

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ТЕНЗОРА СЕЙСМИЧЕСКОГО МОМЕНТА СИЛЬНЫХ РЕГИОНАЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ*Абубакиров И.Р., Павлов В.М.**Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский,
air@emsd.ru, pvm@emsd.ru***Введение**

Тензор сейсмического момента (ТСМ) в последнее время все чаще используется в качестве основной характеристики очагов землетрясений. В ТСМ естественным образом объединяются фокальный механизм землетрясения и значение скалярного сейсмического момента. Фокальный механизм землетрясения характеризует ориентировку и направление плоскостей взаимного скольжения блоков земной коры в очаге, и отражает напряженно-деформированное состояние среды. Скалярный сейсмический момент отражает масштаб очагового процесса. Для оценки ТСМ необходимы длиннопериодные сейсмограммы и средства расчета теоретических сейсмограмм.

В последнее время в России, включая Дальний Восток, интенсивно развивается сеть широкополосных станций. С другой стороны, имеется программа для расчета теоретических сейсмограмм, разработанная в КФ ГС РАН [1, 6]. Это позволяет начать разработку методики рутинного определения ТСМ для Дальнего Востока России и других ее сейсмоопасных регионов по записям региональных широкополосных станций. В данной работе приводится алгоритм, который предполагается положить в основу такой методики.

Существует несколько методик рутинного расчета ТСМ. «Гарвардская группа» получает оценки ТСМ по методике [2], рассчитывающей СМТ (Centroid moment tensor). При этом используются данные телесеизмических станций мировой сети. Описание методик расчета ТСМ, использующих данные на региональных расстояниях ($<30^\circ$), можно найти, например, в работе [5] (см. также ссылки в ней).

В этих методиках используется модель очага в виде точечного дипольного источника с ТСМ и временной функцией источника (ВФИ) – средней по очагу скорости подвижки (см. например, [3]). ТСМ рассчитывается путем «подгонки» реальных сейсмограмм или их спектров теоретическими сейсмограммами или их спектрами. Одновременно с ТСМ, как правило, определяется положение «наилучшего точечного источника» (центроида) и, в редких случаях, ВФИ, которая обычно задается.

В предлагаемом алгоритме форма ВФИ принимается известной. Длительность ВФИ оценивается вместе с ТСМ, в отличие от работы [2], где длительность задается в зависимости от магнитуды. Задача определения положения центроида в предлагаемом алгоритме, в отличие от работы [2], не ставится, а ТСМ рассчитывается для эквивалентного точечного источника, географические координаты которого совпадают с географическими координатами эпицентра. Положение эпицентра предполагается известным из независимых определений. Глубина источника оценивается вместе с ТСМ. Предполагается, что ТСМ удовлетворяет условию нулевого следа.

Применяется итеративная процедура оценки ТСМ. Времена пробега не вычисляются; теоретические и реальные сейсмограммы совмещаются по вступлению P -волны. Для этой ситуации рассчитывается начальное приближение для ТСМ. Затем по ТСМ рассчитываются теоретические сейсмограммы, определяются относительные сдвиги реальных и теоретических сейсмограмм с использованием функции взаимной корреляции, и ТСМ рассчитывается снова. Итерации повторяются до тех пор, пока относительная среднеквадратическая невязка теоретических и реальных сейсмограмм не стабилизируется.

Алгоритм расчета тензора сейсмического момента

Предполагаем, что тензор сейсмического момента \mathbf{M} с компонентами M_{ij} , ($i, j=1, 2, 3$) является симметричным ($M_{ji} = M_{ij}$) и удовлетворяет условию нулевого следа: $M_{11} + M_{22} + M_{33} = 0$.

Алгоритм расчета ТСМ состоит из трех шагов:

1. Подготовка исходных сейсмограмм и функций влияния, являющихся откликами на элементарные единичные диполи, соответствующие компонентам ТСМ.
2. Итерационный расчет оценки ТСМ для набора пробных глубин h и длительностей τ временной функции эквивалентного точечного источника.
3. Выбор наилучшего решения по критерию минимума относительной среднеквадратической невязки (ОСН).

