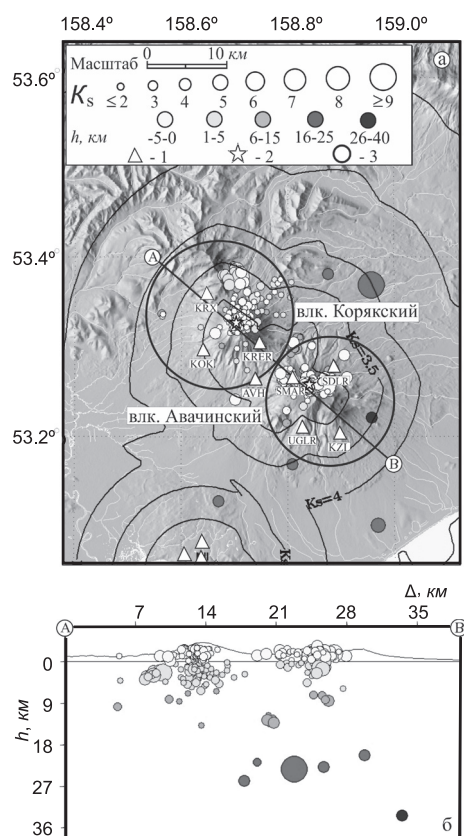


Рис. 7. Карта эпицентров землетрясений Авачинской группы вулканов в 2021 г. (а) и проекция гипоцентров на вертикальный разрез по линии А–В (б)

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

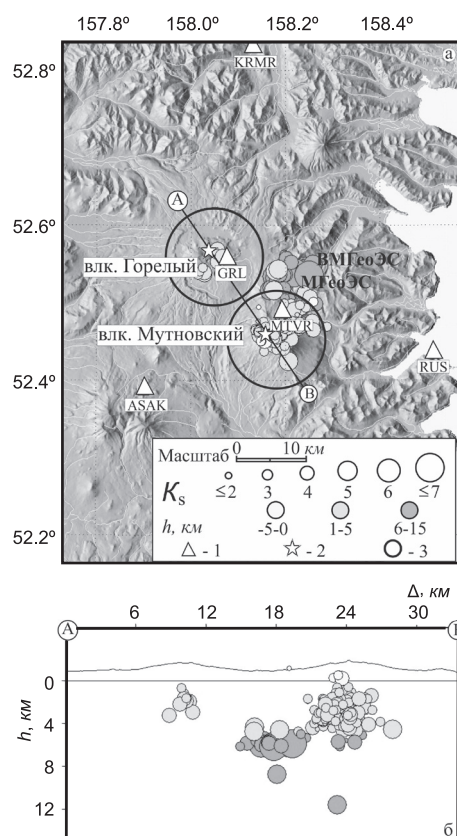


Рис. 8. Карта эпицентров землетрясений Гореловско-Мутновской группы вулканов в 2021 г. (а) и проекция гипоцентров на вертикальный разрез по линии А–В (б)

