

СИЛЬНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ СЕВЕРНОГО ПРИБАЙКАЛЬЯ ($M_w=4.6-4.7$) в 2015 г.

Я.Б. Радзиминович^{1,2}, В.И. Мельникова^{1,2}, Н.А. Гилёва², А.И. Филиппова³

¹Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, ian@crust.irk.ru

²Байкальский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Иркутск, nagileva@crust.irk.ru

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

Аннотация. В статье рассмотрены три относительно сильных землетрясения, произошедших в течение 2015 г. в пределах Северного Прибайкалья: Верхнеакулинское 7 июля ($M_w=4.6$) с эпицентром в верховьях р. Верхняя Акули, а также Гулонгинское-I 25 сентября ($M_w=4.7$) и Гулонгинское-II 13 декабря ($M_w=4.6$) с эпицентрами вблизи горных озер Гулонга. Приведены инструментальные и макросейсмические данные об этих землетрясениях. Тензор сейсмического момента, рассчитанный по амплитудным спектрам поверхностных волн, показывает сбросовое решение механизма очага для Верхнеакулинского и Гулонгинского-II землетрясений, в то время как Гулонгинское-I землетрясение характеризуется сдвиговыми движениями в очаге. Полученные результаты могут быть использованы в работах по сейсмическому районированию и уточнению сейсмической опасности Северного Прибайкалья.

Ключевые слова: землетрясение, инструментальные и макросейсмические данные, механизм очага, активные разломы, Байкальская рифтовая зона, Северное Прибайкалье.

DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.27

Для цитирования: Радзиминович Я.Б., Мельникова В.И., Гилёва Н.А., Филиппова А.И. Сильные землетрясения Северного Прибайкалья ($M_w=4.6-4.7$) в 2015 году // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – С. 276–290. doi: 10.35540/1818-6254.2021.24.27

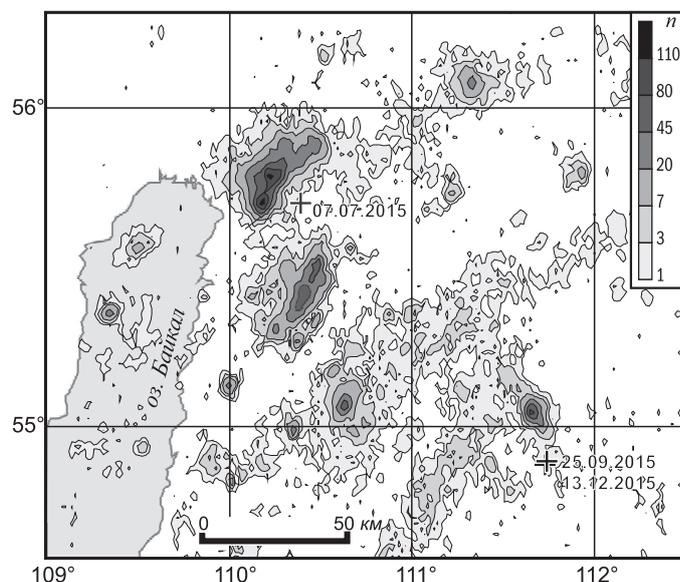


Рис. 1. Карта плотности эпицентров землетрясений с $K_p \geq 5.6$ за период 1999–2014 гг.

n – число событий на единичной площадке осреднения размером $\varphi=0.02^\circ$ с.ш. и $\lambda=0.03^\circ$ в.д. Крестиками обозначены эпицентры сильных землетрясений 2015 г.: 7 июля, 25 сентября и 13 декабря.

характерные черты перехода от рифтового типа развития к блоковым движениям положительного знака, выраженным в Забайкалье [2, 3]. В этой связи значительный интерес представляют относительно сильные землетрясения в пределах этого района, поскольку их детальное изучение дает возможность уточнить современные представления о геодинамике и сеймотектонических процессах северо-восточного фланга БРЗ.

Введение. Северо-восточный фланг Байкальской рифтовой зоны (БРЗ), и в частности Северное Прибайкалье, характеризуется высокой сейсмической активностью (рис. 1). Согласно палеосейсмологическим и инструментальным данным, здесь неоднократно отмечались сильные землетрясения, в том числе определяющие сейсмический потенциал территории. В то же время рассматриваемая область соседствует со слабосейсмичным Забайкальским блоком. Условная граница между этими двумя областями достаточно легко устанавливается по особенностям эпицентрального поля: если в пределах БРЗ эпицентры землетрясений концентрируются в ярко выраженные полосы и скопления, то в Забайкалье они рассеяны по большой площади [1]. Такое пространственное распределение сейсмических событий является прямым отражением различия геодинамических режимов БРЗ и Забайкальского блока. В Северном Прибайкалье наиболее отчетливо проявляются ха-

К подобным событиям относятся несколько сильных землетрясений, произошедших в 2015 г. в Северном Прибайкалье. В частности, это землетрясение 7 июля в 14^h15^m ($M_w=4.6$), локализованное в районе истока р. Верхняя Акули и получившее название Верхнеакулинское, а также два сейсмических события, произошедших 25 сентября в 23^h24^m ($M_w=4.7$) и 13 декабря в 05^h53^m ($M_w=4.6$) в районе озер Гулонга и названных по местоположению эпицентров соответственно Гулонгинское-I и Гулонгинское-II. Результаты изучения этих землетрясений представлены в настоящей статье.

Верхнеакулинское землетрясение 7 июля 2015 г. ($K_p=13.0$, $M_w=4.6$, $I_0=7$) произошло в северо-западной части Баргузинского хребта, в районе истока р. Верхняя Акули. Следует отметить, что в течение периода инструментальных сейсмологических наблюдений непосредственно в районе эпицентра Верхнеакулинского землетрясения не было зарегистрировано ни одного сейсмического события с $K_p \geq 13.0$. Это обстоятельство позволяет считать землетрясение 7 июля 2015 г. значимым для территории Северного Прибайкалья событием.

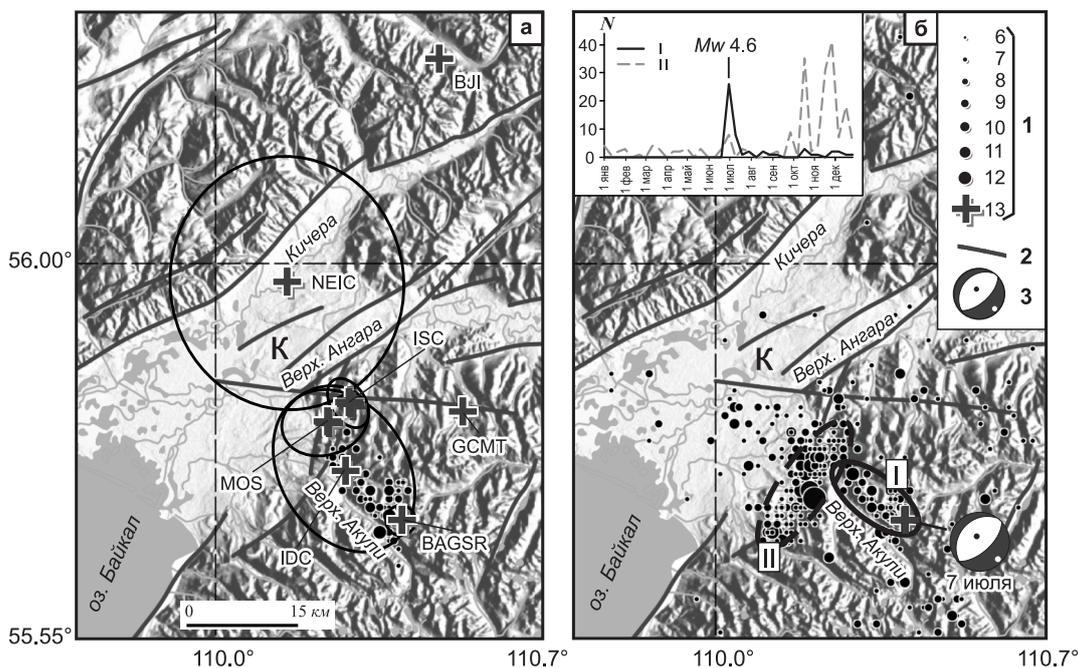


Рис. 2. а – Решения эпицентров главного толчка и эллипсы горизонтальных ошибок Верхнеакулинского землетрясения по данным разных агентств; кружками показаны эпицентры афтершоков землетрясения 7 июля; б – Карта эпицентров землетрясений района, прилегающего к северной оконечности оз. Байкал за период 01.01–31.12.2015 г.

