

III. СИЛЬНЫЕ и ОЩУТИМЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

УДК 550.348.098.32 (571.53/.55)

МУЯКАНСКАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ в 2015 г. (Северное Прибайкалье)

Н.А. Гилёва¹, В.И. Мельникова^{1,2}, А.И. Филиппова³, Я.Б. Радзиминович^{1,2}, Е.А. Кобелева¹

¹Байкальский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Иркутск, nagileva@crust.irk.ru

²Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, vimel@crust.irk.ru

³Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, г. Москва, г. Троицк, ale@crust.irk.ru

Аннотация. Представлены результаты исследования сейсмического режима, фокальных механизмов и макросейсмических проявлений в районе крупнейшей Муяканской активизации 2015 г. (Северное Прибайкалье). В результате работы временной сети сейсмостанций в рассматриваемой области резко возросло количество регистрируемых землетрясений ($K_r \geq 3$), общее число которых в 2015 г. приблизилось к ~30 тыс. Пространственно-временное развитие данной активизации характеризовалось стабильно малыми глубинами гипоцентров сейсмических событий и разделением эпицентрального поля на два кластера – восточный и северо-западный. Каждый из кластеров был связан с локальным полем напряжений (рифтового и сдвигового типов соответственно), в то время как общий режим сейсмотектонического деформирования земной коры в области активизации, по совокупным данным о фокальных механизмах 77 Муяканских землетрясений ($K_r \geq 9.2$), характеризовался, в основном, субмеридиональным горизонтальным растяжением. Макросейсмические эффекты от наиболее сильных землетрясений Муяканской последовательности отмечались, преимущественно, в пгт Северомуйск ($\Delta=10-15$ км, $I=5$ баллов), при этом новая информация о сильных движениях, полученная по записям одноименной сейсмостанции, заметно дополнила базу подобных данных для территории северо-восточного фланга Байкальской рифтовой зоны. В целом, полученные материалы могут быть использованы для уточнения сейсмической опасности рассматриваемой территории и совершенствования инструментальной части сейсмических шкал.

Ключевые слова: эпицентры и гипоцентры землетрясений, механизм очага, макросейсмические данные, Муяканская активизация, Северное Прибайкалье.

DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.24

Для цитирования: Гилёва Н.А., Мельникова В.И., Филиппова А.И., Радзиминович Я.Б., Кобелева Е.А. Муяканская последовательность землетрясений в 2015 г. (Северное Прибайкалье) // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – С. 245–257. doi: 10.35540/1818-6254.2021.24.24

Введение. В Северо-Муйском районе Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) в 2015 г. наблюдался всплеск сейсмической активности в области Муяканской последовательности землетрясений (рис. 1 а), начало которой зарегистрировано в апреле 2014 г. ($M_{w,max}=5.5$) [1]. На первом этапе развития данной активизации в конфигурации поля эпицентров наметилась тенденция его расширения в северо-западном направлении. В процессе дальнейших наблюдений этот факт получил свое подтверждение – все сейсмические события концентрировались в двух достаточно обособленных кластерах: восточном и северо-западном. Многократный рост количества землетрясений, среди которых было несколько сильных толчков ($M_w=4.6-5.0$), в 2015 г. отмечался именно в северо-западном кластере (рис. 2). Результаты анализа пространственно-временного развития сейсмического процесса при Муяканской активизации 2015 г. и очаговых параметров землетрясений представлены в настоящей работе.

Инструментальные данные. Обработка основной массы землетрясений осуществлялась с помощью региональной программы [4], минимизирующей сумму квадратов невязок моментов вступлений прямых сейсмических волн P_g и S_g . В расчетах использовалась однослойная модель земной коры со средними скоростями основных сейсмических волн: $V_p=6.15$ км/с, $V_s=3.58$ км/с. В локализации наиболее сильных событий ($M_w=4.6-5.0$) участвовали данные ~40 сейсмических станций региона и соседних территорий (рис. 3 а). Минимальное и максимальное эпицентральные расстояния составили ~15 км («Северомуйск») и ~1370 км («Арадан») соответственно. Шесть станций располагались на расстояниях до 200 км.

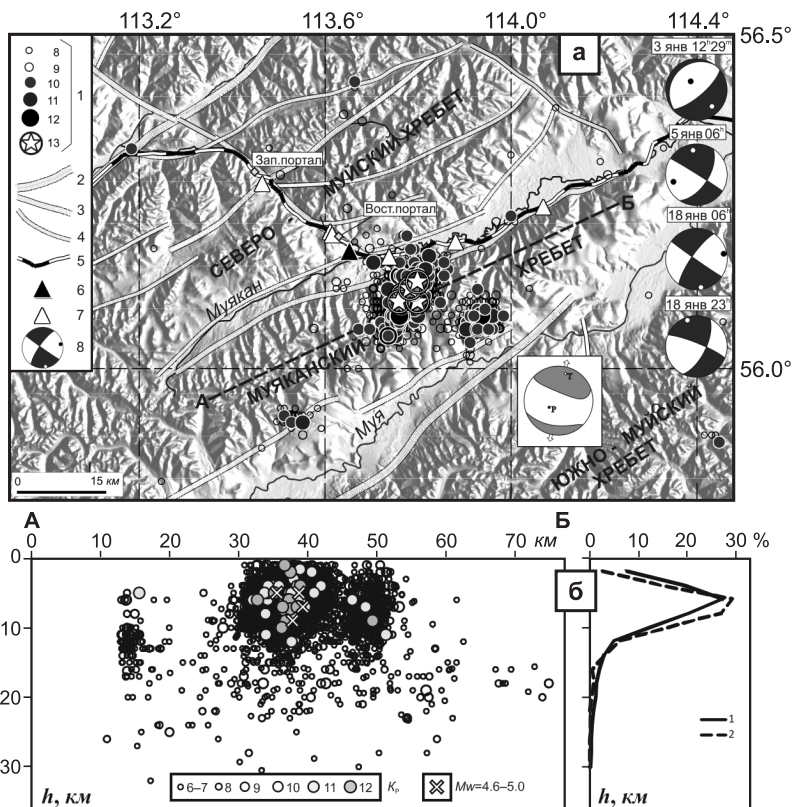


Рис. 1. Карта-схема разломных структур Северо-Муянского района БРЗ по [2], эпицентральное (а) и гипоцентральное (б) поля Муяканских землетрясений за период 2015 г.

а – 1 – эпицентры землетрясений с $K_p \geq 8$; активные разломы (2–4): 2 – межблоковые, 3 – внутриблоковые, 4 – локальные внутриблоковые; 5 – железная дорога; 6, 7 – региональные и локальные сейсмические станции; 8 – стереограммы фокальных механизмов землетрясений с $M_w \geq 4.6$ (с датами) в проекции нижней полусферы, выходы осей напряжений сжатия и растяжения обозначены черными и белыми точками. На врезке показана стереограмма среднего механизма (Т, Р – главные оси деформаций удлинения и укорочения), полученная для 77 решений фокальных механизмов по методике С.Л. Юнга [3] (степень соответствия результирующей матрицы и матрицы индивидуального механизма: $\chi = 0.49$). б – Разрез по глубине вдоль Муяканского хребта (пунктирная линия А–Б на рис. 1 а). Справа количество землетрясений с разной глубиной в процентах от общего числа гипоцентров (1 – регистрация только региональной сетью, 2 – по совокупным данным локальной и региональной сетей).

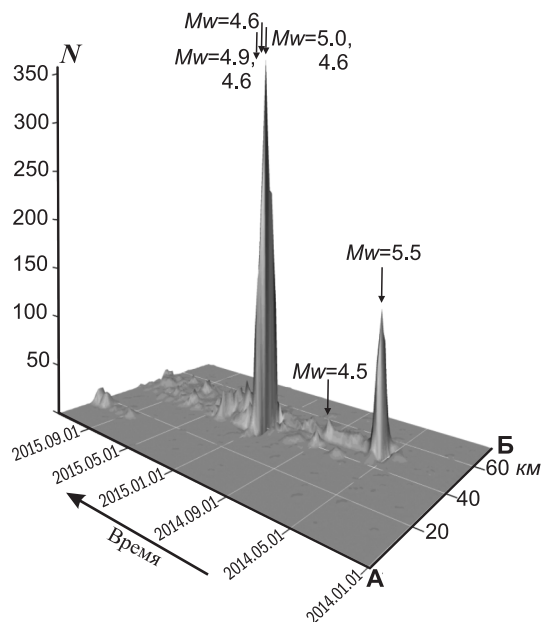


Рис. 2. Пространственно-временное развитие Муяканской последовательности землетрясений в 2014–2015 гг.

