

ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОЩУТИМЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПРИБАЙКАЛЬЯ

А.И. Середкина^{1,2}

¹Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск

²Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск
ale@crust.irk.ru

В 2011 г. на территории Прибайкалья произошло 8 землетрясений с $K_p \geq 12.0$ (по данным каталога [1]). В данной работе для пяти из них (рис. 1, табл. 1) по амплитудным спектрам поверхностных волн был рассчитан тензор сейсмического момента (ТСМ).

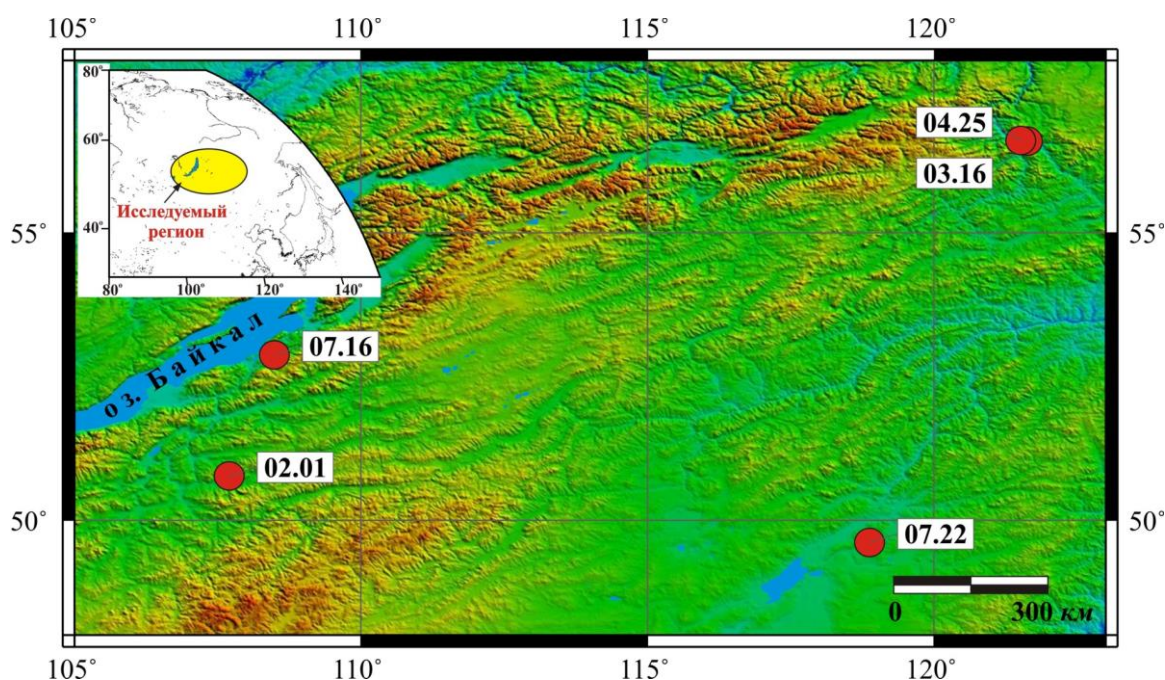


Рис. 1. Эпицентры исследуемых землетрясений с указанием дат: месяца, числа (на врезке показано положение исследуемого региона)

Таблица 1. Параметры исходных данных

№	Дата, д м	t_0 , ч мин с	Эпицентр		K_p	m_b	Δ_{\min} , км	Δ_{\max} , км	Диапазон периодов ΔT , с	Число станций
			φ° , E	λ° , N						
1	01.02	12 53 51.3	107.85	50.98	13.2	4.9	2304	4628	30–55	10
2	16.03	17 12 36.1	121.58	56.64	13.5	4.9	2163	8908	30–65	13
3	25.04	22 13 49.6	121.53	56.61	12.1	4.6	2165	5673	30–55	9
4	16.07	18 38 52.0	108.49	52.88	14.5	5.5	2318	5736	30–55	16
5	22.07	14 52 57.6	118.77	49.74	13.5	4.9	2292	5347	30–60	10

Материалом для исследования служили записи выбранных землетрясений на широкополосных каналах цифровых сейсмических станций сетей П [2], ПУ [3] и ИС [4] (рис. 2). Положение станций выбиралось таким образом, чтобы они находились в разных азимутах от эпицентра анализируемого события. Азимутальные распределения сейсмических станций с примерами фильтрации записей на отдельных станциях показаны на рис. 3. Минимальное эпицентральное расстояние составило около 2 100 км, а максимальное – около 8 900 км (табл. 1).