На шаге 1 вычисляются эпицентральные расстояния, азимуты из эпицентра на сейсмические станции и обратные азимуты. Производится расчет смещений грунта и функций влияния для набора пробных глубин эквивалентного точечного источника, синхронизация времен вступления P -волн на записях смещений и на функциях влияния, полосовая фильтрация и выделение сегментов, по которым рассчитывается ТСМ.

На шаге 2 на каждой итерации используется процедура расчета ТСМ для случая, когда h , τ , а также относительные сдвиги реальных и теоретических сейсмограмм зафиксированы. Опишем эту процедуру.

Для расчета ТСМ на каждой итерации нужно решать систему, которая составляется из уравнений вида:

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}_i, k, t_j) \hat{\mathbf{M}} = b(\mathbf{x}_i, k, t_j) \quad (1)$$

где \mathbf{x}_i , ($i = 1, 2, \dots, N_s$) обозначает станцию, $k = r, \varphi, z$ – компонента записи (радиальная, трансверсальная и вертикальная), t_j , ($j = 1, 2, \dots, N_t(\mathbf{x}_i, k)$) – временные отсчеты, $b(\mathbf{x}_i, k, t_j)$ – амплитуда смещения грунта в заданной полосе частот. Вектор-столбец $\hat{\mathbf{M}}$ составлен из пяти компонент тензора M_{ij} , а именно: $\hat{\mathbf{M}} = (M_{11}, M_{12}, M_{13}, M_{22}, M_{23})^T$; символ «Т» обозначает транспонирование. Вектор-строка $\mathbf{G} = (F_{11} - F_{33}, F_{12}, F_{13}, F_{22} - F_{33}, F_{23})$ составлен из значений функций F_{ij} , представляющих собой свертку сдвинутых функций влияния с временной функцией источника. На первой итерации используются нулевые сдвиги. На остальных итерациях сдвиги определяются по функции взаимной корреляции реальных и теоретических сейсмограмм, рассчитанных по оценке ТСМ, полученной на предыдущей итерации.

Решение системы уравнений (1) находится путем минимизации ОСН:

$$\delta(h, \tau, i, \hat{\mathbf{M}}) = (\mathbf{G}\hat{\mathbf{M}} - \mathbf{V})^T (\mathbf{G}\hat{\mathbf{M}} - \mathbf{V}) / \mathbf{V}^T \mathbf{V} \times 100\%, \quad (2)$$

где $\mathbf{G} = \{\mathbf{g}\}$ – $N \times 5$ – матрица, $\mathbf{V} = \{b\}$ – $N \times 1$ – матрица, N – число уравнений вида (1), i – номер итерации. За оценку качества полученного решения принимаем относительную среднеквадратическую невязку $\delta(h, \tau, i, \hat{\mathbf{M}})$.

На шаге 3 производится выбор наилучшего решения $(h^*, \tau^*, \hat{\mathbf{M}}^*)$ по критерию минимума относительной среднеквадратической невязки:

$$(h^*, \tau^*, i^*) = \arg \min_{(h, \tau, i)} \delta(h, \tau, i, \hat{\mathbf{M}}), \quad \hat{\mathbf{M}}^* = \hat{\mathbf{M}}(h^*, \tau^*, i^*). \quad (3)$$

Вектор $\hat{\mathbf{M}}^*$ дает оценку для пяти компонент тензора \mathbf{M}^* . Шестая компонента M_{33} рассчитывается с использованием условия нулевого следа. Полученные шесть компонент полностью определяют тензор \mathbf{M}^* , поскольку он предполагается симметричным. По тензору \mathbf{M}^* производится расчет моментной магнитуды M_w :

$$M_w = (2/3) \log_{10}(M_0[\text{дин} \cdot \text{см}] - 10.7), \quad (4)$$

где $M_0 = (1/2)(M_3 - M_1)$; $M_3(M_1)$ – наибольшее (наименьшее) главное значение тензора \mathbf{M}^* .

В результате работы алгоритма определяются характеристики эквивалентного точечного источника: тензор сейсмического момента \mathbf{M}^* , моментная магнитуда M_w , глубина h^* и длительность τ^* временной функции.

