

IV. СЕЙСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ВУЛКАНОВ

УДК 550.348.438(517.66)

ВУЛКАНЫ КАМЧАТКИ

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. 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 и Жупановский за год. В 2014 г. в районе Северной группы лоцировано 4983 землетрясения с $K_s=2.1-8.7$, Авачинской – 469 с $K_s=1.6-6.1$, Мутновско-Гореловской – 459 с $K_s=1.9-6.1$, 220 землетрясений с $K_s=2.4-8.5$ вблизи влк. Кизимен и 238 с $K_s=2.5-8.4$ – влк. Жупановский. По данным всех видов наблюдений зафиксированы и детально прослежены все периоды активизаций вулканов в 2014 г.: интенсивная вулканическая деятельность влк. Шивелуч, связанная с ростом нового купола, продолжение сейсмической и вулканической активизации влк. Жупановский после 56-летнего периода покоя и постепенное завершение в январе-феврале вершинного эксплозивно-эффузивного извержения вулкана Ключевской, начавшееся в августе 2013 г.

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

DOI: 10.35540/1818-6254.2020.23.38

Для цитирования: Сениуков С.Л., Нуждина И.Н. Вулканы Камчатки // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 23 (2014 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – С. 375–387. doi: 10.35540/1818-6254.2020.23.38

Введение. В 2014 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 Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН) [3]. Сеть станций, осуществляющая контроль сейсмической активности вулканов в 2014 г., не изменилась. Как и в предыдущие годы, сеть позволяла проводить детальные наблюдения в режиме, близком к реальному времени, для Северной (влк. Шивелуч, Ключевской, Безымянный, Плоский Толбачик, Ушковский и Крестовский), Авачинской (влк. Авачинский, Корякский), Мутновско-Гореловской (влк. Горелый и Мутновский) групп вулканов, а также для влк. Кизимен и влк. Жупановский.

Методика обработки вулканических землетрясений, локальные годографы не изменились, по сравнению с таковыми в 2013 г., и изложены в [1, 4]. Здесь важно отметить, что обработка и определение параметров землетрясений проводились по программе DIMAS [5] с использованием различных одномерных скоростных моделей среды [1, 6]. Исследование представительных классов и углов наклона графиков повторяемости для выборок вулканических землетрясений проводилось с помощью пакета программ ZMAP [7].

Ниже приведены данные о сейсмической активности Северной, Авачинской, Мутновско-Гореловской групп вулканов и отдельно вулканов Кизимен и Жупановский. 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 4983 землетрясения по Северной группе [8], 469 – по Авачинской [9], 457 – по Мутновско-Гореловской [10], 220 – по влк. Кизимен [11] и 238 – 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 и в соответствующих таблицах ниже по тексту статьи 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 для вулканов в 2014 г. были определены и приведены в работе [13] и обычно показывают возможный, ожидаемый, минимальный уровень в районе вершины вулкана при условии работы всех станций, что не всегда выполняется. Поэтому фактический представительный класс $K_{\text{пред}}^1$ обычно получается несколько выше.

В зависимости от уровня сейсмической и вулканической активности вулкана, ежедневно ему присваивался цветовой код опасности. Цветовая шкала имеет четыре основные градации активности в соответствии с общими параметрами. «Красный» код присваивается при очень высокой сейсмической активности и регистрации пепловых выбросов с высотой 8 км над уровнем моря и выше; «оранжевый» – при регистрации большого количества локальных землетрясений, пепловых выбросов до 8 км выше уровня моря или при фиксировании на вулкане лавовых потоков. «Желтый» код выставляется, когда зарегистрированная сейсмичность немного превышает фоновую, наблюдаются слабые пепловые выбросы, высота которых не превышает 1 км над вершиной вулкана, а также при наличии термальных аномалий по спутниковым данным. Когда на вулкане сейсмическая и вулканическая активность не превышает фонового уровня, выставляется «зеленый» код. Кроме этого используется пятый код – белый, показывающий отсутствие сейсмических данных по техническим причинам на опорных для вулканов станциях. При оценке цветового кода активности вулканов учитываются сейсмические события, зарегистрированные в земной коре в пределах окружности вокруг вулкана. Радиусы окружностей приведены ниже в подрисуночной подписи для карт эпицентров землетрясений. Подробные результаты мониторинга активных вулканов Камчатки в 2014 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 в 2012–2014 гг.

год Вулкан\Код	2012 г.					2013 г.					2014 г.				
	Б	З	Ж	О	К	Б	З	Ж	О	К	Б	З	Ж	О	К
Шивелуч	1	103	181	67	14	–	7	101	249	8	–	75	116	156	18
Ключевской	14	288	64	–	–	14	211	76	56	8	–	295	70	–	–
Безымянный	33	264	66	1	2	319	42	4	–	–	2	358	5	–	–
Пл. Толбачик	2	322	7	34	1	7	38	93	227	–	–	258	107	–	–
Авачинский	–	366	–	–	–	4	361	–	–	–	1	363	1	–	–
Корякский	–	366	–	–	–	6	359	–	–	–	–	365	–	–	–
Мутновский	4	301	61	–	–	18	303	44	–	–	37	231	97	–	–
Горелый	93	–	273	–	–	39	10	316	–	–	5	137	223	–	–
Кизимен	16	43	66	241	–	–	34	60	271	–	–	320	45	–	–
Жупановский	нет данных										3	76	88	26	4

Как следует из табл. 1, влк. Шивелуч сохранял лидирующее положение по совокупности видов наблюдений в течение 2012–2014 гг. В 2014 г. на нем 174 раза выставлялся оранжевый и красный код опасности. Следующим по активности в 2014 г. был влк. Жупановский.

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

Далее рассмотрим каждый вулкан в отдельности.

Северная группа вулканов. Каталог землетрясений Северной группы вулканов за 2014 г. [8] содержит 4983 землетрясения. Распределение землетрясений по вулканам и по энергетическим классам [15] представлено в табл. 2. Карта эпицентров землетрясений и условные зоны сейсмичности рассматриваемых вулканов показаны на рис. 1.

Таблица 2. Распределение числа землетрясений по энергетическим классам K_S и суммарная сейсмическая энергия землетрясений в районе Северной группы вулканов в 2014 г.

