

**АРГУНСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 22 июля 2011 г.**

**с  $K_p=13.5$ ,  $M_w=4.5$ ,  $I_0=7$  (Приаргунье)**

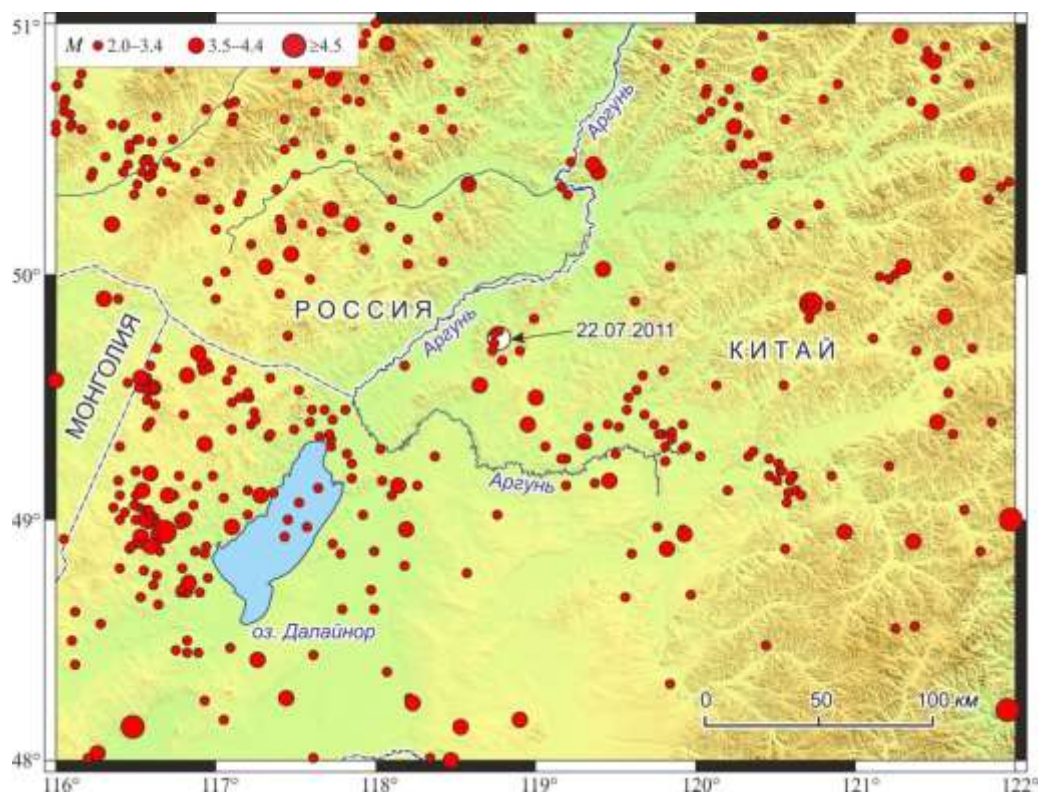
**Я.Б. Радзиминович<sup>1,2</sup>, А.И. Середкина<sup>1</sup>, В.И. Мельникова<sup>1,2</sup>, Н.А. Гилёва<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, [ian@crust.irk.ru](mailto:ian@crust.irk.ru)

<sup>2</sup>Байкальский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Иркутск

22 июля 2011 г. в районе среднего течения р. Аргунь вблизи государственной границы Российской Федерации и КНР произошло землетрясение с  $K_p=13.5$  (рис. 1). По местоположению эпицентра это событие названо Аргунским. Следует отметить, что территория Приаргунья, наряду с приграничными районами Северного Китая и Восточной Монголии, в сейсмологическом и сеймотектоническом отношении на сегодняшний день исследована недостаточно. Сильные землетрясения регистрируются здесь весьма редко, что затрудняет оценку потенциала активных разломов и сейсмической опасности. В условиях дефицита сейсмологической информации детальное изучение сравнительно сильного сейсмического события становится приоритетной задачей.

Определение основных параметров Аргунского землетрясения выполнено с использованием данных региональных сейсмических сетей Байкальского [1], Бурятского [2], Якутского [3] и Сахалинского [4] филиалов ЕГС РАН (рис. 2). Кроме того, дополнительная информация была получена с ближайшей к эпицентру ( $\Delta=88$  км) сейсмической станции «Хайлар» (НИА), расположенной на территории КНР. Максимальное эпицентральное расстояние (до станции «Орлик» (ORL)) составило  $\Delta_{\max}=1370$  км. Всего в обработке были использованы данные 38 станций. Результаты обработки, наряду с определениями международных сейсмологических агентств, представлены в табл. 1.