N – число Муяканских землетрясений с $K_p > 6.5$ в 2014–2015 гг. (по 10-суточным интервалам с единичной площадкой осреднения 1.8×30 км) в проекции на условную ось одноименного хребта (штриховая линия А–Б на рис. 1 а), стрелками указаны моменты наиболее сильных землетрясений и их моментные магнитуды.

Основные параметры Муяканских землетрясений с $M_w \geq 4.6$ по материалам различных сейсмологических центров (далее в тексте – «агентств») приведены в табл. 1. Очевидно, что благодаря использованию данных близких станций, наилучшие результаты локаций получены в агентстве BAGSR (рис. 3 б). Значения глубин гипоцентров рассматриваемых событий по данным большинства агентств, включая решения, полученные в BAGSR по моментам вступлений прямых сейсмических волн [5, 6] и по оценке тензора сейсмического момента (ТСМ) [7], показывают активизацию верхней части земной коры ($h = 5–10$ км) (рис. 1 б). Более глубокие очаги ($h = 17–24$ км) дает агентство GСMT.

Болезнь более глубокие очаги ($h = 17–24$ км) дает агентство GСMT.

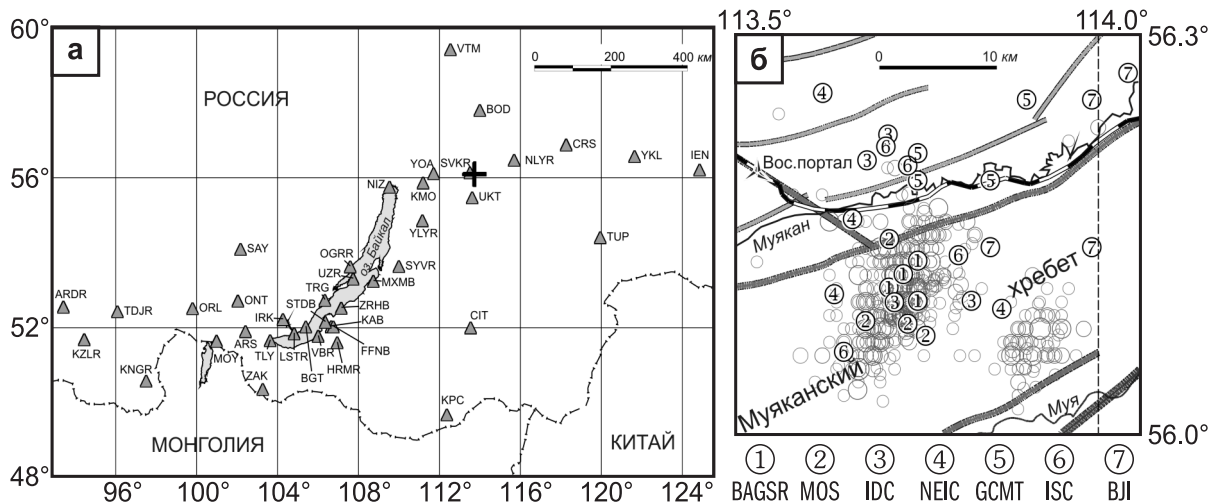


Рис. 3. а – Схема региональных сейсмических станций, данные которых использовались при обработке материалов наблюдений в районе, центр которого обозначенным крестом; б – решения эпицентров четырёх главных толчков последовательности по данным разных сейсмологических центров, кружками показаны эпицентры с $K_p \geq 8.6$ за 2015 г.

Таблица 1. Основные параметры Муяканских землетрясений с $M_w \geq 4.6$ по данным различных сейсмологических агентств

	Агент-ство	t_0 , ч мин с	δt_0 , с	Гипоцентр				h , км	δh , км	Магнитуда	Источ-ник
				φ° , N	$\delta\varphi^\circ$	λ° , E	$\delta\lambda^\circ$				
03.01.2015 12:29	BAGSR	12 29 42.70	0.20	56.110	0.015	113.710	0.019	7 11*	4	$K_p=(12.9\pm 0.2)/26$, $M_w=5.0/13^*$	[6, 7]
	MOS	12 29 40.70	0.88	56.083	0.042	113.736	0.104	2	–	$M_S=4.3/7$, $MPSP=4.9/59$	[8]
	IDC	12 29 42.15	0.42	56.099	0.101	113.718	0.141	0f	–	$m_b=4.4/34$, $M_S=4.3/1$	[9]
	NEIC	12 29 43.70	1.34	56.105	0.123	113.635	0.215	10f	–	$m_b=4.8/212$	[9]
	GCMТ	12 29 35.70	0.30	56.250	–	113.900	–	12f	–	$M_w=4.8/75$	[9]
	ISC	12 29 42.88	0.59	56.062	0.026	113.648	0.042	7.9	3.7	$M_S=4.7/18$, $m_b=4.8/182$	[9]
	ВЛ	12 29 42.40	–	56.140	–	113.850	–	5.0	–	$m_b=4.5/55$, $M_S=5.0/53$	[9]
05.01.2015 06:04	BAGSR	06 04 29.10	0.16	56.100	0.012	113.750	0.016	5 0–1*	2	$K_p=(13.0\pm 0.2)/25$, $M_w=4.6/10^*$	[6, 7]
	MOS	06 04 27.60	1.03	56.146	0.041	113.711	0.109	5	–	$M_S=4.2/5$, $MPSP=4.8/31$	[8]
	IDC	06 04 29.35	0.54	56.224	0.133	113.709	0.177	0f	–	$m_b=4.3/24$, $M_S=4.0/25$	[9]
	NEIC	06 04 31.07	1.52	56.255	0.069	113.619	0.183	10f	–	$m_b=4.7/78$	[9]
	GCMТ	06 04 31.10	0.40	56.190	–	113.750	–	18	1.9	$M_w=4.7/82$	[9]
	ISC	06 04 30.02	0.62	56.201	0.022	113.736	0.033	9.5	4.9	$M_S=4.1/31$, $m_b=4.6/99$	[9]
	ВЛ	06 04 27.00	–	56.250	–	113.990	–	5.0	–	$m_b=4.5/45$, $M_S=4.9/39$	[9]
18.01.2015 06:41	BAGSR	06 41 30.90	0.20	56.130	0.015	113.750	0.020	7 0–1*	3	$K_p=(13.4\pm 0.2)/24$, $M_w=4.9/17^*$	[6, 7]
	MOS	06 41 30.90	1.38	56.085	0.036	113.678	0.086	10	–	$M_S=4.9/23$, $MPSP=5.0/60$	[8]
	IDC	06 41 31.00	0.42	56.205	0.094	113.680	0.115	0f	–	$m_b=4.4/33$, $M_S=4.5/34$	[9]
	NEIC	06 41 33.90	1.65	56.161	0.094	113.660	0.175	10f	–	$m_b=5.0/276$	[9]
	GCMТ	06 41 30.90	0.20	56.210	–	113.750	–	17.0	0.9	$M_w=5.0/121$	[9]
	ISC	06 41 32.81	0.41	56.215	0.027	113.706	0.038	8.6	2.4	$M_S=4.8/65$, $m_b=4.9/215$	[9]
	ВЛ	06 41 28.80	–	56.270	–	114.040	–	5.0	–	$m_b=4.8/51$, $M_S=5.4/52$	[9]
18.01.2015 23:06	BAGSR	23 06 17.70	0.17	56.120	0.013	113.730	0.017	9 4–5*	2	$K_p=(13.1\pm 0.2)/23$, $M_w=4.6/13^*$	[6, 7]
	MOS	23 06 16.30	1.11	56.074	0.042	113.761	0.102	8	–	$M_S=4.2/4$, $MPSP=4.4/6$	[8]
	IDC	23 06 16.46	0.63	56.100	0.134	113.824	0.168	0f	–	$m_b=3.8/19$, $M_S=3.9/18$	[9]
	NEIC	23 06 18.49	1.81	56.094	0.064	113.866	0.152	10f	–	$m_b=4.4/29$	[9]
	GCMТ	23 06 17.50	0.40	56.190	–	113.850	–	24.6	1.6	$M_w=4.8/66$	[9]
	ISC	23 06 17.11	0.93	56.134	0.029	113.806	0.038	1.3	6.0	$M_S=4.0/21$, $m_b=4.3/43$	[9]
	ВЛ	23 06 15.30	–	56.140	–	113.990	–	5.0	–	$m_b=4.2/34$, $M_S=4.8/34$	[9]

Примечание. * – значение параметра рассчитано по амплитудным спектрам поверхностных волн [7].