Название вулкана	$R_{зоны}, км$	K_S								N_{Σ}	$\Sigma E, 10^8 Дж$
		2	3	4	5	6	7	8	9		
Шивелуч	12	–	9	301	133	17	1	–	1	462	4.370
Ключевской	7	–	46	2322	1537	29	–	–	–	3934	1.960
Безымянный	6	6	19	2	–	–	–	–	–	27	0.001
Плоский Толбачик	20	1	102	173	27	6	4	1	–	314	1.364
Крестовский и Ушковский	10.1	–	11	23	1	–	–	–	–	35	0.003
Вне вулканов	–	–	14	101	62	22	8	3	1	211	8.049
Всего	–	7	201	2922	1760	74	13	4	2	4983	15.747

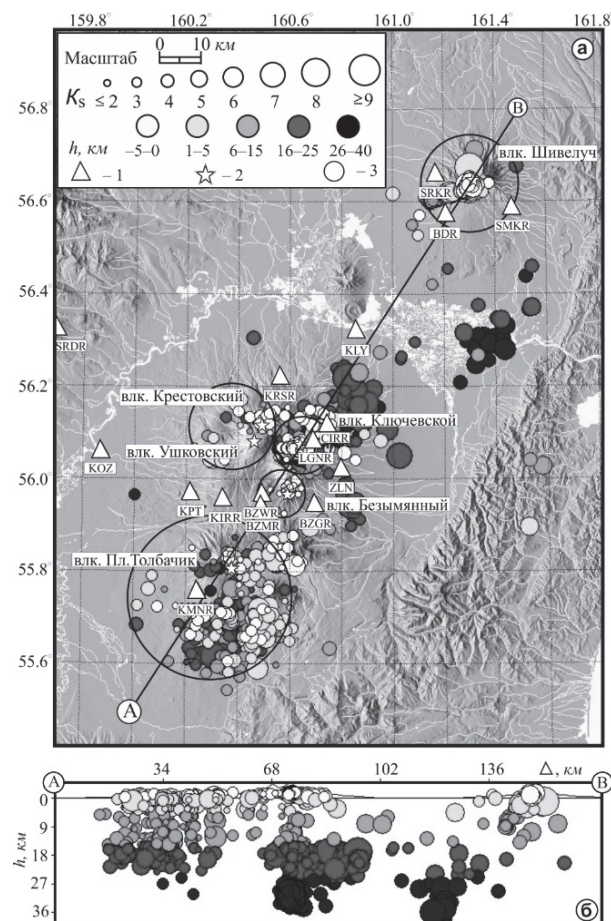


Рис. 1. Карта эпицентров (а) землетрясений Северной группы вулканов за 2014 г. и проекция гипоцентров (б) на вертикальную плоскость, проходящую по линии А–В

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.

В 2014 г. суммарное число землетрясений, лоцированных в районе Северной группы вулканов, составило $N_{\Sigma}=4983$, суммарная энергия – $\Sigma E=15.7 \cdot 10^8 Дж$ (табл. 2), что незначительно отличается от таковых значений в 2013 г. (табл. 3) [4].

В табл. 3 приведены значения параметров сейсмического режима вулканов Северной группы за 2012–2014 гг.

Наиболее активной по числу землетрясений в 2014 г., как и в 2013 г. (табл. 3) [4], была зона влк. Ключевской. Здесь произошло 79 % землетрясений от общего числа событий, вошедших в каталог. В 2014 г. представительными для района Северной группы вулканов стали землетрясения с $K_{пред}=4.0$, т.е. уровень надежной регистрации уменьшился

по сравнению с $K_{пред}=4.8$ в 2013 г. (табл. 3). Уменьшение уровня надежной регистрации связано с понижением или прекращением вулканического дрожания, которое сопровождало извержения вулканов влк. Плоский Толбачик и влк. Ключевской и не позволяло обрабатывать слабые землетрясения. Наклон графика повторяемости в 2014 г. для землетрясений этого района получился немного положе, $\gamma=0.89 \pm 0.07$ по сравнению с $\gamma=1.07$ в 2013 г. (табл. 3). Землетрясение с максимальным классом $K_S=8.7$ произошло 17 ноября в 11^h18^m на глубине $h=21.8 км$ северо-восточнее зоны влк. Ключевской [8].

Таблица 3. Число землетрясений, их суммарная сейсмическая энергия, представительный класс, угол наклона графика повторяемости для вулканов Северной группы в 2012–2014 гг.

Название вулкана	2012 г.				2013 г.				2014 г.			
	N	$\Sigma E, 10^8 \text{ Дж}$	$K_{\text{пред}}$	γ	N	$\Sigma E, 10^8 \text{ Дж}$	$K_{\text{пред}}$	γ	N	$\Sigma E, 10^8 \text{ Дж}$	$K_{\text{пред}}$	γ
Северная группа	7638	2220	4.0	0.74	4390	16.5	4.8	1.07	4983	15.7	4.0	0.89
Шивелуч	340	0.03	4.6	1.04	1336	1.07	4.0	0.95	462	4.370	4.0	0.78
Ключевской:	5983	3.81	–	–	2737	6.67	–	–	3934	1.96	–	–
I слой	65	–	4.0	0.66	470	–	4.1	0.78	181	0.026	4.0	1.66
II слой	16	–	–	–	140	–	4.3	0.74	31	0.006	–	–
III слой	5902	–	4.0	0.96	2127	–	4.9	1.5	3722	1.93	4.0	0.87
Безымянный	222	0.14	3.2	0.62	8	0.001	–	–	27	0.001	–	–
Плоский	797	2000	3.7	0.44	112	2.85	4.1	0.4	314	1.364	3.6	0.62
Толбачик												
Крестовский и Ушковский	33	0.01	–	–	14	0.01	–	–	–	–	–	–

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

Вулкан Шивелуч. Теоретический уровень надежной регистрации K_{min} [13] изменяется от $K_{\text{min}}=3.5$ в центре до $K_{\text{min}}=4.5$ на краях для области, обозначенной окружностью с радиусом 12 км на рис. 1.

В 2014 г. на влк. Шивелуч продолжалось экстремально-эксплозивное извержение, связанное с ростом нового купола. Извержение сопровождалось вулканическим дрожанием, мощными газо-пепловыми выбросами, сходом пирокластических потоков и горячих лавин. Количество землетрясений с $3.1 \leq K_S \leq 8.6$ [8], произошедших в радиусе 12 км от вулкана и диапазоне глубин $h=-2.6-13.9$ км (рис. 2 а, б), в 2014 г. уменьшилось ~ в 3 раза, а высвобожденная в их очагах энергия выросла ~ в 4 раза, по сравнению с таковыми в 2013 г. (табл. 3). Представительный класс $K_{\text{пред}}=4.0$ и угол наклона графика повторяемости $\gamma=0.78 \pm 0.06$ в 2014 г. практически не изменились, по сравнению с таковыми в 2013 г. (табл. 3).

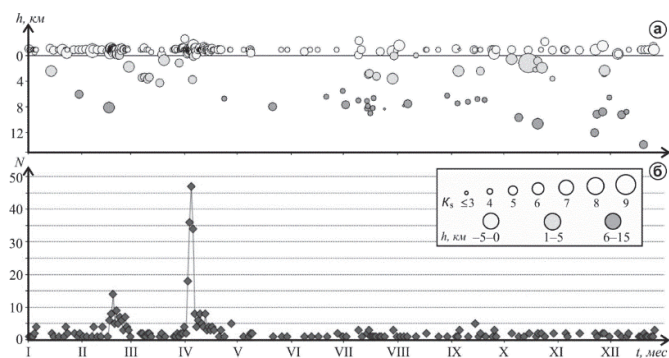


Рис. 2. Изменение во времени глубины гипоцентров h (а) и количества N (б) вулканических землетрясений, лоцированных в радиусе 12 км от влк. Шивелуч в 2014 г.

Землетрясение с максимальным энергетическим классом $K_S=8.6$ произошло 15 октября в 02^h16^m на глубине $h=1.2$ км под постройкой вулкана (рис. 2 а) [8]. В течение года было зарегистрировано два кратковременных всплеска сейсмической активности 16–25 февраля ($N=70$) и 2–12 апреля ($N=178$).