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

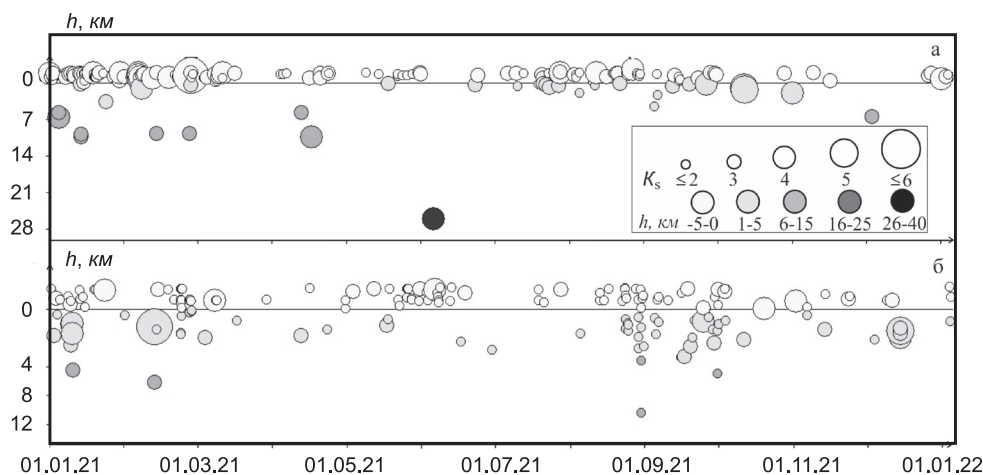


Рис. 9. Изменение во времени глубины гипоцентров вулканических землетрясений Авачинского (а) и Корякского (б) вулканов в 2021 г.

Вулканическая активность влк. Корякский и влк. Авачинский проявлялась только в виде фумарольной деятельности.

Мутновско-Гореловская группа находится в 70 км к югу от г. Петропавловска-Камчатского, здесь расположены Мутновская и Верхне-Мутновская геотермальные станции (рис. 8 а). Комплексный мониторинг вулканов Горело-Мутновской группы проводится с 2009 г.

Теоретический уровень надежной регистрации землетрясений в районе Мутновско-Гореловской группы вулканов при существующей сети РТСС равен $K_{\min}=4.5$ [Приложение 1, 12]. В каталог 2021 г. из этого района вошло $N=295$ землетрясений в диапазоне глубин $h=-1.1-11.6$ км с энергетическим классом $K_S=1.9-6.9$ (табл. 6). Землетрясение с $K_{S\max}=6.9$ произошло 21 августа в 11^h15^m на глубине $h=5.9$ км вне зоны вулканов (рис. 8, [Приложение 10]).

Таблица 6. Распределение землетрясений района Гореловско-Мутновской группы вулканов по энергетическим классам K_S в 2021 г.

Название вулкана	$R_{\text{зоны}}, \text{ км}$	K_S						N_{Σ}	$\Sigma E, 10^6 \text{ Дж}$
		2	3	4	5	6	7		
Мутновский	7	19	206	27	2	–	–	254	0.709
Горелый	7	–	4	5	–	–	–	9	0.056
Вне вулканов		–	9	14	6	1	2	32	14.26
Всего		19	309	46	8	1	2	295	15.025

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 2021 г. ею регистрировалось спазматическое вулканическое дрожание и слабые локальные сейсмические события от вулкана.

В исследуемый период в радиусе 7 км от вершины влк. Горелый и в диапазоне глубин $h=0.7-3.3$ км было лоцировано всего 9 землетрясений (табл. 6) [Приложение 10]. В 2009 г. у основания стенки активного кратера образовалась высокотемпературная бокка. Процесс образования бокки сопровождался роем землетрясений. Начиная с 2010 г. количество лоцированных землетрясений резко снизилось. Поэтому логично сравнить значения 2021 г. (табл. 5) с данными за 2009 г. ($N=2731$, $\Sigma E=0.55 \cdot 10^8 \text{ Дж}$) и за период наблюдений 2010–2020 гг. ($N_{\text{cp}}=20$, $\Sigma E_{\text{cp}}=3.22 \cdot 10^6 \text{ Дж}$). Количество лоцированных событий в 2021 г. в ~ 303 раза меньше, чем их значение за 2009 г., а высвобожденная ими суммарная энергия снизилась примерно в 1000 раз. Если сравнивать со среднегодовыми значениями периода 2010–2020 гг., то количество землетрясений в 2021 г. снизилось только в 2 раза, энергия – в 57 раз.