**Рис. 1.** Сейсмичность Приаргунья за инструментальный период наблюдений 1960–2014 гг.

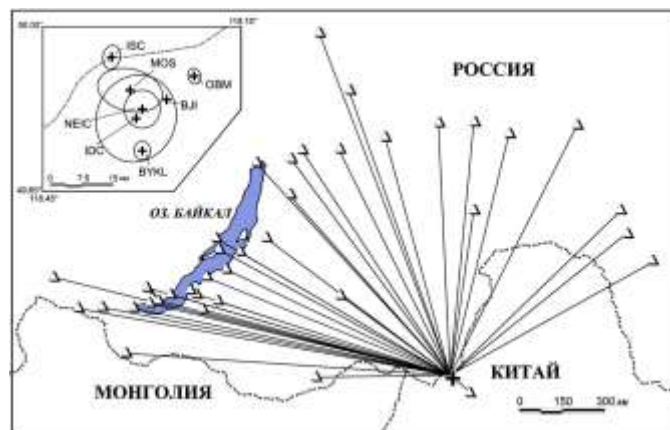


Рис. 2. Схема расположения использованных в обработке сейсмических станций относительно эпицентра Аргунского землетрясения 22 июля 2011 г.

На врезке показано положение эпицентра главного толчка с эллипсами ошибок различных сейсмологических агентств (табл. 1).

Таблица 1. Основные параметры Аргунского землетрясения 22 июля 2011 г. с  $M_w=4.5$  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		
BYKL	14 52 57.6	0.5	49.74	0.02	118.77	0.03	4–6*	$K_p=(13.5\pm 0.2)/26$ , $M_w^*=4.5/10$	[5, 6]
MOS	14 52 56.50	0.99	49.87	0.04	118.73	0.11	9	$MPSP=4.6/40$	[7]
IDC	14 52 56.44	0.43	49.81	0.09	118.75	0.13		$m_b=4.3/31$ , $M_s=3.7/34$	[8]
NEIC	14 52 58.04	0.19	49.83	0.04	118.77	0.06	10	$m_b=4.9/62$	[8]
OBM	14 52 53.30	0.09	49.90	0.02	118.94	0.02	2	$M_l=4.6/2$	[8]
BJI	14 52 55.70		49.85		118.85		10	$m_b=4.6/42$ , $M_s=4.7/58$	[8]
ISC	14 52 58.52	0.25	49.94	0.02	118.67	0.03	10	$M_s=3.9/48$ , $m_b=4.7/98$	[8]

Примечание. В столбце «магнитуда» через косую черту приведено количество станций; звездочкой (\*) обозначены значения глубины гипоцентра ( $h$ ) и моментной магнитуды ( $M_w$ ), полученные в данной работе. Сейсмологические агентства: BYKL – Байкальский филиал ФИЦ ЕГС РАН (Иркутск); MOS – Геофизическая служба РАН (Обнинск); IDC – Международный центр данных (Вена, Австрия); NEIC – Национальный сейсмологический информационный центр (США); OBM – Исследовательский центр астрономии и геофизики (Улан-Батор, Монголия); BJI – Китайское сейсмологическое бюро (Пекин, Китай); ISC – Международный сейсмологический центр (Великобритания).

Наименьшими погрешностями определения пространственных координат эпицентра характеризуются решения агентств BYKL, OBM и ISC (рис. 2). Следует отметить довольно значительное расхождение в данных различных агентств, которое объясняется, по-видимому, отсутствием близких сейсмических станций.

**Механизм очага.** Исходными данными для определения механизма очага землетрясения 22 июля 2011 г. служили записи широкополосных цифровых сейсмических станций сетей IRIS. Для анализа использовались только сейсмограммы с высоким отношением сигнал/шум и нормальной поляризации. Положение станций, используемых для дальнейшего анализа, выбиралось таким образом, чтобы они находились в разных азимутах от эпицентра рассматриваемого события. Всего были отобраны записи 10 сейсмических станций (рис. 3). Диапазон эпицентральных расстояний составил от 2292 до 5347 км. Спектры основной моды поверхностных волн были получены для каждой трассы «эпицентр–станция» с помощью метода спектрально-временного анализа (СВАН) [9] в диапазоне периодов колебаний 30–60 с.