Данные локальной сети станций. Резкое увеличение (более чем в 7 раз) количества регистрируемых землетрясений малых энергетических классов произошло после установки на период с 19 января по 5 марта 2015 г. шести временных локальных сейсмостанций (рис. 1 а) [10, 11]. Для обработки этих данных необходимо было выявить более детальную скоростную модель среды в районе Муяканского хребта. С этой целью была использована программа VELEST [12], позволяющая для локальных землетрясений одновременно уточнять скоростную модель среды и положение гипоцентра [13].

Таблица 2. Скоростная модель земной коры в р-не Муяканской последовательности

h , км	0	1.5	4.3	6.0	8.0	12.0	15.0	20.0	40
V_p , км/с	5.99	6.01	6.01	6.10	6.25	6.36	6.56	6.57	8.00

В дальнейшем полученная модель (табл. 2) была применена для локализации всех землетрясений периода работы локальной сети по программе HYPOCENTR [14].

Наличие временных станций, дополняющих региональную сеть и обеспечивающих эпицентральные расстояния $\Delta=5-35$ км, позволило зарегистрировать дополнительно более 14 тыс. слабых ($K_p=3-5$) землетрясений (табл. 3), при этом представительными стали землетрясения с $K_p \geq 5$.

Таблица 3. Распределение числа землетрясений Муяканской последовательности по энергетическим классам K_p и значения угла наклона (γ) графика повторяемости землетрясений для разных периодов регистрации

№	Период времени	K_p											N_{Σ}	$\gamma \pm \sigma_{\gamma} (K_{pmin}-K_{pmax})$
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		
1	01.01–19.01.15	18	274	682	2721	1244	482	204	73	22	10	5	5735	$-0.45 \pm 0.02 (8-11)$
2	20.01–05.03.15	1741	7794	4748	1524	503	170	56	9	4	1	–	16550	$-0.53 \pm 0.01 (5-12)$
3	06.03–31.12.15	–	–	11	3525	1029	341	108	41	13	3	–	5071	$-0.50 \pm 0.01 (6-12)$
4	01.01–31.12.15	1759	8068	5441	7770	2776	993	368	123	39	14	5	27356	$-0.46 \pm 0.01 (6-13)$

Примечание. $K_{pmin}-K_{pmax}$ – диапазон классов, по которым рассчитано значение γ ; 1 – 4 – данные за периоды наблюдений региональных и локальных сейсмостанций: 1, 3 – региональная сеть, 2 – региональная и локальная сети, 4 – весь период наблюдений.

Комментируя полученные данные можно отметить, что в первой половине января 2015 г. значение γ уменьшилось относительно предыдущего 2014 г. ($\gamma=-0.57 \pm 0.01$ [1]), однако в последующий период наблюдений этот параметр приобрел обычные для региона значения (табл. 3).

В настоящем выпуске журнала приведен каталог из 6310 землетрясений Муяканской последовательности 2015 г. [15]. В период работы временной локальной сети (с 19 января по 5 марта) в нем представлены землетрясения с $K_p > 5.5$, в остальное время – с $K_p > 6.5$. По данным этого каталога ошибки локации в период работы временных станций относительно региональных уменьшились более чем в 2 раза.

Сейсмо тектоника района и механизмы очагов землетрясений. Муяканский хребет, к центральной части которого приурочена рассматриваемая последовательность землетрясений, наряду с Северо-Муйским и Южно-Муйским хребтами и рифтовыми впадинами, имеет северо-восток–юго-западное простирание и относится к основным морфоструктурам Северо-Муйского района. С северо-запада и юго-востока хребет ограничен региональными внутриблоковыми разломами докайнозойского заложения: Муяканским, отделяющим его от одноименной впадины, и Южномуяканским, разделяющим хребет и Муйскую впадину (рис. 1 а) [2]. В кайнозойский этап развития эти разломы характеризуются высокой активностью и играют важную роль в сейсмо тектонике района. Так, в зоне Муяканского разлома установлена крупная палеоструктура (300–2000 лет, $M \sim 7.6$) [2, 16], а к зоне Южномуяканского разлома, предположительно, приурочен эпицентр сильного исторического землетрясения 29 апреля 1917 г., ($M \sim 6.6$) [16]. В инструментальный период наблюдений в районе Муяканского хребта также наблюдались достаточно сильные землетрясения – 11 ноября 1962 г. ($M=5.8$) [16] и 18 декабря 1971 г. ($M=5.0$) [17]. Следует отметить, что до 2014–2015 гг. сейсмическая активность здесь проявлялась неравномерно. Наибольшая плотность эпицентров наблюдалась в центральной части хребта, при этом глубины гипоцентров большинства сейсмических событий распределялись в сейсмо-активном слое 17–26 км [1]. Фокальные механизмы землетрясений до Муяканских событий, как

правило, показывали разнообразные типы подвижек в очагах, при этом плоскости разрывов имели различные простирания и во многих случаях крутое падение. В большей части очагов доминировала сбросовая компонента смещений [18].

В 2015 г. механизмы очагов были определены по стандартной методике [19] для 77 ($K_p \geq 9.2$) Муяканских землетрясений [20], 12 из них ($K_p \geq 11.5$, $M_w \geq 4.3$) имели решение тензора сейсмического момента (ТСМ) [7]. На рис. 1 а для 4 самых сильных толчков ($M_w = 4.6-5.0$) представлены стереограммы таких решений, показывающие наличие в очагах крутой плоскости разрыва северо-северо-восточного простирания и, преимущественно, сдвиговые смещения в очагах, что согласуется с кинематическими характеристиками местных разломов [2, 16]. В целом, основная часть очагов землетрясений восточного и северо-западного кластеров с установленными механизмами формировалась при доминирующем влиянии горизонтального субмеридионального растяжения, косо ориентированного к основным структурным направлениям (см. диаграмму среднего механизма на рис. 1 а). При расчете среднего механизма выявилась невысокая степень однородности сейсмоактивного объема земной коры (степень соответствия результирующей матрицы и матрицы индивидуального механизма составила $\chi = 0.49$, в то время как пределы изменения этого параметра: $\chi = 0 \div 1$) [3].

Макросейсмические данные. Муяканская последовательность землетрясений включает большое количество толчков, непосредственно ощущавшихся населением [21]. Вместе с тем в силу малонаселенности рассматриваемой территории макросейсмические эффекты фиксировались населением почти исключительно в пгт Северомуйск, расположенном на расстоянии 10–15 км от эпицентрального поля последовательности. Более чем в одном пункте ощутимые сотрясения наблюдались только при землетрясениях 3 января ($M_w = 5.0$), 5 января ($M_w = 4.6$) и 18 января в $06^h 41^m$ ($M_w = 4.9$).

Землетрясения 3 января 2015 г. в 12^h ($M_w = 5.0$). Необходимо отметить, что 3 января фактически произошло два сильных близких по энергии землетрясения с интервалом в 41 секунду: первый толчок в $12^h 29^m 42.7^s$, второй – в $12^h 30^m 23.9^s$ [6]. Имеющаяся макросейсмическая информация (табл. 4, рис. 4) позволяет оценить интенсивность первого события в пгт Северомуйск в 4–5 баллов, а второго в 5 баллов. Однако в других пунктах макросейсмические проявления двух толчков практически неразличимы. Таким образом, можно обоснованно допустить, что макросейсмическое поле события 3 января 2015 г. было сформировано двумя равными по силе толчками.

Таблица 4. Макросейсмические данные о двух землетрясениях 3 января 2015 г. в 12^h ($M_w = 5.0$)

№	Пункт	Δ , км	Координаты пункта		№	Пункт	Δ , км	Координаты пункта	
			φ° , N	λ° , E				φ° , N	λ° , E
	5 баллов								
1	пгт Северомуйск	11	56.171	113.576	8	пгт Горно-Чуйский	209	57.643	111.722
	4 балла				9	пос. Варваринский	213	54.333	112.367
2	пгт Таксимо	78	56.344	114.879	10	с. Верхняя Заимка	223	55.849	110.141
	3 балла				11	пос. Витимский	237	58.218	113.270
3	пгт Янчукан	57	56.258	112.815	12	у. Алла	240	54.689	110.818
	2 балла				13	у. Арзгун	268	54.378	110.735
4	пгт Согдиондон	200	57.694	112.160	14	г. Северобайкальск	277	55.636	109.336
	Не ощущалось				15	с. Могойто	280	54.381	110.459
5	пос. Усть-Муя	124	56.414	115.628	16	у. Аргада	282	54.240	110.681
6	пос. Муя	127	56.459	115.662	17	пос. Кропоткин	285	58.509	115.322
7	пос. Баргалино	128	56.506	115.648					

Примечание. пгт – поселок городского типа, пос. – поселок, с. – село, у. – улус, г. – город.

