

**МУЯКАНСКОЕ-II ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 23 мая 2014 г.**

**с  $K_p=14.3$ ,  $M_w=5.5$ ,  $I_0=7-8$  (Северное Прибайкалье)**

**Н.А. Гилёва<sup>1</sup>, В.И. Мельникова<sup>2</sup>, А.И. Середкина<sup>3</sup>, Я.Б. Радзиминович<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Байкальский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Иркутск, [nagileva@crust.irk.ru](mailto:nagileva@crust.irk.ru)

<sup>2</sup>Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, [vimel@crust.irk.ru](mailto:vimel@crust.irk.ru)

<sup>3</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова РАН, г. Москва, г. Троицк, [ale@crust.irk.ru](mailto:ale@crust.irk.ru)

**Аннотация.** В работе обсуждается Муяканское землетрясение 23 мая 2014 г. ( $M_w=5.5$ ), произошедшее в Муяканском хребте на северо-востоке Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) вблизи восточного портала Северомуйского тоннеля Байкало-Амурской магистрали. Данное событие сопровождалось многочисленными толчками ( $K_p=5.6-9.9$ ), количество которых до конца года превысило две тысячи. Пространственно-временной анализ Муяканской последовательности показал, что в ее эпицентральной поле выделились два обособленных кластера: восточный и западный. Все основные события: форшоки, главный толчок и наиболее сильные афтершоки ( $M_w=4.4; 4.5$ ) – произошли в восточном кластере, в то время как в западном зарегистрированы лишь достаточно слабые сейсмические события ( $K_p<10.0$ ). Для Муяканского землетрясения по амплитудным спектрам поверхностных волн был рассчитан тензор сейсмического момента, в результате получены сведения о рифтовом типе механизма очага, скалярном сейсмическом моменте ( $M_0=1.9 \cdot 10^{17}$  Н·м), моментной магнитуде ( $M_w=5.5$ ) и глубине гипоцентра ( $h=24$  км). По региональным данным гипоцентры главного толчка и большинства сопровождавших его землетрясений (80 %) располагались в интервале глубин  $h=3-11$  км, а максимальная интенсивность сотрясений (4–5 баллов по шкале MSK-64) при основном событии отмечалась в пгт Северомуйск ( $\Delta=29$  км). Полученные результаты могут быть использованы для уточнения сейсмической опасности на ответственном участке Байкало-Амурской магистрали.

**Ключевые слова:** Эпицентр и гипоцентр землетрясения, тензор сейсмического момента, механизм очага, Северомуйский район Байкальского рифта.

**DOI:** 10.35540/1818-6254.2020.23.33

**Для цитирования:** 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

**Введение.** Северо-восточный фланг Байкальской рифтовой зоны (от оз. Байкал до р. Олекмы) в сейсмическом отношении чрезвычайно активен. Ежегодно здесь регистрируется более 50 % всех землетрясений Прибайкалья, среди которых возможны и достаточно сильные события ( $M_w \geq 6.0$ ). В связи с прохождением по данной территории трассы Байкало-Амурской магистрали (БАМ) изучение сейсмических проявлений здесь приобретает первостепенное значение. Особый интерес представляют собой участки с максимальной сейсмической активностью. Одним из таких участков, несомненно, является Северо-Муйский район, в котором располагается протяженный (15 км) Северомуйский тоннель. Рельеф района представлен рифтовыми впадинами и обрамляющими их хребтами, в одном из которых (Муяканском) в апреле 2014 г. было зарегистрировано начало крупной последовательности сейсмических толчков, получившей название Муяканской (рис. 1). Главный толчок по данным агентства ISC характеризовался магнитудами:  $M_s=5.2$  и  $m_b=5.6$  (табл. 1). Результаты расчета и анализа очаговых параметров главного события, а также исследования пространственно-временного развития Муяканской последовательности землетрясений представлены в настоящей работе.

**Инструментальные данные.** Локализация самого сильного землетрясения Муяканской последовательности, произошедшего 23 мая 2014 г. в  $19^h42^m$  ( $M_w=5.5$ ) [1, 2], была выполнена по данным 40 региональных сейсмических станций (рис. 2), 32 из которых относятся к Байкальскому и Бурятскому филиалам ФИЦ ЕГС РАН [3, 4], четыре – к Якутскому филиалу и две – к Алтае-Саянскому. Кроме того, использовались данные китайской станции «Хайлар» (НИА) и временной станции «Кырен», установленной на юго-западе БРЗ в районе Тункинских впадин

Институтом земной коры Сибирского отделения РАН. Самой близкой к эпицентру ( $\Delta=24$  км) оказалась станция «Северомуйск» (SVKR). Шесть станций располагались на расстоянии до 200 км, а максимальное эпицентрального расстояние до станции «Кызыл» (KZLR) составило 1356 км.