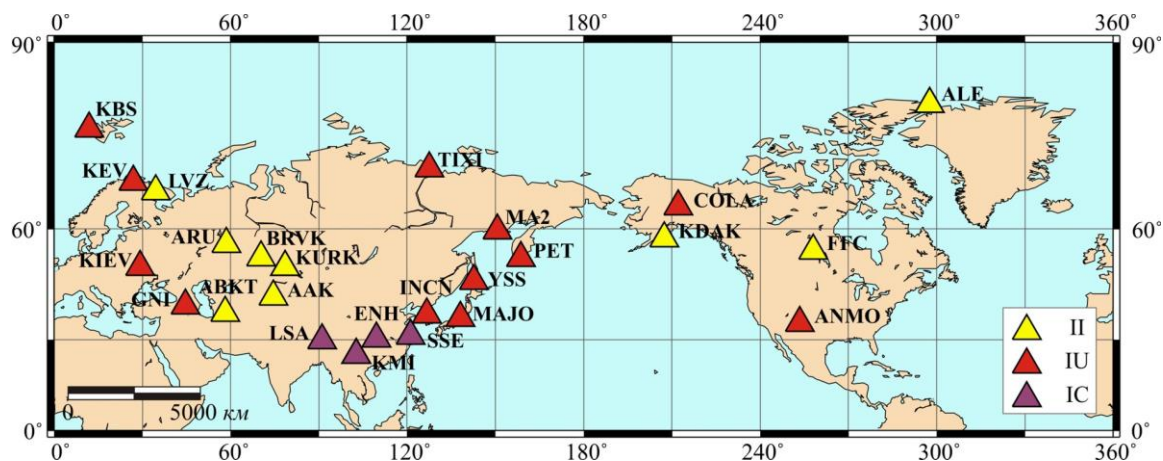


Рис. 2. Используемые для анализа сейсмические станции

Коды станций соответствуют международному стандарту.

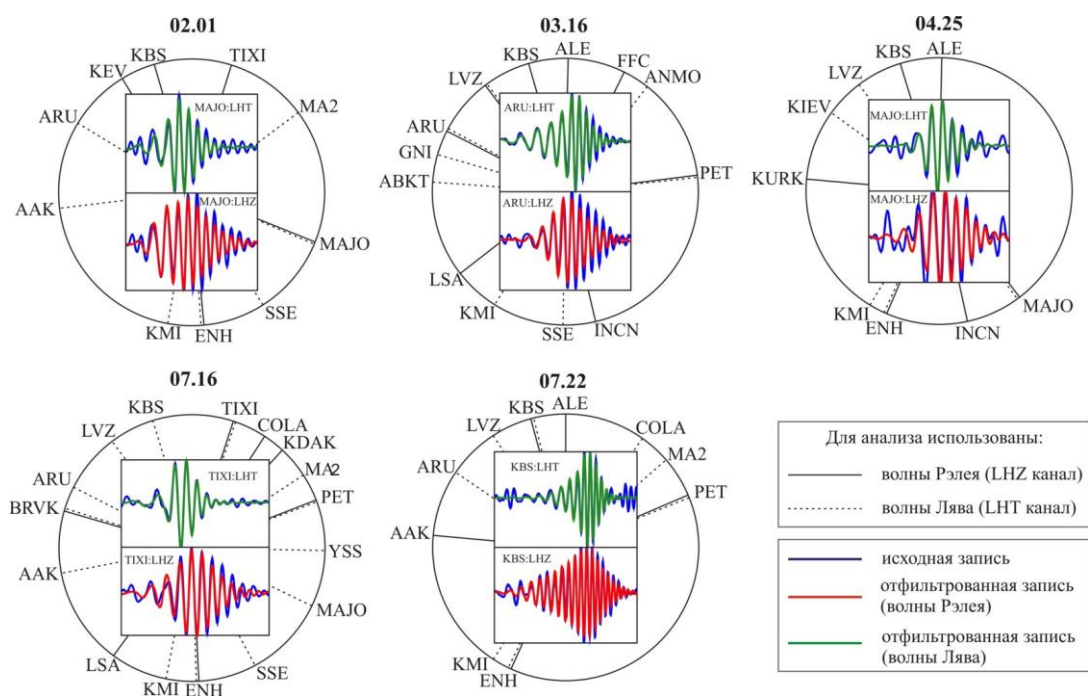


Рис. 3. Азимутальные распределения сейсмических станций относительно эпицентров исследуемых землетрясений с примерами фильтрации записей

Для каждой сейсмической трассы эпицентр-станция с помощью метода спектрально-временного анализа (СВАН) [5] были получены спектры основной моды волн Рэлея и Лява. Отбирались только сигналы с достаточно высоким соотношением сигнал/шум и нормальной поляризацией. Выбор диапазона периодов колебаний (ΔT) для отдельного землетрясения был обусловлен необходимостью удовлетворить приближению точечного источника с одной стороны, и особенностями излучения поверхностных волн мелкофокусным источником с другой [6, 7], и для всей совокупности событий составил от 30 до 65 с (табл. 1). Пример расчета амплитудного спектра волн Рэлея (СВАН-диаграммы) от землетрясения 22 июля, зарегистрированного на станции «Alert» (ALE, рис. 2), показан на рис. 4.