1 – эпицентры землетрясений с $K_p \geq 5.6$; 2 – тектонические разломы по [4]; 3 – стереограмма фокального механизма в проекции нижней полусферы с указанием даты; К – Кичерская впадина. На врезке показан график зависимости числа землетрясений от времени для очаговых областей Верхнеакулинской (I) и Кичеро-Акуликанской (II). Единичный интервал – 5 суток.

Инструментальные данные. Локация эпицентра Верхнеакулинского землетрясения была выполнена по данным 36 региональных сейсмических станций [5], большая часть которых относится к Байкальскому и Бурятскому филиалам ФИЦ ЕГС РАН (31 станция). Также привлечены данные Якутского, Алтае-Саянского филиалов ФИЦ ЕГС РАН и ИЗК СО РАН (пять станций). Диапазон эпицентральных расстояний составил $\Delta=54-1154$ км. В радиусе до 200 км располагались три сейсмостанции.

Таблица 1. Основные параметры Верхнеакулинского землетрясения 7 июля 2015 г. по данным различных сейсмологических агентств

Агентство	t_0 , ч мин с	δt_0 , с	Гипоцентр					h , км	δh , км	Магнитуда	Источник
			φ° , N	$\delta\varphi^\circ$	λ° , E	$\delta\lambda^\circ$					
BAGSR	14:15:51.80	0.22	55.700	0.016	110.390	0.023	23*	–	$K_p=(13.0 \pm 0.2)/26$, $M_w^*=4.6/13$	[6, 7, 8]	
MOS	14:15:49.50	0.85	55.818	0.039	110.231	0.089	10	–	$MS=4.4/21$, $MPSP=5.0/69$	[9]	

Агентство	t_0 , ч мин с	δt_0 , с	Гипоцентр						Магнитуда	Источник
			φ° , N	$\delta\varphi^\circ$	λ° , E	$\delta\lambda^\circ$	h , км	δh , км		
NEIC	14:15:52.07	1.05	55.985	0.150	110.145	0.243	10f	–	$m_b=4.9/281$	[10]
IDC	14:15:49.38	0.42	55.759	0.089	110.270	0.114	0f	–	$m_b=4.5/29, M_s=3.9/29$	[10]
GCMT	14:15:53.10	0.40	55.830	–	110.520	–	29.8	1.0	$M_w=4.8/66$	[10]
ISC	14:15:51.48	0.52	55.841	0.027	110.277	0.031	14.6	3.2	$M_s=4.2/44, m_b=4.8/242$	[10]
ВЛ	14:15:46.50	–	56.250	–	110.470	–	9	–	$m_b=4.4/53, M_s=4.7/45$	[10]

Примечание. Расшифровка кодов агентств дана в обозначениях к наст. выпуску журнала. * – значения рассчитаны по амплитудным спектрам поверхностных волн. f – фиксированная глубина. Через слэш обозначено количество используемых станций.

Основные параметры землетрясения по материалам различных сейсмологических агентств приведены в табл. 1, из которой следует, что решения неплохо согласуются между собой: разброс в положении эпицентра в большинстве случаев (5 из 7) составляет 10 км (рис. 2 а). Наименьшие ошибки локации эпицентров получены в агентстве BAGSR.

Значения глубин гипоцентров имеют большой разброс: $h=9-30$ км (табл. 1). В агентстве BAGSR из-за недостатка близких станций не удалось достоверно определить глубину очага с использованием региональной программы, поэтому в табл. 1 приводится только значение $h=23$ км, рассчитанное по амплитудным спектрам поверхностных волн.

Таблица 2. Распределение числа землетрясений Верхнеакулинской афтершоковой последовательности по энергетическим классам K_p и характеристика точности определения координат эпицентров σ_f в зависимости от энергетического класса для периода 7.07–31.12.2015 г.

Период времени	K_p					N_Σ
	6	7	8	9	13	
7.07–31.12.2015	34	32	3	3	1	73
$\sigma_{f\text{среднее}}, \text{ км}$	4.4	3.4	2.5	3.3	1.8	3.3

Верхнеакулинское землетрясение не предварялось форшоками, а немногочисленные афтершоки преимущественно зарегистрированы в первые пять суток (график на врезке к рис. 2 б, табл. 2) [11]. Эпицентры трассируют направление, поперечное основным структурам, что подтверждается одним из наиболее сильных афтершоков ($K_p=9.1$), зарегистрированным на расстоянии 8.5 км к северу-западу от главного толчка.

Для Верхнеакулинского землетрясения по амплитудным спектрам поверхностных волн, зарегистрированных широкополосными сейсмическими станциями, и данным о знаках первых вступлений P -волн на записях региональных станций в приближении двойной пары сил был определен тензор сейсмического момента (ТСМ): скалярный сейсмический момент, моментная магнитуда, глубина очага и фокальный механизм рифтового типа (рис. 2 б, табл. 1). При сопоставлении полученного решения с данными из Global CMT-каталога обнаружилась их полная согласованность (подробная информация представлена в [10]).

Макросейсмические данные. Информация об ощутимых эффектах Верхнеакулинского землетрясения была собрана с использованием интерактивного опросного листа, размещенного на интернет-сайте БФ ФИЦ ЕГС РАН [12], а также поступила от сотрудников сейсмических станций региональной сети. Данные нельзя назвать обильными, что связано с редкой сетью населенных пунктов и общей низкой населенностью Северного Прибайкалья.

Оценки интенсивности сотрясений при Верхнеакулинском землетрясении, сделанные по совокупности всей имеющейся макросейсмической информации, приведены в табл. 3; схема макросейсмических проявлений типа «пункты–баллы» представлена на рис. 3.

С максимальной интенсивностью, оцениваемой в 4–5 баллов по шкале MSK-64 [13], землетрясение ощущалось в с. *Верхняя Заимка* на расстоянии 23 км. Очевидцы характеризуют землетрясение как «очень сильный толчок снизу», «сильный короткий удар». Отмечена тряска люстры и посуды в шкафу. Некоторые очевидцы покинули помещения и вышли на улицу. Приблизительно такие же эффекты наблюдались в пгт *Кичера* ($\Delta=32$ км): дребезжание посуды и оконных стекол, дрожание мебели, а также испуг очевидцев.

Таблица 3. Макросейсмические данные о Верхнеакулинском землетрясении

№	Пункт	Δ , км	Координаты пункта		№	Пункт	Δ , км	Координаты пункта	
			φ° , N	λ° , E				φ° , N	λ° , E
	4–5 баллов								
1	с. Верхняя Заимка	23	55.849	110.141	7	г. Северобайкальск	66	55.636	109.336
	4 балла					2–3 балла			
2	пгт Кичера	32	55.938	110.100	8	г. Киренск	270	57.785	108.112
	3–4 балла				9	г. Усть-Кут	315	56.766	105.648
3	пос. Кумора	55	55.885	111.208		2 балла			
4	пгт Новый Уоян	96	56.139	111.728	10	пос. Окунайский	172	56.021	107.687
5	пгт Магистральный	190	56.173	107.446	11	пос. Бубновка	263	57.756	108.231
	3 балла				12	г. Бодайбо	332	57.851	114.193
6	пгт Нижнеангарск	52	55.789	109.579	13	г. Чита	456	52.033	113.550
					14	г. Иркутск	549	52.267	104.333

С интенсивностью 3–4 балла землетрясение ощущалось на эпицентральных расстояниях от 55 до 190 км. В пос. Кумора макросейсмические проявления сводились к легкому колебанию висячих предметов и дребезжанию посуды, а также к легкому дрожанию зданий. Аналогичным образом землетрясение проявилось в пгт Новый Уоян.

Особенностью макросейсмических проявлений Верхнеакулинского землетрясения можно считать ощутимые эффекты, хотя и слабые ($I=2$ балла), в городах Чита и Иркутск, удаленных от эпицентра на 456 и 549 км соответственно. Если в г. Чите землетрясения с эпицентрами на северо-восточном фланге БРЗ ощущаются довольно часто, то ощутимые колебания в г. Иркутске, обусловленные сейсмическими событиями в Северном Прибайкалье, являются редким явлением, тем более при землетрясениях в диапазоне магнитуд $M=4.5-5.0$.