Землетрясение ощущалось в четырех населенных пунктах, три из которых расположены в районе трассы Байкало-Амурской магистрали (БАМ). Наибольшая наблюдаемая интенсивность сотрясений, составившая 5 баллов по шкале MSK-64 [22], наблюдалась в пгт Северомуйск, где землетрясение проявилось в виде сильных колебаний, замеченных практически всеми жителями. Реакцию очевидцев можно охарактеризовать как сильный испуг, граничащий с паникой; многие покинули помещения. В зданиях во время землетрясения дребезжали посуда и оконные стекла, скрипели полы, стены и потолки, самопроизвольно хлопали незапертые створки и двери, дрожала и колебалась мебель, незакрепленные предметы на столах и полках сдвигались с места

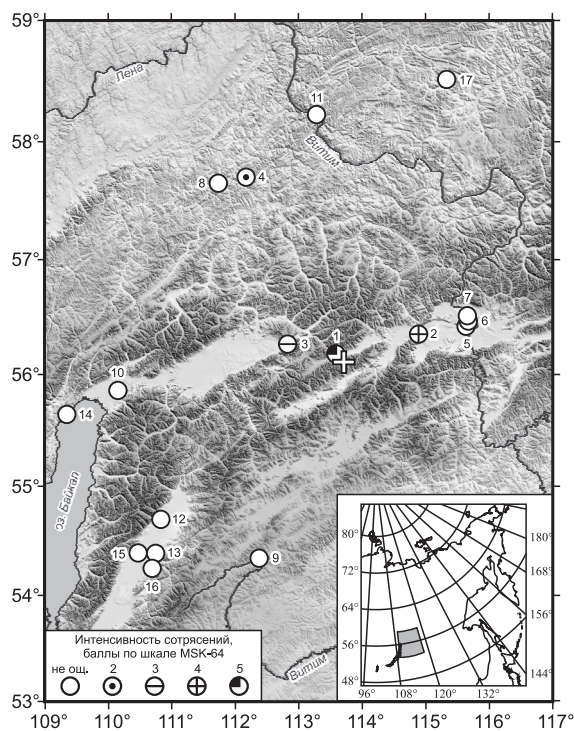


Рис. 4. Карта макросейсмических проявлений типа «пункты–баллы» землетрясений 3 января 2015 г. в 12^h. Крестиком обозначен инструментальный эпицентр. Номера пунктов соответствуют таковым в табл. 4. На врезке серым цветом обозначено положение района исследования на Азиатском континенте

Жители поселка отмечают общее сотрясение зданий, ощутимые колебания полов и стен, треск и скрип конструкций. В помещениях дрожала и раскачивалась мебель («гремели шкафы»), сильно раскачивались всяческие предметы (люстры), самопроизвольно открывались и закрывались двери, дребезжала и звенела посуда в шкафах, раскачивались новогодние елки. В деревянном одноэтажном здании магазина с полок упали банки и некоторые пакеты с продуктами. Очевидцы испытывали сильный испуг, многие покинули помещения и затем долго опасались возвращаться в дома. Землетрясение сопровождалось подземным гулом.

В *пгт Янчукан* землетрясение ощущалось людьми, находившимися в помещениях; некоторые испытывали испуг. Отмечается общее сотрясение зданий; в помещениях наблюдалось дребезжание посуды и стекол в шкафу, легкое раскачивание всяческих предметов, колебание жидкости в посуде, дрожание мебели.

Макросейсмические эффекты интенсивностью до 3–4 баллов наблюдались также к северу от эпицентра на расстояниях 230–250 км в пунктах, расположенных в долине р. Витим. В *пос. Витимский* проявления землетрясения сводятся к дребезжанию посуды и дрожанию легкой мебели (стулья), при этом сотрясения достаточно уверенно ощущались многими жителями. Подобные макросейсмические проявления – дребезжание посуды и стекол в шкафах – наблюдались в *пос. Мама*.

Интенсивность сотрясений, оцениваемая в 3 балла, отмечена в *пос. Мусковит* и *Колотовка*, где наблюдалось небольшое сотрясение и дрожание предметов. Очевидцы сравнивают это дрожание с колебаниями, вызываемыми движением бульдозера.

Землетрясение 18 января 2015 г. в 06^h41^m ($M_w=4.9$). Информация о макросейсмических проявлениях данного события имеется только для четырех пунктов (табл. 6, рис. 6). С наибольшей интенсивностью, оцениваемой в 5 баллов по шкале MSK-64 [21], землетрясение ощущалось в *пгт Северомуйск*, расположенном на эпицентральной расстоянии 12 км. Во время землетрясения сильно дрожали и скрипели стены, полы и потолки, отмечено общее сотрясение зданий.

и падали. Отмечены случаи осыпания чешуек побелки и возникновения тонких трещин в штукатурке. При землетрясении был слышен подземный гул.

В *пгт Таксимо* землетрясение вызвало испуг очевидцев; в помещениях дребезжала и звенела посуда, дрожали оконные стекла. С учетом реакции населения интенсивность сотрясений можно оценить в 4 балла.

В *пгт Янчукан* землетрясение, по свидетельству очевидцев, ощущалось только на верхних этажах зданий и выразилось в дребезжании посуды и колебании всяческих предметов (люстра). Реакция людей на сотрясения была спокойной или отсутствовала. Интенсивность сотрясений может быть оценена в 3 балла.

В *пос. Согдиондон* землетрясение было замечено в виде слабой вибрации при отсутствии каких-либо других проявлений. Макросейсмические эффекты, по-видимому, практически не превышали порога ощутимости и, таким образом, интенсивность сотрясений оценивается в 2 балла.

Землетрясение 5 января 2015 г. в 06^h04^m ($M_w=4.6$). Наиболее сильные макросейсмические эффекты, как и в случае событий 3 января 2015 г., были отмечены в *пгт Северомуйск* (табл. 5, рис. 5). Землетрясение ощущалось в зданиях различного типа вне зависимости от этажности.

В помещениях отмечено дребезжание посуды и оконных стекол, скрип и сильное дрожание мебели. Характер проявления землетрясения определяется очевидцами как волнообразные колебания. Жители испытывали сильный испуг, некоторые в панике покидали помещения и выбегали на открытый воздух. При землетрясении был слышен подземный гул.

Таблица 5. Макросейсмические данные о землетрясении 5 января 2015 г. ($M_w=4.6$)

№	Пункт	Δ , км	Координаты пункта	
			φ° , N	λ° , E
	5 баллов			
1	пгт Северомуйск	13	56.171	113.576
	4 балла			
2	пгт Янчукан	60	56.258	112.815
	3–4 балла			
3	пос. Куанда	146	56.316	116.081
4	пос. Витимский	237	58.218	113.270
5	пгт Мама	251	58.311	112.899
	3 балла			
6	пос. Мусковит	236	58.215	113.290
7	пос. Колотовка	237	58.215	113.187
	Не ощущалось			
8	пос. Усть-Муя	121	56.414	115.628

№	Пункт	Δ , км	Координаты пункта	
			φ° , N	λ° , E
9	п. Муя	124	56.459	115.662
10	пос. Баргалино	125	56.506	115.648
11	пос. Маловский	189	54.400	113.550
12	пгт Горно-Чуйский	211	57.643	111.722
13	пос. Варваринский	215	54.333	112.367
14	с. Верхняя Заимка	226	55.849	110.141
15	у. Алла	242	54.689	110.818
16	у. Арзгун	270	54.378	110.735
17	г. Северобайкальск	280	55.636	109.336
18	с. Могойто	282	54.381	110.459
19	пос. Кропоткин	284	58.509	115.322
20	у. Аргада	284	54.240	110.681
21	пос. Усть-Джилинда	294	53.664	111.944