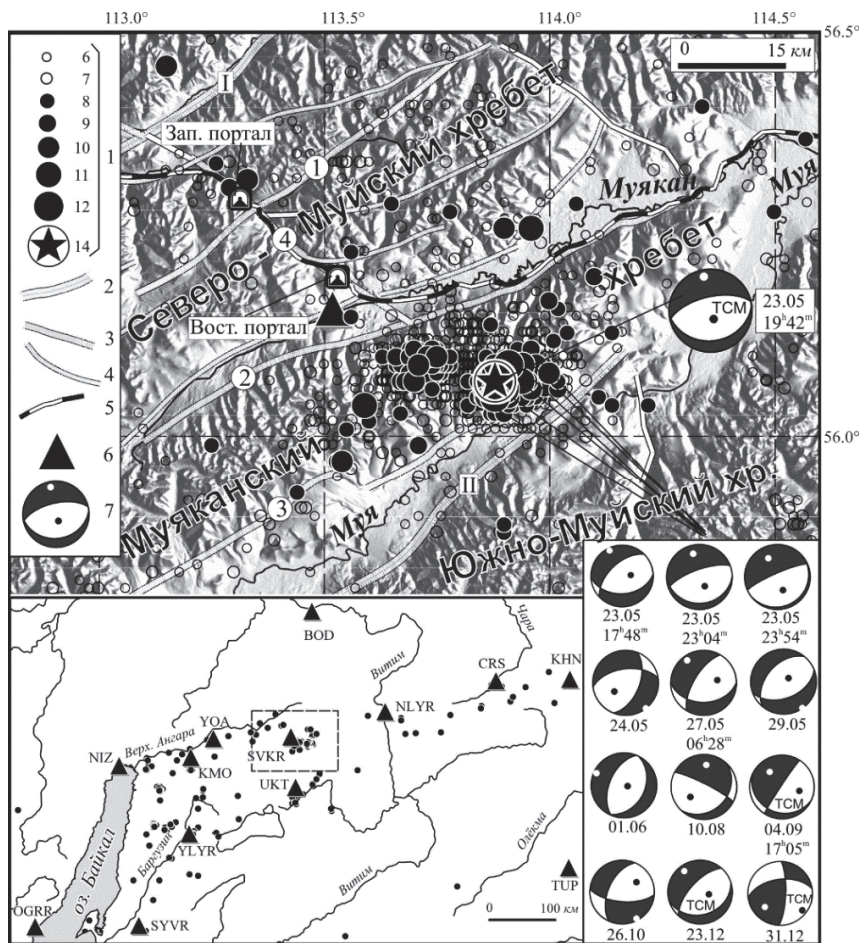
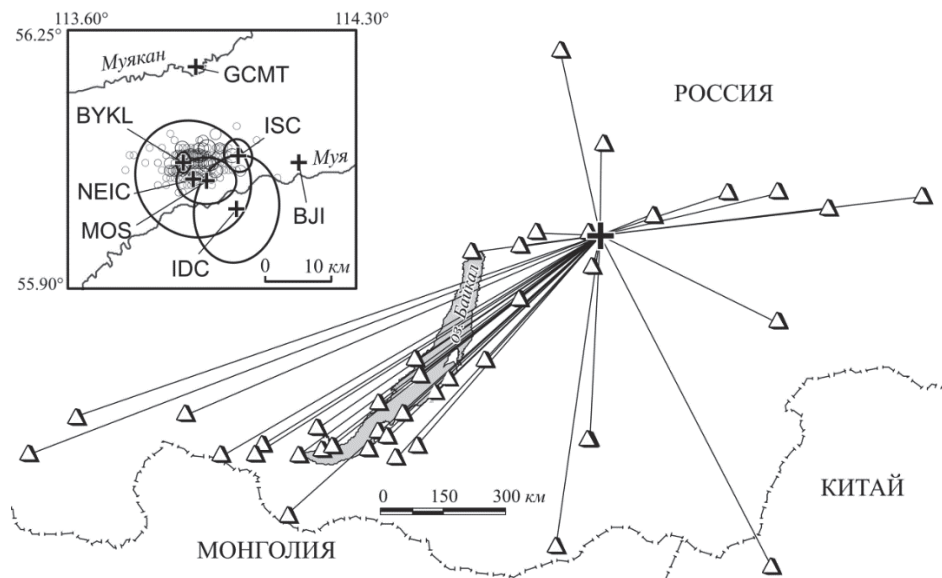


Рис. 1. Карта эпицентров и механизмы очагов землетрясений Северо-Муйского района БРЗ за период с 1.01–31.12.2014 г.

1 – эпицентры землетрясений,  $K_p$ ; активные разломы по [5, 6]: 2 – региональные межблоковые: I – Северомуйский, II – Верхнемуйский; 3 – региональные внутриблоковые (цифры в кружках): 1 – Ангараканский, 2 – Муяканский, 3 – Южномуяканский, 4 – Перевальный (по геофизическим данным); 4 – локальные внутриблоковые; 5 – железная дорога (БАМ); 6 – региональная сейсмическая станция [3]; 7 – диаграмма фокального механизма в проекции нижней полусферы (выходы осей напряжений сжатия и растяжения обозначены черными и белыми точками) из [7] с указанием числа и месяца сейсмического события, а для событий, произошедших в одни и те же сутки, с указанием также часа и минуты, обозначение «ТСМ» на диаграмме показывает, что решение получено путем расчета тензора сейсмического момента, иное решение – по знакам первых вступлений  $P$ -волн. На врезке показана сейсмичность ( $K_p \geq 9$ ) северо-восточного Прибайкалья в 2014 г., пунктиром выделен Северо-Муйский район.

Обработка основного толчка и сопровождающих его землетрясений производилась с помощью региональной программы [8], минимизирующей сумму квадратов невязок моментов вступлений прямых продольных ( $P_g$ ) и поперечных ( $S_g$ ) сейсмических волн. При этом использовалась однослойная модель земной коры со средними скоростями основных сейсмических волн:  $V_p=6.15$  км/с,  $V_s=3.58$  км/с. Толщина слоя при этом ограничивалась мощностью земной коры в Прибайкалье (35–40 км), так как глубоких землетрясений здесь не выявлено.

Основные параметры Муяканского землетрясения по материалам различных сейсмологических агентств приведены в табл. 1, из которой следует, что полученные решения неплохо согласуются между собой. Максимальный разброс в положении эпицентра для агентств, представивших ошибки его определения, составляет 11 км (рис. 2). Наименьшие ошибки локализации получены в агентстве ВУКЛ [1, 2]. Значение глубины гипоцентра по данным разных агентств варьируется от 3 до 7 км.



**Рис. 2.** Положение эпицентра Муяканского землетрясения 23 мая 2014 г. относительно региональных сейсмических станций, данные которых использовались при обработке материалов наблюдений (на врезке – решения эпицентра главного толчка и эллипсы горизонтальных ошибок по данным разных сейсмологических центров; кружками показаны эпицентры афтершоков с  $K_p \geq 7.0$ , зарегистрированных в течение месяца после главного толчка; обозначения агентств соответствуют таковым в табл. 1)

**Таблица 1.** Основные параметры Муяканского землетрясения 23 мая 2014 г. по данным различных сейсмологических агентств

Агентство	$t_0$ , ч мин с	$\delta t_0$ , с	Гипоцентр						Магнитуда	Источник
			$\varphi^\circ$ , N	$\delta\varphi^\circ$	$\lambda^\circ$ , E	$\delta\lambda^\circ$	$h$ , км	$\delta h$ , км		
BYKL	19 42 27.60	0.20	56.070	0.014	113.880	0.019	3.3 24*	–	$K_p=(14.3 \pm 0.2)/25$ , $M_w=5.5/15$	[1, 2]
MOS	19 42 25.70	0.85	56.045	0.032	113.937	0.068	6	–	$M_S=5.1/144$ , $M_{PSP}=5.7/51$	[9]
IDC	19 42 26.20	0.31	56.007	0.073	114.008	0.095	0f	–	$m_b=5.2/33$ , $M_S=4.9/49$	[10]
NEIC	19 42 26.79	1.36	56.047	0.056	113.904	0.101	3.3	3	$m_b=5.6/677$	[10]
GCMT	19 42 27.00	0.10	56.200	–	113.910	–	12f	0.5	$M_w=5.4/141$	[10]
ISC	19 42 27.28	0.40	56.079	0.018	114.014	0.036	6.4	2.26	$M_S=5.2/495$ , $m_b=5.6/523$	[10]
BJI	19 42 25.50	–	56.070	–	114.160	–	7.0	–	$m_b=5.2/71$	[10]

Примечание. Расшифровка кодов агентств дана в Обозначениях к настоящему сборнику;

\* значение рассчитано по амплитудным спектрам поверхностных волн.

