

IV. СЕЙСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ВУЛКАНОВ

УДК 550.348.438(517.66)

СЕЙСМИЧНОСТЬ ВУЛКАНИЧЕСКИХ РАЙОНОВ КАМЧАТКИ в 2015 г.

С.Л. Сениуков, 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. Дан анализ сейсмической активности в районах Северной (Шивелуч, Ключевской, Безымянный, Плоский Толбачик, Ушковский и Крестовский), Авачинской (Авачинский и Корякский), Мутновско-Гореловской групп вулканов (Мутновский и Горелый) и вулканов Кизимен и Жупановский за год. В 2015 г. в районе Северной группы лоцировано 5464 землетрясения с $K_S=1.8-8.1$, Авачинской – 302 с $K_S=1.7-5.7$, Мутновско-Гореловской – 295 с $K_S=2.1-6.8$, 462 землетрясения с $K_S=2.2-8.3$ вблизи влк. Кизимен и 165 с $K_S=2.5-8.4$ – влк. Жупановский. 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 2015 г.: интенсивная вулканическая деятельность влк. Шивелуч, связанная с ростом нового купола, вершинное эксплозивно-эффузивное извержение влк. Ключевской в январе–апреле и продолжение сейсмической и вулканической активизации влк. Жупановский после 56-летнего периода покоя.

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

DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.33

Для цитирования: Сениуков С.Л., Нуждина И.Н. Сейсмичность вулканических районов Камчатки в 2015 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – С. 349–361 doi: 10.35540/1818-6254.2021.24.33

Введение. В 2015 г. был продолжен мониторинг активности вулканов Камчатки. Их положение, 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 Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (КФ ФИЦ ЕГС РАН) [3]. Сеть РТСС, осуществляющая контроль сейсмической активности вулканов в 2015 г., не изменилась и позволяла проводить детальные наблюдения в режиме, близком к реальному времени для Северной (влк. Шивелуч, Ключевской, Безымянный, Плоский Толбачик, Ушковский и Крестовский), Авачинской (влк. Авачинский, Корякский), Мутновско-Гореловской (влк. Горелый и Мутновский) групп вулканов, а также для влк. Кизимен и влк. Жупановский.

Методика обработки вулканических землетрясений, локальные годографы не изменились по сравнению с таковыми в 2014 г. и изложены в [1, 4]. Как и прежде, для определения параметров землетрясений применялась программа DIMAS [5] с использованием различных одномерных скоростных моделей среды [1, 6], а исследование представительных энергетических классов и углов наклона графиков повторяемости для выборок вулканических землетрясений проводилось с помощью пакета программ ZMAP [7].

Анализ данных. Ниже приведены данные о сейсмической активности вулканов Камчатки. 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»: $\varphi=54.90-55.54^\circ\text{N}$, $\lambda=159.82-160.80^\circ\text{E}$ и «района влк. Жупановский»: $\varphi=53.40-53.90^\circ\text{N}$, $\lambda=158.70-159.65^\circ\text{E}$. Все события сгруппированы в пять каталогов

[8–12], включающих 5464 землетрясения по Северной группе [8], 302 – по Авачинской [9], 295 – по Мутновско-Гореловской [10], 462 – по влк. Кизимен [11] и 165 – по влк. Жупановский [12]. В соответствии с принятой системой разделения, каждому землетрясению в каталогах [8–12] 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 [13, 14], 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) при сложившейся конфигурации сети. Эти величины отмечены изолиниями на картах и обычно показывают 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 ежедневно выставлялся цветовой код опасности, учитывающий сейсмические, видео и спутниковые данные. Цветовая шкала имеет основные градации активности: «красный», «оранжевый», «желтый», «зеленый» и «белый». Уровень сейсмической и вулканической активности, соответствующий цветовому коду, описан в [4]. Подробные результаты мониторинга активных вулканов Камчатки в 2015 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 2000–2013 гг. и отдельно в 2014 и 2015² годах

Вулкан\Код	2000–2013 гг. (сред./год)					2014 г.					2015 г.				
	Б	З	Ж	О	К	Б	З	Ж	О	К	Б	З	Ж	О	К
Шивелуч	16	74	186	84	5	–	75	116	156	18	–	44	102	204	15
Ключевской	3	215	117	28	2	–	295	70	–	–	–	166	138	57	4
Безымянный	74	259	30	2	1	2	358	5	–	–	136	228	1	–	–
пл. Толбачик	52	258	36	18	1	–	258	107	–	–	80	276	9	–	–
Авачинский	1	363	2	–	–	1	363	1	–	–	–	365	–	–	–
Корякский	2	357	6	–	–	–	365	–	–	–	–	364	1	–	–
Мутновский	53	291	21	–	–	37	231	97	–	–	5	221	138	1	–
Горелый	53	61	251	–	–	5	137	223	–	–	31	222	112	–	–
Кизимен	13	80	120	151	2	–	320	45	–	–	25	318	22	–	–
Жупановский						3	76	88	26	4	–	228	105	27	5

Как следует из табл. 1, на основании комплексных наблюдений влк. Шивелуч сохранял лидирующее положение по активности в течение 2000–2015 гг. В 2015 г. для него 219 раз выставлялись оранжевый и красный коды опасности. Следующими по активности в 2015 г. были влк. Ключевской и влк. Жупановский. Далее рассмотрим каждый вулкан в отдельности.

Северная группа вулканов. Каталог землетрясений Северной группы вулканов за 2015 г. [8] содержит 5464 землетрясения, суммарная энергия которых составила $\Sigma E = 5.107 \cdot 10^8$ Дж (табл. 2). Это ~ в 3 раза меньше, чем в 2014 г., хотя событий лоцировано ~ в 1.1 раза больше (табл. 3) [4]. Распределение количества землетрясений по K_S и их суммарная энергия для районов отдельных вулканов Северной группы [15] приведены в табл. 2. Карта эпицентров землетрясений и условные зоны сейсмичности рассматриваемых вулканов показаны на рис. 1.

Наиболее активной по числу землетрясений в 2015 г., как и в 2014 г. [4], была зона влк. Ключевской. Здесь произошло 57 % землетрясений от общего числа событий, вошедших в каталог (табл. 2). В 2015 г. представительными для района Северной группы вулканов стали землетрясения с $K_{\text{пред}} = 4.1$, т.е. остались на уровне 2014 г. ($K_{\text{пред}} = 4.0$), но ниже, чем за весь период

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 комплексный мониторинг вулканов Горело-Мутновской группы и влк. Кизимен проводится с 2009 г., влк. Жупановский с 2013 г.

2000–2014 гг. ($K_{\text{пред}}=4.5$) (табл. 3). Угол наклона графика повторяемости $\gamma=0.94\pm 0.07$ для землетрясений этого района в 2015 г. практически не изменился по сравнению с таковым в 2014 г. ($\gamma=0.89$) и близок значению за период 2000–2014 гг. ($\gamma=0.9$).

Таблица 2. Распределение числа землетрясений по энергетическим классам K_S и суммарная сейсмическая энергия землетрясений в районе Северной группы вулканов в 2015 г.