Максимальное количество землетрясений ($N=47$) за сутки зафиксировано 4 апреля (рис. 2 б) [8].

По-прежнему в течение всего года на спутниковых снимках регистрировалась термальная аномалия (рис. 3 а), свидетельствующая о постоянном присутствии на поверхности горячего материала, сопровождающего экстремальный рост купола. По видеоданным и визуальным наблюдениям регистрировались пепловые выбросы (рис. 3 б) и сход пирокластических потоков. Максимальный пепловый выброс высотой 12 км над уровнем моря был зафиксирован 24 сентября.

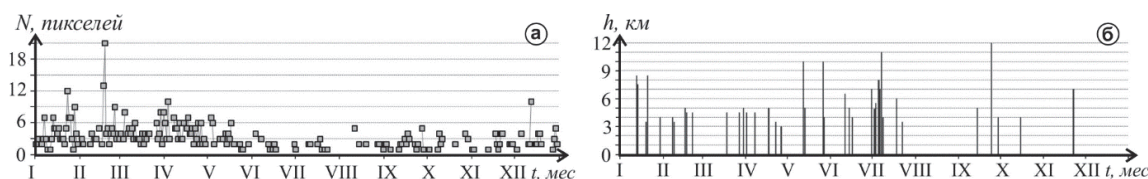


Рис. 3. Изменение во времени размера термальной аномалии на влк. Шивелуч по данным спутников NOAA16 и NOAA17 (а); высота газо-пепловых выбросов над уровнем моря по видеоданным и визуальным наблюдениям сотрудников сейсмической станции «Ключи» (б) в 2014 г.

Сравнение активности влк. Шивелуч с таблицей в цветовых кодах (табл. 1) позволяет сделать вывод, что она в 2014 г. была такой же высокой, как и в 2013 г.

Вулкан Ключевской. Существующая сеть станций (рис. 1) позволяет регистрировать при благоприятных условиях землетрясения, начиная с $K_{\min}=3.0$ [13]. Ближайшая телеметрическая станция «Логоинов» расположена в 4 км от кратера и может регистрировать землетрясения в районе кратера с $K_S \geq 2.2$. В 2014 г. в радиусе 7 км от влк. Ключевской и диапазоне глубин $h=-2.4-35.1$ км было лоцировано 3934 землетрясения (табл. 2), это в 1.4 раза больше, чем в 2013 г. (табл. 3) [4]. Но суммарная энергия, высвобожденная в очагах этих землетрясений, меньше таковой в 2013 г. в 3.4 раза (табл. 3). Причиной такого соотношения является наличие в 2013 г. четырех землетрясений с относительно высоким энергетическим классом $7.6 \leq K_S \leq 7.9$. Карта эпицентров и проекция гипоцентров на вертикальный разрез представлены на рис. 1, а графики изменения во времени параметров сейсмической активности вулкана – на рис. 4. Характер сейсмичности Ключевского 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]. Поэтому все землетрясения в 2014 г., как и в предыдущие годы, были разделены по трем слоям: поверхностные (I $\rightarrow -5.0 \leq h \leq 5.0$ км); промежуточные (II $\rightarrow 5.0 < h \leq 20.0$ км) и глубокие (III $\rightarrow 20 < h < 40.0$ км) (табл. 3).

В 2014 г., как и в предыдущем 2013 г., практически вся сейсмичность влк. Ключевской была сосредоточена в нижнем (III) горизонте (рис. 4 б, в), где генерируются глубокие длиннопериодные землетрясения, в образовании которых активную роль играет магматический расплав [19]. Всего в каталог вошло $N=3722$ ($3.3 \leq K_S \leq 5.8$) глубоких землетрясения, максимальное количество $N=44$ за сутки было зарегистрировано 20 сентября (рис. 4 б). Землетрясения с максимальным классом $K_S=5.8$ произошли 18 мая в 05^h34^m и 13 июля в 04^h23^m на глубине $h \sim 30$ км под постройкой вулкана (рис. 4 а) [8].

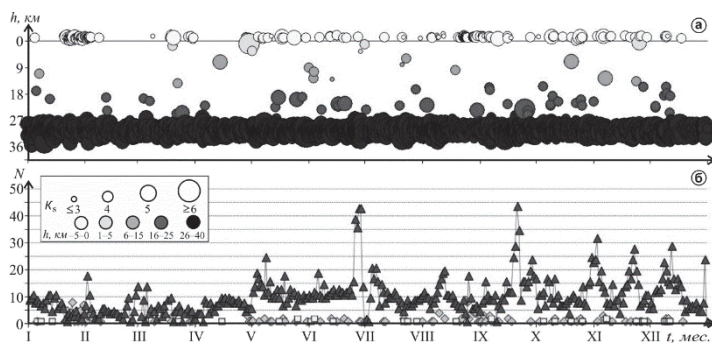


Рис. 4. Изменение во времени глубины гипоцентров h вулканических землетрясений (а); ежесуточного числа поверхностных (ромб), промежуточных (квадрат) и глубоких (треугольник) землетрясений (б), произошедших в радиусе 7 км от влк. Ключевской в 2014 г.

В слоях 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 2014 г. произошло 181 поверхностное землетрясение с $2.8 \leq K_S \leq 5.6$ (слой I) и 31 в промежуточном слое (II) с $3.4 \leq K_S \leq 5.0$.

В табл. 3 представлены данные по определению представительного класса и угла наклона графика повторяемости для всех трех слоев за 2012–2014 гг. Можно отметить некоторое уменьшение представительных классов для всех слоев в 2014 г., по сравнению с таковыми в 2013 г., из-за снижения и прекращения вулканического дрожания, которое сопровождало извержения вулканов влк. Плоский Толбачик и влк. Ключевской.

Повышенный «желтый» код опасности выставлялся в основном в январе–феврале 2014 г., когда постепенно завершалось вершинное взрывно-эффузивное извержение вулкана, начавшееся в августе 2013 г.

Вулкан Плоский Толбачик. Ближайшая телеметрическая станция «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 станций (рис. 1) и благоприятных условиях составляет $K_{\min}=4.0$ [13]. В 2014 г. в районе вулкана было зарегистрировано 314 землетрясений с $2.5 \leq K_S \leq 8.0$ (табл. 2) в диапазоне глубин $h=-1.8-27.1$ км [8] (рис. 5). Землетрясение с максимальным классом $K_S=8.0$ произошло 24 августа в 23^h36^m на глубине $h=17.1$ км на юге Толбачинского дола (рис. 5 а) [8].