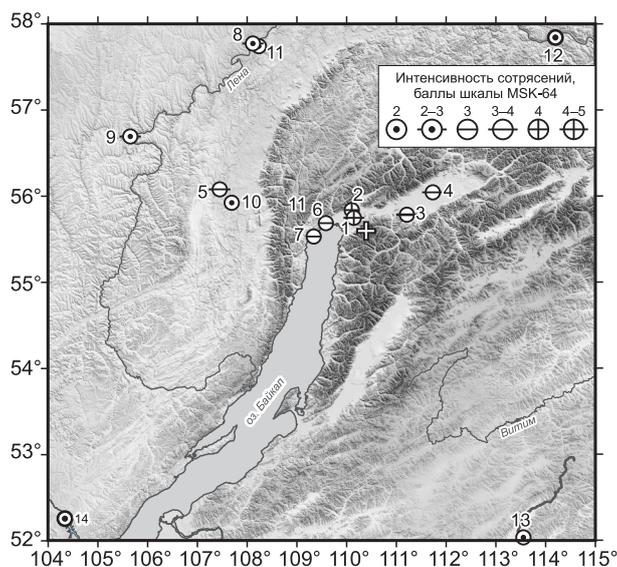


Рис. 3. Карта макросейсмических проявлений типа «пункты–баллы» Верхнеакулинского землетрясения. Крестиком обозначен инструментальный эпицентр, цифры соответствуют пунктам в табл. 3.

Сильные движения. Значения пиковых ускорений грунта (PGA), соответствующие инструментальной интенсивности сотрясений 3 балла и более по шкале MMSK-92 [14], были зарегистрированы на трех сейсмических станциях региональной сети, находящихся в пределах 100 км от эпицентра (рис. 4). Интересно отметить, что наибольшие ускорения были записаны на станции «Уоян» ($A_{\max}=7.6 \text{ см/с}^2$), расположенной на почти вдвое большем эпицентральных расстоянии по сравнению со станциями «Нижнеангарск» и «Кумора». Записанное на станции «Уоян» значение PGA, соответствующее интенсивности сотрясений 4 балла по шкале MMSK-92, в целом неплохо согласуется с наблюдаемыми макросейсмическими эффектами в пгт Новый Уоян, оцениваемыми в 3–4 балла. Удовлетворительное соответствие между инструментальными и макросейсмическими оценками интенсивности сотрясений отмечается также для станции «Кумора». Достигнутое здесь пиковое значение ускорений, $A_{\max}=2.7 \text{ см/с}^2$, соответствует 3 баллам по

инструментальной части шкалы MMSK-92, в то время как наблюдаемые эффекты в пос. Кумора оцениваются в 3–4 балла. Наибольшее расхождение отмечено для станции «Нижнеангарск»: по инструментальным данным интенсивность сотрясений должна составлять 4 балла, однако наблюдавшиеся макросейсмические проявления можно оценить лишь в 3 балла.

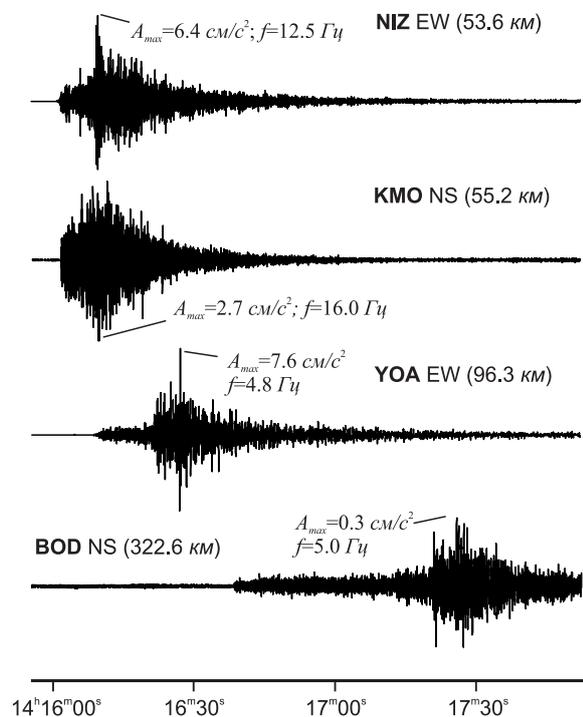


Рис. 4. Акселерограммы Верхнеангарского землетрясения, полученные на ближайших к эпицентру сейсмических станциях Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН

Отдельно следует остановиться на записях станций «Иркутск» и «Чита», на которых значения PGA равны 0.1 см/с^2 и 0.2 см/с^2 соответственно. Ускорения такого уровня не достигают порога ощутимости, тем не менее землетрясение ощущалось как в г. Иркутске, так и в г. Чите с интенсивностью 2 балла, при этом эпицентральные расстояния составляли несколько сотен километров. По всей видимости, это обстоятельство связано с наличием в обоих городах высотной застройки и ощутимостью землетрясения на верхних этажах зданий.

Гулонгинские землетрясения 25 сентября с $K_p=13.1$, $M_w=4.7$, $I_0=7$ и 13 декабря с $K_p=13.0$, $M_w=4.6$, $I_0=7$ произошли в центре Икатского хребта вблизи высокогорных озер Гулонга (урез воды озера на высоте 2450 м, наивысшая точка хребта 2573 м) в составе роя

[15]. Координаты этих близких по значению энергии событий, зарегистрированных с интервалом примерно в два с половиной месяца, практически совпадают (рис. 5).

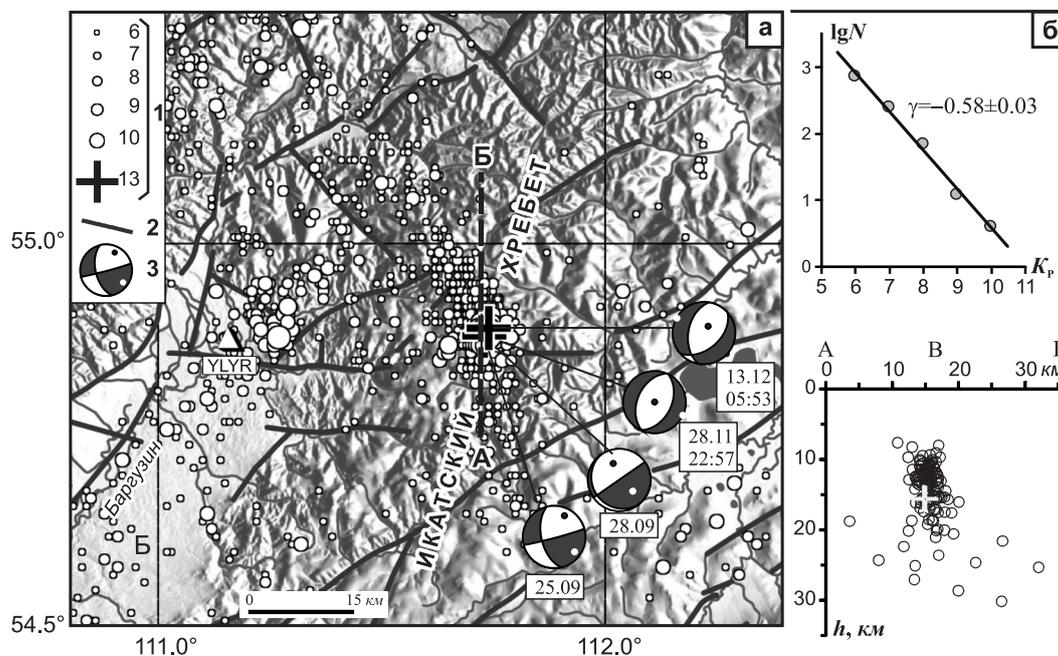


Рис. 5. Карта эпицентров землетрясений района Икатского хребта за период 01.01–31.12.2015 г. (а), график повторяемости землетрясений Гулонгинского роя ($K_p=6-10$), период 2015 г. (б) и меридиональный (по $\lambda=111.72^\circ$) разрез (А–Б) по глубине с использованием только надежных данных (в) 1 – эпицентры землетрясений с $K_p \geq 5.6$; 2 – тектонические разломы по [4]; 3 – стереограмма фокального механизма в проекции нижней полусферы с указанием даты; Б – Баргузинская впадина.