Опробование алгоритма расчета тензора сейсмического момента

Для опробования алгоритма были отобраны 5 сильнейших землетрясений Дальнего Востока России: Шикотанское 4.11.1994 г. ($M_w = 8.3$), Кроноцкое 5.12.1997 г. ($M_w = 7.8$), Олюторское 20.04.2006 г., ($M_w = 7.6$), Симуширское 15.11.2006 г., ($M_w = 8.3$) и Симуширское землетрясение 13.01.2007 г., ($M_w = 8.1$).

Для каждого землетрясения использовались трехкомпонентные записи широкополосных станций Дальневосточного региона России и сопредельных с ним территорий (по 3 станции на каждое событие).

На рис. 1 показаны эпицентры землетрясений, их СМТ механизмы (<http://www.globalcmt.org/>) и положение использованных сейсмических станций.

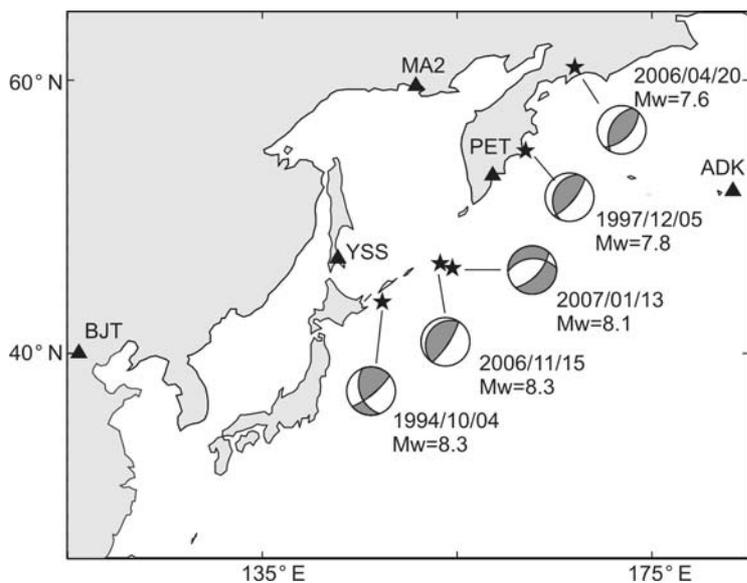


Рис. 1 – Карта с эпицентрами использованных землетрясений и сейсмическими станциями. Для каждого землетрясения приведены оценки моментных магнитуд M_w по данным глобального каталога СМТ и диаграммы механизмов ближайших к СМТ тензорам двойных диполей без момента. Здесь и ниже диаграммы механизмов показаны в стереографической проекции нижней полусферы.

Для расчета функций влияния использовали оригинальную эффективную методику, позволяющую синтезировать сейсмограммы от точечного силового диполя, размещенного в слоистом полупространстве [1, 6]. Скоростной разрез среды в виде трех слоев, лежащих на полупространстве, принят по модели IASPEI91 [4]. Для инверсии использовали реальные и теоретические сейсмограммы в полосе периодов 60-120 секунд. Использовались сегменты сейсмограмм, содержащие группы продольных, поперечных и поверхностных волн. Форма временной функции источника принята треугольной.

На рисунках 2-6 приведены зависимости механизмов, моментных магнитуд и длительностей временных функций от глубины эквивалентного точечного источника для 5 использованных землетрясений. Механизмы очагов оценивались по «ближайшему» к ТСМ двойному диполю без момента. Отклонение оценок ТСМ от двойного диполя без момента оценивали коэффициентом Лодена-Надаи $\mu = 2M_2 / (M_1 - M_3)$; $M_1 \geq M_2 \geq M_3$ – главные значения ТСМ. Для пяти использованных землетрясений получены следующие значения коэффициентов Лодена-Надаи: $\mu=3\%$ (Шикотанское 4.11.1994 г.), $\mu=6\%$ (Кроноцкое 5.12.1997 г.), $\mu=15\%$ (Олюторское 20.04.2006 г.), $\mu=28\%$ (Симуширское 15.11.2006 г.), $\mu=54\%$ (Симуширское 13.01.2007 г.). Заметим, что тензоры СМТ определяются, как и в настоящей работе, с условием нулевого следа, однако их отличие от наилучшего двойного диполя без момента для 5 использованных землетрясений не превышает 7%.