TСM в приближении двойной пары сил (double-couple) и глубина гипоцентра рассчитывались по полученным амплитудным спектрам поверхностных волн по программе, разработанной в ИТПЗ РАН [8]. Корректность применения используемой методики расчета TСM для байкальских землетрясений средних магнитуд рассмотрена в работе [9]. Для однозначного определения механизма очага землетрясения дополнительно учитывались знаки первых вступлений объемных волн на региональных сейсмических станциях [10].

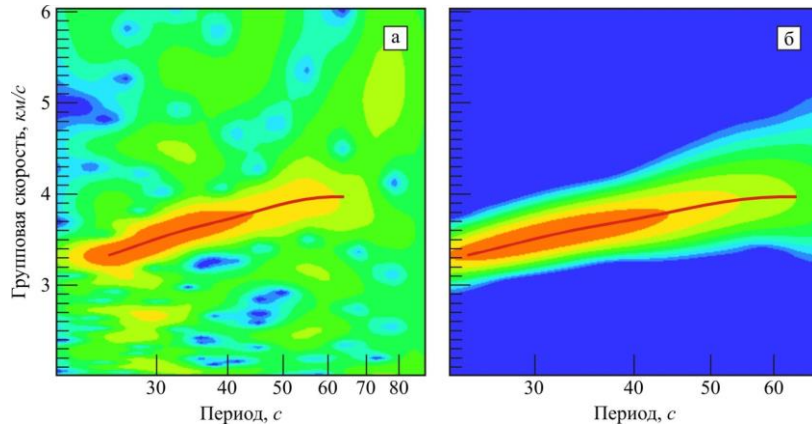


Рис. 4. СВАН-диаграммы записи землетрясения 22 июля на вертикальной (Z) компоненте станции «Alert» (ALE, Канада) до (а) и после фильтрации (б)

Красным цветом обозначена дисперсионная кривая групповой скорости.

Оценка качества полученного решения производилась с помощью функции нормированной невязки (ϵ) [10]. 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.

Строение земной коры под сейсмическими станциями задавалось моделью 3SMAC [11], а в окрестности очага землетрясения – моделями 3SMAC или CRUST 2.0 [12] в зависимости от того, какая из них обеспечивает меньшее значение функции нормированной невязки (табл. 2). Для описания верхней мантии и расчета затухания поверхностных волн применялась сферически симметричная модель PREM [13].

В результате для рассматриваемых землетрясений были определены значения глубины гипоцентра h , скалярного сейсмического момента M_0 , моментной магнитуды M_w и фокальные механизмы очагов (рис. 5, табл. 2).