Инструментальные данные. Детальная сводная обработка Гулонгинских землетрясений была выполнена с использованием записей станций Байкальского и Бурятского филиалов ФИЦ ЕГС РАН, а также материалов ИЗК СО РАН и соседних регионов: Якутского и Алтае-Саянского филиалов ФИЦ ЕГС РАН, Монголии, Китая. Эпицентры землетрясений 25 сентября и 13 декабря были локализованы по данным 39 и 38 региональных сейсмических станций соответственно. Диапазон эпицентральных расстояний составил $\Delta=36-1197$ км. В радиусе до 200 км располагалось семь сейсмостанций.

Основные параметры главных толчков по материалам различных сейсмологических агентств представлены в табл. 4, 5. В целом имеющиеся решения неплохо согласуются между собой: максимальный разброс в положении эпицентров для агентств, указавших ошибки их определения, составляет 23 км для землетрясения 25 сентября и 16 км – для события 13 декабря (рис. 6). Наименьшие ошибки локализации получены в агентстве BAGSR [7, 15]. Значение глубин гипоцентров, согласно определениям разных агентств, варьируется от 1 до 16 км.

Таблица 4. Основные параметры Гулонгинского землетрясения 25 сентября 2015 г. по данным различных сейсмологических агентств

Агентство	t_0 , ч мин с	δt_0 , с	Гипоцентр						Магнитуда	Источник
			φ° , N	$\delta\varphi^\circ$	λ° , E	$\delta\lambda^\circ$	h , км	δh , км		
BAGSR	23:24:10.95	0.15	54.882	0.005	111.743	0.009	15.6 8-9*	2.7	$K_p=(13.1\pm 0.2)/27$, $M_w^*=4.7/16$	[6, 7, 8]
MOS	23:24:11.40	1.19	54.787	0.039	111.708	0.086	13	–	$M_S=4.5/22$, $M_{PSP}=4.8/20$	[9]
NEIC	23:24:13.37	1.36	54.841	0.084	111.660	0.157	11.1	4.0	$m_b=4.6/129$	[10]
IDC	23:24:11.38	0.48	54.990	0.123	111.705	0.150	0f	–	$m_b=4.2/33$, $M_S=4.0/28$	[10]
GCMT	23:24:12.40	0.30	54.990	–	111.820	–	13.8	1.6	$M_w=4.8/93$	[10]
ISC	23:24:11.15	0.52	54.873	0.019	111.762	0.034	1.3	3.3	$M_S=4.5/53$, $m_b=4.6/160$	[10]
BJI	23:24:10.70	–	54.930	–	111.790	–	11	–	$m_b=4.4/49$, $M_S=5.0/49$	[10]

См. Примечания к табл. 1.

Таблица 5. Основные параметры Гулонгинского землетрясения 13 декабря 2015 г. по данным различных сейсмологических агентств

Агентство	t_0 , ч мин с	δt_0 , с	Гипоцентр						Магнитуда	Источник
			φ° , N	$\delta\varphi^\circ$	λ° , E	$\delta\lambda^\circ$	h , км	δh , км		
BAGSR	5:53:17.92	0.14	54.885	0.005	111.733	0.009	15.6 6*	2.5	$K_p=(13.0\pm 0.2)/28$, $M_w^*=4.6/17$	[6, 7, 8]
MOS	5:53:17.50	0.94	54.924	0.037	111.627	0.087	8	–	$M_S=3.9/11$, $M_{PSP}=5.0/58$	[9]
NEIC	5:53:20.03	1.26	54.979	0.065	111.646	0.119	12.3	3.5	$m_b=5.1/342$	[10]
IDC	5:53:20.68	3.90	54.838	0.092	111.702	0.126	21.7	26.2	$m_b=4.3/30$, $M_S=3.8/30$	[10]
GCMT	5:53:19.00	0.30	55.100	–	111.860	–	13.2	1.6	$M_w=4.8/68$	[10]
ISC	5:53:19.15	0.54	54.977	0.019	111.763	0.035	10.5	3.3	$M_S=3.9/34$, $m_b=5.0/261$	[10]
BJI	5:53:16.60	–	55.030	–	111.870	–	10	–	$m_b=4.5/52$, $M_S=4.7/50$	[10]

См. Примечания к табл. 1.

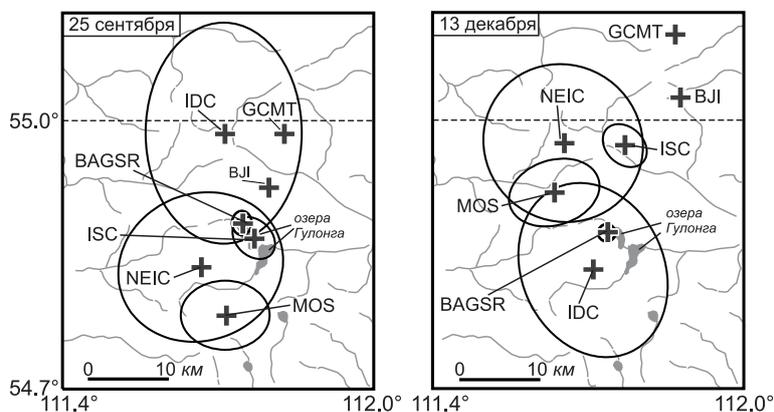


Рис. 6. Решения эпицентров главных толчков и эллипсы горизонтальных ошибок Гулонгинских землетрясений 25 сентября и 13 декабря по данным различных сейсмологических агентств

Уточнение глубин афтершоков. Большая часть событий в рое – это слабые землетрясения ($K_p=6$), локация которых проводилась региональной программой обработки с использованием данных только 4–5 сейсмических станций, вследствие чего для них получены значительные ошибки в определении координат эпицентров (табл. 6) и, тем более, глубин. Для землетрясений, обеспеченных регистрацией большим числом пунктов наблюдений ($N_{st} \geq 6$ с $\Delta < 200$ км, с наличием данных ближайшей станции YLYR), была использована программа HYPOINVERSE-2000 [16] с однослойной скоростной моделью коры ($V_p=6.1$ км/с, $V_p/V_s=1.73$). При этом удалось уточнить пространственные параметры 137 землетрясений. В каталоге [7] их параметры приведены с большей точностью, чем остальные. На рис. 5 в показан меридиональный разрез по долготе $\lambda=111.72^\circ$ (А–Б), построенный по надежным данным (стандартные ошибки определения времени в очаге $RMS < 0.5$ с, эпицентра $ERN < 1$ км и глубины $ERZ < 5$ км). Отметим, что гипоцентры 84 % событий расположены в слое $h=10–20$ км, а гипоцентры главных толчков имеют одну и ту же глубину ($h=15.6$ км).

Таблица 6. Распределение числа землетрясений района Гулонгинского роя по энергетическим классам K_p и характеристика точности определения координат эпицентров σ_F в зависимости от энергетического класса для периода 1.01–31.12.2015 г.

K_p	6	7	8	9	10	11	12	13	N_Σ
N	475	179	58	8	4	–	–	2	726
σ_F среднее, км	8.6	2.2	1.9	1.2	0.6	–	–	0.6	6.4

В течение 2015 г. в Гулонгинском очаге зарегистрировано более 700 землетрясений с $K_p \geq 5.6$ (табл. 6) [15]. Угол наклона графика повторяемости по землетрясениям представительных энергетических классов ($K_p=6–10$) составляет $\gamma=-0.58 \pm 0.03$ (рис. 5 б) при среднем долговременном (за 15-летний период) значении в этом районе $\gamma=-0.50 \pm 0.02$. Это означает, что доля относительно слабых событий в Гулонгинском рое значительно больше, чем в период предшествующей фоновой сейсмичности. Вытянутость эпицентрального поля в юго-восточном – северо-западном направлении (поперек основных структур БРЗ) объясняется большими ошибками локации эпицентров, преимущественно слабых толчков, что в свою очередь обусловлено неравномерной по площади расстановкой региональных сейсмических станций [5].

Развитие сейсмического процесса. Гулонгинский очаг существовал и до основной активизации в сентябре 2015 года. Так, здесь еще с июля 2014 г. отмечено умеренное число землетрясений с $K_{pmax}=10.1$. (рис. 7). Рой не менял своего местоположения и не затухал за прослеженный нами период времени до октября 2016 года.

