

УДК 550.34

МАССОВОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ОЧАГОВ КАМЧАТСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ 2014 г. ПО РЕГИОНАЛЬНЫМ ВОЛНОВЫМ ФОРМАМ

Абубакиров И.Р., Павлов В.М.

*Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН (КФ ФИЦ ЕГС РАН), г. Петропавловск-Камчатский,
air@emsd.ru*

Введение

Механизм очага является его базовой геометрической характеристикой, которая описывает взаимно-согласованную ориентацию двух возможных плоскостей разрыва и направление подвижки в них. Массовое определение механизмов землетрясений создает принципиальную возможность для детального изучения сеймотектонических процессов.

Расчет механизмов по сейсмическим данным традиционно проводится с использованием двух основных подходов: (1) по знакам первых вступлений объемных волн; и (2) путем инверсии широкополосных волновых форм в тензор сейсмического момента (ТСМ), объединяющий механизм очага и скалярный сейсмический момент M_0 , по которому определяется моментная магнитуда M_w [10]:

$$M_w = (2/3) \cdot (\lg M_0 / H \cdot m] - 9.1). \quad (1)$$

Подход (1) стал систематически использоваться для создания и пополнения каталога механизмов камчатских землетрясений, начиная с 1960-х гг.; краткий обзор ранних и современных работ на эту тему приведен в [3]. В настоящее время каталог механизмов по знакам первых вступлений¹ насчитывает 1360 событий Камчатки и Командорских островов периода 1964-2018 гг. с энергетическим классом по S -волне $K_s \geq 11.5$. До сих пор он остается наиболее полным однородным каталогом, характеризующим геометрию очагов камчатских землетрясений. Его основная проблема связана с достаточно часто возникающими ошибками в оценках полярности первых вступлений, которые ухудшают качество полученных индивидуальных решений; тем не менее, средние механизмы, построенные по группе событий, в большинстве случаев оказываются вполне приемлемыми и позволяют получить адекватное представление о сеймотектонических процессах [3].

Второй подход начал развиваться в КФ ФИЦ ЕГС РАН в 2010-х гг. после создания современной сети широкополосных станций [7] на Дальнем Востоке России в целом и на Камчатке в частности. Сначала был разработан и опробован алгоритм расчета ТСМ для сильных ($M_w > 7.5$) землетрясений по региональным волновым формам, зарегистрированным на эпицентральных расстояниях до 3000 км [5]. Позже адаптированная версия алгоритма стала использоваться для рутинного оперативного определения параметров очагов всех землетрясений из зоны ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН с $M_w \geq 6.5$, а также для отдельных камчатских землетрясений меньшей силы [6].

В данной работе предпринята попытка массового расчета ТСМ для всех землетрясений из зоны ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН за 2014 год с $K_s \geq 11.5$ (т.е. с тем же нижним предельным значением K_s , что и в каталоге механизмов по знакам вступлений). Качество полученных решений проверяли, используя выборку из 17 землетрясений, пересекающуюся с каталогом GCMT².

Исходные данные

Исходная выборка землетрясений для расчета ТСМ, насчитывающая 40 событий из зоны ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН с $K_s \geq 11.5$, сформирована на основе регионального каталога землетрясений Камчатки и Командорских островов³.

В качестве исходного наблюдательного материала для непосредственного расчета ТСМ использованы дата, время в очаге землетрясения и координаты эпицентра из регионального каталога землетрясений и широкополосные сейсмограммы из цифрового архива волновых форм КФ ФИЦ ЕГС

¹ Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, Каталог механизмов очагов землетрясений Камчатки и Командорских островов (<http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/mechanism.php>)

² The Global Centroid-Moment-Tensor Project (<https://www.globalcmt.org>)

³ Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов (<http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php>)

РАН [1, 8]. Архив волновых форм содержит материалы регистрации Камчатской региональной сети сейсмических станций, сейсмограммы станций специализированной сети Службы предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России и записи некоторых дальневосточных станций глобальной сейсмической сети GSN. Из архива отбирались трехкомпонентные широкополосные записи велосиметров (каналы ВН) в формате SEED, которые для дальнейшей обработки конвертировались в формат ASCII с помощью программы DIMAS [2]. В силу методических ограничений отбирались записи станций на эпицентральных расстояниях до 3000 км.