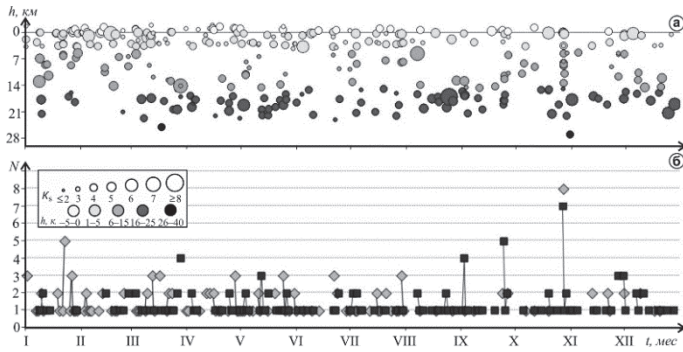


Рис. 5. Изменение во времени глубины гипоцентров h вулканических землетрясений (а) и ежесуточного числа поверхностных – $5.0 \leq h \leq 5.0$ км (ромб) и глубоких $5.0 < h \leq 40.0$ км (квадрат) землетрясений (б), произошедших в радиусе 20 км от влк. Плоский Толбачик в 2014 г.

В табл. 3 представлены данные по различным параметрам землетрясений, лоцированных в 2012–2014 гг. Количество землетрясений, по сравнению с предыдущим 2013 г., увеличилось ~ в 2.8 раза, но их суммарная энергия уменьшилась ~ в 2.1 раза. По сравнению с 2012 г., когда на вулкане регистрировалась высокая сейсмическая активность, связанная с подготовкой и началом мощного Толбачинского трещинного извержения имени 50-летия Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (ТТИ-50) [20], в 2014 г. в очагах землетрясений выделено суммарной энергии ~ в 1471 раз меньше, хотя количество лоцированных землетрясений уменьшилось всего в 2.5 раза. Представительный класс в 2014 г. соответствует $K_{пред}=3.6$, угол наклона графика повторяемости $\gamma=0.62 \pm 0.05$ (табл. 3).

В 2014 г. повышенный «желтый» код опасности в основном выставлялся по спутниковым данным при регистрации термальной аномалии над еще неостывшими лавовыми потоками, излившимися в 2012–2013 гг., и четыре раза из-за повышенного уровня сейсмичности (табл. 1).

На влк. Безымянный, Ушковский и Крестовский в 2014 г. наблюдалась слабая сейсмическая активность, никаких проявлений вулканической активности не отмечено. Информация о цветовых кодах и сейсмическом режиме вулканов имеется в табл. 1 и 3.

Авачинская группа вулканов. В эту группу входят два действующих вулкана: Авачинский и Корякский. Из всех вулканов они представляют наибольшую потенциальную опасность, т.к. расположены в 30 км от наиболее густонаселенных городов Камчатки – Петропавловска-Камчатского и Елизово.

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

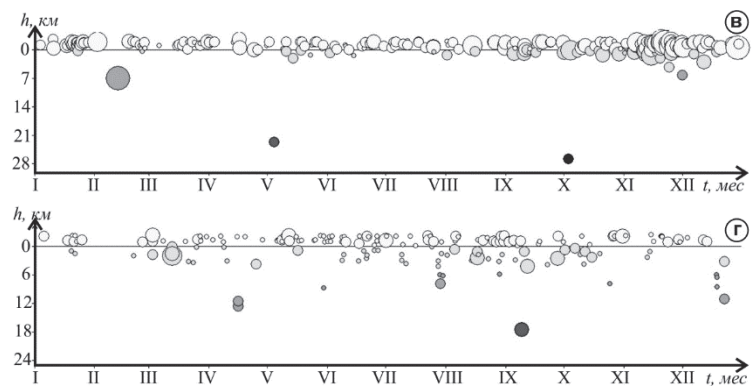
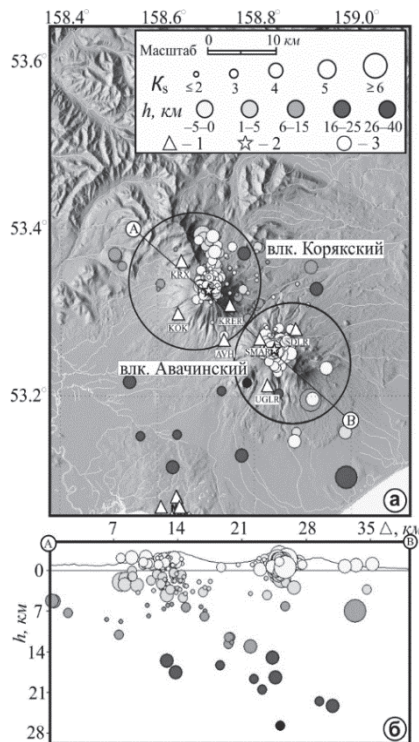


Рис. 6. Карта эпицентров землетрясений Авачинской группы вулканов в 2014 г. (а) и проекция гипоцентров на вертикальный разрез по линии А–В (б), а также изменение во времени параметров вулканических землетрясений Авачинского (в) и Корякского (г) вулканов в 2014 г.

1 – сейсмическая станция; 2 – активный вулкан; 3 – окружность, огибающая область выборки землетрясений вокруг Авачинского ($R=8$ км) и Корякского вулканов ($R=9$ км).

Теоретический уровень надежной регистрации землетрясений из района Авачинской группы вулканов равен $K_{min}=3.0$ [13]. В табл. 4 представлены данные по параметрам землетрясений, зафиксированных в 2014 г. Сейсмичность вулканов Авачинской группы в 2014 г. соответствовала «фоновой», землетрясение с максимальным классом $K_S=6.1$ произошло 5 марта

в 05^h16^m вне зон Авачинского и Корякского вулканов на глубине $h=15.9$ км [9]. Для сравнения в табл. 5 представлены данные по различным параметрам землетрясений за 2012–2014 гг.

Вулканическая активность проявлялась только в виде фумарольной деятельности.

Таблица 4. Распределение чисел землетрясений по энергетическим классам K_S и выделяющаяся сейсмическая энергия в районах Авачинской группы вулканов в 2014 г.

Название вулкана	$R_{зоны},$ км	K_S					N_{Σ}	$\Sigma E,$ 10^6 Дж
		2	3	4	5	6		
Авачинский	8	79	119	57	8	3	266	3.501
Корякский	9	131	36	7	1	–	175	0.202
Вне вулканов	–	9	9	9	–	1	28	1.343
Всего	–	219	164	73	9	4	469	5.046

Таблица 5. Число землетрясений, их суммарная сейсмическая энергия, представительный класс, угол наклона графика повторяемости для вулканов Авачинский, Корякский, Мутновский, Горелый, Кизимен, Жупановский в 2012–2014 гг.