Тензор сейсмического момента, определенный для Гулонгинских землетрясений 25 сентября и 13 декабря 2015 г., показал сдвиговый и сбросовый типы фокальных механизмов соответственно (рис. 5 а), что не противоречит данным об очаговых параметрах этих событий из каталога Global CMT (подробную информацию о полученных решениях см. в [8]). Фокальные механизмы двух афтершоков с $K_p=10$ (рис. 5 а), определенные по знакам первых вступлений P -волн на записях региональных станций, характеризовались сдвиговыми, взбросовыми и сбросовыми смещениями в очагах [17].

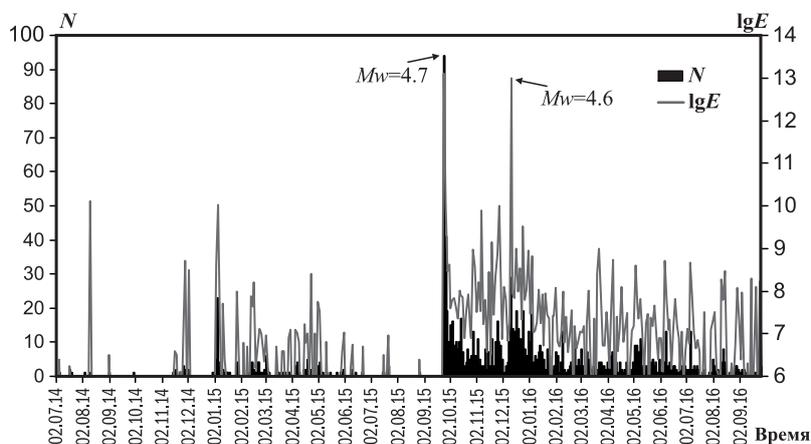


Рис. 7. Распределение количества землетрясений N (левая ось ординат) и сейсмической энергии $\lg E$ (правая ось ординат) по времени для района Гулонгинского роя за период 01.07.2014 г. – 30.09.2016 г. Единичный интервал – 2 суток

Макросейсмические данные. Эпицентральные области Гулонгинских землетрясений расположены в практически незаселенной таежной местности, в связи с чем сведения об их ощутимых эффектах весьма ограничены. Следует отметить, что подобная ситуация является типичной для землетрясений Северного Прибайкалья, поэтому любые данные о макросейсмических проявлениях в этом районе представляют значительный интерес.

В случае Гулонгинского-I землетрясения 25 сентября 2015 г. информация была получена главным образом посредством почтовой рассылки опросных листов; кроме того, часть данных поступила от сотрудников сейсмических станций региональной сети. Оценки интенсивности сотрясений при землетрясении 25 сентября 2015 г. представлены в табл. 7, схема макросейсмических проявлений типа «пункты–баллы» отображена на рис. 8.

Таблица 7. Макросейсмические данные о землетрясении 25 сентября 2015 г.

№	Пункт	Δ , км	Координаты пункта	
			φ° , N	λ° , E
4 балла				
1	у. Улюнхан	43	54.863	111.070
2	у. Аргада	99	54.240	110.681
3	пгт Янчукан	166	56.258	112.815
4	пос. Кунерма	227	55.750	108.483
5	пос. Колотовка	380	58.215	113.187
6	пос. Мусковит	381	58.215	113.290
7	пос. Витимский	381	58.218	113.270
8	пос. Кропоткин	457	58.509	115.322
3 балла				
9	пгт Новый Уоян	139	56.139	111.728
10	пгт Таксимо	254	56.344	114.879

№	Пункт	Δ , км	Координаты пункта	
			φ° , N	λ° , E
Не ощущалось				
11	пос. Варваринский	74	54.333	112.367
12	у. Арзгун	86	54.378	110.735
13	с. Могойто	100	54.381	110.459
14	с. Курумкан	111	54.332	110.315
15	пос. Усть-Джилinda	137	53.664	111.944
16	с. Верхняя Заимка	147	55.849	110.141
17	с. Уро	193	53.547	109.841
18	с. Романовка	197	53.217	112.767
19	с. Читкан	200	53.500	109.776
20	с. Адамово	223	53.481	109.302

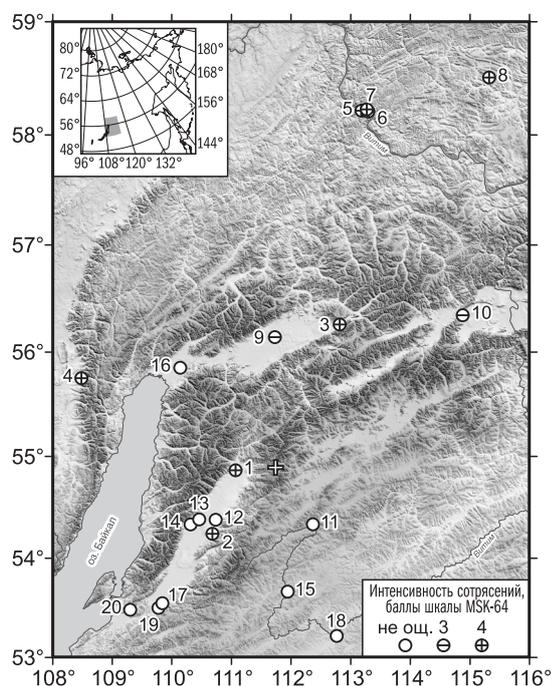


Рис. 8. Карта макросейсмических проявлений типа «пункты–баллы» Гулонгинского-I землетрясения. Крестиком обозначен инструментальный эпицентр

кую магнитуду, вызвало лишь 3–4-балльные эффекты в населенных пунктах, расположенных на расстояниях менее 100 км к западу и юго-востоку от эпицентра. При этом, однако, Гулонгинское-II событие довольно уверенно ощущалось с интенсивностью 3 балла в г. Чита ($\Delta=338$ км), тогда

Наибольшая наблюдаемая интенсивность сотрясений составила 4 балла по шкале MSK-64 [13]. В у. Улюнхан и у. Аргада, расположенных в Баргузинской впадине, землетрясение ощущалось в виде сильного толчка, вызвавшего сотрясение домов и пробуждение спящих. Интересно отметить, что если в у. Аргада сотрясения проявились вполне отчетливо, то в других близлежащих населенных пунктах Баргузинской долины землетрясение замечено не было. В пгт Янчукан сотрясения уверенно ощущались многими очевидцами, спящие проснулись; в помещениях отмечено дребезжание посуды, дрожание мебели, раскачивание висячих предметов. Аналогичные эффекты наблюдались в пос. Кунерма ($\Delta=227$ км), а также в пос. Витимский ($\Delta=381$ км) и в п. Кропоткин ($\Delta=457$ км). Последний пункт является наиболее удаленной точкой, в которой интенсивность сотрясений оценивается в 4 балла.

Макросейсмические проявления Гулонгинского-II землетрясения 13 декабря 2015 г. заметно отличаются от первого события 25 сентября 2015 года. Если в первом случае сотрясения интенсивностью 4 балла распространились далеко на север, то землетрясение 13 декабря, имеющее близкую магнитуду, вызвало лишь 3–4-балльные эффекты в населенных пунктах, расположенных на расстояниях менее 100 км к западу и юго-востоку от эпицентра. При этом, однако, Гулонгинское-II событие довольно уверенно ощущалось с интенсивностью 3 балла в г. Чита ($\Delta=338$ км), тогда

как при первом событии сведения из этого пункта не поступали. Макросейсмические сведения о землетрясении 13 декабря 2015 г. обобщены в табл. 8, карта проявлений представлена на рис. 9.

Таблица 8. Макросейсмические данные о землетрясении 13 декабря 2015 г.

