

ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОЩУТИМЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПРИБАЙКАЛЬЯ

А.И. Середкина

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

В 2007 г. на территории Прибайкалья и Забайкалья произошло 11 землетрясений с $K_p \geq 11.6$ [1], $m_b \geq 4.3$ [2]. Для шести из них (рис. 1, табл. 1) по амплитудным спектрам поверхностных волн в приближении двойной пары сил был рассчитан тензор сейсмического момента.

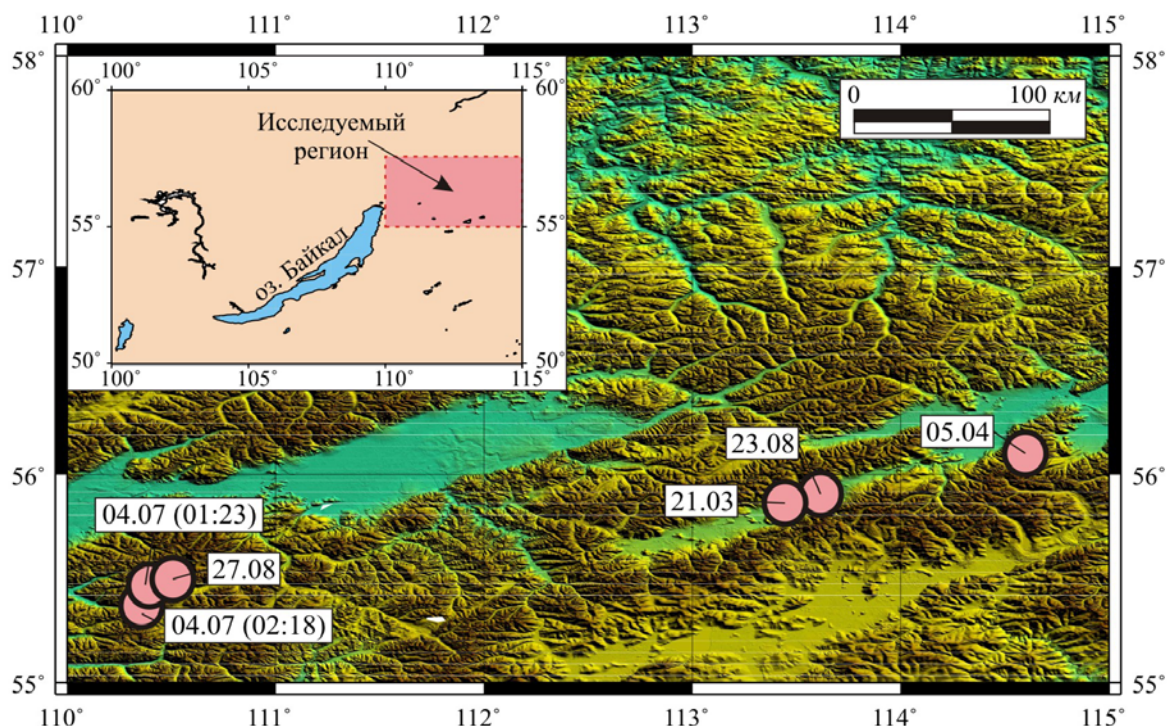


Рис. 1. Карта эпицентров исследуемых землетрясений с указанием числа и месяца

Для двух землетрясений 4 июля в скобках приведено время в очаге (час, минута). На врезке показано положение рассматриваемого района на Азиатском континенте.

Таблица 1. Общие сведения о рассматриваемых землетрясениях

№	Дата, д м	t_0 , ч мин с	Эпицентр		h , км	K_p	m_b , [2]	ΔT , с	Модель коры
			φ° , E	λ° , N					
1	21.03	14 55 42.7	55.85	113.41	19	12.3	4.3	30–55	3SMAC [3]
2	05.04	13 22 53.3	56.08	114.49	13	13.4	4.9	30–55	3SMAC [3]
3	04.07	01 23 22.9	55.44	110.44	19	14.2	5.2	30–65	CRUST 2.0 [4]
4	04.07	02 18 04.5	55.40	110.39	18	12.7	4.7	30–65	3SMAC [3]
5	23.08	04 49 18.2	55.93	113.56	21	13.3	4.8	30–70	CRUST 2.0 [4]
6	27.08	10 09 30.1	55.47	110.48	15	12.7	4.7	30–65	3SMAC [3]

Примечание: ΔT – диапазон периодов колебаний, используемый для анализа (см. текст); модель коры в окрестности очага землетрясения (см. текст).