Название вулкана	2012 г.				2013 г.				2014 г.			
	N	$\Sigma E,$ 10^7 Дж	$K_{пред}$	γ	N	$\Sigma E,$ 10^7 Дж	$K_{пред}$	γ	N	$\Sigma E,$ 10^7 Дж	$K_{пред}$	γ
Авачинский	157	0.2	2.9	0.69	171	0.25	2.5	0.43	266	0.35	2.5	0.57
Корякский	11	0.01	–	–	25	0.01	–	–	175	0.02	2.2	0.79
Мутновский	24	0.1	–	–	22	–	–	–	373	0.14	3.2	0.92
Горелый	38	0.9	–	–	67	2.06	3.4	0.52	21	0.03	–	–
Кизимен	1973	31	4.3	0.85	170	68.2	4.0	0.45	136	35.5	3.0	0.37
Жупановский	–	–	–	–	16	1.0	–	–	211	47.2	4.3	0.46

Мутновско-Гореловская группа находится в 70 км к югу от г. Петропавловск-Камчатский, здесь расположены Мутновская и Верхне-Мутновская геотермальные станции (рис. 7). Теоретический уровень надежной регистрации землетрясений из района Мутновско-Гореловской группы вулканов при существующей сети сейсмических станций равен $K_{min}=4.5$ [13]. В 2014 г. в районе Мутновско-Гореловской группы было лоцировано $N=457$ землетрясений (табл. 6) в диапазоне глубин $h=-0.9-21.2$ км с энергетическим классом $K_S=1.9-6.1$ [10]. Высвобожденная в очагах землетрясений суммарная энергия составила $\Sigma E=0.41 \cdot 10^7$ Дж, что меньше ~ в 7 раз такого значения 2013 г. [4]. Землетрясение с максимальным классом $K_S=6.1$ произошло на глубине $h=5.5$ км вне зон вулканов 24 декабря в 10^h20^m [10].

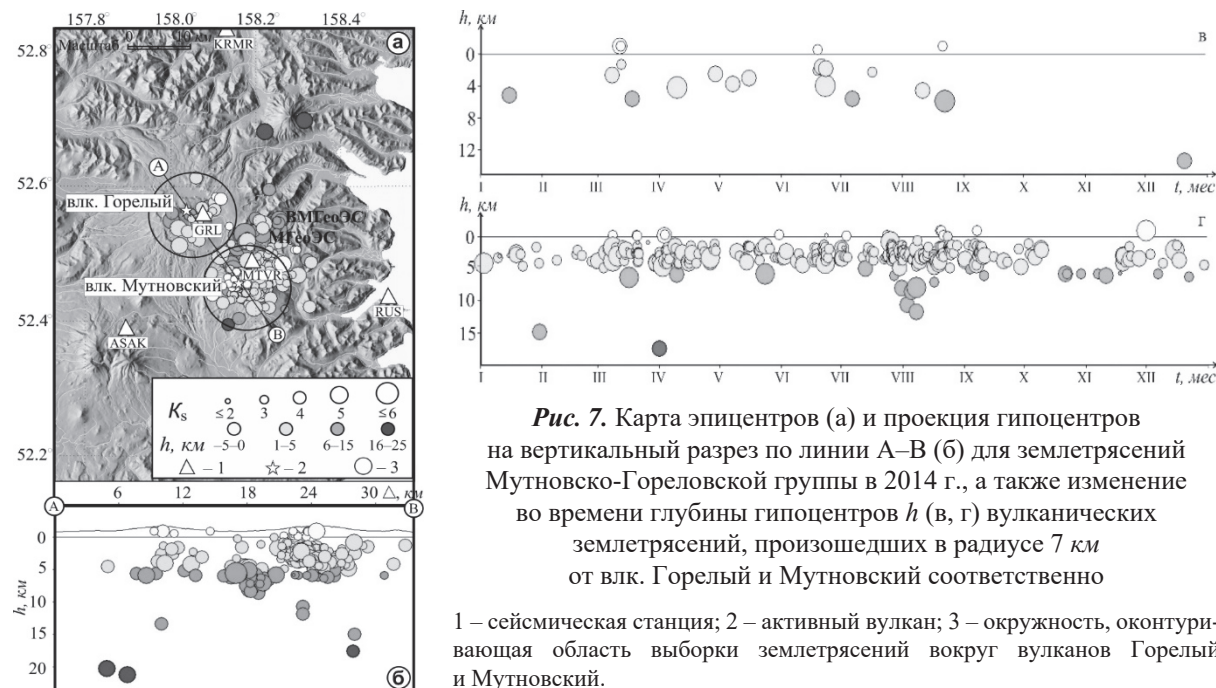


Рис. 7. Карта эпицентров (а) и проекция гипоцентров на вертикальный разрез по линии А–В (б) для землетрясений Мутновско-Гореловской группы в 2014 г., а также изменение во времени глубины гипоцентров h (в, г) вулканических землетрясений, произошедших в радиусе 7 км от влк. Горелый и Мутновский соответственно

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

Ближайшая к влк. Горелый станция «Горелый» (GRL) расположена в 4 км от кратера и позволяет регистрировать землетрясения с $K_S \geq 2.2$. В 2014 г. в каталог вошло всего 21 землетрясение (табл. 6) с $K_S = 2.6-5.0$, локализованных в радиусе 7 км от вершины вулкана и диапазоне глубин $h = -0.9-13.4$ км [10] (рис. 7 в). Землетрясение с максимальным классом $K_S = 5.0$ произошло на глубине $h = 5.9$ км под постройкой влк. Горелый 22 августа в 12^h19^m [10].

Таблица 6. Распределение землетрясений района Гореловско-Мутновской группы вулканов по энергетическим классам K_S в 2014 г.

Название вулкана	$R_{зоны},$ км	K_S					N_{Σ}	$\Sigma E,$ 10^7 Дж
		2	3	4	5	6		
Горелый	7	–	7	13	1	–	21	0.031
Мутновский	7	58	254	53	8	–	373	0.141
Вне вулканов	–	7	23	22	10	1	63	0.242
Всего	–	65	284	88	19	1	457	0.414

Станция «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 2014 г. в радиусе 7 км от вулкана было локализовано 373 землетрясения (табл. 6) с $K_S = 1.9-5.3$, диапазон глубин $h = -0.9-17.6$ км [10] (рис. 7 г). Представительный класс для них получился $K_{пред} = 3.2$ при $\gamma = 0.92 \pm 0.07$. Землетрясение с максимальным классом $K_S = 5.3$ произошло на глубине $h = 6.4$ км под постройкой влк. Мутновский 22 августа в 12^h19^m [10].

В 2014 г. «желтый» код опасности на 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 2014 г. проявлялась только в виде фумарольной деятельности.

Вулкан Кизимен – самый южный из действующих вулканов Центральной Камчатской депрессии. Ближайшая телеметрическая станция «Кизимен» (KZV) расположена на склоне вулкана ~ 2.5 км от вершины (рис. 8 а). Теоретический уровень надежной регистрации землетрясений из района влк. Кизимен при существующей сети сейсмических станций равен $K_{min} = 4.0$ по программе «Кам_tst».

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).