№	Пункт	Δ, км	Координаты пункта		№	Пункт	Δ, км	Координаты пункта	
			φ°, N	λ°, E				φ°, N	λ°, E
	3–4 балла								
1	у. Улюнхан	42	54.863	111.070	4	пгт Атамановка	351	51.929	113.637
2	пос. Варваринский	73	54.333	112.367		Не ощущалось			
	3 балла				5	у. Аргада	98	54.240	110.681
3	г. Чита	338	52.033	113.550	6	пос. Маловский	128	54.400	113.550
					7	с. Багдарин	130	54.433	113.600

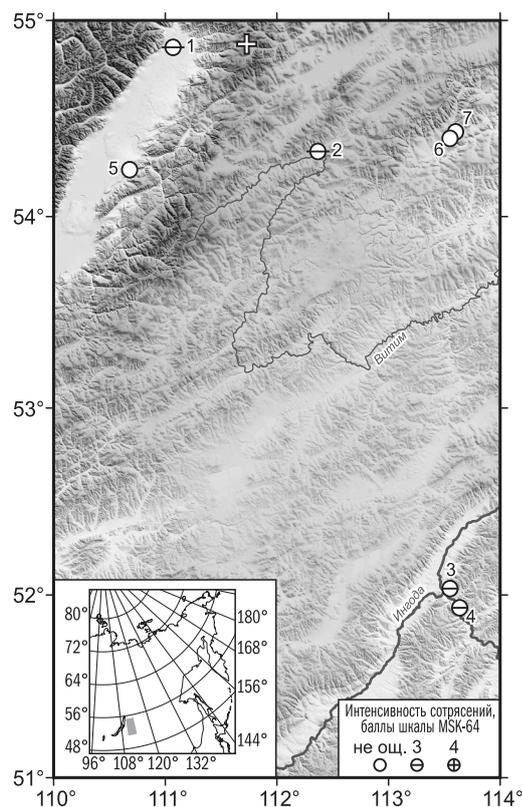


Рис. 9. Карта макросейсмических проявлений типа «пункты–баллы» Гулонгинского-II землетрясения. Крестиком обозначен инструментальный эпицентр

Тектоническое строение района. Северное Прибайкалье (в пределах территории, указанной на рис. 1) характеризуется сложной сеймотектонической обстановкой. Разломообразование здесь обусловлено длительной тектонической эволюцией литосферы, контролирует зоны сочленения различных морфоструктур (впадин и обрамляющих их поднятий) и связано с разнотипными и разномасштабными тектоническими движениями, формирующими блоковую структуру района. Разломная тектоника представлена складчатыми дислокациями субмеридионального и северо-восточного простираний, а также системами поперечных разломов северо-западного направления; встречаются также и субширотно ориентированные разломы. Возрастной спектр заложения структурных нарушений весьма широк – от раннего протерозоя до кайнозоя, при этом последний включает в себя период рифтогенной тектоно-магматической активизации [19].

Характерной особенностью сеймотектонического развития рассматриваемого района является то, что одни фрагменты его структуры вовлечены в рифтовый тип развития, а другие претерпевают перестройку с активизацией блоковых движений положительного знака [20, 21].

Сильные движения. Наибольшие пиковые ускорения грунта при обоих Гулонгинских землетрясениях были зарегистрированы на ближайшей сейсмической станции «Улюнхан» (YLUR). В первом случае значение PGA составило 16.1 см/с^2 , во втором – 7.6 см/с^2 (см. рис. 10), что, согласно инструментальной части шкалы MMSK-92 [14], позволяет оценить инструментальную интенсивность в 5 и 4 балла, при наблюдаемой интенсивности сотрясений соответственно 4 и 3–4 балла. Особенностью акселерограмм станции «Улюнхан» являются довольно высокие значения частот, на которых были отмечены максимальные ускорения. Это не первый случай наличия высокочастотной составляющей в записях станции «Улюнхан»: аналогичная частота (25 Гц) была зарегистрирована при Джиргинском землетрясении 27 апреля 2014 г. [18].

Значение максимального ускорения (5.1 см/с^2), которое можно отнести к сильным движениям грунта, также отмечено на сейсмической станции «Уоян» (УОА) при Гулонгинском-I землетрясении 25 сентября 2015 года. Согласно инструментальной части шкалы MMSK-92, такому ускорению соответствует интенсивность сотрясений 4 балла, при том что наблюдавшиеся макросейсмические эффекты в пгт Новый Уоян (место расположения станции) оцениваются в 3 балла. При втором событии ускорение составило лишь 1.2 см/с^2 , что соответствует интенсивности сотрясений 2 балла согласно шкале MMSK-92. К сожалению, информация о макросейсмических эффектах в пгт Новый Уоян отсутствует, поэтому прямое сопоставление оценок наблюдаемой и инструментальной интенсивности невозможно.

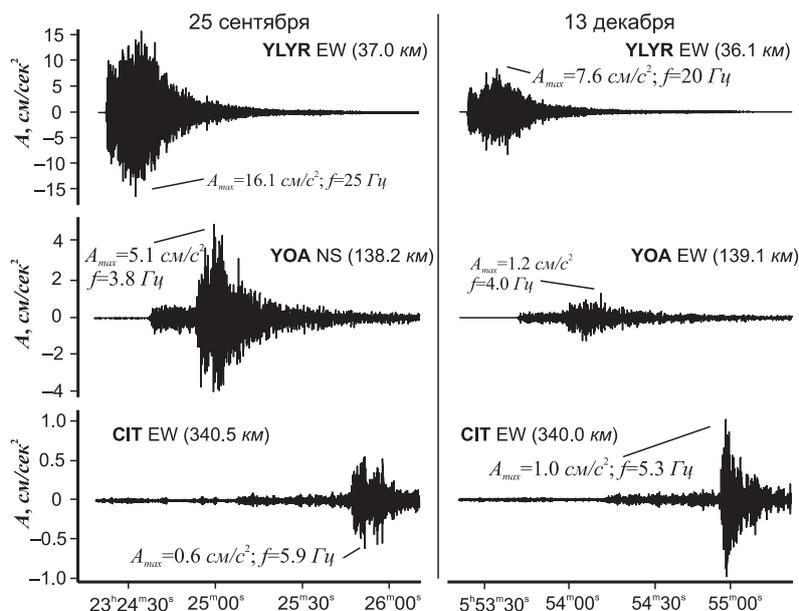


Рис. 10. Акселерограммы Гулонгинских землетрясений, полученные на ближайших к эпицентрам сейсмических станциях Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН

Обсуждение. Несмотря на то, что сейсмичность Северного Прибайкалья неоднократно рассматривалась в литературе, новая информация уточняет наши представления о геодинамической активности данной территории. Относительно сильные сейсмические события ($M > 4.5$), отражающие активность тектонических структур и процессы современного разломообразования, происходят в рассматриваемом районе не слишком часто. В некоторых случаях эпицентры таких землетрясений расположены на удалении от известных и существующих длительное время областей повышенной сейсмической активности. Так, например, Верхнеакулинское землетрясение 7 июля 2015 г. произошло в локальном районе с практически полным отсутствием сейсмических событий с $K_p \geq 5.6$ в период 1999–2014 гг. (см. рис. 1). Вместе с тем, непосредственно к западу от его эпицентра расположена очаговая область сильных Кичерских землетрясений 21 марта 1999 г., сопровождавшихся мощной афтершоковой серией [22, 23]. К югу лежит эпицентральная зона Томпудинского землетрясения 4 июля 2007 г., в которой сейсмическая активность также сохранялась довольно длительное время [24]. Следовательно, Верхнеакулинское землетрясение и его афтершоковая последовательность в определенной мере заполняет один из «пробелов» в эпицентральном поле Северного Прибайкалья. То же самое можно сказать и о Гулонгинских землетрясениях 25 сентября и 13 декабря 2015 г., эпицентры которых также расположены в районе с низкой активностью и отсутствием сейсмических событий сопоставимого энергетического уровня в течение периода инструментальных наблюдений. Таким образом, сильные землетрясения 2015 г. демонстрируют современную активность локальных разломов, ранее считавшихся малоактивными.

Механизмы очагов рассмотренных землетрясений в целом хорошо согласуются с региональным структурным планом. В Северном Прибайкалье преобладают разломы северо-восточного простирания, и такой же ориентацией характеризуются нодальные плоскости в решениях механизмов Верхнеакулинского и Гулонгинского-II землетрясений при практически чистой сбросовой кинематике. Несколько иной механизм очага, с преобладающей сдвиговой составляющей, имеет Гулонгинское-I землетрясение 25 сентября 2015 года. Это обстоятельство дает основание предполагать сложное строение очаговой области Гулонгинской последовательности землетрясений, а также вовлеченность в сейсмический процесс разноориентированных разломных структур.