Название вулкана	$R_{\text{зоны}},$ км	K_S								N_{Σ}	$\Sigma E,$ 10^8 Дж
		2	3	4	5	6	7	8			
Шивелуч	12	–	120	1271	380	28	–	–	1799	0.668	
Ключевской	7	–	152	1733	1210	34	–	–	3129	1.624	
Безымянный	6	5	13	6	1	–	–	–	25	0.001	
пл. Толбачик	20	1	88	158	35	7	1	–	290	0.183	
Крестовский и Ушковский	10.1	1	10	12	4	–	–	–	27	0.007	
Вне вулканов	–	–	25	71	65	24	7	2	194	2.624	
Всего	–	7	408	3251	1695	93	8	2	5464	5.107	

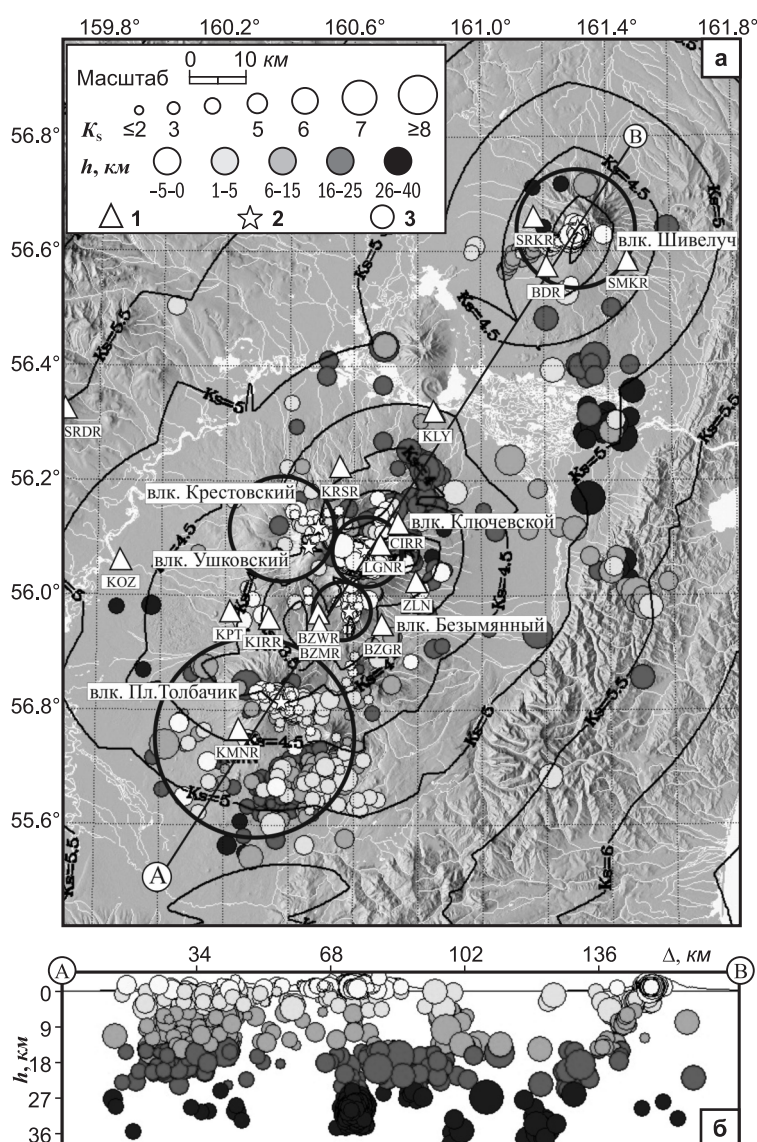


Рис. 1. Карта эпицентров (а) землетрясений Северной группы вулканов за 2015 г. и проекция гипоцентров (б) на вертикальную плоскость, проходящую по линии А–В

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. Число землетрясений, их суммарная сейсмическая энергия, $K_{пред}$, угол наклона графика повторяемости для вулканов Северной группы в 2000–2015 гг.

Название вулкана	2000–2014 гг.				2014 г.				2015 г.			
	$N_{сред/год}$	$\Sigma E_{сред/год}, 10^8 Дж$	$K_{пред}$	γ	N	$\Sigma E, 10^8 Дж$	$K_{пред}$	γ	N	$\Sigma E, 10^8 Дж$	$K_{пред}$	γ
Северная группа	7078	794.49	4.5	0.9	4983	15.7	4.0	0.89	5464	5.108	4.1	0.94
Шивелуч	2942	8.48	4.5	0.98	462	4.370	4.0	0.78	1799	0.668	4.0	0.98
Ключевской:	4059	577.75	4.6	0.97	3934	1.96	–	–	3129	1.624	4.1	0.88
I горизонт	1158	4.68	4.3	0.57	181	0.026	4.0	1.66	825	0.679	4.8	1.6
II горизонт	88	570.7	4.0	0.58	31	0.006	–	–	10	0.009	–	–
III горизонт	2813	2.4	4.7	1.47	3722	1.93	4.0	0.87	2294	0.936	4.1	0.9
Безымянный	239	0.567	4.0	0.88	27	0.001	–	–	25	0.001	–	–
Плоский Толбачик	141	166.16	4.2	0.44	314	1.364	3.6	0.62	290	0.183	3.6	0.72
Крестовский и Ушковский	83	10.57	4.0	0.49	35	0.003	–	–	27	0.007	–	–

Землетрясение с максимальным классом $K_{Smax}=6.0$ произошло 24 августа в 16^h19^m в постройке вулкана ($h=-0.7$ км) (рис. 2 а) [8]. В течение года было зарегистрировано четыре всплеска сейсмической активности 17–25 июня ($N=58$), 25 августа – 7 сентября ($N=156$), 18 сентября – 23 октября ($N=759$) и 27 ноября – 22 декабря ($N=357$). Максимальное количество землетрясений ($N=61$) за сутки зафиксировано 6 октября (рис. 2 б) [8].

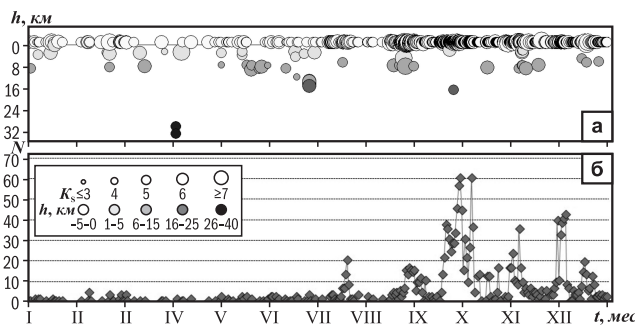


Рис. 2. Изменение во времени глубины гипоцентров h (а) и количества N (б) вулканических землетрясений, локализованных в радиусе 12 км от влк. Шивелуч в 2015 г.

По-прежнему 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 видеоданным и визуальным наблюдениям регистрировались пепловые выбросы (рис. 3 б) и сход пирокластических потоков. Максимальный пепловый выброс высотой 10 км над уровнем моря был зафиксирован 25 марта.