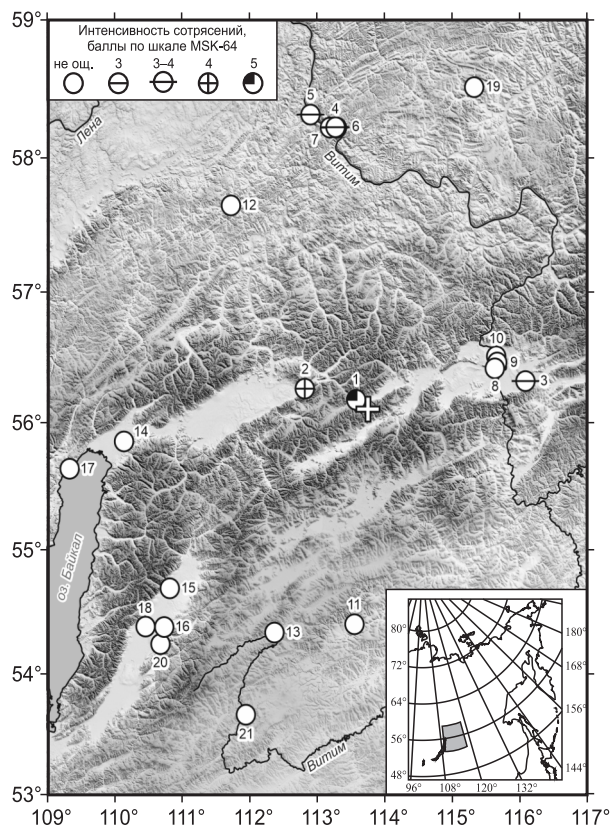


Рис. 5. Карта макросейсмических проявлений типа «пункты–баллы» землетрясения 5 января 2015 г.

Номера пунктов соответствуют таковым в табл. 5. Остальные условные обозначения см. на рис. 4.

Интенсивность сотрясений 4–5 баллов зафиксирована в пгт Таксимо. Очевидцы ощутили сильный толчок; в помещениях качались люстры, звенела посуда, самопроизвольно открывались дверцы шкафов. Был слышен подземный гул.

Макросейсмические эффекты интенсивностью 4 балла наблюдались в пгт Янчукан. Во время землетрясения в помещениях дребезжали посуда и стекла окон, дрожала и скрипела мебель. Очевидцы характеризуют землетрясение как легкое дрожание продолжительностью 20–30 секунд.

В пгт Новый Уоян на расстоянии 125 км отмечено дребезжание посуды и легкое раскачивание висячих предметов. Реакция очевидцев на землетрясение в целом оценивается как спокойная; люди не испугались и оставались на своих местах. Интенсивность сотрясений оценивается в 3–4 балла.

Таблица 6. Макросейсмические данные о землетрясении 18 января 2015 г. в 06^h41^m ($M_w=4.9$)

№	Пункт	Δ , км	Координаты пункта	
			φ° , N	λ° , E
	5 баллов			
1	пгт Северомуйск	12	56.171	113.576
	4–5 баллов			
2	пгт Таксимо	74	56.344	114.879

№	Пункт	Δ , км	Координаты пункта	
			φ° , N	λ° , E
	4 балла			
3	пгт Янчукан	59	56.258	112.815
	3–4 балла			
4	пгт Новый Уоян	125	56.139	111.728

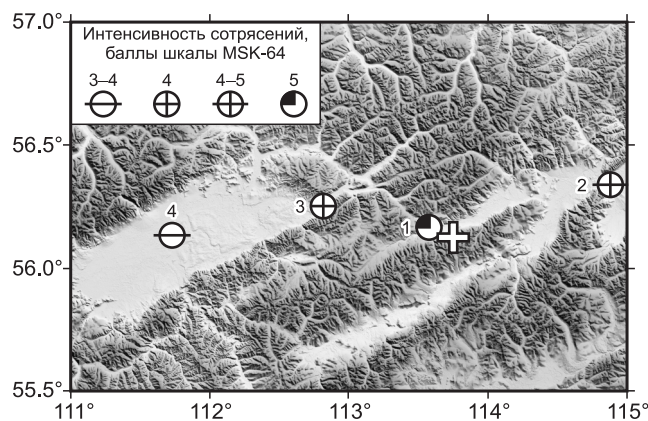


Рис. 6. Карта макросейсмических проявлений землетрясения 18 января 2015 г. в 06^h41^m

Номера пунктов соответствуют таковым в табл. 6. Остальные условные обозначения см. на рис. 4.

Следует отметить, что 18 января 2015 г. было зарегистрировано еще одно землетрясение с $M_w=4.6$, произошедшее в 23^h06^m (табл. 1). Макросейсмические сведения об этом событии имеются только для пгт Северомуйск, где интенсивность сотрясений оценивается в 4 балла по шкале MSK-64 [21].

Сильные движения. В случае Муяканской последовательности землетрясений сопоставление макросейсмических и инструментальных оценок интенсивности сотрясений возможно только для пгт Северомуйск. Акселерограммы, велосиграммы и пиковые значения ускорений (PGA) и скоростей (PGV), полученные сейсмической станцией «Северомуйск» для пяти сильнейших толчков последовательности, приведены на рис. 7. Большой интерес представляет также сравнение оценок инструментальной интенсивности, выполненных с использованием различных сейсмических шкал, в частности MSK-64 [22, 23], MMSK-92 [24] и новейшей шкалы ШСИ-17 [25] (табл. 7).

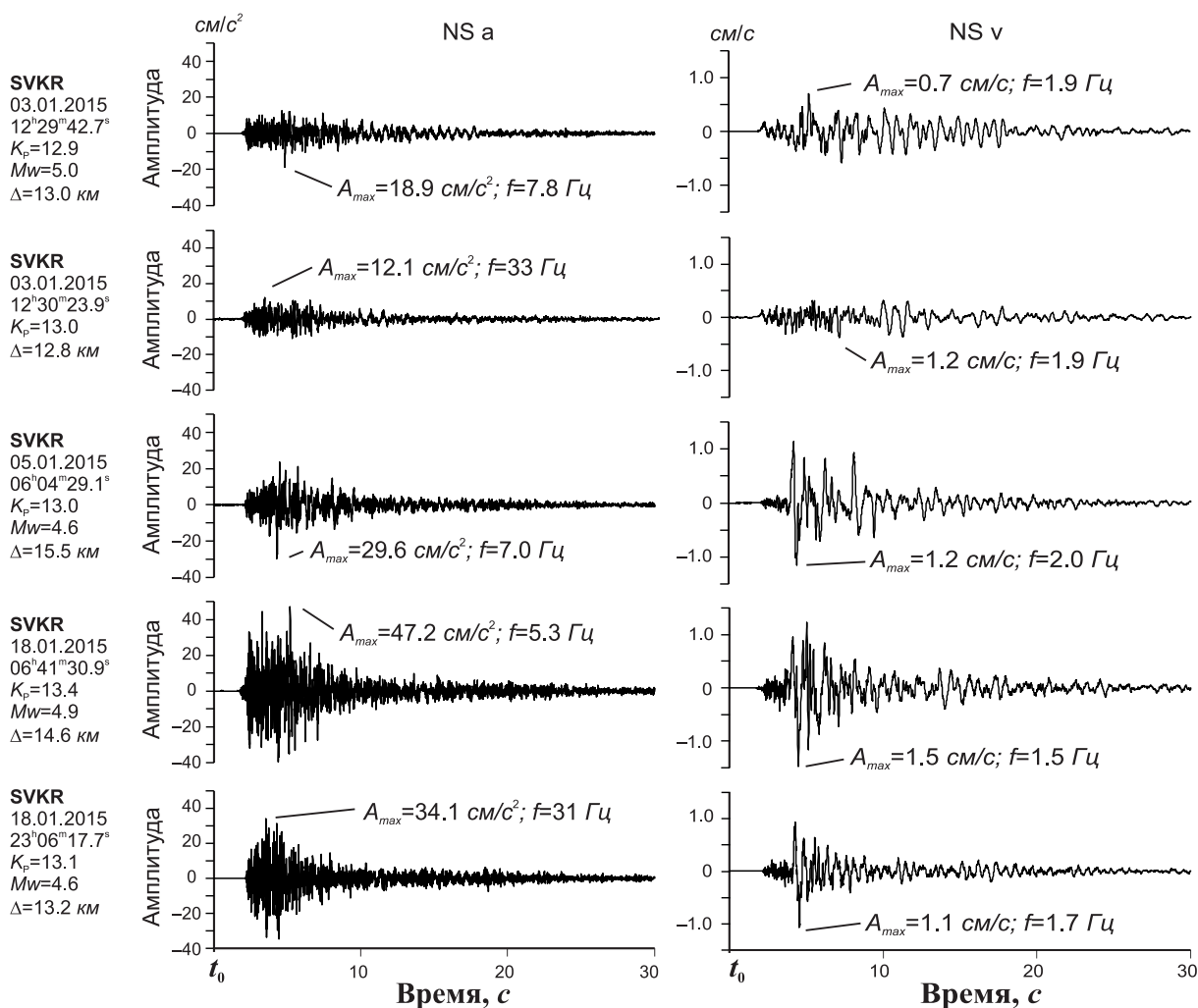


Рис. 7. Акселерограммы (а) и велосиграммы (v) наиболее сильных землетрясений Муяканской последовательности, записанные на сейсмической станции «Северомуйск»