Землетрясения 2015 г. в Северном Прибайкалье позволили получить новые макросейсмические данные, дополняющие наши знания о проявлениях сильных землетрясений в пределах северо-восточного фланга БРЗ. Кроме того, Верхнеакулинское и Гулонгинские землетрясения можно рассматривать в качестве теста эффективности работы интерактивной системы сбора макросейсмической информации, действующей в БФ ФИЦ ЕГС РАН [12]. Для территории Южного

Прибайкалья использование данной системы показало весьма неплохие результаты, позволив получить до нескольких сотен откликов после землетрясений в магнитудном диапазоне $M_w=4.6-4.9$ [25, 26]. Иная ситуация наблюдается в Северном Прибайкалье. На текущий момент можно рассчитывать на получение сколько-нибудь заметного количества откликов только в том случае, если землетрясение с эпицентром в пределах Северного Прибайкалья уверенно ощущалось в крупном городе с развитыми интернет-коммуникациями (например, г. Чита). В небольших населенных пунктах этого района доступ к сети Интернет пока еще нельзя назвать широко распространенным, что отражается на количестве поступающих откликов и общей эффективности работы системы. Очевидно, что в течение еще довольно длительного времени для землетрясений северо-восточного фланга БРЗ будут востребованы традиционные методы сбора макросейсмических данных, в частности, почтовая рассылка опросных листов.

Заключение. Результаты, полученные в настоящей статье, позволяют сделать следующие выводы.

1. Сильные землетрясения 2015 г. и сопровождающие их сейсмические события, произошедшие в пределах Северного Прибайкалья, в определенной мере заполняют «пробелы» в эпицентральном поле рассматриваемого района.

2. Информация о механизмах очагов Верхнеакулинского и Гулонгинских землетрясений может быть использована для более ясного понимания геодинамики сложного в сеймотектоническом отношении района северо-восточного фланга БРЗ.

3. Пиковые ускорения грунта, равно как и макросейсмические эффекты, зарегистрированные при Верхнеакулинском и Гулонгинских землетрясениях, не превышали умеренного уровня. Тем не менее полученные на региональных сейсмических станциях записи можно рассматривать как существенное пополнение банка данных о сильных движениях грунта на территории северо-восточного фланга БРЗ. Эти данные, безусловно, будут востребованы при проведении работ по сейсмическому районированию и уточнению сейсмической опасности, в особенности с учетом того, что на территории Северного Прибайкалья расположен участок Байкало-Амурской магистрали.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках темы НИР АААА-А20-120060890030-9 госзадания № 075-00576-21 ФИЦ ЕГС РАН с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» а также при поддержке РФФИ (проект № 20-05-00823).

Л и т е р а т у р а

1. Мельникова В.И., Гилёва Н.А., Курушин Р.А., Масальский О.К., Шлаевская Н.С. Выделение условных районов для ежегодных обзоров сейсмичности региона Прибайкалья и Забайкалья // Землетрясения Северной Евразии в 1997 году. – Обнинск: Изд-во ФООП, 2003. – С. 107–117.
2. Мельникова В.И., Гилева Н.А. О связи сейсмичности Северного Прибайкалья с блоковым строением земной коры // ДАН. – 2017. – Т. 473, № 4. – С. 459–463. doi: 10.7868/S0869565217040168
3. Мельникова В.И., Середкина А.И., Гилёва Н.А. Пространственно-временные закономерности развития крупных сейсмических активизаций (1999–2007 гг.) в Северном Прибайкалье // Геология и геофизика. – 2020. – Т. 61, № 1. – С. 119–134. doi: 10.15372/gig2019103
4. Лунина О.В. Цифровая карта разломов для плиоцен-четвертичного этапа развития земной коры юга Восточной Сибири и сопредельной территории Северной Монголии // Геодинамика и тектонофизика. – 2016. – Т. 7, № 3. – С. 407–434. doi: 10.5800/GT-2016-7-3-0215
5. 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
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. Каталог (оригинал) землетрясений Прибайкалья и Забайкалья за 2015 г. с $K_p \geq 3$ ($N=36430$). – Иркутск: Фонды БФ ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – 531 с.

7. 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>
8. 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
9. Сейсмологический бюллетень (сеть телесеизмических станций), 2015. (2021) // ФИЦ ЕГС РАН [сайт]. – URL: ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_bulletin/2015
10. International Seismological Centre. (2021). On-line Bulletin. <https://doi.org/10.31905/D808B830>
11. 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 района Верхнеакулинской последовательности землетрясений ($K_p > 5.5$) с сильным землетрясением 7 июля 2015 г. с $M_w=4.6$, $K_p=13.0$, $I_0=7$ // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – [Электронное приложение]. – URL: <http://www.ceme.gsras.ru/zse/app-24.html>
12. Радзиминович Я.Б., Хритова М.А., Гилёва Н.А. Современные способы получения макросейсмических данных и возможности их применения на территории Восточной Сибири // Вулканология и сейсмология. – 2014. – № 6. – С. 59–74. doi: 10.7868/S0203030614060066
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 // Магнитное поле Земли: математические методы описания. Проблемы макросеймики (Вычислительная сейсмология; Вып. 34). – М.: Геос, 2003. – С. 210–253.
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., Папкина А.А., Галактионова Н.Н. Каталог района Гулонгинской последовательности землетрясений ($K_p > 5.5$) с сильными землетрясениями 25 сентября 2015 г. с $M_w=4.7$, $K_p=13.1$, $I_0=7$ и 13 декабря 2015 г. с $M_w=4.6$, $K_p=13.0$, $I_0=7$ // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – [Электронное приложение]. – URL: <http://www.ceme.gsras.ru/zse/app-24.html>
16. Klein F.W. User's guide to HYPOINVERSE-2000, a Fortran program to solve for earthquake locations and magnitudes. – US Geological Survey, 2002. – № 2002-171.
17. 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>
18. Радзиминович Я.Б., Гилёва Н.А., Середкина А.И., Мельникова В.И. Джиргинское землетрясение 27 апреля 2014 г. с $K_p=13.3$, $M_w=4.9$, $I_0=7$ (Северное Прибайкалье) // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 23 (2014 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – С. 307–316. doi: 10.35540/1818-6254.2020.23.31
19. Замараев С.М., Васильев Е.П., Мазукабзов А.М., Ружич В.В., Рязанов Г.В. Соотношение древней и кайнозойской структур в Байкальской рифтовой зоне. – Новосибирск: Наука, СО АН СССР, 1979. – 125 с.
20. Сейсмическое районирование Восточной Сибири и его геолого-геофизические основы / Ред. В.П. Солоненко. – Новосибирск: Наука, СО АН СССР, 1977. – 303 с.
21. Демьянович М.Г. Структурные взаимоотношения и сеймотектоника области сочленения Байкальской рифтовой зоны с юго-восточным обрамлением // Тектоника и сейсмичность континентальных рифтовых зон / Ред. Н.А. Логачев. – М.: Наука, 1978. – С. 78–83.
22. Мельникова В.И., Гилёва Н.А., Радзиминович Я.Б., Ружич В.В., Масальский О.К., Радзиминович Я.Б., Бержинский Ю.А., Бержинская Л.П., Павленов В.А., Емельянова И.А. Кичерские землетрясения 21 марта 1999 года с $M_w=6.0$ и с $M_w=5.6$, $I_0=7-8$ (Прибайкалье) // Землетрясения Северной Евразии в 1999 году. – Обнинск: ФОП, 2005. – С. 280–295.
23. Мельникова В.И., Радзиминович Я.Б., Гилёва Н.А., Чипизубов А.В., Добрынина А.А. Активизация рифтовых процессов в Северном Прибайкалье (на примере Кичерской последовательности землетрясений 1999 г.) // Физика Земли. – 2007. – № 11. – С. 3–20.