Тензор сейсмического момента (ТСМ) в приближении двойной пары сил (double-couple) и глубина гипоцентра рассчитывались по полученным амплитудным спектрам поверхностных волн по программе [10], разработанной в ИТПЗ РАН. Корректность применения используемой методики расчета ТСМ для прибайкальских землетрясений средних магнитуд рассмотрена в работе [11]. Для однозначного определения механизма очага землетрясения дополнительно учитывались знаки первых вступлений объемных волн на региональных сейсмических станциях [12].

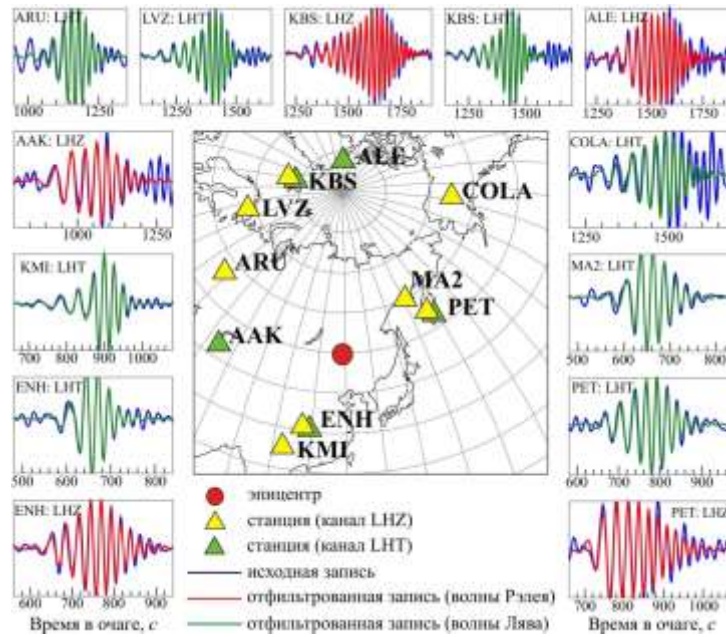


Рис. 3. Сейсмические станции, используемые для анализа очаговых параметров с отфильтрованными записями

Коды станций соответствуют международному стандарту.

Строение земной коры под сейсмическими станциями задавалось моделью 3SMAC [13], а в окрестности очага землетрясения – 3SMAC и CRUST 2.0 [14]. В табл. 2 приведены основные параметры коры (мощности слоев, скорости  $P$ - и  $S$ -волн, плотность) согласно используемым моделям. Так, ее мощность варьирует от 34 [13] до 36.5 км [14], существенно различаются скоростные и плотностные характеристики осадочного слоя, а также само строение коры, состоящей из двух и трех слоев для моделей 3SMAC и CRUST 2.0 соответственно. Наблюдаемые расхождения могут быть связаны с различием в исходных данных, методах их интерпретации и осреднения. Следует отметить, что в результате исследований коры и верхней мантии северо-востока Китая [15] по данным групповых и фазовых скоростей волн Рэлея для эпицентральной области рассматриваемого землетрясения (с учетом горизонтального разрешения) был получен скоростной разрез, сходный с моделью CRUST 2.0, что свидетельствует о корректности ее применения для дальнейшего анализа очаговых параметров. Для описания верхней мантии и расчета затухания поверхностных волн использовалась сферически симметричная модель PREM [16].

Таблица 2. Строение земной коры в окрестности очага землетрясения 22 июля 2011 г.

$h$ , км		$v_p$ , км/с		$v_s$ , км/с		$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	
3SMAC	CRUST 2.0	3SMAC	CRUST 2.0	3SMAC	CRUST 2.0	3SMAC	CRUST 2.0
1	0.5	5.5	2.5	3.0	1.2	2.6	2.1
11	12	6.1	6.1	3.5	3.5	2.7	2.8
23	12	6.7	6.6	3.9	3.7	2.9	2.9
	12		7.2		4.0		3.1

Оценка качества полученного решения производилась с помощью функции нормированной невязки ( $\epsilon$ ) [12]. Данная функция характеризует отличие расчетных амплитудных спектров от наблюдаемых, а также показывает отношение количества знаков первых вступлений, не удовлетворяющих полученной диаграмме излучения, к общему числу знаков. Кроме того, рассчитывалась частная функция нормированной невязки для каждого из искомых параметров (например, глубины –  $\epsilon_h$ ).