В эпицентральной области будущей Муяканской последовательности с начала 2014 г. (рис. 1) наблюдалась лишь слабая фоновая сейсмичность. Постепенное увеличение активности отмечено с 17 апреля и вплоть до момента главного толчка 23 мая. В общей сложности за этот период было зарегистрировано 93 форшока с  $K_p=5.6-9.6$ . Число афтершоков за сутки после главного толчка составило  $N=350$  ( $K_p=5.6-9.9$ ), а до конца года – более 2 тысяч (табл. 2), при этом результаты локализации эпицентров на первом этапе развития сейсмического процесса согласуются с положением главного толчка (врезка к рис. 2, рис. 3 а, б).

Каталог Муяканских землетрясений, представленный в данном сборнике, включает только представительные события ( $K_p > 6.5$ ) [2]. При локализации самых слабых из них в среднем использованы данные 6–7 сейсмических станций, расположенных в основном на эпицентральных расстояниях до 250 км. Ошибка определения координат эпицентров зависит от силы землетрясения и четкости вступлений основных сейсмических волн и в большинстве случаев не превышает 3 км. Погрешность оценки глубины гипоцентров также зависит от силы землетрясения, но превышает горизонтальную ошибку в 2–2.5 раза. Для 752 событий в каталоге представлены данные о глубинах [2]. Гипоцентры 80 % из них располагаются в интервале  $h=3-11$  км с выраженным максимумом на глубинах 6–8 км (рис. 3 в).

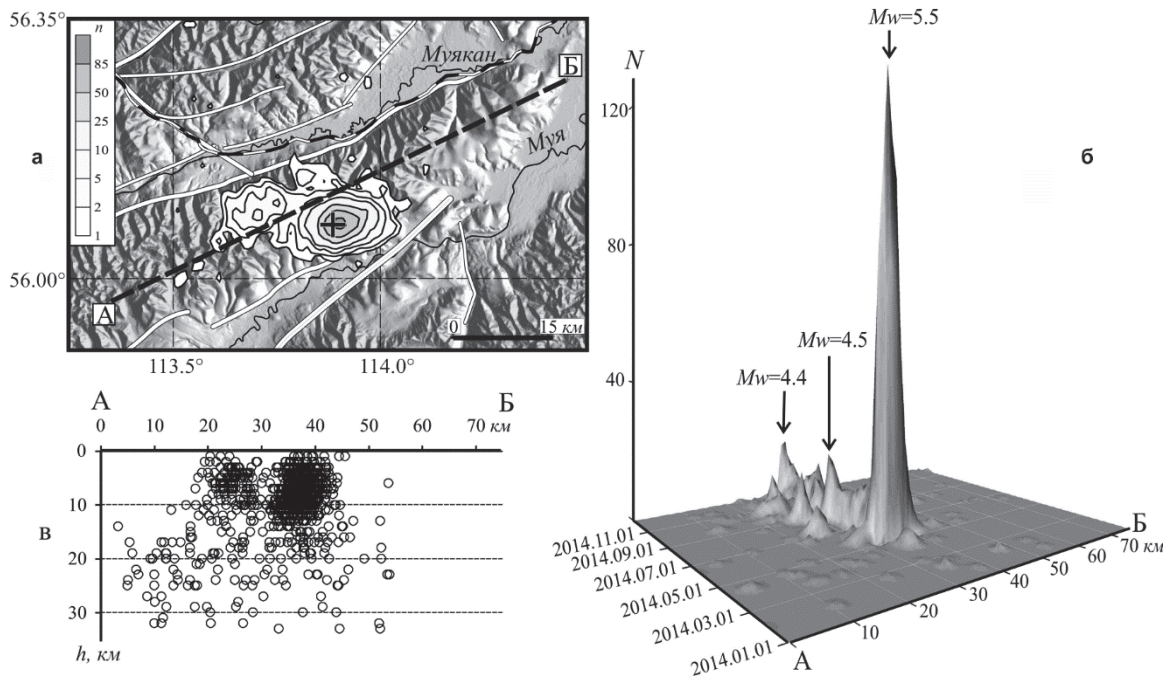


Рис. 3. Пространственно-временное развитие Муыканской последовательности землетрясений в 2014 г.

а – карта плотности эпицентров, где  $n$  – число землетрясений на единичной площадке осреднения размером  $\varphi=0.01^\circ$ ,  $\lambda=0.02^\circ$ , крестиком обозначен главный толчок; б – пространственно-временное распределение числа Муыканских землетрясений с  $K_p > 6.5$  в 2014 г. (по десяти суточным интервалам с единичной площадкой осреднения  $1.8 \times 30$  км) в проекции на условную ось одноименного хребта (штриховая линия на рис. 3 а), стрелками указаны моменты наиболее сильных землетрясений и их моментные магнитуды; в – разрез А – Б (штриховая линия на рис. 3 а) по глубине.

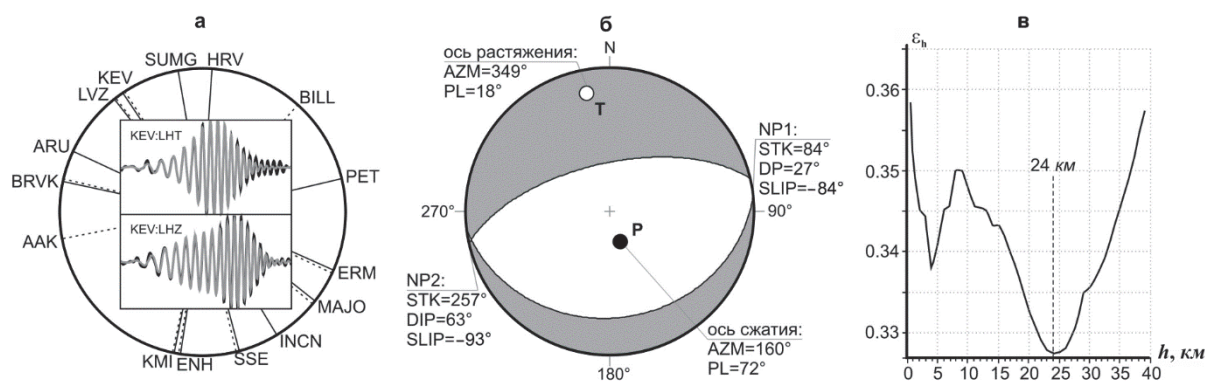
Расчет угла наклона графика повторяемости по землетрясениям представительных энергетических классов ( $K_p=7-11$ ) показал несколько большие, чем обычно в Прибайкалье, значения  $\gamma = -0.57 \pm 0.01$  (табл. 2).

Таблица 2. Распределение числа землетрясений Муыканской последовательности по энергетическим классам  $K_p$  и значение угла наклона  $\gamma$  графика повторяемости землетрясений для периода 01.04–31.12.2014 г.

Период времени	$K_p$									$N_\Sigma$	$\gamma \pm \sigma_\gamma$ при $\Delta K=7-11$
	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
01.04–31.12.2014	1171	825	284	73	19	5	3	-	1	2381	$-0.57 \pm 0.01$

Примечание.  $\Delta K_p$  – диапазон классов, по которому рассчитано значение  $\gamma$ .