24. Гилёва Н.А., Мельникова В.И., Радзиминович Я.Б. Томпудинское землетрясение 4 июля 2007 г. с $K_p=14.2$, $M_w=5.4$, $I_0=7-8$ (Северное Прибайкалье) // Землетрясения Северной Евразии в 2007 году. – Обнинск: ГС РАН, 2013. – С. 363–372.
25. Мельникова В.И., Гилёва Н.А., Середкина А.И., Радзиминович Я.Б. Сильные землетрясения юго-западного фланга Байкальского рифта в 2014 г.: Урикское 1 ноября с $K_p=13.6$, $M_w=4.6$, $I_0=7-8$ и Хубсугульское 5 декабря с $K_p=13.9$, $M_w=4.9$, $I_0=7-8$ // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 23 (2014 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – С. 350–363. doi: 10.35540/1818-6254.2020.23.36
26. Радзиминович Я.Б., Середкина А.И., Мельникова В.И., Гилёва Н.А. Землетрясение 29.03.2019 г. в западной части Тункинской системы впадин: Очаговые параметры и макросейсмические проявления // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2020. – Т. 47, № 2. – С. 64–80. doi: 10.21455/VIS2020.2-4

STRONG EARTHQUAKES in the NORTH of the LAKE BAIKAL REGION ($M_w=4.6-4.7$) in 2015

Ya.B. Radziminovich^{1,2}, V.I. Melnikova^{1,2}, N.A. Gileva², A.I. Filippova³

¹*Institute of the Earth's crust SB RAS, Irkutsk, ian@crust.irk.ru*

²*Baikal branch GS RAS, Irkutsk, nagileva@crust.irk.ru*

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

Abstract. The paper considers three relatively strong earthquakes that occurred in 2015 in the northern Lake Baikal region: July 7 Upper Akuli earthquake ($M_w=4.6$) with the epicenter at the headwaters of the Akuli River, and September 25 Gulonga-I ($M_w=4.7$) and December 13 Gulonga-II earthquakes ($M_w=4.6$) with the epicenters near the mountain lakes Gulonga. Instrumental and macroseismic data on these seismic events are reported. A seismic moment tensor, calculated from surface wave records, shows normal fault focal mechanisms for Upper Akuli and Gulonga-II earthquakes and strike-slip movements in the source of the Gulonga-I seismic event. The results obtained could be used in further studies of seismic zoning and seismic hazard assessment in the northern Lake Baikal region.

Key words: earthquake, instrumental and macroseismic data, focal mechanism, active faults, Baikal rift zone, northern Lake Baikal region.

DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.27

For citation: Radziminovich, Ya.B., Melnikova, V.I., Gileva, N.A., & Filippova, A.I. (2021). [Strong earthquakes in the north of the Lake Baikal region ($M_w=4.6-4.7$) in 2015]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015), 276–290. (In Russ.). doi: 10.35540/1818-6254.2021.24.27

R e f e r e n c e s

1. Melnikova, V.I., Gileva, N.A., Kurushin, R.A., Masalsky, O.K., & Shlaevskaya, N.S. (2003). [Allocation of conditional areas for annual reviews of seismicity in the Baikal and Transbaikalia regions]. In *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii v 1997 godu* [Earthquakes of Northern Eurasia, 1997] (pp. 107–117). Obninsk, Russia: FOP Publ. (In Russ.).
2. Melnikova, V.I., & Gilyova, N.A. (2017). Relationship between Seismicity in the Northern Pribaikalye and the Block Structure of the Crust. *Doklady Akademii Nauk* [Doklady Earth Sciences], 473(2), 386–389. doi: 10.1134/S1028334X17040031
3. Melnikova, V.I., Seredkina, A.I., & Gileva, N.A. (2020). Spatio-temporal patterns of the development of strong seismic activations (1999–2007) in the Northern Baikal Area. *Russian Geology and Geophysics*, 61(1), 96–109. doi: 10.15372/RGG2019103
4. Lunina, O.V. (2016). The digital map of the Pliocene-Quaternary crustal faults in the southern East Siberia and the adjacent Northern Mongolia. *Geodynamics & Tectonophysics*, 7(3), 407–434. doi: 10.5800/GT-2016-7-3-0215
5. Melnikova, V.I., Gileva, N.A., Filippova, A.I., Radziminovich, Ya.B., & Kobeleva, 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
6. 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.).

7. 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.).
8. Filippova, A.I., & Gileva, N.A. [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
9. GS RAS, Bulletin of Teleseismic Stations, 2015. (2021). Retrieved from ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_bulletin/2015/
10. International Seismological Centre. (2021). On-line Bulletin. <https://doi.org/10.31905/D808B830>
11. 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. (2021). [Catalog of the Upper Akuli earthquakes sequence ($K_R>5.5$) with the July 7, 2015, $M_w=4.6$, $K_R=13.0$, $I_0=7$ strong earthquake]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015). Electronic supplement. Retrieved from <http://www.ceme.gsras.ru/zse/app-24.html> (In Russ.).
12. Radziminovich, Ya.B., Khritova, M.A., & Gileva, N.A. (2014). Modern Methods for Acquisition of Macro-seismic Data and their Possible Uses for Eastern Siberia. *Journal of Volcanology and Seismology*, 8(6), 375–389. doi: 10.1134/S0742046314060062
13. Medvedev, S.V., Sponheuer, V., & Karnik, V. (1965). *Mezhdunarodnaia shkala seysmicheskoy intensivnosti MSK-64* [MSK-64 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. 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. (2021). [Catalog of the Gulonga earthquakes sequence ($K_R>5.5$) with the September 25, 2015, $M_w=4.7$, $K_R=13.1$, $I_0=7$ and December 13, 2015, $M_w=4.6$, $K_R=13.0$, $I_0=7$ strong earthquakes]. *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. Klein, F.W. (2002). User's Guide to HYPOINVERSE-2000, a Fortran Program to Solve for Earthquake Locations and Magnitudes. *US Geological Survey*.
17. 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.).
18. Radziminovich, Ya.B., Gileva, N.A., Seredkina, A.I., & Melnikova, V.I. (2020). [The April 27, 2014, $M_w=4.9$, $K_R=13.3$, $I_0=7$ Dzhirga earthquake (North of Baikal Region)]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), 307–316. (In Russ.). doi: 10.35540/1818-6254.2020.23.31
19. Zamaraev, S.M., Vasiliev, E.P., Mazukabzov, A.M., Ruzhich, V.V., & Ryazanov, G.V. (1979). *Sootnosheniye drevney i kaynozoykskoy struktur v Baykal'skoy riftovoy zone* [Relationship between ancient and Cenozoic structures in the Baikal rift zone]. Novosibirsk, Russia: Nauka Publ., 125 p. (In Russ.).
20. Solonenko, V.P. (1977). *Seysmicheskoe raionirovanie Vostochnoy Sibiri i ego geologo-geofizicheskie osnovy* [Seismic zoning of Eastern Siberia and its geological and geophysical foundations]. Novosibirsk, Russia: Nauka Publ., 303 p. (In Russ.).
21. Demyanovich, M.G. (1978). [Structural relationships and seismotectonics of the junction area of the Baikal rift zone and the southeastern framing]. In *Tektonika i seysmichnost' kontinental'nykh riftovykh zon* [Tectonics and seismicity of continental rift zones] (pp. 78–83). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
22. Melnikova, V.I., Gileva, N.A., Radziminovich, N.A., Ruzhich, V.V., Masalsky, O.K., Radziminovich, Ya.B., Berzhinsky, Yu.A., Berzhinskaya, L.P., Pavlenov, V.A., & Emelyanova, I.A. (2005). [March 21, 1999, $M_w=6.0$ and $M_w=5.6$, $I_0=7-8$ Kichera earthquakes (Baikal region)]. In *Zemletriaseniia Severnoy Evrazii v 1999 godu* [Earthquakes of Northern Eurasia, 1999] (pp. 280–295). Obninsk, Russia: FOP Publ. (In Russ.).

-
23. Melnikova, V.I., Radziminovich, N.A., Gileva, N.A., Chipizubov, A.V., & Dobrynina, A.A. (2007). Activation of rifting processes in the Northern Cis-Baikal region: a case study of the Kichera earthquake sequence of 1999. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 43(11), 905–921.
 24. Gileva, N.A., Melnikova, V.I., & Radziminovich, Ya.B. (2013). [The July 4, 2007, $K_R=14.2$, $M_w=5.4$, $I_0=7-8$ Tompuda earthquake (Northern Cisbaikalia)]. In *Zemletriaseniia Severnoy Evrazii v 2007 godu* [Earthquakes of Northern Eurasia, 2007] (pp. 363–372). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ).
 25. Melnikova, V.I., Gileva, N.A., Seredkina, A.I., & Radziminovich, Ya.B. (2020). [Strong seismic events at the south-western flank of the Baikal rift in 2014: November 1, 2014, $K_R=13.6$, $M_w=4.6$, $I_0=7-8$ Urik earthquake and December 5, 2014, $K_R=13.9$, $M_w=4.9$, $I_0=7-8$ Hovsgol earthquake]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), 350–363. (In Russ.). doi: 10.35540/1818-6254.2020.23.36
 26. Radziminovich, Ya.B., Seredkina, A.I., Melnikova, V.I., & Gileva, N.A. (2020). The March 29, 2019 Earthquake in the Western Part of the Tunka Rift Basin System: Source Parameters and Macroseismic Effects. *Seismic Instruments*, 56(6), 648–661. doi: 10.3103/S0747923920060067