В результате инверсии было получено решение механизма очага со следующими параметрами плоскостей разрыва ( $STK$ ,  $DP$ ,  $SLIP$ ):  $NP1$ : 134°, 90°, 132°;  $NP2$ : 224°, 42°, 0° (рис. 4 а) Глубина гипоцентра составила 4–6 км (рис. 4 б), скалярный сейсмический момент  $M_0=0.70 \cdot 10^{16}$  Н·м, моментная магнитуда  $M_w=4.5$  и значение функции нормированной невязки  $\epsilon=0.282$ .

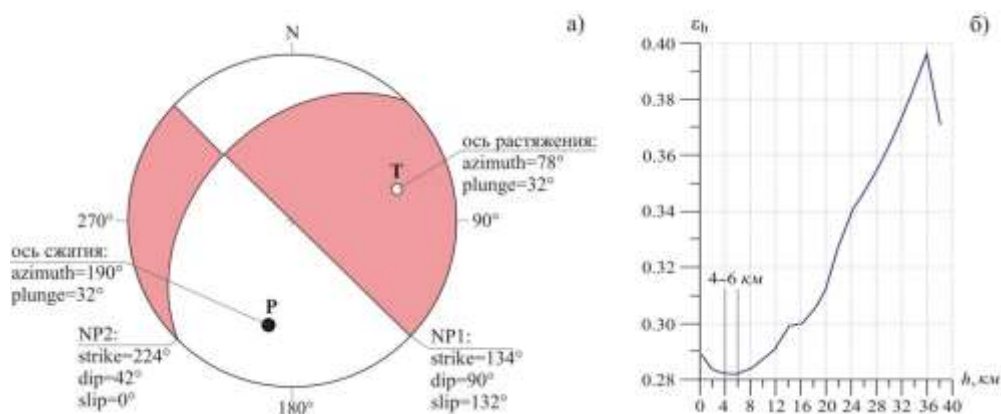


Рис. 4. Механизм очага Аргунского землетрясения (в проекции нижней полусферы) и зависимость частной функции нормированной невязки ( $\epsilon_h$ ) от глубины очага

**Макросейсмические данные.** Сведения об ощутимых эффектах Аргунского землетрясения были получены посредством почтовой рассылки опросных листов в ближайшие к эпицентру районы Восточного Забайкалья. Согласно поступившим ответам, землетрясение уверенно ощущалось на эпицентральных расстояниях до 140 км. Наибольшая наблюдаемая интенсивность сотрясений составила 5 баллов по шкале MSK-64 [17] при эпицентральных расстояниях 26–68 км (рис. 5, табл. 3).