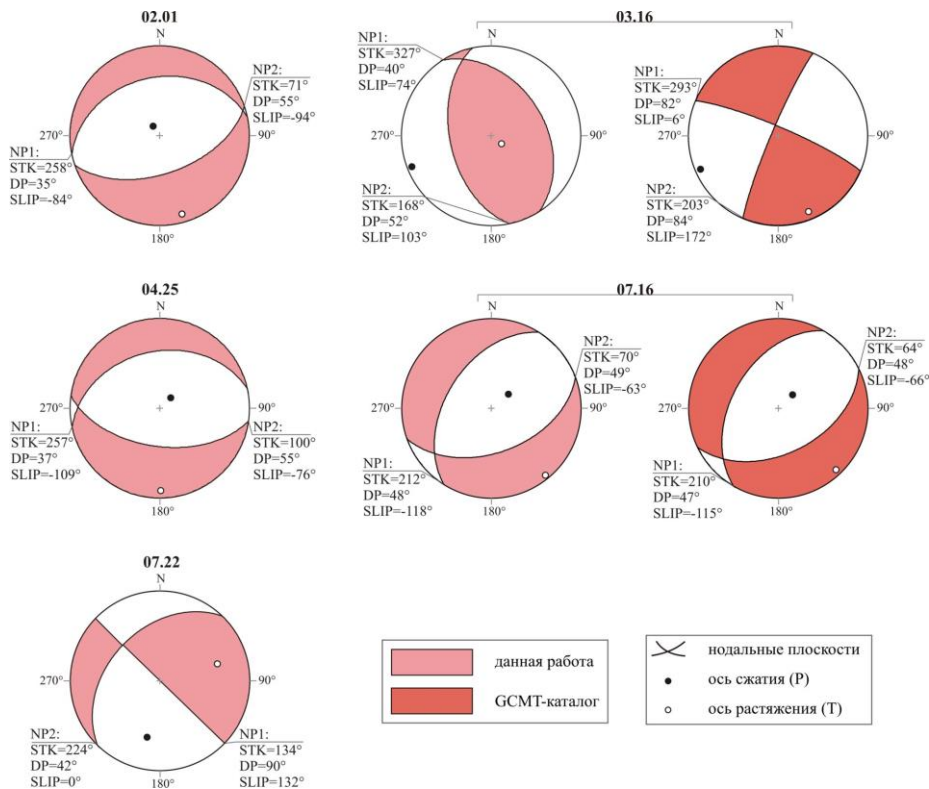


Рис. 5. Механизмы очагов исследуемых землетрясений (в проекции нижней полусферы)

Параметры нодальных плоскостей: STK – азимут простираия, DP – угол падения, $SLIP$ – угол подвижки.

Таблица 2. Очаговые параметры исследуемых землетрясений.

№	Дата, д.м	$M_0 \cdot 10^{17}$, Н.м	M_w	h , км	ε	Модель коры	Ось T		Ось P	
							$AZM, ^\circ$	$Pl, ^\circ$	$AZM, ^\circ$	$Pl, ^\circ$
1	01.02	0.12	4.7	26	0.219	[12]	164	10	325	79
2	16.03	0.92	5.3	30	0.272	[11]	129	78	249	6
3	25.04	0.05	4.4	26	0.330	[11]	180	9	52	76
4	16.07	0.76	5.2	22	0.369	[11]	141	1	50	70
5	22.07	0.07	4.5	4–6	0.282	[11]	78	32	190	32

Для двух из рассматриваемых событий в GСMT-каталоге имеется информация о тензоре сейсмического момента и центреиде. При этом из рис. 5 видно, что в случае землетрясения 16 июля механизмы очагов, полученные различными методами, хорошо согласуются между собой. Несогласованность решений для землетрясения 16 марта, скорее всего, обусловлена ошибками GСMT, для которых погрешности отдельных компонент ТСМ имеют тот же порядок, что и сами значения компонент. Кроме того, как отмечалось ранее [9], данное сейсмическое событие могло характеризоваться сложным характером разрывообразования.

Очаг сейсмического события 16 июля сформировался в обстановке практически чистого растяжения, хотя и располагался в горном массиве (хр. Улан-Бургасы). При этом ось растяжения имеет типичную для данной части Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) ориентацию. Полученные данные свидетельствуют о продолжающемся процессе развития структур растяжения в горном обрамлении юго-восточного борта Среднего Байкала [14, 15].

Фокальные механизмы землетрясений 16 марта и 25 апреля, локализованных на северо-восточном фланге БРЗ, существенно различаются между собой, что отражает сеймотектоническую ситуацию рассматриваемой территории. Здесь наблюдается резкое изменение морфокинематики активных разломов: северо-восточное рифтовое простирание разрывных нарушений меняется на близширотное, а левосторонние сбросо-сдвиги, характерные для БРЗ, к востоку от р. Олёкмы сменяются на левосторонние и правосторонние взбросо-сдвиги [16]. Кроме того, ранее для континентальных рифтовых систем было установлено [17], что возникновение глубоких ($h > 20$ км) коровых землетрясений наиболее вероятно вблизи краев рифта, что подтверждается результатами данного исследования.

Особый интерес представляют сейсмические события 1 февраля и 22 июля, произошедшие в слабоактивных районах Западного Забайкалья и в долине р. Аргунь соответственно. Очаговые параметры первого из них, приуроченного к Заганскому хребту (одноименному комплексу метаморфического ядра), свидетельствуют о наличии в данном районе процессов континентального растяжения [18, 19]. Решение фокального механизма второго землетрясения позволяет предположить его связь с разломом северо-восточного простирания, ограничивающим юго-восточный борт Аргунской впадины (на территории Китая) [20, 21].

Экспериментальные оценки ТСМ, выполненные в данной работе, представляют существенный интерес для режимных наблюдений за полями напряжений и деформаций соответствующего масштабного уровня и способствуют выявлению их пространственно-временных вариаций.

Работа выполнена при поддержке РНФ, грант № 15-17-20000.