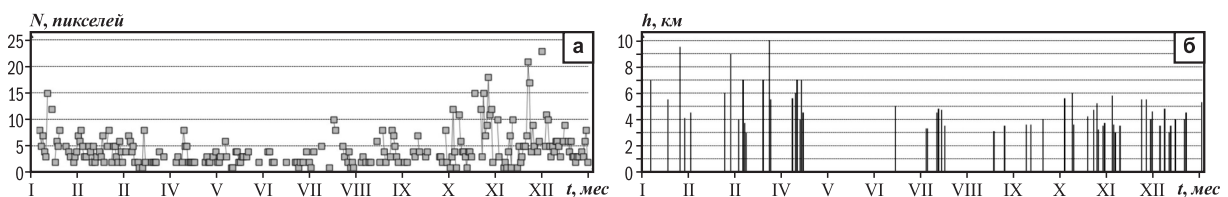


Рис. 3. Изменение во времени размера термальной аномалии на влк. Шивелуч по данным спутников NOAA16 и NOAA17 (а); высота газо-пепловых выбросов над уровнем моря по видеоданным и визуальным наблюдениям сотрудников сейсмической станции «Ключи» (б) в 2015 г.

Сравнение активности вулкана в цветовых кодах (табл. 1) позволяет сделать вывод, что в 2015 г. сейсмическая и вулканическая активность влк. Шивелуч была такой же высокой, как и за весь период наблюдений, начиная с февраля 2000 года.

Вулкан Ключевской. Существующая сеть станций (рис. 1) позволяла регистрировать при благоприятных условиях землетрясения, начиная с $K_{min}=3.0$ [13]. Ближайшая телеметрическая станция «Логинов» (LGNR) располагалась в 4 км от кратера и регистрировала землетрясения в районе кратера с классом $K_S \geq 2.2$. В 2015 г. в радиусе 7 км от влк. Ключевской и диапазоне глубин $h=-3.3-34.7$ км было локализовано 3129 землетрясений с $3.1 \leq K_S \leq 6.0$, суммарная энергия

которых составила $\Sigma E = 1.62 \cdot 10^8$ Дж (табл. 2) [8]. Это \sim в 1.2 раза меньше аналогичных значений в 2014 г. (табл. 3) [4]. Карта эпицентров и проекция гипоцентров на вертикальный разрез представлены на рис. 1, а графики изменения во времени параметров сейсмической активности вулкана – на рис. 4. Как и в предыдущие годы, все землетрясения зоны влк. Ключевской в 2015 г. 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) [4].

Характер сейсмичности вулкана связан с притоком мантийных магм в магматический очаг на глубинах $h = 20\text{--}35$ км и дальнейшим их подъемом в постройку вулкана при вершинном извержении [16–19]. В 2015 г., с 5 января по 27 апреля, на влк. Ключевской наблюдалось вершинное эксплозивно-эффузивное извержение, поэтому практически вся сейсмичность была сосредоточена в нижнем (III) и верхнем (I) горизонтах (рис. 4 б, в).

В 2015 г. было лоцировано $N = 2294$ ($3.1 \leq K_S \leq 5.7$) глубоких длиннопериодных землетрясений (табл. 3), в образовании которых активную роль играет магматический расплав [19]. Максимальное количество $N = 97$ за сутки было локализовано 23 ноября (рис. 4 б) [8]. Землетрясения с максимальным классом $K_S = 5.7$ произошли на глубине $h \sim 30$ км под постройкой вулкана 8 февраля в $13^{\text{h}}35^{\text{m}}$, 1 марта в $08^{\text{h}}37^{\text{m}}$ и 19 марта в $01^{\text{h}}37^{\text{m}}$ (рис. 4 а) [8].

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 [16]. В 2015 г. в каталог вошло $N = 825$ поверхностных (горизонт I) землетрясений с $3.2 \leq K_S \leq 6.0$, это \sim в 4.6 раза больше, чем в 2014 г. (табл. 3). Землетрясения с $K_{S\text{max}} = 6.0$ произошли в постройке вулкана 14 января в $15^{\text{h}}33^{\text{m}}$ и 6 февраля в $07^{\text{h}}41^{\text{m}}$ (рис. 4 а) [8]. Из табл. 3 видно, что количество землетрясений, лоцированных в горизонтах I и III, близко к среднегодовому числу за период 2000–2014 гг. В промежуточном горизонте (II) произошло всего $N = 10$ землетрясений ($3.4 \leq K_S \leq 5.0$) [8].

В табл. 3 приведены значения $K_{\text{пред}}$ и γ для всех трех горизонтов за 2000–2015 гг. Нужно отметить повышение представительного класса ($K_{\text{пред}} = 4.8$) в слое I в 2015 г. по сравнению с таковым в 2014 г. ($K_{\text{пред}} = 4.0$). Возможной причиной этого повышения может быть мощное вулканическое дрожание, которое сопровождало извержение влк. Ключевской.

В табл. 1 представлено распределение суммарного числа дней с определенным цветовым кодом активности на вулканах Камчатки. В 2015 г. по сравнению с предыдущим 2014 г. на влк. Ключевской наблюдалась повышенная сейсмическая и вулканическая активность, связанная с извержением вулкана. «Красный» код опасности выставлялся четыре раза: 25, 27 января, и 14, 15 февраля.

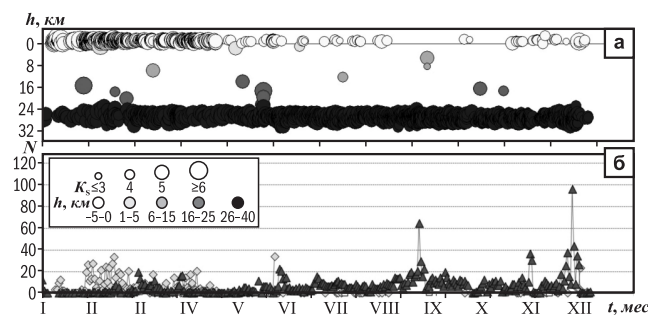


Рис. 4. Изменение во времени глубины гипоцентров h вулканических землетрясений (а); ежесуточного числа поверхностных (ромб), промежуточных (квадрат) и глубоких (треугольник) землетрясений (б), произошедших в радиусе 7 км от влк. Ключевской в 2015 г.

Вулкан Плоский Толбачик. Ближайшая сейсмическая станция «Каменистая» (KMNR) располагалась в 10 км от кратера вулкана (рис. 1) и регистрировала землетрясения с $K_S \geq 3.3$. Теоретический уровень надежной регистрации при существовавшей сети РТСС и благоприятных условиях составлял $K_{\text{min}} = 4.0$ [13]. В 2015 г. в районе вулкана было лоцировано 290 землетрясений с $2.5 \leq K_S \leq 6.6$ (табл. 2) в диапазоне глубин $h = -2.7\text{--}35.5$ км (рис. 5) [8]. Землетрясение с $K_{S\text{max}} = 6.6$ произошло 20 октября в $17^{\text{h}}06^{\text{m}}$ на глубине $h = 15.5$ км под постройкой вулкана (рис. 5 а).

В табл. 3 представлены данные по различным параметрам землетрясений. Из

таблицы видно, что в 2015 г. количество лоцированных землетрясений, их $K_{\text{пред}}$ и γ практически не изменились по сравнению с 2014 г. [4], но суммарной энергии было высвобождено в очагах меньше \sim в 7.5 раза. Если сравнивать выделенную суммарную энергию со всем предыдущим периодом 2000–2014 гг., в который вошло извержение имени 50-летия Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (ТТИ-50) [20], то это значение меньше в 900 раз.