Материалом для исследования служили записи выбранных землетрясений на широкополосных каналах цифровых сейсмических станций сетей IRIS, GEOFON и GEOSCOPE (рис. 2).

Положение станций выбиралось таким образом, чтобы они находились в разных азимутах от эпицентра анализируемого события. Минимальное эпицентральное расстояние составило около 2 000 км, а максимальное – около 9 500 км.

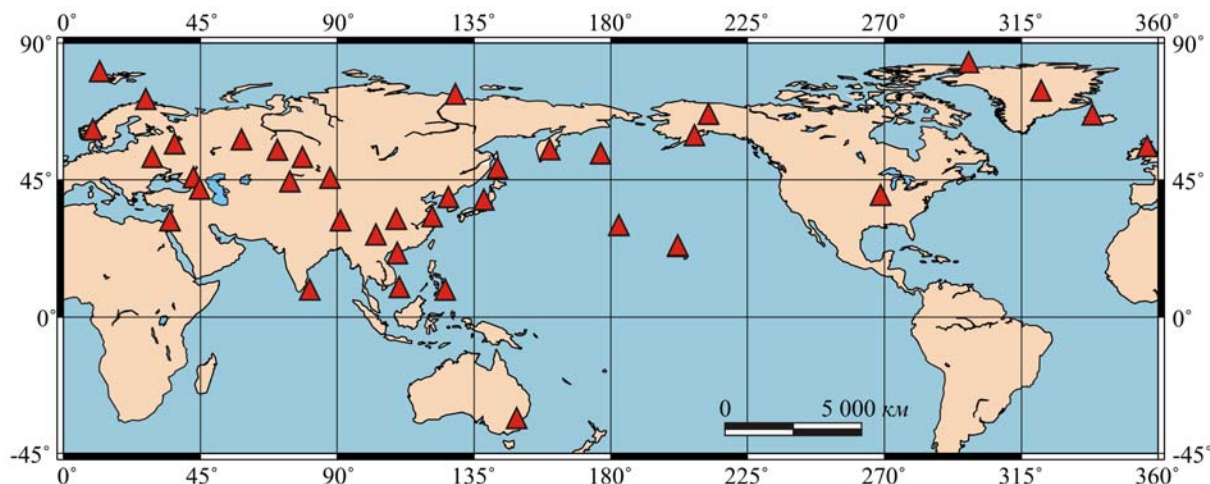


Рис. 2. Карта сейсмических станций, записи которых использовались для расчетов тензора сейсмического момента

Для каждой сейсмической трассы эпицентр-станция с помощью метода спектрально-временного анализа [5] были получены спектры основной моды волн Рэлея и Лява. Для анализа были отобраны только сигналы с достаточно высоким соотношением сигнал/шум и нормальной поляризацией. Азимутальные распределения сейсмических станций с примерами фильтрации записей на отдельных станциях показаны на рис. 3. Выбор диапазона периодов колебаний (ΔT) для отдельного землетрясения был обусловлен необходимостью удовлетворить приближению точечного источника, с одной стороны, и особенностям излучения поверхностных волн мелкофокусным источником [6, 7] – с другой. Для всей совокупности событий он составил от 30 до 70 с (табл. 1).

Тензор сейсмического момента и глубина гипоцентра рассчитывались по полученным амплитудным спектрам поверхностных волн по программе, разработанной в Институте теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН [8]. Данный метод имеет следующие особенности:

- очаг моделируется разрывом сплошности по плоской площадке в результате накопленных тектонических напряжений; силовым эквивалентом очага является двойная пара сил с противоположным по знаку моментом;
- используется приближение слабой горизонтальной неоднородности [9, 10];
- значения координат эпицентра и момента времени эквивалентного мгновенного источника считаются заданными. При этом с учетом всех наложенных ограничений ошибки определения координат эпицентра землетрясения практически не влияют на амплитудный спектр смещений [8].

Таким образом, очаг можно описать пятью параметрами: глубиной диполя (h), сейсмическим моментом (M_0) и фокальным механизмом, характеризующимся положением плоскостей разрыва или направлением осей главных напряжений. В процессе инверсии четыре из вышеперечисленных неизвестных определяются перебором в четырехмерном параметрическом пространстве, а сейсмический момент рассчитывается с помощью минимизации невязок между наблюдаемыми и вычисленными амплитудными спектрами поверхностных волн методом наименьших квадратов.