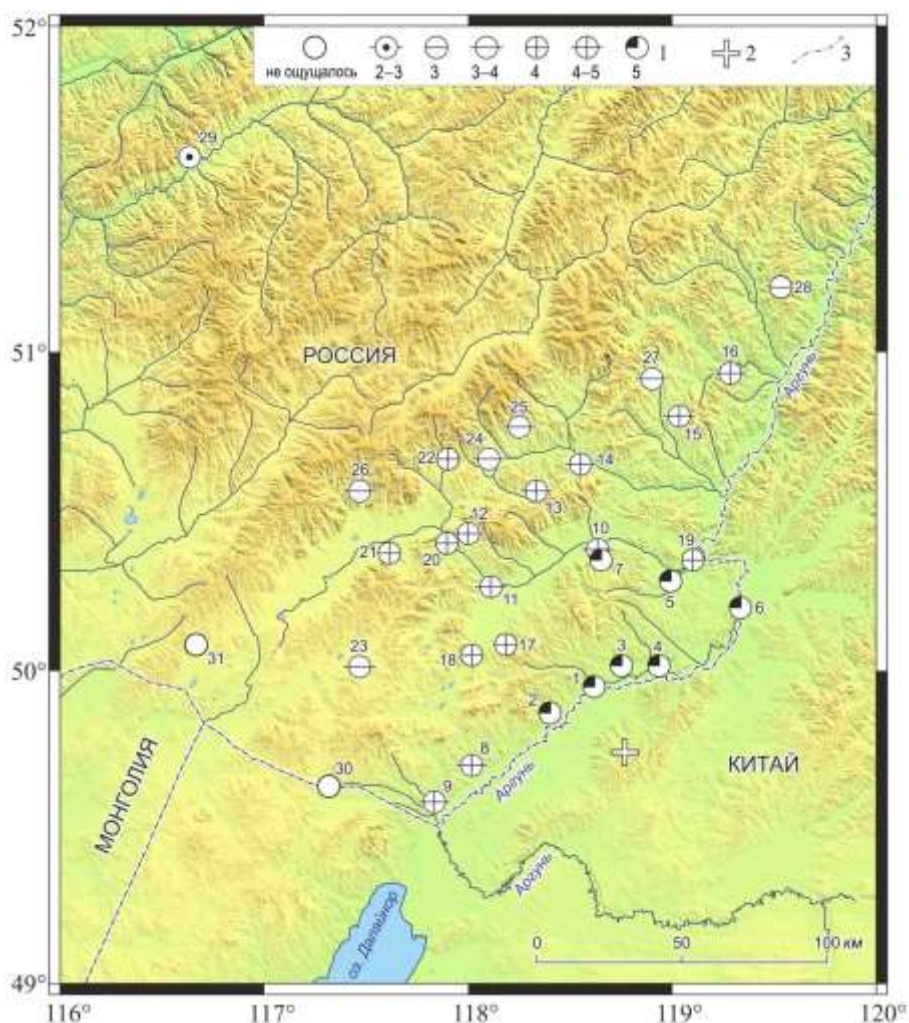


Рис. 5. Макросейсмические проявления Аргунского землетрясения 2011 г. с  $M_w=4.5$

1 – интенсивность сотрясений, баллы по шкале MSK-64; 2 – инструментальный эпицентр; 3 – государственная граница.

В населенных пунктах *Капцегайтуй*, *Кайластуй*, *Богдановка*, *Дурой*, *Молодежный*, *Староцурухайтуй* и *Погодаево* землетрясение, произошедшее в ночное местное время (23<sup>h</sup>53<sup>m</sup>), ощущалось практически всеми жителями, в том числе находившимися на открытом воздухе. Реакцию людей можно охарактеризовать как весьма острую: спящие проснулись, люди испытывали сильный испуг, многие покинули помещения. По свидетельству местных жителей, наиболее распространенные макросейсмические проявления в помещениях сводились к следующему: был слышен скрип полов, стен и потолков; самопроизвольно открывались и закрывались двери; дребезжала посуда и оконные стекла; скрипела и раскачивалась мебель; незакрепленные предметы сдвигались со своих мест. Отмечены случаи образования тонких трещин в штукатурке. Землетрясение сопровождалось сильным подземным гулом, который опрошенные очевидцы сравнивают главным образом с «работой или движением тяжелой техники». Продолжительность сотрясений очевидцы оценивают по-разному – от нескольких секунд до одной минуты.

По мере удаления от эпицентра на северо-запад интенсивность сотрясений постепенно убывает. Тем не менее, макросейсмические эффекты, оцениваемые в 4–5 баллов, наблюдались на расстоянии от 54 до ~140 км (табл. 3). В населенных пунктах, расположенных на указанных расстояниях, макросейсмические проявления были менее ярко выражены по сравнению с зоной 5-балльных сотрясений, однако оставались достаточно сильными, чтобы вызвать испуг и в отдельных случаях панику у очевидцев. В некоторых пунктах землетрясение замечено не всеми жителями. В помещениях наблюдалось раскачивание висячих предметов, дребезжание стекол и посуды, скрип полов и стен, в редких случаях – смещение незакрепленных предметов.