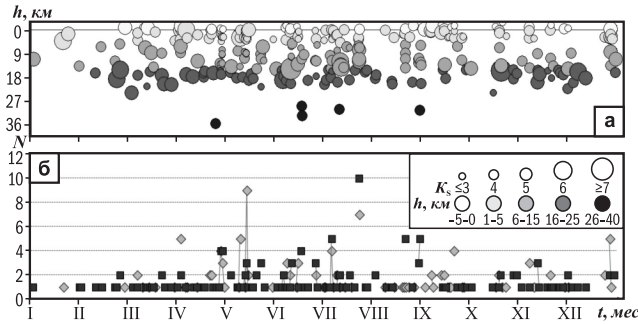


Рис. 5. Изменение во времени глубины гипоцентров h вулканических землетрясений (а); ежесуточного числа поверхностных $-5.0 \leq h \leq 5.0$ км (ромб) и глубоких $5.0 < h \leq 40.0$ км (квадрат) землетрясений (б), произошедших в радиусе 20 км от влк. Плоский Толбачик в 2015 г.

ленных городов Камчатки – Петропавловска-Камчатского и Елизово, поэтому из всех вулканов Камчатки представляют наибольшую потенциальную опасность.

Карта эпицентров и проекция гипоцентров на вертикальный разрез представлены на рис. 6.

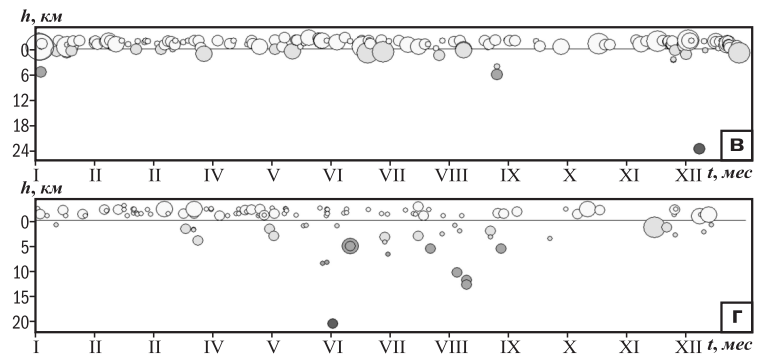
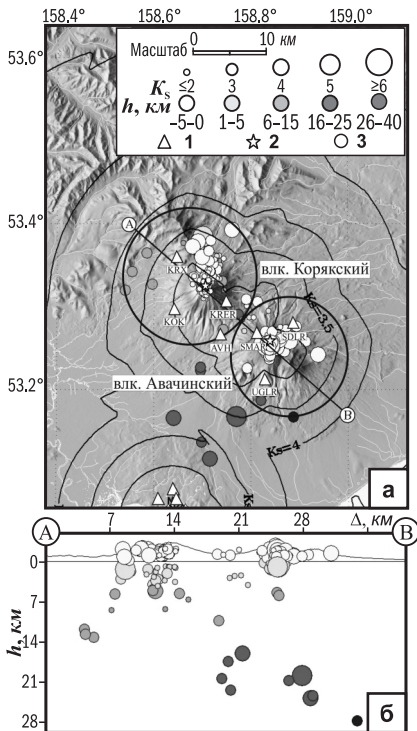


Рис. 6. Карта эпицентров землетрясений Авачинской группы вулканов в 2015 г. (а) и проекция гипоцентров на вертикальный разрез по линии А–В (б), а также изменение во времени глубины гипоцентров и класса вулканических землетрясений Авачинского (в) и Корякского (г) вулканов в 2015 г.

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

Теоретический уровень надежной регистрации землетрясений из района Авачинской группы изменялся от $K_{min}=2.5$ вблизи вершин вулканов до $K_{min}=3.5$ на краях областей, обозначенных окружностями (рис. 6) [13]. В табл. 4 представлены данные по параметрам землетрясений, зафиксированных в 2015 году. Сейсмичность вулканов Авачинской группы в 2015 г. соответствовала «фоновой». Землетрясение с $K_{Smax}=5.7$ произошло 3 января в 10^{h05m} в постройке влк. Авачинский ($h=-0.5$ км) [9]. Для сравнения в табл. 5 представлены данные по различным параметрам землетрясений за 2000–2014 гг.

Вулканическая активность проявлялась только в виде фумарольной деятельности.

Таблица 4. Распределение землетрясений Авачинской группы вулканов по энергетическим классам K_S в 2015 г.

Название вулкана	$R_{зоны},$ км	K_S					N_{Σ}	$\Sigma E,$ 10^6 Дж
		2	3	4	5	6		
Авачинский	8	70	73	18	6	1	168	1.471
Корякский	9	84	32	4	–	–	120	0.093
Вне вулканов	–	2	10	2	–	–	14	0.063
Всего	–	156	115	24	6	1	302	1.627

Таблица 5. Число землетрясений, их суммарная сейсмическая энергия, $K_{пред}$, угол наклона графика повторяемости для вулканов Авачинский, Корякский, Мутновский, Горелый, Кизимен, Жупановский в 2000–2015 гг.

Название вулкана	2000–2014 гг.				2014 г.				2015 г.			
	$N_{ср/год}$	$\Sigma E_{ср/год}, 10^6 \text{ Дж}$	$K_{пред}$	γ	N	$\Sigma E, 10^6 \text{ Дж}$	$K_{пред}$	γ	N	$\Sigma E, 10^6 \text{ Дж}$	$K_{пред}$	γ
Авачинский	171	9.5	2.6	0.6	266	3.5	2.5	0.57	168	1.471	2.0	0.53
Корякский	209	95	3.1	0.57	175	0.2	2.2	0.79	120	0.093	1.8	0.76
Мутновский	32	11.6	3.3	0.53	373	1.41	3.2	0.92	239	1.4	3.3	0.95
Горелый	578	16.7	3.5	0.86	21	0.31	–	–	8	0.2	–	–
Кизимен	9381	304019	5.0	0.79	136	355.1	3.0	0.37	205	252.6	3.7	0.49
Жупановский	227	481.9	4.3	0.47	211	471.6	4.3	0.46	136	389.9	3.7	0.41

Мутновско-Гореловская группа находится в 70 км к югу от г. Петропавловска-Камчатского, здесь расположены Мутновская и Верхне-Мутновская геотермальные станции (рис. 7). Теоретический уровень надежной регистрации землетрясений из района Мутновско-Гореловской группы вулканов при существовавшей сети РТСС был равен $K_{мин}=4.5$ [13]. В 2015 г. в районе Мутновско-Гореловской группы было лоцировано $N=295$ землетрясений (табл. 6) в диапазоне глубин $h=-1.4-15.5$ км с энергетическим классом $K_S=2.1-6.8$ [10], это в 1.5 раза меньше, чем в 2014 г. ($N=457, \Sigma E=0.41 \cdot 10^7 \text{ Дж}$). Высвобожденная в очагах землетрясений суммарная энергия составила $\Sigma E=1.15 \cdot 10^7 \text{ Дж}$, что в 2.8 раза больше, чем в 2014 г. [4]. Землетрясение с $K_{Smax}=6.8$ произошло 9 ноября в 10^h04^m на глубине $h=14.8$ км вне зон вулканов.