**Механизм очага Муыканского землетрясения и его афтершоков.** Для события 23 мая 2014 г. был рассчитан тензор сейсмического момента (ТСМ). В качестве исходных данных использовались записи поверхностных волн, зарегистрированных на каналах LHZ и LHT 15 цифровых широкополосных сейсмических станций сетей IRIS, в том числе на российских станциях «Билибино», «Петропавловск», «Арти», «Лавозеро», и GEOFON на эпицентральных расстояниях 2275–9086 км (рис. 4 а). Диапазон периодов колебаний, в котором выделялась фундаментальная мода волн Рэлея и Лява, составлял 30–70 с. Вычисление ТСМ проводилось методом [11, 12]. В результате инверсии было получено решение механизма очага (рис. 4 б), глубина гипоцентра  $h=24$  км (рис. 4 в), скалярный сейсмический момент  $M_0=1.9 \cdot 10^{17}$  Н·м, моментная магнитуда  $M_{w_{\text{рег}}}=5.5$  и значение функции нормированной невязки  $\varepsilon=0.328$ . Сопоставляя полученное решение с данными GСMT-каталога ( $NP1: 101^\circ, 50^\circ, -39^\circ, NP2: 219^\circ, 61^\circ, -132^\circ, M_0=1.51 \cdot 10^{17}$  Н·м,  $M_w=5.4$ ), отметим хорошую, с учетом разницы в предположениях относительно модели очага, согласованность результатов инверсий, выполненных различными методами. Однако, в данном случае сопоставление глубин очага невозможно, т.к. для расчета GСMT-решения использовалось фиксированное значение  $h=12$  км.



**Рис. 4.** а – азимутальное распределение сейсмических станций (с международными кодами), используемых для расчета амплитудных спектров поверхностных волн (сплошные и пунктирные линии проведены к станциям, для которых выделены волны Рэля и Лява соответственно), с примером фильтрации записей станции KEV ( $AZM=325.74^\circ$ ,  $\Delta=4237$  км);  
 б – механизм очага землетрясения в проекции нижней полусферы;  
 в – зависимость частной функции нормированной невязки ( $\epsilon_h$ ) от глубины очага

Существенное расхождение между значениями глубины гипоцентра, рассчитанными по данным поверхностных и объемных волн (табл. 1), вероятно, связано с разницей в частотном диапазоне используемых данных и, соответственно, отражает различные фазы разрывообразования в очаге Муяканского землетрясения. Т.е. значение глубины 3.3 км, вычисленное по короткопериодным записям, соответствует начальной фазе разрывообразования, а глубина 24 км характеризует его основную фазу.

Кроме основного толчка, ТСМ был рассчитан и для трех его афтершоков, в то время как для остальных событий Муяканской последовательности решения фокальных механизмов были получены по знакам первых вступлений  $P$ -волн на региональных станциях (рис. 1) [7].

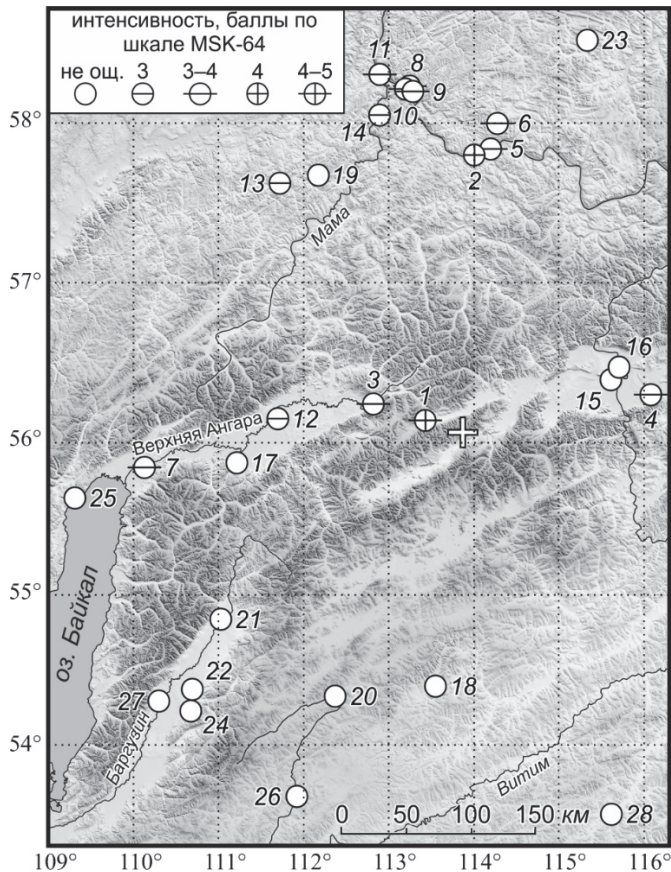
**Макросейсмические сведения.** Эпицентр Муяканского землетрясения располагался вблизи трассы БАМ в районе с низкой плотностью населения и небольшим количеством населенных пунктов, сосредоточенных вдоль линии железной дороги. Обширные пространства к югу и северу от эпицентра представляют собой практически ненаселенную горную местность. По этой причине макросейсмические данные о Муяканском землетрясении следует признать весьма ограниченными. Информация была собрана главным образом посредством почтовой рассылки опросных листов, кроме того, часть сведений была получена от сотрудников сейсмических станций региональной сети. Использование интерактивной анкеты, размещенной на сайте БФ ФИЦ ЕГС РАН, в данном случае не принесло результатов: не было получено ни одного сообщения. По всей видимости, это объясняется все еще недостаточным распространением сети Интернет в данном районе на момент землетрясения, а также низким уровнем информированности населения о сайте БФ ФИЦ ЕГС РАН и наличии интерактивной анкеты.

Максимальная интенсивность сотрясений при Муяканском землетрясении наблюдалась в пгт *Северомуйск* и составила 4–5 баллов по шкале MSK-64 [13]. Спавшие очевидцы проснулись, многие испытывали испуг. В помещениях сильно раскачивались и дребезжали всяческие предметы (люстры); звенела и дребезжала посуда; сдвигались со своих мест и падали небольшие незакрепленные предметы.

С интенсивностью 4 балла землетрясение проявилось в пос. *Мамакан*, расположенном в ~200 км к северу от эпицентра. Реакция очевидцев заключалась в основном в пробуждении спавших; многие испытывали испуг. В помещениях наблюдалось дребезжание посуды, легкое раскачивание всяческих предметов, колебание жидкости в посуде, дрожание и скрип мебели. Практически все очевидцы характеризуют землетрясение как «волнообразные колебания продолжительностью 25–30 с».

Макросейсмические эффекты, оцениваемые в 3–4 балла, наблюдались на эпицентральных расстояниях от ~70 до ~260 км. Очевидцами отмечено в основном легкое раскачивание всяческих предметов, дребезжание посуды, иногда небольшое дрожание и колебание мебели.

Оценки интенсивности сотрясений, сделанные на основании всех имеющихся данных, приведены в табл. 3, схема макросейсмических проявлений типа «пункты–баллы» представлена на рис. 5.