**Таблица 3.** Макросейсмические данные об Аргунском землетрясении 22 июля 2011 г.

№	Пункт	Δ, км	Координаты пункта		№	Пункт	Δ, км	Координаты пункта	
			φ°, N	λ°, E				φ°, N	λ°, E
<u>5 баллов</u>					18	Краснокаменск	64	50.05	118.02
1	Капцегайтуй	26	49.95	118.62	19	Приаргунск	72	50.35	119.1
2	Кайластуй	30	49.87	118.4	20	Маргуцек	96	50.40	117.9
3	Богдановка	31	50.02	118.75	21	Ковыли	108	50.37	117.61
4	Дурой	33	50.02	118.93	22	Манкечур	120	50.67	117.9
5	Молодежный	62	50.28	118.99	<u>3–4 балла</u>				
6	Староцурухайтуй	65	50.20	119.33	23	Степной	98	50.01	117.47
7	Погодаево	68	50.35	118.65	24	Бутунтай	113	50.67	118.1
<u>4–5 баллов</u>					25	Чиндагагай	120	50.77	118.25
8	Брусилровка	54	49.70	118.02	26	Кондуй	130	50.57	117.47
9	Абагайтуй	70	49.58	117.83	27	Калга	131	50.92	118.9
10	Досагуй	72	50.38	118.63	<u>3 балла</u>				
11	Целинный	75	50.27	118.11	28	Горный Зерентуй	171	51.20	119.53
12	Кличка	94	50.43	118	<u>2–3 балла</u>				
13	Селинда	97	50.57	118.33	29	Балей	255	51.60	116.63
14	Бырка	102	50.65	118.55	<u>Не ощущалось</u>				
15	Чингильтуй	119	50.80	119.03	30	Забайкальск	105	49.63	117.32
16	Кадая	137	50.93	119.28	31	Харанор	155	50.08	116.67
<u>4 балла</u>									
17	Октябрьский	57	50.08	118.18					

**Тектоническая позиция очага.** Согласно определению координат Аргунского землетрясения агентством БФ ФИЦ ЕЕГС РАН (см. табл. 1), его эпицентр расположен на территории Китая. Очаг, по всей видимости, приурочен к крупному разлому северо-восточного простираения, ограничивающему с юго-востока Аргунскую (Дуроевскую по [18]) тектоническую впадину. Последняя представляет собой узкую грабен-синклиналь, сформировавшуюся в позднеюрское–раннемеловое время [19, 20]. Основная система разломов осложнена разноориентированными структурными нарушениями (рис. 6) и имеет фрагментарный характер активности, проявляющийся в виде редких землетрясений низких и средних магнитуд ( $M \leq 5.0$ ).

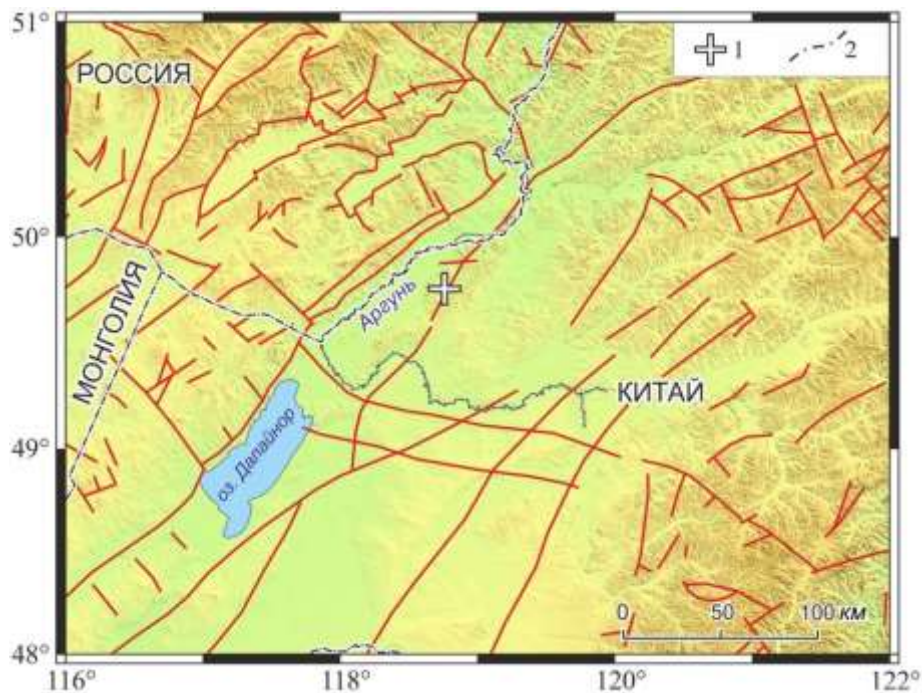


Рис. 6. Схема разломов в пределах исследуемого района по [21]

1 – инструментальный эпицентр; 2 – государственная граница.

Механизм очага Аргунского землетрясения имеет сдвиговый характер и демонстрирует одинаковый вклад субмеридиональных сжимающих и субширотных растягивающих усилий (угол погружения обеих осей составил  $32^\circ$ ). Это не противоречит общей геодинамической ситуации на окраине Амурской плиты [22]. Можно предположить, что тектонические напряжения в районе Приаргунья формируются под влиянием нескольких источников сил, однако для их накопления требуется длительное время. В конечном итоге накопившиеся напряжения могут реализовываться в виде слабых и умеренных землетрясений ( $M < 5$ ).