РТСС «Мутновская» (MTVR) установлена на расстоянии ~ 3 км от активного кратера влк. Мутновский (рис. 8 а). Минимальный уровень надежной регистрации землетрясений на этой станции соответствует $K_S=2.0$. С января по 12 мая данные с РТСС не поступали. В 2021 г. в радиусе 7 км от вулкана было лоцировано 254 землетрясения ($K_S=1.9-5.3$, $h=-1.1-11.6$ км) (табл. 6, [Приложение 10], рис. 10), что в ~ 1.8 раза больше среднегодового значения ($N_{\text{cp}}=140$) за период 2009–2020 гг. (табл. 5). Представительный класс ($K_{\text{пред}}=2.9$) для них получился близким

к значению за период 2009–2020 гг., а наклон графика повторяемости стал еще круче по сравнению с предыдущим 2020 г. ($\gamma=0.91$) (табл. 5).

«Желтый» код опасности для влк. Горелый и влк. Мутновский (табл. 1) выставлялся в основном из-за повышенного уровня сейсмичности, когда общее количество слабых лоцированных и нелоцированных локальных сейсмических событий превышало $N>50$ в сутки. Вулканическая активность влк. Горелый и влк. Мутновский в 2021 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 в ~ 2.5 км от вершины. Комплексный мониторинг влк. Кизимен проводится с 2009 года.

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).

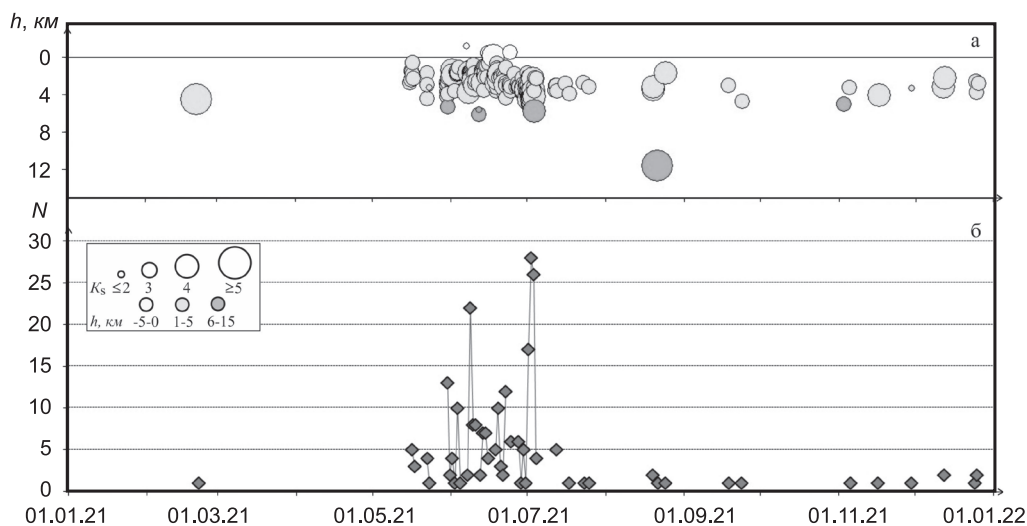


Рис. 10. Изменение во времени глубины гипоцентров h вулканических землетрясений (а) и ежесуточного числа землетрясений (б), произошедших в радиусе 7 км от влк. Мутновский в 2021 г.

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 2021 году. В исследуемый период в радиусе 15 км от вершины вулкана и в диапазоне глубин $h=-1.5-15.1$ км было лоцировано 247 землетрясений ($\Sigma E=0.48 \cdot 10^8$ Дж). Так как большая часть этих событий произошла вне постройки влк. Кизимен в районе Щапинской гидротермальной системы, то сравнивать количество землетрясений и выделенную ими энергию с таковыми за предыдущий год не совсем корректно. Если сравнивать значения этих параметров со средними за весь период наблюдений с 2009 г. по 2020 г. включительно, в который вошла подготовка и извержение влк. Кизимен в 2010–2011 г., число землетрясений снизилось в ~ 16 раз, а высвобожденная ими сейсмическая энергия – в ~ 2640 раз (табл. 5). Самое сильное землетрясение в радиусе 15 км от вулкана с $K_{S\max}=7.1$ произошло 30 декабря 2021 г. в 03^h24^m ($h=-1.7$ км) [Приложение 9]. Максимальное на планшете (рис. 11 а) землетрясение с $K_{S\max}=12.0$ ($h=8.7$ км) было зарегистрировано 19 марта в 03^h16^m [Приложение 9] вне зоны вулкана в районе Щапинской гидротермальной системы.