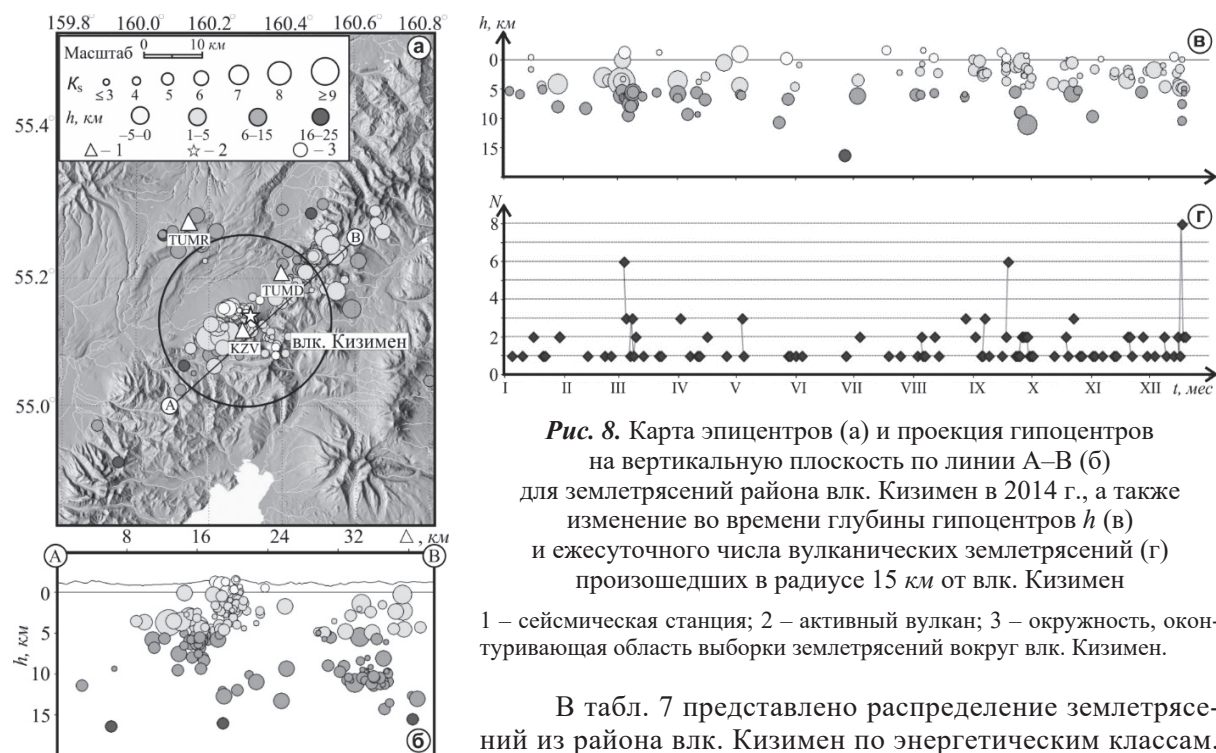


Рис. 8. Карта эпицентров (а) и проекция гипоцентров на вертикальную плоскость по линии А–В (б) для землетрясений района влк. Кизимен в 2014 г., а также изменение во времени глубины гипоцентров h (в) и ежесуточного числа вулканических землетрясений (г) произошедших в радиусе 15 км от влк. Кизимен

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

В табл. 7 представлено распределение землетрясений из района влк. Кизимен по энергетическим классам.

В 2014 г. в радиусе 15 км от вершины вулкана и в диапазоне глубин $h=-1.5-16.4$ км было локализовано 136 землетрясений [11], выделенная энергия которых составила $\Sigma E=3.551 \cdot 10^8$ Дж. После завершения мощного эксплозивно-эффузивного извержения, продолжавшегося с ноября 2010 г. по 2013 г. включительно, сейсмичность влк. Кизимен снизилась. По сравнению с предыдущими годами количество землетрясений уменьшилось. При этом суммарная сейсмическая энергия, высвобожденная вулканическими землетрясениями в 2014 г., сравнима с таковой в 2012 г. (табл. 5) Представительный класс для землетрясений получился $K_{пред}=4.0$, а $\gamma=0.46 \pm 0.01$. Землетрясение с максимальным классом $K_S=8.5$ произошло на глубине $h=3.8$ км под постройкой вулкана 3 марта в 01^h06^m [11].

Таблица 7. Распределение землетрясений из района влк. Кизимен по энергетическим классам K_S в 2014 г.

Название вулкана	$R_{зоны},$ км	K_S						N_{Σ}	$\Sigma E, 10^8$ Дж
		3	4	5	6	7	8		
Кизимен	15	37	49	32	15	2	1	136	3.551
Вне вулкана	–	15	18	31	13	7	–	84	0.916
Всего	–	52	67	63	28	9	1	220	4.467

Вулканическая активность влк. Кизимен в 2014 г. проявлялась только в виде мощной фумарольной деятельности, а сейсмичность превышала фоновую (желтый код) 45 дней, 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]. Исторические извержения 1776, 1882, 1925, 1929, 1940 и 1956–1957 гг. были связаны с третьим конусом и имели характер сравнительно небольших эксплозий [21]. Первое пробуждение влк. Жупановский после 56-летнего периода фумарольной деятельности началось по сейсмическим данным 23 октября 2013 г. с образования трещины и новой фумаролы на западном склоне третьего конуса [22]. В течение двух суток из трещины извергались пепел и газ.

Сейсмический мониторинг влк. Жупановский проводится удаленными станциями, ближайšie из которых – «Седловина» (SDLR), «Корякский ретранслятор» (KRER) и «Арик» (KRX) – расположены в 38–40 км от него в районе Авачинской группы вулканов (рис. 9 а). Теоретический уровень надежной регистрации существующей сети сейсмических станций равен $K_{min}=4.9$ [13].