**Заключение.** Аргунское землетрясение 22 июля 2011 г. ( $M_w=4.5$ ) является наиболее сильным сейсмическим событием в Приаргунье в течение инструментального периода сейсмологических наблюдений. Оно сопровождалось хорошо ощутимыми макросейсмическими эффектами, достигавшими интенсивности 5 баллов при эпицентральных расстояниях до  $\sim 70$  км. Интенсивность сотрясений при Аргунском землетрясении не превысила значений, предусмотренных новыми картами общего сейсмического районирования России ОСР-2012 и ОСР-2014 [23]. Согласно упомянутым картам, в Приаргунье можно ожидать возникновения сотрясений интенсивностью до 6 баллов с периодом повторяемости 500 и 1000 лет, и 7 баллов с периодом повторяемости 5000 лет. Тем не менее, крайняя ограниченность сейсмологических данных о рассматриваемом районе может вызвать необходимость уточнения оценки сейсмической опасности Приаргунья. Представленные в настоящей статье данные позволяют в некоторой степени восполнить дефицит знаний о сейсмичности Юго-Восточного Забайкалья. События, подобные Аргунскому землетрясению, происходят в Приаргунье нечасто, что существенно осложняет анализ геодинамических условий района. Стоит отметить, что сопредельные районы Восточного Забайкалья, расположенные к западу от долины Аргуни, характеризуются чуть более высоким уровнем активности. Сильные землетрясения, сопровождающиеся заметными макросейсмическими эффектами, происходят здесь также редко, однако их магнитуда может достигать значений  $M=5.5-6.0$  [24]. Принципиальная возможность возникновения сильных землетрясений в Юго-Восточном Забайкалье подтверждается палеосейсмологическими данными [25]. Как следует из указанной работы, в зоне Кличкинского надвига обнаружены следы палеоземлетрясения с  $M=7.0-7.4$ , произошедшего около 9300 лет назад и сопровождавшегося разрывообразованием на земной поверхности. Таким образом, уточнение сейсмического потенциала активных структур и оценка сейсмической опасности Юго-Восточного Забайкалья и Приаргунья требуют дополнительных исследований, в том числе палеосейсмологических.