Таблица 7. Распределение землетрясений района влк. Кизимен по энергетическим классам K_s в 2021 году

Название вулкана	$R_{\text{зоны}}, \text{ км}$	K_s											N_{Σ}	$\Sigma E, 10^8 \text{ Дж}$
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Кизимен	15	30	92	80	27	16	2	–	–	–	–	–	247	0.48
Вне вулкана		100	1092	1077	592	227	39	14	7	1	–	1	3150	10191.97
Всего		130	1184	1157	619	243	41	14	7	1	–	1	3397	10192.45

«Желтый» код опасности для влк. Кизимен в 2021 г. выставлялся 5 дней при повышенной сейсмичности. Вулканическая активность проявлялась только в виде мощной фумарольной деятельности.

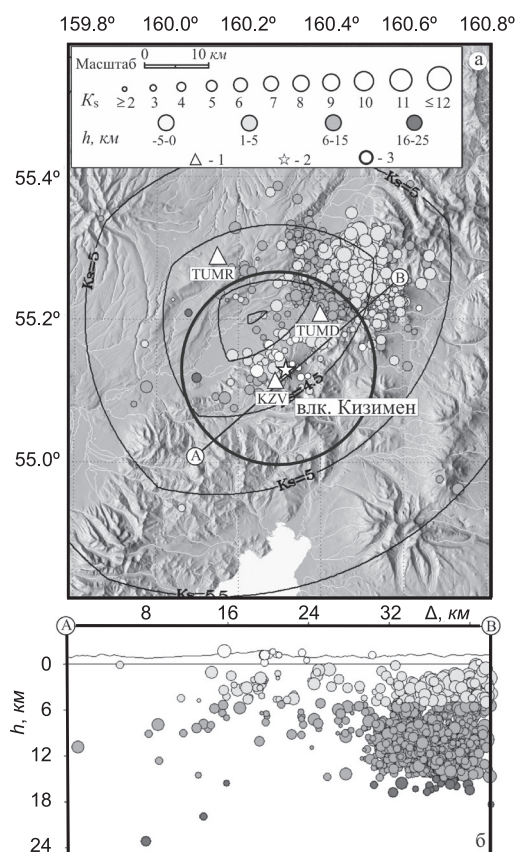


Рис. 11. Карта эпицентров землетрясений влк. Кизимен в 2021 г. (а) и проекция гипоцентров на вертикальный разрез по линии А–В (б)