Таблица 7. Соотношение наблюдаемой интенсивности сотрясений и интенсивности по инструментальным данным согласно различным сейсмическим шкалам по данным станции «Северомуйск»

Дата, время	PGA, см/с ²	PGV, см/с	$I_{\text{макр}}$	Инструментальная интенсивность			
				$I_{\text{MSK-64}}$	$I_{\text{MMSK-92}}$	$I_{\text{ШСИ-17}}$	$I_{\text{PGA-PGV}}$
03.01.2015 г. 12 ^h 29 ^m 42.7 ^s	18.9	0.7	4–5	5	5	5	4.3
03.01.2015 г. 12 ^h 30 ^m 23.9 ^s	12.1	0.4	5	4	5	4–5	3.7
05.01.2015 г. 06 ^h 04 ^m 29.1 ^s	29.6	1.2	5	5	6	5–6	4.9
18.01.2015 г. 06 ^h 41 ^m 30.9 ^s	47.2	1.5	5	6	6	6	5.3
18.01.2015 г. 23 ^h 06 ^m 17.7 ^s	34.1	1.1	4	5	6	5–6	4.9

Примечание. PGA – пиковые ускорения; PGV – пиковые скорости; $I_{\text{макр}}$ – наблюдаемая интенсивность сотрясений; $I_{\text{MSK-64}}$, $I_{\text{MMSK-92}}$, $I_{\text{ШСИ-17}}$ – интенсивность по инструментальной части сейсмических шкал MSK-64 [23], MMSK-92 [24] и ШСИ-17 [25] соответственно; $I_{\text{PGA-PGV}}$ – интенсивность сотрясений по произведению PGA·PGV, рассчитанная по уравнению $I=1.325\lg(\text{PGA}\cdot\text{PGV})+2.83$ [24].

Как следует из табл. 7, наблюдаемым макросейсмическим данным наилучшим образом соответствует инструментальная интенсивность $I_{\text{PGA-PGV}}$, рассчитанная по произведению PGA·PGV, предложенному в шкале ШСИ-17 [25]. Расхождение в макросейсмических и инструментальных оценках составляет 1 балл при землетрясениях 3 января в 12^h30^m и 18 января 2015 г. в 23^h06^m, в остальных случаях оценки или практически совпадают, или различаются не более чем на 0.5 балла. Существенно большие различия наблюдаются при оценке инструментальной интенсивности по диапазонам PGA в шкалах MSK-64 [23] и MMSK-92 [24]. В случае использования шкалы MSK-64 разница между макросейсмическими и инструментальными оценками достигает 1 балла, для шкалы MMSK-92 расхождение возрастает до 2 баллов. Более приемлемые результаты получены с применением шкалы ШСИ-17 [25]. Эта шкала, наряду с использованием произведения PGA·PGV, предполагает также оценку инструментальной интенсивности либо по средним значениям PGA, либо по корреляционной зависимости $I=2.50\lg(\text{PGA})+1.89$. Тем не менее, и в этом случае рассчитанные по инструментальным данным значения интенсивности также не совпадают с макросейсмическими наблюдениями на 1.0–1.5 балла, в частности, для землетрясений 18 января 2015 г. в 06^h41^m и в 23^h06^m.

В целом Муяканская последовательность землетрясений позволила заметно пополнить базу данных сильных движений для территории северо-восточного фланга БРЗ. В дальнейшем эти материалы могут быть востребованы для уточнения зависимости интенсивности сотрясений от динамических параметров движения грунта, а также для совершенствования инструментальной части сейсмических шкал.

Обсуждение. Муяканская последовательность землетрясений в 2015 г. достигла максимума своей активности, выделяясь на фоне ранее известных здесь сильных толчков [16, 18] огромным количеством событий малой и средней силы. Характерной особенностью данной активизации явилось начавшееся в 2014 г. разделение ее эпицентрального поля на два обособленных кластера – восточный и северо-западный (рис. 1 а). Восточная группа толчков в 2014 г. в энергетическом смысле была более представительной ($M_{w\text{max}}=5.5$) [1], чем западная. В 2015 г. ситуация резко изменилась, наиболее сильные землетрясения ($M_{w\text{max}}=5.0$) регистрировались уже в западном кластере, при этом доминирующее ранее рифтовое поле напряжений уступило место сдвиговому (рис. 1 а). Несмотря на это, общие среднестатистические характеристики напряженно-деформированного состояния среды, полученные путем расчета среднего механизма по методике С.Л. Юнги [3], показали, что существенное влияние на формирование эпицентральной зоны Муяканских землетрясений оказало косое горизонтальное субмеридиональное растяжение (рис. 1 а).

Стоит подчеркнуть, что важным отличием Муяканской серии землетрясений от всех предыдущих активизаций явились малые глубины их гипоцентров ($h=3–11$ км, рис. 1 б). Для объяснения этого факта в будущем требуются специальные исследования геолого-геофизических условий сейсмогенерирующей среды. В настоящее же время, основываясь на результатах глубинного сейсмического зондирования [26], можно предположить, что физические свойства верхней части земной коры в районе активизации связаны с изменением упругих модулей и плотности горных пород в результате тектонического расслоения среды. Это, в свою очередь, способствует разрядке напряжений в виде землетрясений средней силы.

В целом, особенности сейсмического режима и напряженно-деформированного состояния земной коры при Муяканской последовательности землетрясений в определенной степени свидетельствуют о перераспределении напряжений в земной коре и об активизации локальных разнонаправленных разрывных нарушений в центральных фрагментах Муяканского и Южномуяканского разломов.

Отметим, что ощутимые макросейсмические эффекты, сопровождавшие относительно сильные землетрясения Муяканской активизации в 2015 г., фиксировались, в основном, в ближайшем населенном пункте (*пгт Северомуйск*, $\Delta=10-15$ км). Максимальная наблюдаемая интенсивность сотрясений при этом составляла 5 баллов, что не противоречит Карте общего сейсмического районирования ОСР-2012 [27]. Стоит отметить, что при Муяканских землетрясениях заметно пополнилась база данных о сильных движениях на территории северо-восточного фланга БРЗ.

Заключение. В результате изучения уникальной по количеству событий Муяканской серии землетрясений 2015 г. были выявлены следующие особенности: фрагментарный характер эпицентрального поля, малые глубины гипоцентров сейсмических событий и перераспределение с течением времени напряжений в верхних горизонтах земной коры. Получены новые данные о характере сильных движений и сейсмических проявлениях в Северо-Муйском районе БРЗ и, в частности, вблизи трассы БАМ. Полученные материалы могут быть использованы для уточнения сейсмической опасности рассматриваемой территории и совершенствования инструментальной части сейсмических шкал.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00576-21 и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира», а также при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-05-00823).