Анализ рисунков 2-6 показывает приемлемое согласие механизмов, глубин и длительностей, рассчитанных по разработанному алгоритму, и по каталогу СМТ. Оценки моментных магнитуд, за исключением Олюторского землетрясения 20.04.2006 г., оказались заниженными на 0.1-0.3 единицы относительно значений M_w , приведенных в глобальном каталоге СМТ.

Заключение

На основе оригинальной программы синтеза полных широкополосных теоретических сейсмограмм от импульсного точечного источника в плоскопараллельной среде, предложен алгоритм расчета тензора сейсмического момента для протяженного очага сильного землетрясения по широкополосным записям нескольких сейсмических станций на удалениях до 3000 км от эпицентра.

Работоспособность предложенного алгоритма проверена на примере 5 сильных ($M_w=7.6-8.3$) землетрясений Дальнего Востока России.

В ходе проверки рассчитан набор тензоров сейсмического момента, удовлетворяющих условию нулевого следа. Механизмы ближайших к рассчитанным тензорам двойных диполей, приемлемо согласуются с механизмами, полученными по тензорам СМТ. Отклонения рассчитанных тензоров от соответствующего наилучшего двойного диполя в 3 случаях из 5 заметно превышают аналогичные отклонения для тензоров, приведенных в глобальном каталоге СМТ. Целесообразно включить в алгоритм возможность расчета тензора сейсмического момента, удовлетворяющего условию двойного диполя без момента. Однако, это приведет к нелинейной задаче, что увеличит затраты компьютерного времени.

Шикотанское землетрясение 04.10.1994 г.; минимальная невязка 45.5 %

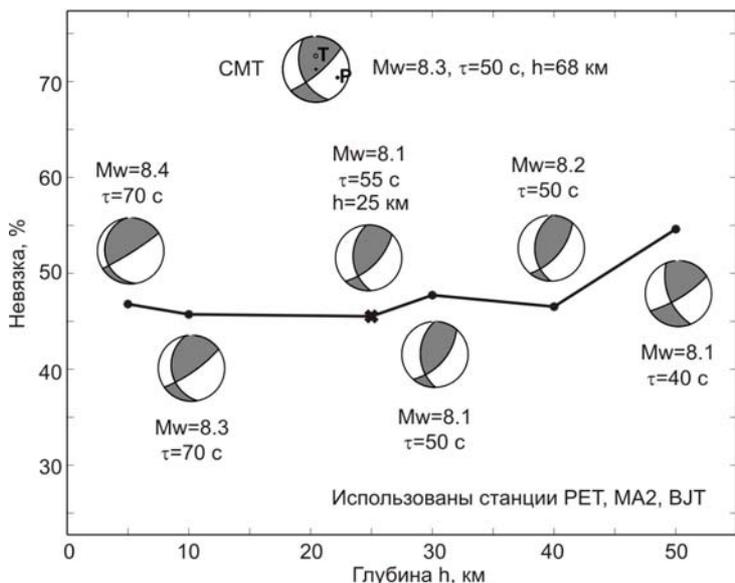


Рис. 2 – Зависимость параметров очага от глубины источника для Шикотанского землетрясения 04.10.1994 г. Ломаной линией показана зависимость относительной среднеквадратической невязки от пробной глубины h источника. Для набора значений h , отмеченного жирными точками, приведены оценки механизмов очага, моментных магнитуд M_w и длительностей τ временной функции источника (ВФИ). Крестиком отмечен минимум невязки, который достигается при $h=25$ км. Тензор, рассчитанный при этом значении h , принимается за окончательную оценку ТСМ. В верхней части рисунка для сравнения приведены механизм очага, моментная магнитуда, длительность ВФИ и глубина источника по данным каталога СМТ.