Значение моментной магнитуды (M_w) рассчитывалось по определенной в процессе инверсии величине сейсмического момента (M_0 , дн·см) [11]:

$$M_w = 2/3 \lg M_0 - 10.7.$$

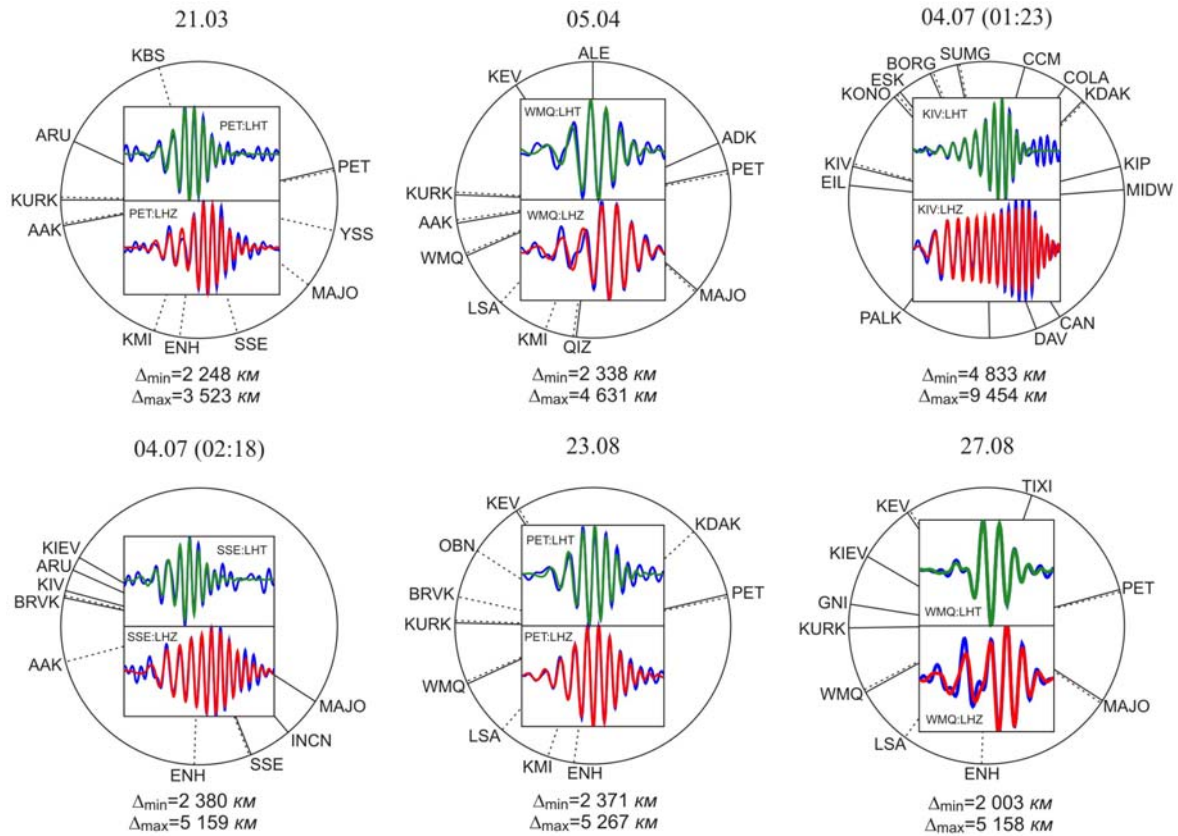


Рис. 3. Азимутальные распределения сейсмических станций относительно эпицентров исследуемых землетрясений с примерами фильтрации записей

Сплошными линиями обозначены станции, на которых для анализа была использована вертикальная компонента записи (LHZ), штрихованными – трансверсальная компонента (LHT). Записи исходного сигнала показаны синим цветом, отфильтрованного – зеленым (волны Лява) и красным (волны Рэлея). Под каждой диаграммой указано минимальное (Δ_{\min}) и максимальное (Δ_{\max}) эпицентральные расстояния. Коды станций соответствуют международному стандарту.