**Рис. 5.** Карта макросейсмических проявлений типа «пункты–баллы» Муяканского землетрясения (крестиком обозначен инструментальный эпицентр; номера пунктов соответствуют таковым в табл. 3)

**Таблица 3.** Макросейсмические данные о Муяканском землетрясении 23 мая 2014 г.

№	Пункт	Δ, км	Координаты пункта	
			φ°, N	λ°, E
<b>4–5 баллов</b>				
1	Северомуйск	29	56.15	113.43
<b>4 балла</b>				
2	Мамакан	194	57.82	114.00
<b>3–4 балла</b>				
3	Янчукан	69	56.25	112.81
4	Куанда	139	56.32	116.08
5	Бодайбо	199	57.85	114.19
6	Балахнинский	217	58.01	114.28
7	Верхняя Заимка	234	55.85	110.14
8	Витимский	241	58.22	113.27
9	Мусковит	241	58.22	113.29
10	Колотовка	242	58.22	113.19
11	Мама	256	58.31	112.90
<b>3 балла</b>				
12	Новый Уоян	135	56.16	111.71
13	Горно-Чуйский	218	57.64	111.72
14	Луговский	229	58.06	112.89
<b>Не ощущалось</b>				
15	Усть-Муя	114	56.41	115.62
16	Неляты	122	56.49	115.70
17	Кумора	166	55.88	111.23
18	Маловский	187	54.40	113.55
19	Согдиондон	208	57.69	112.16
20	Варваринский	215	54.33	112.37
21	Улюнхан	225	54.85	111.03
22	Арзгун	275	54.38	110.70
23	Кропоткин	284	58.51	115.32
24	Аргада	287	54.23	110.68
25	Северобайкальск	288	55.65	109.32
26	Усть-Джилинда	296	53.65	111.93
27	Курумкан	300	54.30	110.30
28	Тунгокочен	303	53.53	115.62

К сожалению, общая картина макросейсмического поля остается неполной в силу отсутствия информации из ненаселенных районов, непосредственно примыкающих к эпицентральной области с севера и юга. Тем не менее, анализ макросейсмических данных позволяет предположить более сильное затухание сейсмических колебаний в южном направлении от эпицентра. В населенных пунктах, расположенных к югу от эпицентра на расстояниях от 187 до 303 км, землетрясение не ощущалось, тогда как в северных румбах на расстояниях от 194 до 256 км ощутимые сотрясения интенсивностью до 4 баллов наблюдались вполне отчетливо. Следует отметить, что существенно более слабое затухание сейсмических колебаний в северных румбах при землетрясениях с эпицентрами в пределах северо-восточного фланга БРЗ неоднократно наблюдалось и ранее. Можно предположить, что это явление отражает особенности строения земной коры региона.

**Сильные движения.** Акселерограммы Муяканского землетрясения получены станциями региональной сети на эпицентральных расстояниях от 24 до 216 км. Наибольшее значение пиковых ускорений грунта, составившее  $26.6 \text{ см/с}^2$ , было зарегистрировано на сейсмостанции «Северомуйск», наименьшее –  $1.0 \text{ см/с}^2$  – на сейсмостанции «Бодайбо» (рис. 6). Большинство сейсмических станций расположены в населенных пунктах, для которых имеются сведения об ощутимости землетрясения, что делает возможным прямое сравнение инструментальных и макросейсмических оценок интенсивности сотрясений.

Наибольшее расхождение между инструментальной оценкой и наблюдаемой интенсивностью отмечается для г. Бодайбо. Пиковое ускорение грунта, зарегистрированное на сейсмической станции «Бодайбо» и составившее  $1.0 \text{ см/с}^2$ , соответствует макросейсмической интенсивности 2 балла согласно инструментальной части шкалы MMSK-92 [14]. Наблюдавшиеся макросейсмические эффекты в г. Бодайбо позволяют оценить интенсивность сотрясений как минимум в 3–4 балла. Следует отметить, что в г. Бодайбо, равно как и в пос. Мамакан, нередко наблюдаются

более высокие значения интенсивности сотрясений по сравнению со значениями, рассчитанными по уравнению макросейсмического поля. В настоящее время этот эффект не находит удовлетворительного объяснения.

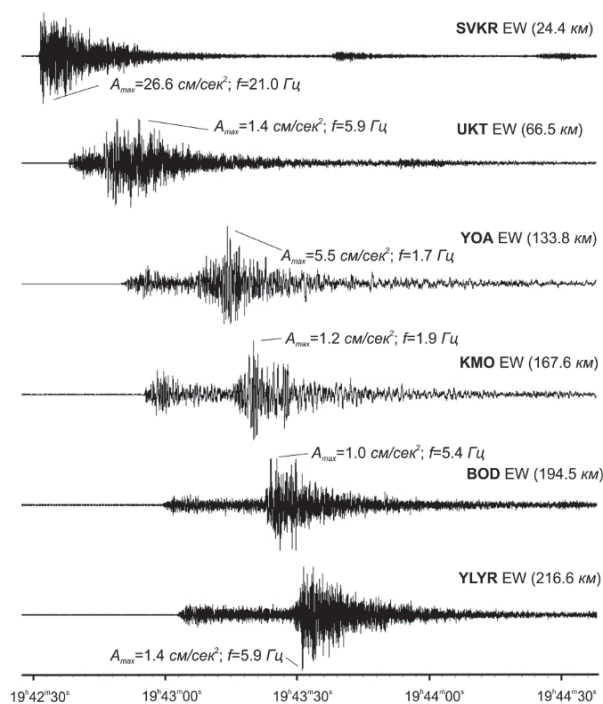


Рис. 6. Акселерограммы Муяканского землетрясения 23 мая 2014 г., полученные на ближайших к эпицентру сейсмических станциях [3]

к основным структурам Северо-Муйского района. С северо-запада и юго-востока хребет ограничен региональными внутриблоковыми разломами докайнозойского заложения: – Муяканским, отделяющим его от одноименной впадины, и Южномуяканским, отделяющим хребет от Муйской впадины (рис. 1) [5].

В позднекайнозойский этап развития эти разломы, имеющие юго-запад – северо-восточное простирание, характеризуются высокой активностью и играют важную роль в сеймотектонике района. Чаще всего кинематика смещений в их зонах соответствует сбросам, сбросо-сдвигам и сдвиго-сбросам, при этом во многих случаях наблюдаются крутые углы падения. Стоит отметить, что указанные дизъюнктивы сопровождаются опережающими разрывами, способствующими развитию мелких блоковых структур в приразломных участках [6].