Л и т е р а т у р а

1. 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.
2. **Scripps Institution of Oceanography: IRIS/IDA Seismic Network.** International Federation of Digital Seismograph Networks. – 1986. – Other/Seismic Network. doi:10.7914/SN/II.

3. **Albuquerque Seismological Laboratory (ASL)/USGS: Global Seismograph Network (GSN - IRIS/USGS)**. International Federation of Digital Seismograph Networks. –1988. – Other/Seismic Network. doi:10.7914/SN/IU.
4. **Albuquerque Seismological Laboratory (ASL)/USGS (1992): New China Digital Seismograph Network**. International Federation of Digital Seismograph Networks. –1992. – Other/Seismic Network. doi:10.7914/SN/IC.
5. **Левшин А.Л., Яновская Т.Б., Ландер А.В. и др.** Поверхностные сейсмические волны в горизонтально-неоднородной Земле. – М.: Наука, 1986. – 278 с.
6. **Букчин Б.Г.** Особенности излучения поверхностных волн мелкофокусным источником // Физика Земли. – 2006. – № 8. – С. 88–93.
7. **Bukchin B., Clevede E., Mostinskiy A.** Uncertainty of moment tensor determination from surface wave analysis for shallow earthquakes // J. Seismol. – 2010. – **14**. – № 3. – P. 601–614. doi: 10.1007/s10950-009-9185-8.
8. **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.
9. **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.
10. **Lasserre C., Bukchin B., Bernard P., Tapponnier 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. – **144**. – № 1. – P. 206–220.
11. **Nataf H.-C., Ricard Y.** 3SMAC: on a priori tomographic model of the upper mantle based on geophysical modeling // Phys. Earth Planet. Inter. – 1996. – **95**. – P. 101–122.
12. **Bassin C., Laske G., Masters G.** The current limits of resolution for surface wave tomography in North America // EOS Trans AGU. – 2000. – **81**. – F897.
13. **Dziewonski A.M., Anderson D.L.** Preliminary Reference Earth Model // Phys. Earth Planet. Inter. –1981. – **25**. – P. 297–356.
14. **Мельникова В.И., Гилёва Н.А., Имаев В.С., Радзиминович Я.Б., Тубанов Ц.А.** Особенности сейсмических активизаций Среднего Байкала в 2008–2011 гг. // ДАН. – 2013. – **453**. – № 6. – С. 680–685. doi: 10.7868/S086956521336019X.
15. **Гилёва Н.А., Мельникова В.И., Середкина А.И., Радзиминович Я.Б., Тубанов Ц.А.** Туркинское землетрясение 16 июля 2011 г. с $K_p=14.5$, $M_w=5.2$, $I_0=7-8$ (Центральное Прибайкалье) // Землетрясения Северной Евразии, 2011 год. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – С. 370–378.
16. **Имаева Л.П., Мельникова В.И., Имаев В.С., Козьмин Б.М., Мельников А.И., Гриб Н.Н.** Эволюция сейсмотектонических процессов северо-восточного фланга Байкальской рифтовой зоны / Иркутск: Институт земной коры СО РАН. – 2012. – 232 с.
17. **Doser D.I., Yarwood D.R.** Deep crustal earthquakes associated with continental rifts // Tectonophysics. – 1994. – **229**. – P. 123–131.
18. **Мельникова В.И., Середкина А.И., Радзиминович Я.Б., Мельников А.И., Гилёва Н.А., Тубанов Ц.А.** Заганское землетрясения 1 февраля 2011 года ($M_w=4.7$) в слабо активном районе Западного Забайкалья: наблюдения и анализ // ВИС. – 2015. – **42**. – № 3. – С. 55–70.
19. **Мельникова В.И., Гилёва Н.А., Середкина А.И., Радзиминович Я.Б., Тубанов Ц.А.** Заганское землетрясение 1 февраля 2011 г. с $K_p=13.2$, $M_w=4.7$, $I_0=6$ (Забайкалье) // Землетрясения Северной Евразии, 2011 год. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – С. 314–322.
20. **Радзиминович Я.Б., Середкина А.И., Мельникова В.И., Гилёва Н.А.** Землетрясение 22 июля 2011 года ($M_w=4.5$) в слабоактивном районе Приаргунья // ВИС. – 2016. – **43**. – № 4. – С. 21–33.
21. **Радзиминович Я.Б., Середкина А.И., Мельникова В.И., Гилёва Н.А.** Аргунское землетрясение 22 июля 2011 г. с $K_p=13.5$, $M_w=4.5$, $I_0=7$ (Приаргунье) // Землетрясения Северной Евразии, 2011 год. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – С. 392–399.