Кроноцкое землетрясение 05.12.1997 г.; минимальная невязка 31.8 %

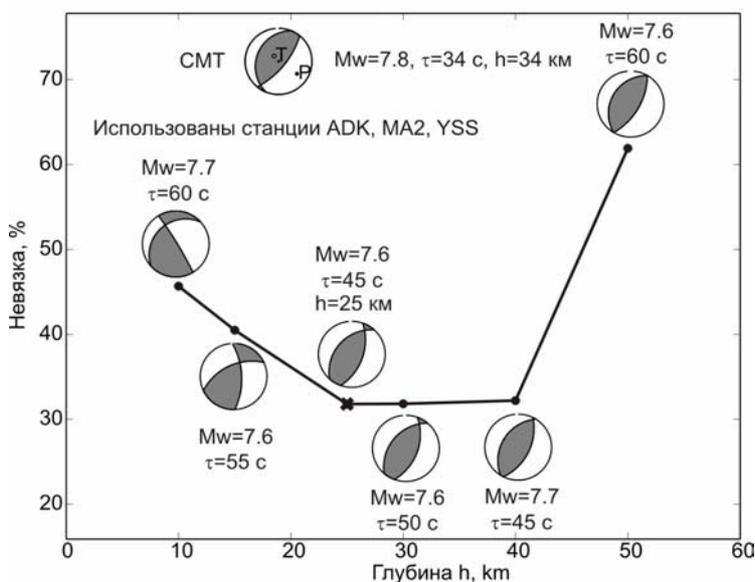


Рис. 3 – Зависимость параметров очага от глубины источника для Кроноцкого землетрясения 05.12.1997 г. Компонировка рисунка и обозначения такие же, как и на рис. 2.

Олюторское землетрясение 20.04.2006 г.; минимальная невязка 23.8 %

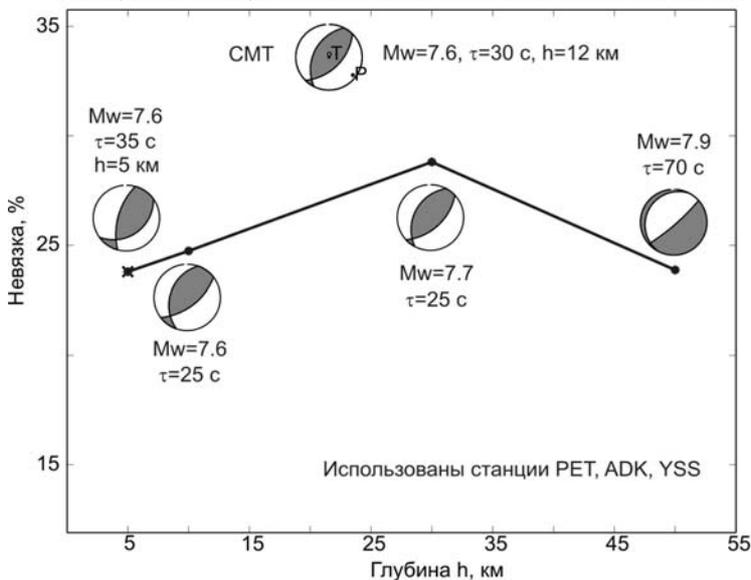


Рис. 4 – Зависимость параметров очага от глубины источника для Олюторского землетрясения 20.04.2006 г. Компонировка рисунка и обозначения такие же, как и на рис. 2.