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

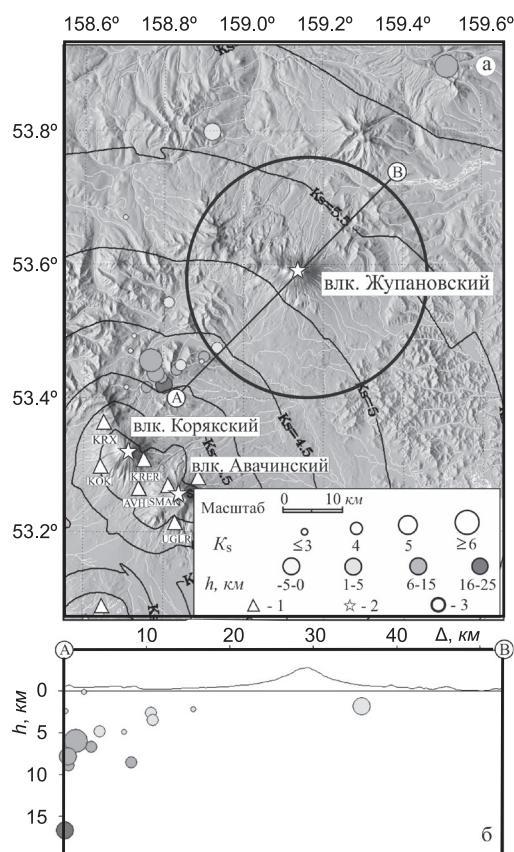


Рис. 12. Карта эпицентров землетрясений влк. Жупановский в 2021 г. (а) и проекция гипоцентров на вертикальный разрез по линии А–В (б)

1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан; 3 – окружность, оконтуривающая область выборки землетрясений вокруг влк. Жупановский ($R=20$ км). Изолиниями отмечен 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 [20].

Комплексный мониторинг влк. Жупановский проводится с 2013 г. Сейсмический мониторинг влк. Жупановский осуществляется удаленными РТСС, ближайшие из которых – «Седловина» (SDLR), «Корякский ретранслятор» (KRER) и «Арик» (KRX) – расположены в 38–40 км от него в районе Авачинской группы вулканов. Теоретический уровень надежной регистрации существующей сети сейсмических станций соответствует $K_{\min}=4.5-5.5$, (рис. 12 а).

Таблица 8. Распределение землетрясений из района влк. Жупановский по энергетическим классам K_s в 2021 году

Название вулкана	$R_{зоны}, км$	K_s				N_{Σ}	$\Sigma E, 10^6 Дж$
		3	4	5	6		
Жупановский	20		1			1	0.004
Вне вулкана		6	6	2	2	16	2.009
Всего		6	7	2	2	17	2.013

В табл. 8. представлено распределение землетрясений из района влк. Жупановский по энергетическим классам. В 2021 г. в районе вулкана было лоцировано всего 17 землетрясений ($3.0 \leq K_s \leq 6.1$, $h=0.1-16.7$ км), из них в радиусе 20 км от вершины – только одно землетрясение ($K_s=3.6$, $h=3.5$ км), суммарная энергия составила $\Sigma E=0.2 \cdot 10^8 Дж$ ([Приложение 8], рис. 12). Землетрясение с $K_{Smax}=6.1$ произошло 8 октября в 11^h21^m на глубине $h=5.0$ км.

Вулканическая активность влк. Жупановский в 2021 г. проявлялась только в виде фумарольной деятельности, а сейсмичность превышала фоновую всего два раза (табл. 1).

Вулкан Камбальный – самый южный вулкан Южно-Камчатской вулканической зоны, расположенный на юге Камбального хребта [21]. Это действующий конусовидный стратовулкан с абсолютной высотой 2156 м, на склонах которого имеются пять шлаковых конусов голоценового возраста. Комплексный мониторинг влк. Камбальный проводится с 2017 года. 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) – 116 км на северо-восток. Расчетный уровень надежной регистрации землетрясений в районе влк. Камбальный составляет $K_{\min}=6.5$. В 2021 г. в радиусе 7 км от вершины влк. Камбальный не было лоцировано ни одного землетрясения.

Вулкан Карымский – один из активнейших вулканов в центральной части Восточной вулканической зоны [22]. 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 событий с $K_s \geq 6.0$. Поэтому все основные выводы о деятельности вулкана сделаны по одной станции «Карымский» (КП) [Приложение 1].

В 2021 г. продолжалось эксплозивное извержение в центральном кратере влк. Карымский, сопровождавшееся газо-пепловыми выбросами до 8 км над уровнем моря по сейсмическим данным (3 ноября) и сходом раскаленных лавин. На РТСС (КП) регистрировались локальные поверхностные события, большинство из которых – взрывы в кратере, лоцировать которые невозможно из-за удаленности станций.

В районе влк. Карымский в 2021 г. было лоцировано $N=1$ землетрясение с $K_s=6.8$ ($h=0.6$ км). В радиусе 10 км от вершины вулкана землетрясения не зарегистрированы.