## Л и т е р а т у р а

1. Гилёва Н.А., Кобелева Е.А., Масальский О.К. (отв. сост.). Сейсмические станции Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН (код сети ВУКЛ) в 2011 г. // Землетрясения Северной Евразии, 2011 год. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – Приложение на CD\_ROM.
2. Тубанов Ц.А., Санжиева Д.П.-Д. (отв. сост.). Сейсмические станции Бурятского филиала ФИЦ ЕГС РАН (код сети BURS) в 2011 г. // Землетрясения Северной Евразии, 2011 год. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – Приложение на CD\_ROM.
3. Козьмин Б.М., Шibaев С.В. (отв. сост.). Сейсмические станции Якутии в 2011 г. (код сети YARS) // Землетрясения Северной Евразии, 2011 год. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – Приложение на CD\_ROM.
4. Михайлов В.И. (отв. сост.). Сейсмические станции Приамурья и Приморья в 2011 г. // Землетрясения Северной Евразии, 2011 год. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – Приложение на CD\_ROM.
5. Мельникова В.И., Гилёва Н.А. (отв. сост.), Ландер А.В., Середкина А.И., Татомир Н.В. (сост.). Каталог механизмов очагов землетрясений Прибайкалья и Забайкалья за 2011 г. // Землетрясения Северной Евразии, 2011 год. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – Приложение на CD\_ROM.
6. Хайдурова Е.В., Гилёва Н.А. (отв. сост.), Леонтьева Л.Р., Анисимова Л.В., Хамидулина О.А., Меньшикова Ю.А., Тигунцева Г.В., Андрусенко Н.А., Дреннова Г.Ф., Курилко Г.В., Хороших М.Б., Дворникова В.И., Павлова Л.В., Мазаник Е.В., Терёшина Е.Н., Зиброва Е.С., Борисова О.А., Папкина А.А., Архипенко Н.С. (сост.). Каталог землетрясений Прибайкалья и Забайкалья с  $K_p > 7.5$  за 2011 г. // Землетрясения Северной Евразии, 2011 год. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – Приложение на CD\_ROM.
7. Сейсмологический бюллетень (ежедекадный) за 2011 год / Отв. ред. О.Е. Старовойт. – Обнинск: ГС РАН, 2011–2012. – URL: [ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic\\_bulletin/2011](ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_bulletin/2011).
8. International Seismological Centre (ISC), On-line Bulletin, reviewed, Thatcham, United Kingdom, 2014. – URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/>.
9. Левшин А.Л., Яновская Т.Б., Ландер А.В., Букчин Б.Г., Бармин М.П., Ратникова Л.И., Итс Е.Н. Поверхностные сейсмические волны в горизонтально-неоднородной Земле. – М.: Наука, 1986. – 278 с.
10. Букчин Б.Г. Об определении параметров очага землетрясения по записям поверхностных волн в случае неточного задания характеристик среды // Физика Земли. – 1989. – № 9. – С. 34–41.
11. Середкина А.И., Мельникова В.И. Тензор сейсмического момента землетрясений Прибайкалья по амплитудным спектрам поверхностных волн // Физика Земли. – 2014. – № 3. – С. 103–114. doi:10.7868/S0002333714030090.
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) // Geophysical Journal International. – 2001. – **144**. – N 1. – P. 206–220. doi:10.1046/j.1365-246x.2001.00313.x.
13. Nataf H.-C., Ricard Y. 3SMAC: on a priori tomographic model of the upper mantle based on geophysical modeling // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 1996. – **95**. – N 1–2. – P. 101–122. doi:10.1016/0031-9201(95)03105-7.
14. Bassin C., Laske G., Masters G. The current limits of resolution for surface wave tomography in North America // EOS, Trans. AGU. – 2000. – **81**. – F897.
15. Li Y., Wu Q., Pan J., Sun L. S-wave velocity structure of northeastern China from joint inversion of Rayleigh wave phase and group velocities // Geophysical Journal International. – 2012. – **190**. – N 1. – P. 105–115. doi:10.1111/j.1365-246X.2012.05503.x.
16. Dziewonski A.M., Anderson D.L. Preliminary Reference Earth Model // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 1981. – **25**. – N 4. – P. 297–356. doi:10.1016/0031-9201(81)90046-7.
17. Медведев С.В. (Москва), Шпонхойер В. (Иена), Карник В. (Прага). Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. – М.: МГК АН СССР, 1965. – 11 с.
18. Вотях О.А., Чабан Н.Н., Коломышев И.С., Демина Е.В. Главные типы верхнемезозойских тектонических впадин Забайкалья // Геология и геофизика. – 1990. – № 10. – С. 8–15.
19. Алтухов Е.Н., Смирнов А.Д., Леонтьев Л.Н. Тектоника Забайкалья. – М.: Недра, 1973. – 172 с.

20. **Сейсмическое районирование Восточной Сибири и его геолого-геофизические основы** / Ред. В.П. Солоненко. – Новосибирск: Наука СО, 1977. – 303 с.
21. **Геологическая карта Приамурья и сопредельных территорий** / Ред. Л.И. Красный, Пэн Юньбяо. – Харбин–Санкт-Петербург–Благовещенск: Комитет Российской Федерации по геологии и использованию недр; ВСЕГЕИ им. А.П. Карпинского; Министерство геологии и минеральных ресурсов КНР, 1996.
22. **Barth A., Wenzel F.** New constraints on the intraplate stress field of the Amurian plate deduced from light earthquake focal mechanisms // *Tectonophysics*. – 2010. – **482**. – N 1–4. – P. 160–169. doi:10.1016/j.tecto.2009.01.029.
23. **Уломов В.И., Перетокин С.А., Медведева Н.С., Акатова К.Н., Данилова Т.И.** Сейсмологические аспекты общего сейсмического районирования территории Российской Федерации (ОСР-97, ОСР-2012, ОСР-2014) // *Вопросы инженерной сейсмологии*. – 2014. – **41**. – № 4. – С. 5–24.
24. **Радзиминович Я.Б., Щетников А.А.** Историческая сейсмичность Восточного Забайкалья // *Вулканология и сейсмология*. – 2010. – № 6. – С. 65–78.
25. **Чипизубов А.В., Смекалин О.П., Имаев В.С.** Палеосейсмодислокации в зоне Кличкинского надвига (Юго-Восточное Забайкалье) // *Вопросы инженерной сейсмологии*. – 2014. – **41**. – № 2. – С. 23–36.