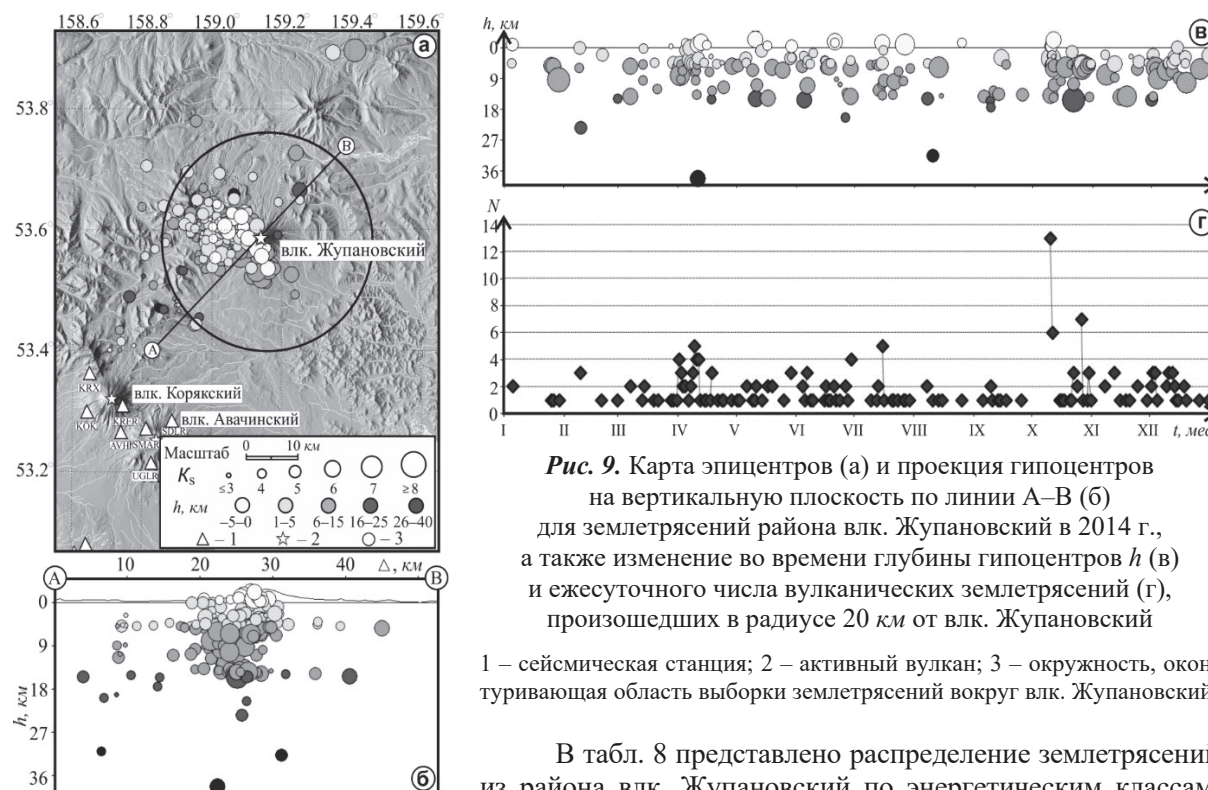


Рис. 9. Карта эпицентров (а) и проекция гипоцентров на вертикальную плоскость по линии А–В (б) для землетрясений района влк. Жупановский в 2014 г., а также изменение во времени глубины гипоцентров h (в) и ежесуточного числа вулканических землетрясений (г), произошедших в радиусе 20 км от влк. Жупановский

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

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

Всего в 2014 г. в каталог вошло 238 событий ($2.5 \leq K_S \leq 8.4$, $h = -2.3 - 38.4$ км) [12], суммарная энергия составила $\Sigma E = 5.24 \cdot 10^8$ Дж. В радиусе 20 км от вершины вулкана в земной коре локализовано 211 землетрясений ($2.6 \leq K_S \leq 8.4$, $\Sigma E = 4.72 \cdot 10^8$ Дж, $h = -2.3 - 38.4$ км). Представительный класс получился равным $K_{\text{пред}} = 4.3$, а угол наклона график повторяемости $\gamma = 0.46 \pm 0.06$. Землетрясение с максимальным классом $K_S = 8.4$ произошло на глубине $h = 9.6$ км под постройкой влк. Жупановский 29 января в 08^h22^m [12]. Из-за удаленности станций от вулкана (рис. 9 а) точность локации очагов землетрясений существенно хуже относительно других контролируемых вулканов. Средняя ошибка в плане равна ~ 6 км, а по глубине – ~ 11 км.

Таблица 8. Распределение землетрясений по энергетическим классам K_S из района влк. Жупановский в 2014 г.

Название вулкана	$R_{\text{зоны}}$, км	K_S							N_{Σ}	ΣE , 10^8 Дж
		2	3	4	5	6	7	8		
Жупановский	20	–	18	88	58	31	14	2	211	4.716
Вне вулкана	–	1	11	8	5	1	1	–	27	0.521
Всего	–	1	29	96	63	32	15	2	238	5.237

После извержения 23 октября 2013 г. на вулкане наступило затишье. Но в январе 2014 г. под постройкой вулкана снова стали регистрироваться землетрясения, и в начале апреля было зафиксировано значительное усиление сейсмической активности (рис. 9 в, г). С 8 апреля возобновились газо-пепловые выбросы. Эксплозивное извержение хорошо совпало с апрельской сейсмической активизацией [12] (рис. 9 в, г). Сила и частота взрывов усиливались в течение года: в июне–сентябре на вулкане выставлялся «оранжевый» код опасности, а в сентябре и октябре – «красный». С 18 июня 2014 г. данные комплексного мониторинга влк. Жупановский стали выставляться в Интернете.

Закключение. Всего в 2014 г. в районе Северной, Авачинской и Мутновско-Гореловской групп вулканов, а также в районе вулканов Кизимен и Жупановский было локализовано 6367 землетрясений, высвобожденная ими сейсмическая энергия составила $\Sigma E = 2.6 \cdot 10^9$ Дж.

Наиболее высокая вулканическая активность с эксплозивными извержениями и сходом раскаленных лавин наблюдалась на влк. Шивелуч. Хотя количество сейсмических событий, сопровождавших рост и обрушение купола, уменьшилось, но их энергия выросла по сравнению с таковой в 2013 г.

В январе–феврале постепенно завершилось вершинное эксплозивно-эффузивное извержение вулкана Ключевской, начавшееся в августе 2013 г.

Продолжилось эксплозивное извержение влк. Жупановский, начавшееся 23 октября 2013 г., после 56-летнего периода покоя.

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

Вулканы Горелый и Мутновский представляют потенциальную опасность для геоэнергетического комплекса МГеоЭС и ВМГеоЭС. В 2014 г. практически вся сейсмичность была сосредоточена в районе влк. Мутновский. На влк. Горелый регистрировались только слабые локальные события, определить кинематические параметры которых было невозможно.

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. // Вулканонология и сейсмология. – 2006. – № 3. – С. 68–78.
2. Сеньюков С.Л. Мониторинг и прогноз активности вулканов Камчатки по сейсмологическим данным в 2000–2010 гг. // Вулканонология 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 2014 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 23 (2014 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – Приложение на CD-ROM.
4. Сеньюков С.Л., Нуждина И.Н. Сейсмический мониторинг вулканов Камчатки // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – С. 485–501.
5. Дроздин Д.В., Дроздина С.Я. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов «DIMAS» // Сейсмические приборы. – М.: ИФЗ РАН, 2010. – 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 // *Seism. Res. Lett.* – 2001. – V. 72. – № 2. – P. 374–383.
8. Нуждина И.Н. (отв. сост.), Напылова Н.А., Напылова О.А., Демянчук М.В., Соболевская О.В., Кожевникова Т.Ю., Толокнова С.Л. Каталог землетрясений Северной группы вулканов за 2014 год. // *Землетрясения Северной Евразии.* – Вып. 23 (2014 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – Приложение на CD-ROM.
9. Нуждина И.Н. (отв. сост.), Кожевникова Т.Ю., Толокнова С.Л., Назарова З.А. Каталог землетрясений Авачинской группы вулканов за 2014 год. // *Землетрясения Северной Евразии.* – Вып. 23 (2014 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – Приложение на CD-ROM.
10. Нуждина И.Н. (отв. сост.), Кожевникова Т.Ю., Толокнова С.Л., Назарова З.А. Каталог землетрясений Мутновско-Гореловской группы вулканов за 2014 год. // *Землетрясения Северной Евразии.* – Вып. 23 (2014 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – Приложение на CD-ROM.
11. Нуждина И.Н. (отв. сост.), Назарова З.А., Кожевникова Т.Ю., Толокнова С.Л. Каталог землетрясений вулкана Кизимен за 2014 год. // *Землетрясения Северной Евразии.* – Вып. 23 (2014 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – Приложение на CD-ROM.
12. Нуждина И.Н. (отв. сост.), Кожевникова Т.Ю., Толокнова С.Л., Назарова З.А. Каталог землетрясений вулкана Жупановский за 2014 год // *Землетрясения Северной Евразии.* – Вып. 23 (2014 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – Приложение на CD-ROM.
13. Сениуков С.Л., Нуждина И.Н., Чебров В.Н. Вулканы Камчатки // *Землетрясения России в 2014 году.* – Обнинск: ГС РАН, 2016. – С. 81–86.
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 России в 2014 году.* – Обнинск: ГС РАН, 2016. – Приложение на CD-ROM.
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. Сениуков С.Л., Дрозина 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. Сениуков 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: СО РАН, 2017. – 421 с.
21. Масуренков Ю.П., Флоренский И.В., Мелекесцев И.В. Вулкан Жупановский // *Действующие вулканы Камчатки.* – М.: Наука, 1991. – Т. II. – С. 218–225.
22. Самойленко С.Б., Мельников Д.В., Чирков С.А., Маневич Т.М. Активизация Жупановского вулкана в 2013–2014 гг. // *Вестник КРАУНЦ.* – Науки о Земле. – 2014. – Выпуск 23. – № 1. – С. 21–26.