Таблица 6. Распределение землетрясений района Гореловско-Мутновской группы вулканов по энергетическим классам K_S в 2015 г.

Название вулкана	$R_{зоны}, \text{ км}$	K_S						N_{Σ}	$\Sigma E, 10^6 \text{ Дж}$
		2	3	4	5	6	7		
Горелый	7	–	2	5	1	–	–	8	0.24
Мутновский	7	18	163	51	7	–	–	239	1.42
Вне вулканов	–	2	22	11	10	2	1	48	9.82
Всего	–	20	187	67	18	2	1	295	11.48

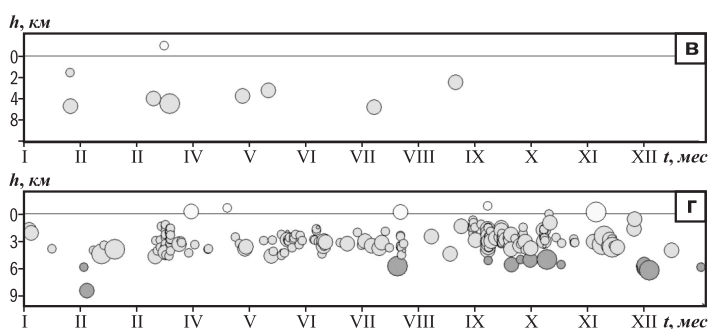
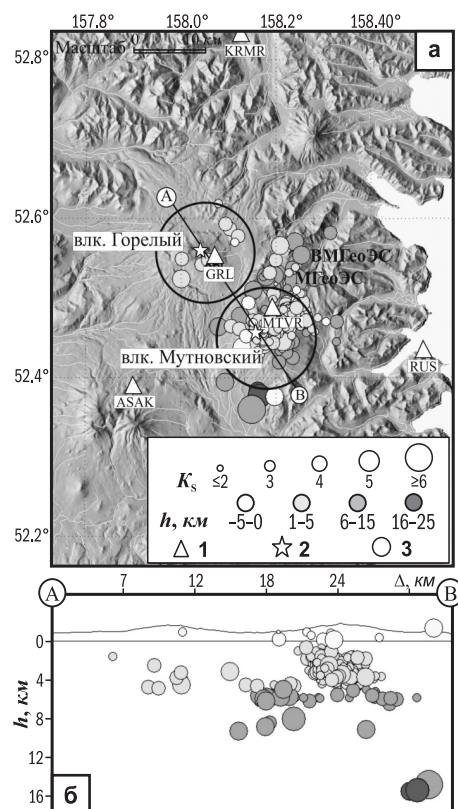


Рис. 7. Карта эпицентров (а) и проекция гипоцентров на вертикальный разрез по линии А–В (б) для землетрясений Гореловско-Мутновской группы в 2015 г., а также изменение во времени глубины гипоцентров h (в, г) вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 7 км от влк. Горелый и Мутновский, соответственно

1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан; 3 – окружность, огибающая область выборки землетрясений вокруг вулканов Горелый и Мутновский.

Ближайшая к влк. Горелый РТСС «Горелый» (GRL) располагалась в 4 км от кратера и позволяла регистрировать землетрясения с $K_S \geq 2.2$. В 2015 г. в каталог вошло всего восемь землетрясений с $K_S=3.0-5.3$ ($\Sigma E=0.24 \cdot 10^7 \text{ Дж}$) (табл. 6),

лоцированных в радиусе 7 км от вершины вулкана в диапазоне глубин $h=-1.0-4.9$ км [10] (рис. 7 в). В сравнении со среднегодовыми значениями за период 2000–2014 гг., когда в 2009 г. регистрировалась высокая сейсмичность, сопровождавшая образование высокотемпературной боки у основания стенки активного кратера, количество лоцированных событий и высвобожденная ими суммарная энергия меньше ~ в 72 и 78 раз соответственно (табл. 5). Землетрясение с $K_{Smax}=5.3$ произошло на глубине $h=4.5$ км под постройкой влк. Горелый 21 марта в 09^h50^m [10]. С 23 ноября по 24 декабря сейсмическая станция не работала.

РТСС «Мутновская» (MTVR) установлена на расстоянии ~ 3 км от активного кратера (рис. 7 а). Минимальный уровень регистрируемой сейсмичности по этой станции соответствует $K_S=2.0$. В 2015 г. в радиусе 7 км от вулкана было лоцировано 239 землетрясений (табл. 6) с $K_S=2.1-5.3$, диапазон глубин $h=-0.8-15.3$ км [10], (рис. 7 г). Представительный класс для них получился $K_{пред}=3.3$ при $\gamma=0.95\pm 0.07$, т.е. параметры не изменились по сравнению с таковыми в 2014 г. (табл. 5). Здесь следует отметить, что большое значение γ обычно свидетельствует о нетектонической природе сейсмических событий и может быть связано с магматической или гидротермальной деятельностью вулкана. Землетрясение с $K_{Smax}=5.3$ произошло 5 ноября в 02^h51^m в постройке влк. Мутновский ($h=-0.1$ км).

В 2015 г. высокий «оранжевый» код опасности для влк. Мутновский был выставлен 28 марта. По РТСС MTVR были зарегистрированы поверхностные сейсмические события продолжительностью 3–4 мин., возможно, сопровождавшие фреатические взрывы в кратере вулкана. По данным туристов, в этот день был слышен гул от взрывов со стороны влк. Мутновский, но визуально он был закрыт облачностью.

«Желтый» код опасности для влк. Горелый и влк. Мутновский выставлялся в основном из-за повышенного уровня сейсмичности, когда количество слабых локальных сейсмических событий превышало $N>50$ в сутки (табл. 1). Вулканическая активность влк. Горелый и влк. Мутновский в 2015 г. проявлялась в основном в виде фумарольной деятельности.

Вулкан Кизимен, самый южный из действующих вулканов Центральной Камчатской депрессии. Ближайшая РТСС «Кизимен» (KZV) располагалась на склоне вулкана, ~ в 2.5 км от вершины. Теоретический уровень надежной регистрации землетрясений для области, обозначенной окружностью с радиусом 15 км от вершины влк. Кизимен, соответствовал $K_{min}=3.5-4.0$ (рис. 8 а).

На рис. 8 представлены карта эпицентров землетрясений (а), проекция их гипоцентров на вертикальный разрез (б), а также изменение во времени различных параметров землетрясений, эпицентры которых находятся в окружности радиусом $R=15$ км от кратера вулкана (в, г).

В табл. 7. представлено распределение землетрясений из района влк. Кизимен по энергетическим классам. В 2015 г. в радиусе 15 км от вершины вулкана и в диапазоне глубин $h=-1.7-22.3$ км было лоцировано 205 землетрясений [11], которыми выделено энергии $\Sigma E=2.526 \cdot 10^8$ Дж. По сравнению с предыдущим 2014 г., количество землетрясений увеличилось в 1.5 раза, при этом их суммарная сейсмическая энергия уменьшилась в 1.4 раза (табл. 5).