В исследуемый период повышенный код опасности «Оранжевый» на влк. Карымский составлялся 128 дней и «Желтый» – 71 день (табл. 1).

Заключение. Всего за период 2021 г. в районе Северной, Авачинской и Мутновско-Гореловской групп вулканов, а также в районе вулканов Кизимен и Жупановский было лоцировано 11693 землетрясения, высвобожденная в их очагах суммарная сейсмическая энергия составила $\Sigma E=10.79 \cdot 10^{11}$ Дж.

В январе 2021 г. на влк. Ключевской продолжалось вершинное эксплозивно-эффузивное извержение, сопровождавшееся повышенной сейсмической активностью, связанной с магматическими процессами. Извержение резко завершилось 7 февраля, а через десять дней, 18 февраля, впервые за 30 лет был зафиксирован новый «несубтерминальный» побочный прорыв на северо-западном склоне вулкана в ~3.5–4.0 км от кратера, который был назван именем Г. С. Горшкова. Ретроспективный анализ сейсмичности показал, что большая часть эпицентров землетрясений, лоцированных в период 7–18 февраля, была смещена в северо-западном направлении от вершины. Центр тяжести эпицентров землетрясений примерно совпал с местом нового побочного извержения. На влк. Ключевской в 2021 г. было лоцировано в ~1.5 раза больше землетрясений ($N=4197$, $\Sigma E=7.89 \cdot 10^8$ Дж), чем в 2020 г. ($N=2828$, $\Sigma E=5.1 \cdot 10^8$ Дж), их суммарная энергия также в ~1.5 раза превысила таковую предыдущего года.

Высокая вулканическая активность с эксплозивными извержениями и сходом раскаленных лавин наблюдалась на влк. Шивелуч. Из-за неустойчивой работы РТСС в районе влк. Шивелуч лоцировать слабую сейсмичность ($K_s < 4.0$), сопровождавшую рост активного купола, было невозможно.

В январе–июле практически вся сейсмичность регистрировалась в постройке влк. Шивелуч в районе активного купола, а единичные землетрясения лоцировались под западным сектором постройки вулкана в районе экструзии Каран на глубине $h \sim 6$ –11 км. Начиная с 25 июля наблюдался рост количества землетрясений под куполом Каран на глубине до $h \sim 29$ км.

В 2021 г. на влк. Безымянный наблюдалась фоновая сейсмичность. Во время извержения влк. Ключевской, сопровождавшегося мощным вулканическим дрожанием, корректный сейсмический мониторинг влк. Безымянный был невозможен. Вулканическая активность проявлялась в виде фумарольной деятельности и свечения, сопровождающего непрерывное экструзивное извержение растущего купола.

На влк. Плоский Толбачик, влк. Кизимен в 2021 г. наблюдалась в основном фоновая сейсмическая активность. Практически все землетрясения регистрировались вне построек вулканов. Для района влк. Плоский Толбачик – это зоны р. Толуд и потухших вулканов Большая Удина и Малая Удина. Для района влк. Кизимен – это зона Щапинской гидро-термальной системы. На

влк. Жупановский сейсмической активности не зарегистрировано. Вулканическая активность на влк. Жупановский и влк. Кизимен проявлялась только в виде фумарольной деятельности.

После первого в историческое время извержения влк. Камбальный, которое произошло с 24 марта по 23 апреля 2017 г., сейсмической и вулканической активности не наблюдалась, включая 2021 г.

На влк. Карымский в исследуемый период продолжалось извержение, сопровождавшееся высокой локальной сейсмичностью, регистрируемой только одной станцией. Из-за удаленности сети РТСС, в радиусе 10 км от влк. Карымский в 2021 г. не было лоцировано ни одного землетрясения.