VOLCANOES OF KAMCHATKA

S.L. Seniukov, I.N. Nuzhdina

*Kamchatka branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, ssl@emsd.ru*

Abstract. The results of near real-time monitoring of the active Kamchatka volcanoes are described. Continuous monitoring was carried out using three remote methods: 1) seismic monitoring according to automatic telemetric seismic stations; 2) visual and video observation; 3) satellite observation of the thermal anomalies

and the ash clouds. Daily information about volcanic activity is published in the Internet (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>) since February 2000. Annual results of seismic activity of the Northern (Shiveluch, Kluchevskoy, Bezymianny, Krestovsky and Ushkovsky), Avacha (Avachinsky and Koryaksky), Mutnovsky-Gorely volcano group and Kizimen volcano are presented. 4983 earthquakes with $K_s=2.1-8.7$ were located for Northern volcano group, 469 earthquakes with $K_s=1.6-6.1$ – for Avacha volcano group, 459 earthquakes with $K_s=1.9-6.1$ – Mutnovsky-Gorely volcano group, 220 earthquakes with $K_s=2.4-8.5$ for Kizimen volcano and 238 earthquakes with $K_s=2.5-8.4$ for Zhupanovsky volcano in 2014. Maps of epicenters, quantities of seismic energy and earthquake distribution according to class are given. All periods of activity were fixed and investigated by remote methods in 2014: intensive volcanic activity of Shiveluch volcano associated with new cone, a continuation of the seismic and volcanic activity of Zhupanovsky volcano after 56-year quite period and the ending of the summit explosive-effusive eruption of Kluchevskoy volcano in January-February.

Keywords: seismic monitoring of the active volcanoes, visual and video observation, energy class K_s , seismic energy.

DOI: 10.35540/1818-6254.2020.23.38

For citation: Seniukov, S.L., & Nuzhdina, I.N. (2020). [Volcanoes of Kamchatka]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), 375–387. (In Russ.). doi: 10.35540/1818-6254.2020.23.38

R e f e r e n c e s

1. Seniukov, S.L. (2006). [Monitoring of Volcanic Activity in Kamchatka by Remote Sensing Techniques in 2000–2004]. *Vulkanologiya i seismologiya* [Journal of Volcanology and Seismology], 3, 68–78. (In Russ.).
2. Seniukov, S.L. (2013). [Monitoring and 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., Matveenko, E.A., Shevchenko, Yu.V., Yaschuk, V.V., & Muzurov, E.L. (2020). [Seismic stations of Kamchatka network in 2014]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), Appendix on CD. (In Russ.).
4. Seniukov, S.L., & Nuzhdina, I.N. (2019). [Kamchatka volcanoes]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 22(2013), 485–501. (In Russ.). doi: 10.35540/1818-6254.2019.22.43.
5. Droznin, D.V., & Droznina, S.Ia. (2010). [Interactive program “DIMAS” of the seismic signal processing]. *Seismicheskie pribory* [Seismic Instruments], 46(3), 22–34. (In Russ.).
6. 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.).
7. Weimer, S. (2001). A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seismological Research Letters*, 72(2), 374–383.
8. Nuzhdina, I.N., Napylova, N.A., Napylova, O.A., Demyanchuk, M.V., Sobolevskaya, O.V., Kozhevnikova, T.Iu., & Toloknova, S.L. (2020). [Catalogue of Earthquakes of the Northern volcano group in 2014]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), Appendix on CD. (In Russ.).
9. Nuzhdina, I.N., Kozhevnikova, T.Iu., Toloknova, S.L., & Nazarova, Z.A. (2020). [Catalogue of Earthquakes of the Avacha volcano group in 2014]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), Appendix on CD. (In Russ.).
10. Nuzhdina, I.N., Kozhevnikova, T.Iu., Toloknova, S.L., & Nazarova, Z.A. (2020). [Catalogue of Earthquakes of the Mutnovsky-Gorely volcano group in 2014]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), Appendix on CD. (In Russ.).
11. Nuzhdina, I.N., Kozhevnikova, T.Iu., Toloknova, S.L., & Nazarova, Z.A. (2020). [Catalogue of Earthquakes of the Kizimen volcano in 2014]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), Appendix on CD. (In Russ.).
12. Nuzhdina, I.N., Kozhevnikova, T.Iu., Toloknova, S.L., & Nazarova, Z.A. (2020). [Catalogue of Earthquakes of the Zhupanovsky volcano in 2014]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), Appendix on CD. (In Russ.).
13. Seniukov, S.L., Nuzhdina, I.N., & Chebrov, V.N. (2016). [Volcanoes of Kamchatka]. In *Zemletriaseniia Rossii, 2014 god* [Earthquakes in Russia, 2014] (pp. 81–86). Obninsk, Russia: 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. (2016). [Volcanic areas of Kamchatka]. In *Zemletriaseniia Rossii, 2014 god* [Earthquakes in Russia, 2014]. Appendix on CD. Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).

15. Fedotov, S.A. (1971). *Energeticheskaya klassifikatsiya Kurilo-Kamchatskikh zemletriasenii i problema magnitud* [Energy classification of the Kuril-Kamchatka earthquakes and the problem of magnitudes]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 117 p. (In Russ.).
16. Fedotov, S.A., Zharinov, N.A., & Gontovaya, 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.
17. Senyukov, S.L., Droznina, S.Y., Nuzhdina, I.N., Garbuzova, V.T., & Kozhevnikova, T.Y. (2009). Studies in the activity of Klyuchevskoi volcano by remote sensing techniques between January 1, 2001 and July 31, 2005. *Journal of Volcanology and Seismology*, 3(3), 191–199.
18. Senyukov, S.L. (2013). *Prognoz izverzhenii vulkanov Klyuevskoy 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]. In *Geodinamika i vulkanizm Kurilo-Kamchatskoi ostrovoduzhnoi sistemy*. [Geodynamics and volcanism of the Kuril-Kamchatka island arc system] (pp. 373–389). Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia: IVGG FED RAS Publ. (In Russ.).
20. Gordeev, E.I., & Dobretsova, N.L. (Ed.) (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). [Zhupanovsky volcano]. In *Deistvuiushchie vulkany Kamchatki. T. 2.* [Active volcanoes of Kamchatka. Vol. 2] (pp. 215–225). Moscow, Russia: Nauka Publ. (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 KRAUNZ. Earth sciences], 23(1), 21–26. (In Russ.).