Если сравнивать значения аналогичных параметров со всем периодом наблюдений, в который вошли подготовка и извержение влк. Кизимен с ноября 2010 г. по 2013 г. включительно, количество землетрясений снизилось ~ в 46 раз, а высвобожденная вулканическими землетрясениями энергия ~ в 1204 раза (табл. 5). Представительный энергетический класс для землетрясений получился $K_{пред}=3.7$, а наклон графика повторяемости $\gamma=0.49\pm 0.01$. Землетрясение с $K_{Smax}=8.3$ произошло в постройке вулкана ($h=-1.2$ км) 18 октября в 13^h49^m.

Таблица 7. Распределение землетрясений из района влк. Кизимен по энергетическим классам K_S в 2015 г.

Название вулкана	$R_{зоны},$ км	K_S								N_{Σ}	$\Sigma E, 10^6$ Дж
		2	3	4	5	6	7	8			
Кизимен	15	4	52	91	37	17	3	1	205	252.6	
Вне вулкана	–	9	78	85	63	16	5	1	257	216.6	
Всего	–	13	130	176	100	33	8	2	462	469.2	

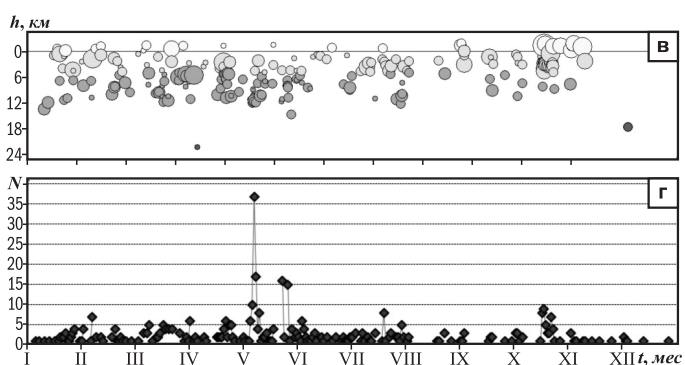
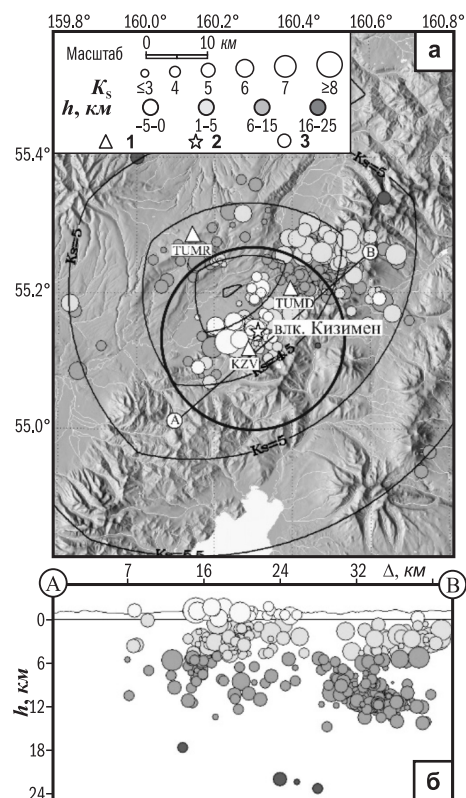


Рис. 8. Карта эпицентров (а) и проекция гипоцентров на вертикальную плоскость по линии А–В (б) для землетрясений района влк. Кизимен в 2015 г., а также изменение во времени глубины гипоцентров h (в) и ежесуточного числа вулканических землетрясений (г), произошедших в радиусе 15 км от влк. Кизимен:

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

Вулканическая активность влк. Кизимен в 2015 г. проявлялась только в виде мощной фумарольной деятельности, а сейсмичность превышала фоновую (желтый код) 22 дня, табл. 1.

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

Сейсмический мониторинг влк. Жупановский проводился удаленными РТСС, ближайшие из которых, «Седловина» (SDLR), «Корякский ретранслятор» (KRER) и «Арик» (KRX), располагались в 38–40 км от него в районе Авачинской группы вулканов (рис. 9 а). Теоретический уровень надежной регистрации существовавшей сети сейсмических станций соответствовал $K_{\min}=4.5-5.5$, рис. 9.

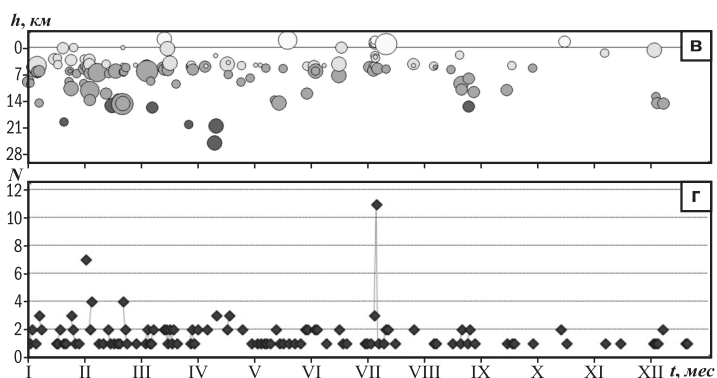
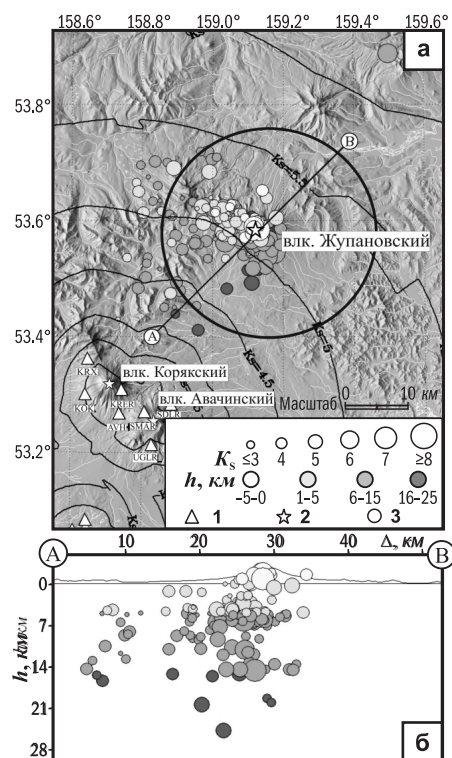


Рис. 9. Карта эпицентров (а) и проекция гипоцентров на вертикальную плоскость по линии А–В (б) для землетрясений района влк. Жупановский в 2015 г., а также изменение во времени глубины гипоцентров h (в) и ежесуточного числа вулканических землетрясений (г) произошедших в радиусе 20 км от влк. Жупановский:

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

В табл. 8. представлено распределение землетрясений из района влк. Жупановский по энергетическим клас-

сам. В 2015 г. в радиусе 20 км от вершины вулкана в земной коре лоцировано 136 землетрясений ($2.5 \leq K_S \leq 8.4$, $h = -2.1 - 24.9$ км), суммарная энергия составила $\Sigma E = 3.9 \cdot 10^8$ Дж [12]. Всего в каталог вошло 165 событий из района вулкана. Представительный класс получился равным $K_{пред} = 3.7$, а угол наклона графика повторяемости $\gamma = 0.41 \pm 0.06$. Землетрясение с $K_{Smax} = 8.4$ произошло на глубине $h = 14.7$ км под постройкой влк. Жупановский 20 февраля в 20^h21^m. Из-за удаленности сейсмических станций от вулкана (рис. 9 а) точность локации землетрясений существенно хуже относительно других контролируемых вулканов. Средняя ошибка в плане равна ~ 6.2 км, а по глубине ~ 8 км.