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

Электронное приложение App11_Kamchatka_2021 (<http://www.gsras.ru/zse/app-28.html>): 1 – Сейсмические станции сети Камчатки и Командорских островов в 2021 г.; 7 – Каталог землетрясений Авачинской группы вулканов за 2021 г.; 8 – Каталог землетрясений вулкана Жупановский за 2021 г.; 9 – Каталог землетрясений вулкана Кизимен за 2021 г.; 10 – Каталог землетрясений Мутновско-Гореловской группы вулканов за 2021 г.; 11 – Каталог землетрясений Северной группы вулканов за 2021 г.

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. EDN: HTUGWF
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. EDN: PUATAP
3. Чебров Д.В., Тихонов С.А., Дрознин Д.В., Дрознина С.Я., Матвиенко Е.А., Митюшкина С.В., Салтыков В.А., Сеньюков С.Л., Серафимова Ю.В., Сергеев В.А., Ящук В.В. 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> EDN: RUYRWU
4. Чебров Д.В., Дрознина С.Я., Сеньюков С.Л., Шевченко Ю.В., Митюшкина С.В. Камчатка и Командорские острова // Землетрясения России в 2021 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2023. – С. 76–87.
5. Сеньюков С.Л., Нуждина И.Н. Сейсмический мониторинг вулканов Камчатки // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 27 (2020). – С. 347–363. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2024.27.31> EDN: XPLRMS
6. Дрознин Д.В., Дрознина 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, N 2. – P. 374–383.
9. 2021-ER_APP19_Volcano-regions-of-Kamchatka_2021.xls // Землетрясения России в 2021 году. – Обнинск: ГС РАН, 2023. – [Электронное приложение]. – URL: http://www.gsras.ru/zr/app_21.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. Мелекесцев И.В., Вольнец О.Н., Ермаков В.А., Кирсанова Т.П., Масуренков Ю.П. Вулкан Шивелуч // Действующие вулканы Камчатки. – М.: Наука, 1991. – Т. I. – С. 84–103.
13. Жаринов Н.А., Демянчук Ю.В., Борисов И.А. О продолжении нового экстрезивного цикла вулкана Шивелуч в 2001–2021 гг., Камчатка // Вулканология и сейсмология. – 2022. – № 3. – С. 3–11.
14. Сеньюков С.Л., Нуждина И.Н., Чебров Д.В. Вулканы Камчатки // Землетрясения России в 2021 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2023. – С. 102–110.
15. Сеньюков С.Л., Дрознин Д.В., Нуждина И.Н., Дрознина С.Я. Особенности сейсмичности влк. Ключевской в связи с побочным прорывом 2021 г. и пароксизмальным вершинным извержением 2023 г. // Геофизические процессы и биосфера. – 2024. – Т. 23, № 4. – С. 115–132. DOI: <https://doi.org/10.21455/GPB2024.4-9>
16. 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.
17. 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.

18. Сенюков С.Л. Прогноз извержений вулканов Ключевской и Безымянный на Камчатке // Saarbrucken: LAP LAMBERTS Academic Publishing. – 2013. – 144 с.
19. 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.
20. Масуренков Ю.П., Флоренский И.В., Мелекесцев И.В. Вулкан Жупановский // Действующие вулканы Камчатки. – М.: Наука, 1991. – Т. II. – С. 218–225.
21. Литасов Н.Е., Важеевская А.А. Вулкан Камбальный // Действующие вулканы Камчатки. – М.: Наука, 1991. – Т. II. – С. 396–405.
22. Иванов Б.В., Брайцева О.А., Зубин М.И. Вулкан Карымский // Действующие вулканы Камчатки. – М.: Наука, 1991. – Т. II. – С. 182–201.