**История сейсмичности в очаговой зоне.** По сейсмичности Северо-Муйский район в целом выделяется повышенной плотностью эпицентров [15]. Здесь имеются сведения о палеоструктурах, ответственных за сильные ( $M \geq 7.0$ ) землетрясения, и информация об исторических сейсмических событиях доинструментального периода наблюдений. Не является исключением и Муяканский хребет, на северо-западном склоне которого установлена палеоструктура (300–2000 лет,  $M \sim 7.6$ ), связанная генетически с одноименным разломом [16, 17]. На юго-востоке, в зоне Южномуяканского разлома, локализован эпицентр крупного исторического землетрясения 29 апреля 1917 г. ( $M \sim 6.6$ ) [17], ощущавшегося на площади, превышающей 500 тыс. км<sup>2</sup>.

К наиболее сильным землетрясениям инструментального периода наблюдений относится Муяканское событие 11 ноября 1962 г. ( $\varphi=55.90^\circ\text{N}$ ,  $\lambda=113.12^\circ\text{E}$ ) с  $M=5.8$  [17], сопровождавшееся 33 повторными толчками и ощущавшееся в г. Бодайбо ( $\Delta=220 \text{ км}$ ) с интенсивностью в 4 балла. Такая же интенсивность колебаний наблюдалась в этом населенном пункте при землетрясении 18 декабря 1971 г. ( $\varphi=56.2^\circ\text{N}$ ,  $\lambda=114.2^\circ\text{E}$  с  $K_p=13.0$ ,  $M=5.0$ ) [17, 18]. Еще одно ощутимое сейсмическое событие (Южномуяканское), проявившееся в пос. Северомуйск с интенсивностью в 5 баллов, произошло 23 августа 2007 г. ( $\varphi=55.93^\circ\text{N}$ ,  $\lambda=113.56^\circ\text{E}$ ,  $K_p=12.3$ ,  $M_w=4.8$ ) [19], примерно, в 20 км к юго-западу от эпицентра сильного исторического землетрясения 29 апреля 1917 г.

Расхождение между инструментальной и макросейсмической оценкой в 1 балл отмечено для пгт Новый Уоян. Максимальная амплитуда пиковых ускорений грунта по данным сейсмостанции «Уоян» составила  $5.5 \text{ см/с}^2$ , что соответствует 4 баллам по шкале MMSK-92. В то же время наблюдавшиеся в пгт Новый Уоян макросейсмические эффекты соответствуют лишь 3 баллам.

В остальных случаях оценки интенсивности по инструментальным и макросейсмическим данным соотносятся удовлетворительно. Например, значения пиковых ускорений грунта, зарегистрированные сейсмическими станциями «Кумора» и «Улюнхан» (рис. 6), соответствуют 2 баллам (практически порог ошутимости), при этом землетрясение в этих населенных пунктах не ощущалось. В пгт Северомуйск наблюдаемые макросейсмические эффекты оцениваются в 4–5 баллов при инструментальной оценке в 5 баллов.

**Тектоническая позиция очага.** Муяканский хребет, где локализовалась рассматриваемая последовательность землетрясений, наряду с Северо-Муйским и Южно-Муйским хребтами и рифтовыми впадинами, относится

В целом, сейсмическая активность в районе Муяканского хребта до 2014 г. проявлялась неравномерно. Наибольшая плотность эпицентров наблюдалась в его центральной части, при этом глубины гипоцентров большинства сейсмических событий распределялись в сейсмоактивном слое 17–26 км. Фокальные механизмы землетрясений показывали разнообразные типы смещений в очагах, при этом плоскости разрывов также имели различные простирания и во многих случаях крутое падение. В большей части очагов доминировала сбросовая компонента смещений [19].

**Обсуждение.** Муяканское землетрясение 2014 г. с  $M_{w\text{per}}=5.5$  по силе и характеру разрядки напряжений в очаге не является чем-то необычным для горного массива одноименного хребта, обрамленного региональными разломами, активизированными в кайнозой. Не противоречит Карте общего сейсмического районирования ОСР-2012 [20] и максимальная наблюдаемая интенсивность сотрясений ( $I=5$  баллов).

Судя по предшествующим сейсмическим событиям с известными механизмами, в рассматриваемой области доминировало рифтовое поле напряжений, характеризующееся субгоризонтальным растяжением северо-западной или близмеридиональной ориентации. Однако, в очагах локализованных здесь менее сильных толчков наблюдались как взбросы, так и сдвиги [19], что может объясняться разноранговой блоковой структурой коры.

Отличительной чертой Муяканского землетрясения 2014 г. является то, что в отличие от известных ранее относительно сильных толчков [5, 15], оно сопровождалось многочисленными менее сильными событиями, количество которых в области очага в следующем году значительно увеличилось [21, 22]. Своеобразие сейсмического режима и напряженно-деформированного состояния земной коры при данной последовательности отразилось на карте плотности эпицентров, где отчетливо выделились два обособленных кластера: восточный и западный (рис. 3 а). Все основные события: форшоки, главный толчок и наиболее сильные афтершоки ( $M_{w\text{per}}=4.4; 4.5$ ) – произошли в восточном кластере. При этом большинство очагов с установленными механизмами формировалось в рифтовом поле напряжений (рис. 1). В западном кластере зарегистрированы лишь достаточно слабые сейсмические события ( $K_p < 10.0$ ). Примечательно, что 80 % гипоцентров землетрясений Муяканской последовательности имеют малые глубины ( $h=3–11$  км, рис. 3 а).

Известно, что в сейсмичности проявляются определенные черты современной тектонической активности геологической среды. Характер этих проявлений свидетельствует о структурных особенностях и перераспределении напряжений в земной коре и в верхней мантии. Что касается Муяканской последовательности, то ее главный толчок, локализованный в зоне Южномуяканского разлома, подтвердил его морфокинематические характеристики: сбросовые смещения в плоскостях разрывов и крутые падения плоскостей сместителей [6]. Сопровождающие его толчки, по всей вероятности, связаны с дальнейшим развитием сейсмического процесса и активизацией локальных разнонаправленных разрывных нарушений в центральных фрагментах Муяканского и Южномуяканского разломов.

**Закключение.** Изучение Муяканского землетрясения 23 мая 2014 г. с  $M_w=5.5$  и сопровождавших его толчков показало, что данные события не противоречат общей сеймотектонической ситуации в Северо-Муйском районе, где существенную роль играют близгоризонтальные растягивающие усилия. Не противоречат они и долговременным параметрам сейсмического режима данной территории. В то же время многочисленность сейсмических событий и фрагментарный характер эпицентрального поля свидетельствуют об особых структурных и геофизических условиях в земной коре Муяканского хребта. Выявление этих условий в будущем – непростая задача, требующая комплексного подхода к геолого-геофизической информации. В целом, результаты проведенных исследований дополняют наши представления о сейсмических проявлениях в Северо-Муйском районе и будут полезны при уточнении сейсмической опасности его территории.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-05-00823).