Таблица 8. Распределение землетрясений по энергетическим классам K_S из района влк. Жупановский в 2015 г.

Название вулкана	$R_{зоны}$, км	K_S								N_{Σ}	ΣE , 10^6 Дж
		2	3	4	5	6	7	8			
Жупановский	20	1	24	49	35	21	4	2	136	389.9	
Вне вулкана	–	–	7	14	6	1	1	–	29	7.6	
Всего	–	1	31	63	41	22	5	2	165	397.5	

В 2015 г. продолжалось извержение влк. Жупановский, сопровождавшееся пепловыми выбросами и селевыми потоками. Установка 13 мая на РТСС «Налычево» (NLC) системы видео наблюдений значительно облегчила сбор информации об активности вулкана. Повышенный код опасности в течение года выставлялся 137 дней, из них 5 – «красный» (табл. 1).

12 июля в 06^h26^m были зарегистрированы землетрясение с $K_S = 7.8$ в постройке вулкана ($h = -0.8$ км) и следующая за ним серия поверхностных событий, сопровождавших мощное эксплозивное извержение, продолжительностью 12 мин. В результате эксплозивной активности произошел обвал южного сектора конуса Приемыш и сход селевых потоков [22].

Заключение. Всего в 2015 г. в районе Северной, Авачинской и Мутновско-Гореловской групп вулканов, а также в районе вулканов Кизимен и Жупановский, было лоцировано 6688 землетрясений, высвобожденная ими сейсмическая энергия составила $\Sigma E = 1.4 \cdot 10^9$ Дж.

Как и в предшествующие годы, наиболее высокая вулканическая активность с эксплозивными извержениями и сходом раскаленных лавин наблюдалась на влк. Шивелуч. Хотя количество сейсмических событий, сопровождавших рост и обрушение купола, увеличилось, их энергия уменьшилась по сравнению с 2014 г. [4].

После годовой паузы, в августе 2013 г., сейсмическая активность и эруптивная деятельность вулкана Ключевской возобновились, а в январе–феврале 2014 г. они постепенно прекратились. В январе–мае 2015 г. наблюдалось усиление сейсмической активности и вершинное эксплозивно-эффузивное извержение влк. Ключевской.

Продолжилось эксплозивное извержение влк. Жупановский, начавшееся 23 октября 2013 г., после 56-летнего периода покоя. В результате эксплозивной активности 12 июля 2015 г. произошел обвал южного сектора конуса Приемыш и сход селевых потоков.

После завершения извержений влк. Плоский Толбачик и влк. Кизимен в 2013 г. их сейсмическая и вулканическая активность продолжали снижаться.

Вулканы Горелый и Мутновский представляют потенциальную опасность для геоэнергетического комплекса МГеоЭС и ВМГеоЭС. В 2015 г., как и в предшествующие несколько лет, практически вся сейсмичность была сосредоточена в районе влк. Мутновский. 28 марта по сейсмическим данным были зарегистрированы поверхностные события, возможно сопровождавшие фреатические взрывы в кратере.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках темы НИР АААА-А19-119031590060-3 госзадания № 075-00576-21 ФИЦ ЕГС РАН, с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Л и т е р а т у р а

1. Сенюков 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., Матвеев Е.А., Шевченко Ю.В., Ящук В.В., Музуров Е.Л. Сейсмические станции сети Камчатки и Командорских островов в 2015 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – [Электронное приложение]. – URL: <http://www.ceme.gsras.ru/zse/app-24.html>
4. 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.
5. Дроздин Д.В., Дроздина С.Я. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов «DIMAS» // Сейсмические приборы. – 2010. – Т. 46, № 3. – С. 22–34.
6. Кузин И.П. Фокальная зона и строение верхней мантии в районе Восточной Камчатки. – М.: Наука, 1974. – 145 с.
7. Weimer S. A software package to analyze seismicity: ZMAP // Seismological Research Letters. – 2001. – V. 72, N. 3. – P. 372–382.
8. Нуждина И.Н. (отв. сост.); Напылова Н.А., Напылова О.А., Демянчук М.В., Соболевская О.В. Каталог землетрясений Северной группы вулканов за 2015 год // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – [Электронное приложение]. – URL: <http://www.ceme.gsras.ru/zse/app-24.html>
9. Нуждина И.Н. (отв. сост.); Толокнова С.Л., Назарова З.А., Кожевникова Т.Ю., Соболевская О.В. Каталог землетрясений Авачинской группы вулканов за 2015 год // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – [Электронное приложение]. – URL: <http://www.ceme.gsras.ru/zse/app-24.html>
10. Нуждина И.Н. (отв. сост.); Кожевникова Т.Ю., Толокнова С.Л., Назарова З.А., Соболевская О.В. Каталог землетрясений Мутновско-Гореловской группы вулканов за 2015 год // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – [Электронное приложение]. – URL: <http://www.ceme.gsras.ru/zse/app-24.html>
11. Нуждина И.Н. (отв. сост.); Назарова З.А., Толокнова С.Л., Кожевникова Т.Ю., Соболевская О.В. Каталог землетрясений вулкана Кизимен за 2015 год // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – [Электронное приложение]. – URL: <http://www.ceme.gsras.ru/zse/app-24.html>
12. Нуждина И.Н. (отв. сост.); Кожевникова Т.Ю., Толокнова С.Л., Назарова З.А. Каталог землетрясений вулкана Жупановский за 2015 год // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – [Электронное приложение]. – URL: <http://www.ceme.gsras.ru/zse/app-24.html>
13. Сеньюков С.Л., Нуждина И.Н., Чебров В.Н. Вулканы Камчатки // Землетрясения России в 2015 году. – Обнинск: ГС РАН, 2017. – С. 88–94.
14. Нуждина И.Н. (отв. сост.); Напылова О.А., Напылова Н.А., Демянчук М.В., Соболевская О.В., Кожевникова Т.Ю., Толокнова С.Л., Назарова З.А. Вулканические районы Камчатки // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – [Электронное приложение]. – URL: <http://www.ceme.gsras.ru/zse/app-24.html>
15. Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. – М.: Наука, 1972. – 117 с.
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., 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.
18. Сеньюков С.Л. Прогноз извержений вулканов Ключевской и Безымянный на Камчатке // Saarbrücken: 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. Толбачинское Трещинное Извержение 2012–2013 гг. / Под ред. Е.И. Гордеева, Н.Л. Добрецова – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. – 421 с.
21. Масуренков Ю.П., Флоренский И.В., Мелекесцев И.В. Вулкан Жупановский // Действующие вулканы Камчатки. – М.: Наука, 1991. – Т. 2. – С. 218–225.
22. Горбач Н.В., Самойленко С.Б., Плечова А.А., Мельников Д.В. Обвал на вулкане Жупановский (Камчатка) в июле 2015 г.: первые данные и наблюдения // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. – 2015. – № 3. – С. 5–11.