Л и т е р а т у р а

1. Гилёва Н.А., Мельникова В.И., Середкина А.И., Радзиминович Я.Б. Муяканское-II землетрясение 23 мая 2014 г. с $K_p=14.3$, $M_w=5.5$, $I_0=7-8$ (Северное Прибайкалье) // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 23 (2014 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – С. 323–333. doi: 10.35540/1818-6254.2020.23.33
2. Геология и сейсмичность зоны БАМ. Структурно-вещественные комплексы и тектоника / Ред. М.М. Мандельбаум. – Новосибирск: Наука, 1983. – 189 с.
3. Юнга С.Д. Методы и результаты изучения сеймотектонических деформаций. – М.: Наука, 1990. – 191 с.
4. Голенецкий С.И. Землетрясения Прибайкалья и Забайкалья // Землетрясения в СССР в 1985 году. – М.: Наука, 1988. – С. 124–135.
5. Гилёва Н.А., Хамидулина О.А. (отв. сост.); Меньшикова Ю.А., Дреннова Г.Ф., Курилко Г.В., Емельянова Л.В., Сенотрусова Т.Е., Архипенко Н.С., Павлова Л.В., Терёшина Е.Н., Мазаник Е.В., Инешина М.Ф., Федюшкина Я.И., Папкина А.А., Галактионова Н.Н. Каталог (оригинал) землетрясений Прибайкалья и Забайкалья за 2015 г. с $K_p \geq 3$ ($N=36430$). – Иркутск: Фонды БФ ФИЦ ЕГС РАН, 2015. – 531 с.
6. Гилёва Н.А., Хамидулина О.А. (отв. сост.); Меньшикова Ю.А., Дреннова Г.Ф., Курилко Г.В., Емельянова Л.В., Сенотрусова Т.Е., Архипенко Н.С., Павлова Л.В., Терёшина Е.Н., Мазаник Е.В., Инешина М.Ф., Федюшкина Я.И., Папкина А.А., Галактионова Н.Н., Филиппова А.И., Радзиминович Я.Б. Каталог землетрясений Прибайкалья и Забайкалья с $K_p > 7.5$ за 2015 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – [Электронное приложение]. – URL: <http://www.ceme.gsras.ru/zse/app-24.html>
7. Филиппова А.И., Гилёва Н.А. Очаговые параметры сильных землетрясений Прибайкалья и Забайкалья в 2015 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – С. 217–225. doi: 10.35540/1818-6254.2021.24.21
8. Сейсмологический бюллетень (сеть телесеизмических станций), 2015. (2021) // ФИЦ ЕГС РАН [сайт]. – URL: ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_bulletin/2015
9. International Seismological Centre. (2021). On-line Bulletin. <https://doi.org/10.31905/D808B830>
10. Гилёва Н.А., Кобелева Е.А. Сейсмические станции Муяканской временной локальной сети в 2015 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – [Электронное приложение]. – URL: <http://www.ceme.gsras.ru/zse/app-24.html>

11. Гилёва Н.А., Масальский О.К., Кобелева Е.А. Эпицентральная область Муяканской последовательности землетрясений (Бурятия) // Землетрясения России в 2015 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – С. 103–107.
12. Kissling E. Programm VELEST users Guide-Short Introduction, Internet version. (2021). [Site]. – URL: <ftp://ftp-server.rm.ingv.it/pub/mario.anselmi/velest.pdf>
13. Гилёва Н.А., Хритова М.А., Хамидулина О.А. Результаты локализации землетрясений Муяканской последовательности 2014–2015 гг. // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XIII Международной сейсмологической школы / Ред. А.А. Маловичко. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – С. 86–90.
14. Lienert B.R. HYPOCENTER 3.2-A Computer Program for Locating Earthquakes Locally // Regionally and Globally, Hawaii Institute of Geophysics & Planetology, Honolulu. – 1994.
15. Гилёва Н.А., Хамидулина О.А. (отв. сост.); Меньшикова Ю.А., Дреннова Г.Ф., Курилко Г.В., Емельянова Л.В., Сенотрусова Т.Е., Архипенко Н.С., Павлова Л.В., Терёшина Е.Н., Мазаник Е.В., Инешина М.Ф., Федюшкина Я.И., Папкова А.А., Галактионова Н.Н. Каталог Муяканской последовательности землетрясений за 2015 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – [Электронное приложение]. – URL: <http://www.ceme.gsras.ru/zse/app-24.html>
16. Ангараканский рой землетрясений в Байкальской рифтовой зоне (условия возникновения и особенности развития) / Ред. О.В. Павлов. – Новосибирск: Наука, 1987. – 81 с.
17. Голенецкий С.И. Землетрясения Прибайкалья // Землетрясения в СССР в 1971 году. – М.: Наука, 1975. – С. 110–117.
18. Мельникова В.И., Гилёва Н.А., Радзиминович Я.Б., Очковская М.Г., Середкина А.И. Ощутимые землетрясения Северо-Муйского района в 2007 г. (Северное Прибайкалье): Мудриканское 5 апреля с $K_p=13.4$, $M_w=4.9$, $I_0=7$ и Южномуяканское 23 августа с $K_p=13.3$, $M_w=4.8$, $I_0=7$ // Землетрясения Северной Евразии, 2007 год. – Обнинск: ГС РАН, 2013. – С. 351–362.
19. Мельникова В.И., Гилёва Н.А., Филиппова А.И., Радзиминович Я.Б., Кобелева Е.А. Сейсмичность Прибайкалья и Забайкалья в 2015 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – С. 129–138. doi: 10.35540/1818-6254.2021.24.12
20. Мельникова В.И., Гилёва Н.А., Филиппова А.И. (отв. сост.). Каталог механизмов очагов землетрясений Прибайкалья и Забайкалья за 2015 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – [Электронное приложение]. – URL: <http://www.ceme.gsras.ru/zse/app-24.html>
21. Радзиминович Я.Б., Гилёва Н.А. (отв. сост.). Макросейсмический эффект ощутимых землетрясений в населенных пунктах Прибайкалья и Забайкалья в 2015 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – [Электронное приложение]. – URL: <http://www.ceme.gsras.ru/zse/app-24.html>
22. Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В. Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. – М.: МГК АН СССР, 1965. – 11 с.
23. Аптикаев Ф.Ф., Шебалин Н.В. Уточнение корреляций между уровнем макросейсмического эффекта и динамическими параметрами движения грунта // Исследования по сейсмической опасности (Вопросы инженерной сейсмологии; Вып. 29). – М.: Наука, 1988. – С. 98–108.
24. Шебалин Н.В., Аптикаев Ф.Ф. Развитие шкал типа MSK // Магнитное поле Земли: математические методы описания. Проблемы макросеймики (Вычислительная сейсмология; Вып. 34). – М.: Геос, 2003. – С. 210–253.
25. ГОСТ Р 57546–2017. Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности. – М.: Стандартинформ, 2017. – 27 с.
26. Крылов С.В., Мандельбаум М.М., Мишенькин Б.П., Мишенькина З.Р., Петрик Г.В., Селезнев В.С. Недра Байкала (по сейсмическим данным). – Новосибирск: Наука, 1981. – 105 с.
27. Уломов В.И. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации – ОСР-2012 // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2013. – Т. 40, № 4. – С. 5–20

MUYAKAN EARTHQUAKE SEQUENCE in 2015 (Northern Baikal Region)

N.A. Gileva¹, V.I. Melnikova^{1,2}, A.I. Filippova³, Ya.B. Radziminovich^{1,2}, E.A. Kobleva¹

¹*Baikal branch GS RAS, Irkutsk, nagileva@crust.irk.ru*

²*Institute of the Earth's crust SB RAS, Irkutsk, vimel@crust.irk.ru*

³*Pushkov Institute of terrestrial magnetism, ionosphere and radio wave propagation RAS Moscow, Troitsk, ale@crust.irk.ru*

Abstract. We present the results of studies of the seismic regime, focal mechanisms, and macroseismic data in the area of the largest Muyakan activation in 2015 (northern Baikal region). Due to the deployment of a network of temporary seismic stations, the number of registered earthquakes ($K_R \geq 3$) increased significantly in 2015 and reached ~ 30 thousand. Spatio-temporal development of the considered activation is characterized by stable low values of earthquake hypocenters and dividing the epicentral field into two clusters – eastern and north-western ones. Both clusters are connected with local stress-strain field (rift type and strike-slip, respectively), while the general regime of seismotectonic deformations of the crust in the activation area, calculated from the statistical analysis of 77 focal mechanisms of Muyakan earthquakes ($K_R \geq 9.2$), demonstrates the predominance of submeridional horizontal extension. Macroseismic effects from the largest earthquakes of the Muyakan sequence were felt, predominantly, in Severomuysk settlement ($\Delta=10-15$ km, $I=5$). New data on strong motions, obtained from the records of the seismic station with the same name, have significantly complemented the database for the territory of the north-eastern flank of the Baikal rift zone. In general, the obtained results could be used to clarify the seismic hazard of the considered area and to improve the instrumental part of seismic scales.

Key words: earthquake epicenter and hypocenter, focal mechanism, macroseismic data, Muyakan activation, northern Baikal region.

DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.24

For citation: Gileva, N.A., Melnikova, V.I., Filippova, A.I., Radziminovich, Ya.B., & Kobeleva, E.A. (2021). [Muyakan earthquake sequence in 2015 (Northern Baikal Region)]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015), 245–257. (In Russ.). doi: 10.35540/1818-6254.2021.24.24

References

- Gileva, N.A., Melnikova, V.I., Seredkina, A.I., & Radziminovich, Ya.B. (2020). [Muyakan-II earthquake on May 23, 2014 with $K_R=14.3$, $M_W=5.5$, $I_0=7-8$ (Northern Baikal region)]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), 323–333. (In Russ.). doi: 10.35540/1818-6254.2020.23.33
- Mandelbaum, M.M. (1983). *Geologiya i seysmichnost' zony BAM. Strukturno-veshchestvennyye komplekсы i tektonika* [Geology and seismicity of the BAM zone. Structural-material complexes and tectonics]. Novosibirsk, Russia: Nauka Publ., 189 p. (In Russ.).
- Yunga, S.D. (1990). *Metody i rezul'taty izucheniya seysmotektonicheskikh deformatsiy* [Methods and results of studying seismotectonic deformations]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 191 p. (In Russ.).
- Golenetskiy, S.I. (1988). [Earthquakes of the Pribaikalye and Transbaikalia]. In *Zemletryaseniia v SSSR v 1985 godu* [Earthquakes in the USSR in 1985] (pp. 124–135). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
- Gileva, N.A., Hamidulina, O.A., Menshikova, Yu.A., Drennova, G.F., Kurilko, G.V., Emelianova, L.V., Senotrusova, T.E., Arkhipenko, N.S., Pavlova, L.V., Tereshina, E.N., Mazanik, E.V., Ineshina, M.F., Fedushkina, Ya.I., Papkova, A.A., & Galaktionova, N.N. (2019). *Katalog (original) zemletriasenii Pribaikal'ia i Zabaikal'ia za 2015 s $K_R \geq 3$ ($N=36430$)* [Catalog (original) of the earthquakes of the Pribaikalye and Transbaikalia for 2015 with the $K_R \geq 3$ ($N=36430$)]. Irkutsk, Russia: Funds BB GS RAS, 531 p. (In Russ.).
- Gileva, N.A., Hamidulina, O.A., Menshikova, Yu.A., Drennova, G.F., Kurilko, G.V., Emelianova, L.V., Senotrusova, T.E., Arkhipenko, N.S., Pavlova, L.V., Tereshina, E.N., Mazanik, E.V., Ineshina, M.F., Fedushkina, Ya.I., Papkova, A.A., Galaktionova, N.N., Filippova, A.I., & Radziminovich, Ya.B. (2021). [Catalog of the earthquakes of the Lake Baykal and Transbaykal regions for 2015 with the $K_R > 7.5$]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015). Electronic supplement. Retrieved from <http://www.ceme.gsras.ru/zse/app-24.html> (In Russ.).
- Filippova, A.I., & Gileva, N.A. (2021). [Source parameters of strong earthquakes occurred in the Baikal region and Transbaikalia in 2015]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015), 217–225. (In Russ.). doi: 10.35540/1818-6254.2021.24.21
- GS RAS, Bulletin of Teleseismic Stations, 2015. (2021). Retrieved from ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_bulletin/2015/
- International Seismological Centre. (2021). On-line Bulletin. <https://doi.org/10.31905/D808B830>
- Gileva, N.A., & Kobeleva, E.A. (2021). [Seismic stations of the Muyakan temporary local 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>
- Gileva, N.A., Masalsky, O.K., & Kobeleva, E.A. (2017). [The epicentral region of the Muyakan sequence of earthquakes (Buryatia)]. In *Zemletryaseniya Rossii v 2015 godu* [Earthquakes of Russia in 2015] (pp. 103–107). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Kissling, E. (2021). Programm VELEST users Guide-Short Introduction. Retrieved from <ftp://ftp-server.rm.ingv.it/pub/mario.anselmi/velest.pdf>

13. Gileva, N.A., Khritova, M.A., & Khamidulina, O.A. (2018). [Muyakan sequence earthquake localization results 2014–2015]. In *Materialy XIII Mezhdunarodnoy seismologicheskoy shkoly "Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh"* [Proceedings of the XIII International Seismological Workshop "Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data"] (pp. 86–90). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
14. Lienert, B.R. (1994). HYPOCENTER 3.2-A Computer Program for Locating Earthquakes Locally. *Regionally and Globally, Hawaii Institute of Geophysics & Planetology, Honolulu*.
15. Gileva, N.A., Hamidulina, O.A., Menshikova, Yu.A., Drennova, G.F., Kurilko, G.V., Emelianova, L.V., Senotrusova, T.E., Arkhipenko, N.S., Pavlova, L.V., Tereshina, E.N., Mazanik, E.V., Ineshina, M.F., Fedyushkina, Ya.I., Papkova, A.A., & Galaktionova, N.N. (2021). [Catalog of Muyakan earthquake sequence 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.).
16. Pavlov, O.V. (1987). *Angarakanskiy roy zemletryaseniy v Baykal'skoy riftovoy zone (usloviya vozniknoveniya i osobennosti razvitiya)* [Angarakan swarm of earthquakes in the Baikal rift zone (conditions of occurrence and development features)]. Novosibirsk, Russia: Nauka Publ., 81 p. (In Russ.).
17. Golenetsky, S.I. (1975). [Earthquakes of the Pribaikalye]. In *Zemletryasenii v SSSR v 1971 godu* [Earthquakes in the USSR in 1971] (pp. 110–117). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
18. Melnikova, V.I., Gileva, N.A., Radziminovich, Ya.B., Ochkovskaya, M.G., & Sereidkina, A.I. (2013). [Felt earthquakes of the North Muya region in 2007 (Northern Baikal region): Mudirikan on April 5 with $K_R=13.4$, $M_w=4.9$, $I_0=7$ and South Muyakan on August 23 with $K_R=13.3$, $M_w=4.8$, $I_0=7$]. In *Zemletryasenii Severnoy Evrazii v 2007 godu* [Earthquakes in Northern Eurasia, 2007] (pp. 351–362). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
19. Melnikova, V.I., Gileva, N.A., Filippova, A.I., Radziminovich, Ya.B., & Kobleva, E.A. (2021). [Seismicity of Baikal and Transbaikalia in 2015]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015), 129–138. (In Russ.). doi: 10.35540/1818-6254.2021.24.12
20. Melnikova, V.I., Gileva, N.A., & Filippova, A.I. (2021). [Catalog of the focal mechanisms of earthquakes of the Pribaikalye and Transbaikalia for 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.).
21. Radziminovich, Ya.B., & Gileva, N.A. (2021). [Macroseismic effect of felt earthquakes in the settlements of the Baikal and Transbaikalia 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.).
22. Medvedev, S.V., Sponheuer, V., & Karnik, V. (1965). *Mezhdunarodnaia shkala seismicheskoy intensivnosti MSK-64* [MSK-64 seismic intensity scale]. Moscow, Russia: MGK Academy of Sciences USSR Publ., 11 p. (In Russ.).
23. Aptikaev, F.F., & Shebalin, N.V. (1988). [Refinement of correlations between the level of macroseismic effect and dynamic parameters of soil movement]. In *Issledovaniya po seismicheskoy opasnosti (Voprosy inzhenernoy seismologii; vypusk 29)* [Research on seismic hazard (Problems of Engineering Seismology; Issue 29)] (pp. 98–108). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
24. Shebalin, N.V., & Aptikaev, F.F. (2003). [Development of MSK-type scales]. In *Magnitnoye pole Zemli: matematicheskiye metody opisaniya. Problemy makroseysmiki (Vychislitel'naya seismologiya; vypusk 34)* [Earth's magnetic field: mathematical methods of description. Problems of macroseismics (Computational seismology; Issue 34)] (pp. 210–253). Moscow, Russia: Geos Publ. (In Russ.).
25. GOST R 57546–2017 (2017). [Earthquakes. Seismic Intensity Scale]. Moscow, Russia: Standardinform Publ., 27 p. (In Russ.).
26. Krylov, S.V., Mandelbaum, M.M., Mishenkin, B.P., Mishenkina, Z.R., Petrik, G.V., & Seleznev, V.S. (1981). *Nedra Baykala (po seismicheskim dannym)* [The Baikal Interior (from seismic data)]. Novosibirsk, Russia: Nauka Publ., 105 p. (In Russ.).
27. Ulomov, V.I. (2014). General seismic zoning of the territory of Russian Federation: GSZ-2012. *Seismic Instruments*, 50(4), 290–304. doi: 10.3103/S0747923914040070