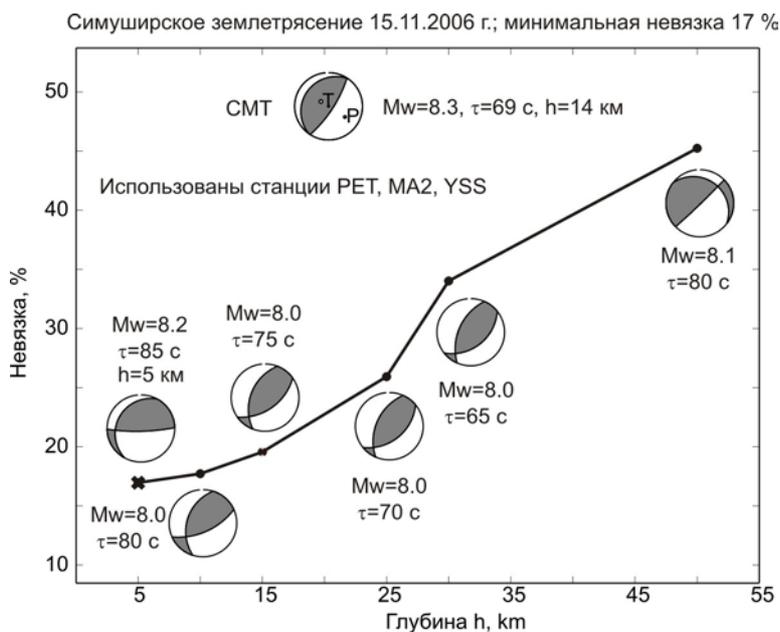


Рис. 5 – Зависимость параметров очага от глубины источника для Симуширского землетрясения 15.11.2006 г. Компонировка рисунка и обозначения такие же, как и на рис. 2.

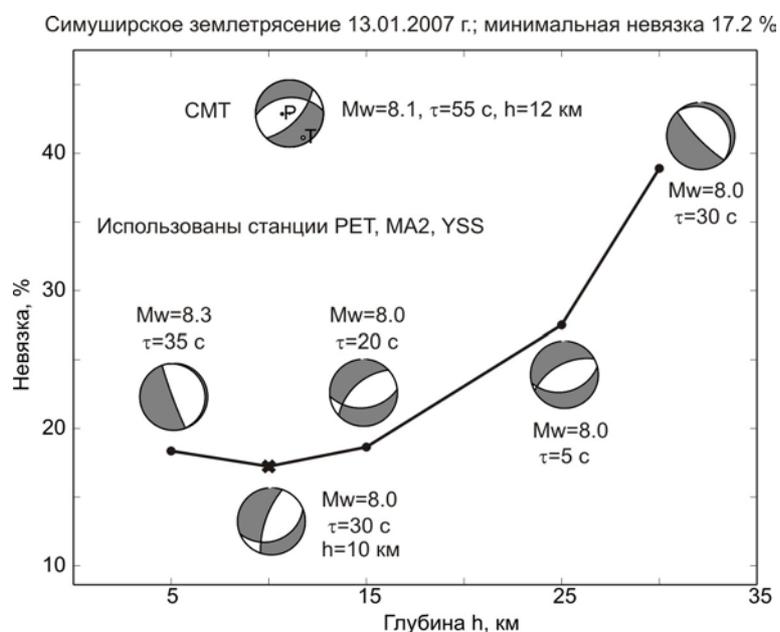


Рис. 6 Зависимость параметров очага от глубины источника для Симуширского землетрясения 13.01.2007 г. Компонировка рисунка и обозначения такие же, как и на рис. 2.

Полученные оценки моментных магнитуд занижены относительно значений M_w , приведенных в глобальном каталоге CMT, на 0.1-0.3 единицы. Это расхождение, вероятно, сохранится и при массовом применении разработанной методики. Дефицит магнитуды, вероятно, обусловлен ограничением рабочей полосы периодов со стороны длинных периодов.

Список литературы

1. Павлов В.М. Матричный импеданс в задаче расчета синтетических сейсмограмм в слоисто-однородной изотропной упругой среде // Физика Земли. 2009. № 10. С. 14-24.
2. Dziewonski, A., Chou, T.A., Woodhouse, J.H. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity // J. Geophys. Res. 1981. V. 86. P. 2825-2852.
3. Ekstrom G. A very broad band inversion method for recovery of earthquake source parameters // Tectonophysics. 1989. V. 166. P. 73-100.
4. Kennett B.L.N. (Ed.). IASPEI 1991 Seismological Tables // Research School of Earth Sciences, Australian National University. 1991. 167 pp.
5. Nakano, M., Kumagai, H., Inoue, H. Waveform inversion in the frequency domain for the simultaneous determination of earthquake source mechanism and moment function // Geophys. J. Int. 2008. V. 173. P. 1000-1011.
6. Pavlov V.M. A convenient technique for calculating synthetic seismograms in a layered half-space // Proceedings of the Intern. Conf. "Problems of Geocosmos". St. Petersburg: 2002. P. 320-323.