SEISMISITY of the VOLCANIC AREAS of KAMCHATKA in 2021

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 on the Internet (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>) since February 2000. The results of seismic activity of the Northern (Shiveluch, Kluchevskoy, Bezymianny, Plosky Tolbachik, Krestovskiy and Ushkovskiy), Avacha (Avachinsky and Koryakskiy), Mutnovskiy-Gorely volcano groups and Kizimen, Zhupanovskiy volcanoes for 2021 are presented. 7599 earthquakes with $K_s=1.6-10.6$ were located for Northern volcano group, 385 earthquakes with $K_s=1.6-9.4$ – for Avacha volcano group, 295 earthquakes with $K_s=1.9-6.9$ – for Mutnovskiy-Gorely volcano group, 3397 earthquakes with $K_s=1.8-12.0$ – for Kizimen volcano, 17 earthquakes with $K_s=3.0-6.1$ – for Zhupanovskiy volcano. Maps of epicenters, quantities of seismic energy and earthquake distribution by energy classes are given. All periods of activity were fixed and investigated by remote methods in 2021: an intensive volcanic activity of Shiveluch volcano associated with new cone, completion of the summit explosive-effusive eruption of Kluchevskoy volcano and the formation of a new “non-subterminal” lateral eruption on the slope of the volcano. All periods of volcanic activity have been tracked and described in detail.

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. (2025). [Seismicity of the volcanic areas of Kamchatka in 2021]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 28(2021), 328–343. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2025.28.31> EDN: XYSAJX

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.). EDN: HTUGWF
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.). EDN: PUATAP
3. Chebrov, D.N., Tikhonov, S.A., Droznin, D.V., Droznina, S.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> EDN: RUYRWU
4. Chebrov, D.N., Droznina, S.Ya., Senyukov, S.L., Shevchenko, Yu.V., & Mityushkina, S.V. (2023). [Kamchatka and Komandor Islands]. In *Zemletriaseniia Rossii v 2021 godu* [Earthquakes in Russia, 2021] (pp. 76–87). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
5. Seniukov, S.L., & Nuzhdina, I.N. (2024). [Seismicity of the volcanic areas of Kamchatka in 2018–2019]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 27(2020), 347–363. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2024.27.31>
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. [2021-ER_APP19_Volcano-regions-of-Kamchatka_2021.xls]. (2023). In *Zemletriaseniia Rossii v 2021 godu* [Earthquakes in Russia, 2021]. Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (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). *Energeticheskaia klassifikatsiia Kurilo-Kamchatskikh zemletriasenii i problema magnitud* [Energy classification of the Kuril-Kamchatka earthquakes and the problem of magnitudes]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 117 p.
12. Melekestsev, I.V., Volynets, O.N., Ermakov, V.A., Kirsanova, T.P., & Masurenkov, Yu.P. (1991). [Shiveluch volcano]. *Dejstvuyushchie vulkany Kamchatki* [Active volcanoes of Kamchatka]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 1, 84–103. (In Russ.).
13. Zharinov, N.A., Demyanchuk, Yu.V., & Borisov, I.O. (2022). [The 2001–2021 ongoing eruptive cycle of Shiveluch volcano (Kamchatka)]. *Vulkanologiya i seismologiya* [Journal of Volcanology and Seismology], 3, 3–11. (In Russ.).
14. Seniukov, S.L., Nuzhdina, I.N., & Chebrov, V.N. (2023). [Volcanoes of Kamchatka]. In *Zemletriaseniia Rossii v 2021 godu* [Earthquakes in Russia, 2021] (pp. 102–110). Obninsk: GS RAS Publ. (In Russ.).
15. Seniukov, S.L., Droznin, D.V., Nuzhdina, I.N., & Droznina, S.Ya. (2024). [Features of seismicity of Klyuchevskoy volcano in connection with the lateral eruption in 2021 and with paroxysmal summit eruption in 2023]. In *Geofizicheskie process i biosfera* [Journal Geophysical Processes and Biosphere], 23(4), 115–132. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21455/GPB2024.4-9>
16. 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.).
17. 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.).
18. 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.
19. 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.).
20. 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.).
21. 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.).
22. 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.).