SEISMICITY of the VOLCANIC AREAS of KAMCHATKA in 2015**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. Annual results of seismic activity of the Northern (Shiveluch, Kluchevskoy, Bezymianny, Krestovskiy, and Ushkovskiy), the Avacha (Avachinsky, and Koryakskiy), the Mutnovskiy-Gorely volcano groups and the Kizimen volcano are presented. 5464 earthquakes with $K_S=1.8-8.1$ were located for the Northern volcano group, 302 earthquakes with $K_S=1.7-5.7$ – for the Avacha volcano group, 295 earthquakes with $K_S=2.1-6.8$ for the Mutnovskiy-Gorely volcano group, 462 earthquakes with $K_S=2.2-8.3$ for Kizimen volcano, and 165 earthquakes with $K_S=2.5-8.4$ for Zhupanovskiy volcano in 2015. 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 2015: intensive volcanic activity of the Sheveluch volcano associated with a new cone; the summit explosive-effusive eruption of the Kluchevskoy volcano in January–April; and a continuation of seismic and volcanic activity of the Zhupanovskiy volcano after 56-year quite period.

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

DOI: 0.35540/1818-6254.2021.24.33

For citation: Seniukov, S.L., & Nuzhdina, I.N. (2021). [Seismicity of the volcanic areas of Kamchatka in 2015]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015), 349–361. (In Russ.). doi: 10.35540/1818-6254.2021.24.33

R e f e r e n c e s

1. Seniukov, S.L. (2006). Monitoring of Volcanic Activity in Kamchatka by Remote Sensing Techniques in 2000–2004. *Vulkanologiya i seismologiya* [Journal of Volcanology and Seismology], 3, 68–78.
2. Seniukov, S.L. (2013). Monitoring and prediction of volcanic activity in Kamchatka from seismological data: 2000–2010. *Journal of Volcanology and Seismology*, 7(1), 86–97. (In Russ.).
3. Chebrov, D.V., Matveenkov, E.A., Shevchenko, Yu.V., Yaschuk, V.V., & Muzurov, E.L. (2021). [Seismic stations of Kamchatka network in 2015]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015). Electronic supplement. Retrieved from <http://www.ceme.gsras.ru/zse/app-24.html> (In Russ.).
4. Seniukov, S.L., & Nuzhdina, I.N. (2019). [Kamchatka volcanoes]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), 375–387. (In Russ.).
5. Droznin, D.V., & Droznina, S.Ya. (2010). [The DIMAS interactive program for seismic signal processing]. *Seismicheskie pribory* [Seismic Instruments], 46(3), 22–34. (In Russ.).
6. Kuzin, I.P. (1974). *Fokal'naiia zona i stroenie verkhnei mantii v raione Vostochnoi Kamchatki* [Focal zone and upper mantle structure in the region of Eastern Kamchatka]. Moscow: Nauka Publ., 145 p. (In Russ.).
7. Weimer, S. (2001). A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seismological Research Letters*, 72(3), 373–382.
8. Nuzhdina, I.N., Napylova, N.A., Napylova, O.A., Demyanchuk, M.V., & Sobolevskaya, O.V. (2021). [Catalogue of earthquakes of the Northern volcano group in 2015]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015). Electronic supplement. Retrieved from <http://www.ceme.gsras.ru/zse/app-24.html> (In Russ.).
9. Nuzhdina, I.N., Toloknova, S.L., Nazarova, Z.A., Kozhevnikova, T.Iu., & Sobolevskaya, O.V. (2021). [Catalogue of earthquakes of the Avacha volcano group in 2015]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015). Electronic supplement. Retrieved from <http://www.ceme.gsras.ru/zse/app-24.html> (In Russ.).
10. Nuzhdina, I.N., Kozhevnikova, T.Iu., Toloknova, S.L., Nazarova, Z.A., & Sobolevskaya, O.V. (2021). [Catalogue of earthquakes of the Mutnovskiy-Gorely volcano group in 2015]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015). Electronic supplement. Retrieved from <http://www.ceme.gsras.ru/zse/app-24.html> (In Russ.).
11. Nuzhdina, I.N., Nazarova, Z.A., Toloknova, S.L., Kozhevnikova, T.Iu., & Sobolevskaya, O.V. (2021). [Catalogue of earthquakes of the Kizimen volcano in 2015]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015). Electronic supplement. Retrieved from <http://www.ceme.gsras.ru/zse/app-24.html> (In Russ.).

12. Nuzhdina, I.N., Kozhevnikova, T.Iu., Toloknova, S.L., & Nazarova, Z.A. (2021). [Catalogue of earthquakes of the Zhupanovsky volcano in 2015]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015). Electronic supplement. Retrieved from <http://www.ceme.gsras.ru/zse/app-24.html> (In Russ.).
13. Seniukov, S.L., Nuzhdina, I.N., & Chebrov, V.N. (2017). [Volcanoes of Kamchatka]. In *Zemletriaseniia Rossii v 2015 godu* [Earthquakes in Russia, 2015] (pp. 88–94). Obninsk: GS RAS Publ. (In Russ.).
14. Nuzhdina, I.N., Napylova, N.A., Napylova, O.A., Demyanchuk, M.V., Sobolevskaya, O.V., Kozhevnikova, T.Iu., Toloknova, S.L., & Nazarova, Z.A. (2017). [Volcanic areas of Kamchatka]. In *Zemletriaseniia Rossii v 2015 godu* [Earthquakes in Russia, 2015], Appendix on CD. (In Russ.).
15. Fedotov, S.A. (1971). *Energeticheskaia klassifikatsiia Kurilo-Kamchatskikh zemletriasenii i problema magnitude* [Energy classification of the Kuril-Kamchatka earthquakes and the problem of magnitudes]. Moscow: Nauka Publ., 117 p. (In Russ.).
16. Fedotov, S.A., Zharinov, N.A., & Gontovaia, L.I. (2010). The magmatic system of the Klyuchevskaya group of volcanoes inferred from data on its eruptions, earthquakes, deformation, and deep structure. *Journal of Volcanology and Seismology*, 4(1), 1–33. (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 between January 1, 2001 and July 31, 2005. *Journal of Volcanology and Seismology*, 3(3), 191–199.
18. Seniukov, S.L. (2013). *Prognoz izverzenii 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 p. (In Russ.).
20. Gordeev, E.I., & Dobretsova, N.L. (2017). *Tolbachinskoe Treshchinnoe Izverzhenie 2012-2013 gg.* [Tolbachik Fissure Eruption 2012-2013]. Novosibirsk, Russia: SB RAS Publ., 421 p. (In Russ.).
21. Masurenkov, Iu.P., Florenskii, I.V., & Melekestsev, I.V. (1991). *Vulkan Zhupanovskii* [Active volcanoes of Kamchatka]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 2, 215–225. (In Russ.).
22. Samoilenko, S.B., Mel'nikov, D.V., Chirkov, S.A., & Manevich, T.M. (2014). [Activation of the Zhupanovsky volcano in 2013–2014]. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle* [Bulletin of KRAESC. Earth Sciences], 23(1), 21–26. (In Russ.).