## Л и т е р а т у р а

1. Гилёва Н.А., Хайдурова Е.В. (отв. сост.), Леонтьева Л.Р., Анисимова Л.В., Хамидулина О.А., Меньшикова Ю.А., Дреннова Г.Ф., Тигунцева Г.В., Андрусенко Н.А., Хороших М.Б., Курилко Г.В., Дворникова В.И., Павлова Л.В., Архипенко Н.С., Терешина Е.Н., Зиброва Е.С., Борисова О.А., Федюшкина Я.И., Папкова А.А., Галактионова Н.Н. Каталог землетрясений Прибайкалья и Забайкалья с  $K_p > 7.5$  за 2014 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 23 (2014 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – Приложение на CD-ROM.



2. Гилёва Н.А., Хайдурова Е.В., (отв. сост.), Леонтьева Л.Р., Анисимова Л.В., Хамидулина О.А., Меньшикова Ю.А., Дреннова Г.Ф., Тигунцева Г.В., Андрусенко Н.А., Хороших М.Б., Курилко Г.В., Дворникова В.И., Павлова Л.В., Архипенко Н.С., Терешина Е.Н., Зиброва Е.С., Борисова О.А., Федюшкина Я.И., Папкина А.А., Галактионова Н.Н. Форшоки и афтершоки Муяканского землетрясения 23 мая 2014 г. с  $M_w=5.5$ ,  $K_p=14.3$ ,  $I_0=7-8$  // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 23 (2014 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – Приложение на CD-ROM.
3. Гилёва Н.А., Кобелева Е.А., Масальский О.К. (отв. сост.). Сейсмические станции Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН (код сети ВУКЛ) в 2014 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 23 (2014 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – Приложение на CD-ROM.
4. Тубанов Ц.А., Санжиева Д.П.-Д. (отв. сост.). Сейсмические станции Бурятского филиала ФИЦ ЕГС РАН (код сети BURS) в 2014 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 23 (2014 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – Приложение на CD-ROM.
5. Кочетков В.М., Боровик Н.С., Мишарина Л.А., Солоненко А.В., Аниканова Г.В., Солоненко Н.В., Мельникова В.И., Гилёва Н.А. Ангараканский рой землетрясений в Байкальской рифтовой зоне (условия возникновения и особенности развития). – Новосибирск: Наука, 1987. – 81 с.
6. Геология и сейсмичность зоны БАМ. Структурно-вещественные комплексы и тектоника. – Новосибирск: Наука, 1983. – 189 с.
7. Мельникова В.И., Гилёва Н.А., Средкина А.И. (отв. сост.). Каталог механизмов очагов землетрясений Прибайкалья и Забайкалья за 2014 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 23 (2014 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – Приложение на CD-ROM.
8. Голенецкий С.И. Землетрясения Прибайкалья и Забайкалья // Землетрясения в СССР в 1985 году. – М.: Наука, 1988. – С. 124–135.
9. Сейсмологический бюллетень (сеть телесеизмических станций), 2014. (2020) // ФИЦ ЕГС РАН [сайт]. – URL: [ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic\\_bulletin/2014](ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_bulletin/2014)
10. International Seismological Centre (2020). On-line Bulletin. <https://doi.org/10.31905/D808B830>.
11. Bukchin, B.G. Determination of source parameters from surface wave recording allowing for uncertainties in the properties of medium // Izvestiya Akad. Nauk SSSR, Fizika Zemli. – 1990. – № 25. – P. 723–728.
12. Lasserre C., Bukchin B., Bernard P., Tapponier P., Gaudemer Y., Mostinsky A., Dailu R. Source parameters and tectonic origin of the 1996 June 1 Tianzhu ( $M_w=5.2$ ) and 1995 July 21 Yongen ( $M_w=5.6$ ) earthquakes near the Haiyuan fault (Gansu, China) // Geophys. J. Int. – 2001. – V. 144. – N. 1. – P. 206–220. doi:10.1046/j.1365-246x.2001.00313.x
13. Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В. Международная шкала сейсмической интенсивности MSK-64. – М.: МГК АН СССР, 1965. – 11 с.
14. Шебалин Н.В., Аптикаев Ф.Ф. Развитие шкал типа MSK // Вычислительная сейсмология. Вып. 34. (Проблемы макросеймики). – М.: Геос, 2003. – С. 210–253.
15. Геология и сейсмичность зоны БАМ. Сейсмичность. – Новосибирск: Наука, 1985. – 192 с.
16. Сейсмическое районирование Восточной Сибири и его геолого-геофизические основы (отв. ред. В.П. Солоненко). – Новосибирск: Наука, СО. – 1977. – 303 с.
17. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. – М.: Наука, 1977. – 536 с.
18. Голенецкий С.И. Землетрясения Прибайкалья // Землетрясения в СССР в 1971 году. – М.: Наука, 1975. – С. 110–117.
19. Мельникова В.И., Гилёва Н.А., Радзиминович Я.Б., Очковская М.Г., Средкина 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.
20. Уломов В.И. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации – ОСР-2012 // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2013. – Т. 40. – № 4. – С. 5–20.
21. 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.
22. 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 / Отв. редактор А.А. Маловичко. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – С. 86–90.

**MUYAKAN-II EARTHQUAKE on MAY 23, 2014 with  $K_p=14.3$ ,  $M_w=5.5$ ,  $I_0=7-8$** **(Northern Baikal region)****N.A. Gileva<sup>1</sup>, V.I. Melnikova<sup>2</sup>, A.I. Seredkina<sup>3</sup>, Ya.B. Radziminovich<sup>2</sup>**<sup>1</sup>*Baikal branch of Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, nagileva@crust.irk.ru*<sup>2</sup>*Institute of the Earth's crust of Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, ale@crust.irk.ru*<sup>3</sup>*Pushkov Institute of terrestrial magnetism, ionosphere and radio wave propagation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Troitsk, ale@crust.irk.ru*

**Abstract.** We consider the May 23, 2014 Muyakan earthquake ( $M_w=5.5$ ) occurred in the Muyakan Range at the north-east of the Baikal rift zone near the eastern tunnel portal of the Baikal-Amur Mainline. This event was followed by numerous aftershocks ( $K_p=5.6-9.9$ ) which number exceeded 2000 by the end of the year. Spatio-temporal analysis of the Muyakan seismic sequence shows that its epicentral field consists of two isolated clusters: eastern and western ones. All the main events including the foreshocks, main shock and the strongest aftershocks ( $M_w=4.4$ ; 4.5) occurred in the eastern cluster while only small seismic events ( $K_p<10.0$ ) were recorded in the western one. Seismic moment tensor was calculated for the Muyakan earthquake from surface wave amplitude spectra. As a result, we obtained information about the rift type focal mechanism, scalar seismic moment ( $M_0=1.9 \cdot 10^{17}$  N·m), moment magnitude ( $M_w=5.5$ ) and hypocentral depth ( $h=24$  km). From regional data, hypocentral depths of the main shock and the major number of the following earthquakes (80 %) were distributed in the depth range  $h=3-11$  km. Maximum intensity of the main shock (4–5 according to MSK-64) was felt in Severomuysk urban village ( $\Delta=29$  km). The obtained results could be used for seismic hazard assessment of the crucial part of the Baikal-Amur Mainline.