Известно, что только по амплитудным спектрам поверхностных волн невозможно однозначно определить механизм очага землетрясения [12]. В этом случае будут существовать четыре эквивалентных решения, различающиеся направлением вертикальной оси и направлением подвижки. Для нахождения единственного решения в расчетах дополнительно была привлечена информация о знаках первых вступлений объемных волн, записанных на сейсмических станциях Байкальского и Бурятского филиалов ГС СО РАН. Для каждой комбинации очаговых параметров рассчитывалась диаграмма направленности излучения объемных волн и проводилось ее сравнение с наблюдаемыми знаками вступлений. Предварительно была выполнена процедура разрежения знаков [13].

Для оценки качества полученных решений использовалась функция нормированной невязки (R), характеризующая отклонение амплитудных спектров, рассчитанных для конкретных очаговых параметров, от наблюдаемых. Также данная функция показывает относительную долю знаков первых вступлений, не удовлетворяющих рассчитанной диаграмме направленности излучения [13].

Строение земной коры под сейсмическими станциями задавалось моделью 3SMAC [3], а в окрестности очага землетрясения – моделями 3SMAC или CRUST 2.0 [4], 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 [14].

Проведенное ранее тестирование выбранной методики на прибайкальских землетрясениях показало, что результаты расчетов хорошо согласуются с данными мировых сейсмологических агентств, а также с решениями фокальных механизмов, полученными по знакам первых вступлений продольных объемных волн на региональных станциях, что говорит о корректности ее применения для региональных сейсмических событий средних магнитуд [15].

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

Таблица 2. Очаговые параметры исследуемых землетрясений

№	Дата, м ч	$M_0 \cdot 10^{17}$, Н·м	M_w	h , км	NP_1			NP_2			R
					STK°	DP°	$SLIP^\circ$	STK°	DP°	$SLIP^\circ$	
1	21.03	0.094	4.6	4	15	84	-108	267	19	-19	0.222
2	05.04	0.180	4.8	12	70	20	-60	218	73	-100	0.280
3	04.07	1.900	5.5	14	25	70	-95	219	21	-77	0.317
4	04.07	0.120	4.7	14	170	23	-143	45	76	-71	0.290
5	23.08	0.170	4.8	22	65	30	-100	257	61	-84	0.271
6	27.08	0.055	4.4	4	162	37	-139	37	67	-60	0.302

Таким образом, использование методики расчета тензора сейсмического момента по поверхностным волнам (в приближении двойной пары сил) позволило существенно дополнить информацию об очаговых параметрах прибайкальских землетрясений средних магнитуд. Полученные результаты способствуют повышению надежности детальных исследований напряженно-деформированного состояния земной коры и построению наиболее реалистичных моделей геодинамического режима Прибайкалья.

Л и т е р а т у р а

1. Хайдурова Е.В., Гилёва Н.А. (отв. сост.) Каталог землетрясений Прибайкалья и Забайкалья за 2007 г. ($N=1331$). (См. Приложение к наст. сб. на CD).
2. **Bulletin of the International Seismological Centre for 2007.** – Thatcham, United Kingdom: ISC, 2009.
3. **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.
4. **Bassin C., Laske G., Masters G.** The current limits of resolution for surface wave tomography in North America // *EOS Trans AGU.* – 2000. – 81. – F897.
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. – N 3. – P. 601–614.
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. **Бабич В.М., Чихачев Б.А., Яновская Т.Б.** Поверхностные волны в вертикально-неоднородном упругом полупространстве со слабой горизонтальной неоднородностью // *Физика Земли.* – 1976. – № 4. – С. 24–31.
10. **Woodhouse J.H.** Surface waves in the laterally varying structure // *Geophys. J. R. Astr. Soc.* – 1974. – 90. – № 12. – P. 713–728.
11. **Hanks T., Kanamori H.** A moment magnitude scale // *J. Geophys. Res.* – 1979. – 84. – B5. – P. 2348–2350.
12. **Mendiguren J.A.** Inversion of surface wave data in source mechanism studies // *J. Geophys. Res.* – 1977. – 82. – N 5. – P. 889–894.
13. **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.
14. **Dziewonski A.M., Anderson D.L.** Preliminary Reference Earth Model // *Phys. Earth Planet. Inter.* – 1981. – 25. – P. 297–356.
15. **Середкина А.И.** Тестирование методики расчета тензора сейсмического момента по поверхностным волнам для прибайкальских землетрясений // *Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Шестой Международной сейсмологической школы (Апатиты, 2011).* – Обнинск: ГС РАН, 2011. – С. 316–320.