**Keywords:** earthquake epicenters and hypocenter, seismic moment tensor, focal mechanism, Severomuysk region of the Baikal rift.

**DOI:** 10.35540/1818-6254.2020.23.33

**For citation:** Gileva, N.A., Melnikova, V.I., Seredkina, A.I., & Radziminovich, Ya.B. (2020). [Muyakan-II earthquake on May 23, 2014 with  $K_p=14.3$ ,  $M_w=5.5$ ,  $I_0=7-8$  (Northern Baikal region)]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), 323–333. (In Russ.). doi: 10.35540/1818-6254.2020.23.33

**R e f e r e n c e s**

- Gileva, N.A., Haydurova, E.V., Leontyeva, L.R., Anisimova, L.V., Hamidulina, O.A., Menshikova, Yu.A., Drennova, G.F., Tiguntseva, G.V., Andrusenko, N.A., Horoshih, M.B., Kurilko, G.V., Dvornikova, V.I., Pavlova, L.V., Arhipenko, N.S., Tereshina, E.N., Zibrova, E.S., Borisova, O.A., Fedyushkina, Ya.I., Papkova, A.A., & Galaktionova, N.N. (2020). [Catalog of earthquakes of Baikal and Transbaikalia for 2014 with the  $K_p>7.5$ ]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), Appendix on CD. (In Russ.).
- Gileva, N.A., Haydurova, E.V., Leontyeva, L.R., Anisimova, L.V., Hamidulina, O.A., Menshikova, Yu.A., Drennova, G.F., Tiguntseva, G.V., Andrusenko, N.A., Horoshih, M.B., Kurilko, G.V., Dvornikova, V.I., Pavlova, L.V., Arhipenko, N.S., Tereshina, E.N., Zibrova, E.S., Borisova, O.A., Fedyushkina, Ya.I., Papkova, A.A., & Galaktionova, N.N. (2020). [Foreshocks and aftershocks of Muyakan earthquake on May 23, 2014 with  $M_w=5.5$ ,  $K_p=14.3$ ,  $I_0=7-8$ ]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), Appendix on CD. (In Russ.).
- Gileva, N.A., Kobeleva, E.A., & Masalskii, O.K. (2020). [Seismic stations of the Baikal Branch of GS RAS (network code BYKL) in 2014]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), Appendix on CD. (In Russ.).
- Tubanov, Ts.A., & Sanjjeva, D.P.-D. (2020). [Seismic stations of the Buryatian Branch of GS RAS (network code BURS) in 2014]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), Appendix on CD. (In Russ.).
- Angarakanskiy roy zemletryaseny 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)] (1987). Novosibirsk, Russia: Nauka Publ., 81 p. (In Russ.).
- Geologiya i seysmichnost' zony BAM. Strukturno-veshchestvennyye komplekсы i tektonika [Geology and seismicity of the BAM zone. Structural-material complexes and tectonics] (1983). Novosibirsk, Russia: Nauka Publ., 189 p. (In Russ.).
- Melnikova, V.I., Gileva, N.A., & Seredkina, A.I. (2020). [Catalog of focal mechanisms of earthquakes of Baikal and Transbaikalia for 2014]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), Appendix on CD. (In Russ.).

8. Golenetskiy, S.I. (1988). [Earthquakes of Baikal and Transbaikalia]. In *Zemletryaseniia v SSSR v 1985 godu* [Earthquakes in the USSR, 1985] (pp. 124–135). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
9. GS RAS, Bulletin of Teleseismic Stations, 2014. (2020). Retrieved from [ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic\\_bulletin/2014](ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_bulletin/2014)
10. International Seismological Centre (2020). On-line Bulletin. Retrieved from <https://doi.org/10.31905/D808B830>
11. Bukchin, B.G. (1990). [Determination of source parameters from surface wave recording allowing for uncertainties in the properties of medium]. *Izvestiya AN SSSR, Fizika Zemli*, 25, 723–728.
12. Lasserre, C., Bukchin, B., Bernard, P., Tapponnier, P., Gaudemer, Y., Mostinsky, A., & Dailu, R. (2001). Source parameters and tectonic origin of the 1996 June 1 Tianzhu ( $M_w=5.2$ ) and 1995 July 21 Yongen ( $M_w=5.6$ ) earthquakes near the Haiyuan fault (Gansu, China). *Geophysical Journal International*, 144(1), 206–220. doi: 10.1046/j/1365-246x.2001.00313.x
13. Medvedev, S.V., Shponhoyer, V., & Karnik, V. (1965). *Mezhdunarodnaya shkala seysmicheskoy intensivnosti MSK-64* [MSK-64 International seismic intensity scale]. Moscow, Russia: MGK Academy of Sciences USSR Publ., 11 p. (In Russ.).
14. Shebalin, N.V., & Aptikaev, F.F. (2003). [Development of MSK-type scales]. In *Magnitnoye pole Zemli: matematicheskiye metody opisaniya. Problemy makroseysmiki (Vychislitel'naya seysmologiya; 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.).
15. *Geologiya i seysmichnost' zony BAM. Seysmichnost'* [Geology and seismicity of the BAM zone. Seismicity] (1985). Novosibirsk, Russia: Nauka Publ., 192 p. (In Russ.).
16. *Seysmicheskoye rayonirovaniye Vostochnoy Sibiri i yego geologo-geofizicheskoye osnovy* [Seismic zoning of Eastern Siberia and its geological and geophysical basis] (1977). Novosibirsk, Russia: Nauka Publ., 303 p. (In Russ.).
17. Kondorskaya, N.V., & Shebalin, N.V. (Eds). (1977). *Novyi katalog sil'nykh zemletriasenii na territorii SSSR s drevneishikh vremen do 1975 goda* [A new catalog of strong earthquakes in the USSR from ancient times to 1975]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 536 p. (In Russ.).
18. Golenetskiy, S.I. (1975). [Earthquakes of Baikal region]. In *Zemletryaseniia v SSSR v 1971 godu* [Earthquakes in the USSR, 1971] (pp. 110–117). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
19. Melnikova, V.I., Gileva, N.A., Radziminovich, Ya.B., Ochkovskaya, M.G., & Seredkina, A.I. (2013). [Felt earthquakes of the North Mui region in 2007 (Northern Baikal region): Mudirikan earthquake on April 5 with  $K_p=13.4$ ,  $M_w=4.9$ ,  $I_0=7$  and South Muyakan earthquake on August 23 with  $K_p=13.3$ ,  $M_w=4.8$ ,  $I_0=7$ ]. In *Zemletryaseniia Severnoy Evrazii v 2007 godu* [Earthquakes in Northern Eurasia, 2007] (pp. 351–362). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
20. 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
21. 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.).
22. Gileva, N.A., Khritova, M.A., & Khamidulina, O.A. (2018). [Muyakan sequence earthquake localization results 2014–2015]. In *Materialy XIII Mezhdunarodnoi seismologicheskoi 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.).