На этапе предварительной обработки набор данных, отобранный из архива, очищали, оставляя для инверсии записи с достаточно высоким отношением сигнал/шум и без признаков выхода за пределы динамического диапазона регистрирующей аппаратуры. С учетом этих требований к качеству исходных данных после предварительной обработки получили 336 трехкомпонентных записей с общим числом компонент 1008.

На этапе подготовки сейсмограмм для инверсии проводили деконволюцию в частотной области, расчет радиальной и поперечной компонент и поэтапное понижение частоты дискретизации до 1 Гц с использованием стандартного подхода – комбинации фильтров низких частот, подавляющих эффект наложения частот, и децимации.

В ходе инверсии были отбракованы записи 545 компонент, для которых не удалось добиться приемлемого согласия между наблюдаемыми и синтетическими волновыми формами. Для расчета TCM использовали записи оставшихся 653 компонент на 30 станциях. Число использованных станций для отдельных землетрясений варьирует от 4 до 18.

Методика определения TCM, механизмов и моментных магнитуд

Методика основана на минимизации скалярной функции невязки, которая является мерой расхождения между наблюдаемыми и синтетическими сейсмограммами. Невязка задана на множестве возможных точечных дипольных источников для дискретного набора глубин h и для дискретного набора длительностей τ временной функции источника (ВФИ). ВФИ представляет собой безразмерную нормированную функцию, равную нулю до момента t_0 зарождения разрыва и единице после окончания его формирования в момент $t_0 + \tau$, где τ – длительность ВФИ. Для решения задачи минимизации невязки при фиксированных значениях h и τ используется метод наименьших квадратов. Минимизация по h и τ осуществляется перебором. Относительно географических координат источника предполагается, что они совпадают с заранее известными координатами эпицентра.

Методика предусматривает две возможные модели источника: 1) симметричный TCM с нулевым следом – NT (Null Trace tensor), 2) тензор двойного диполя без момента – DC (Double Couple tensor). В первой модели механизм очага задается параметрами двойного диполя, который конструируется по TCM [9]; отклонение TCM от двойного диполя характеризуется коэффициентом Лоде-Надаи $\eta = (2M_2 - M_1 - M_3)/(M_1 - M_3)$, где M_1, M_2, M_3 ($M_1 \geq M_2 \geq M_3$) – главные значения TCM. Во второй модели двойной диполь и, соответственно механизм, непосредственно определяются по волновым формам [11]. Скалярный сейсмический момент для обеих моделей рассчитывается по формуле $M_0 = (M_1 - M_3)/2$, а моментная магнитуда M_w – по формуле (1).

При практической реализации методики использовали алгоритм [5, 6], позволяющий одновременно с TCM оценить глубину h эквивалентного точечного источника, а в случае достаточно сильных землетрясений и длительность τ его временной функции, поскольку в этом случае конечная длительность ВФИ существенным образом влияет на амплитуду и форму синтетических сейсмограмм. Синтетические сейсмограммы рассчитывали с частотой дискретизации 1 Гц на основе заранее подготовленных функций влияния – откликов слоисто-однородного изотропного полупространства на размещенные в нем элементарные источники, соответствующие единичным компонентам TCM. Функции влияния вычисляли для модели среды, состоящей из 16 слоев, лежащих на подстилающем полупространстве, используя алгоритм, представленный в работе [4]. Параметры слоев и полупространства задавали в соответствии со слоисто-однородной сферической континентальной моделью Земли AK135-F⁴. Эта модель получена из исходной средней сферической модели ak135-f⁵ в результате следующих операций:

верхние 120 км разреза замещены континентальной структурой;

⁴ http://www.eas.slu.edu/eqc/eqc_cps/TUTORIAL/SPHERICITY/AK135/tak135sph.mod

⁵ <http://rses.anu.edu.au/seismology/ak135/ak135f.html>

- величины $Q(\kappa_{pp})$, $Q(\mu)$ пересчитаны в значения добротностей $Q(P)$ и $Q(S)$ для продольных и поперечных волн;
- слои с градиентами скорости конвертированы в слои с постоянной скоростью, которая рассчитывалась как величина, обратная среднему значению медленностей для глубин, соответствующих кровле и подошве слоя.

Расчет ТСМ для моделей NT и DC проводили по фрагментам записей, содержащим группы объемных и поверхностных волн, используя итерационный подход. На каждой итерации, по мере необходимости, корректировали полосу периодов для полосовой фильтрации наблюдаемых и синтетических сейсмограмм на отдельных станциях, положение и длительность фрагментов записей для отдельных компонент или станций, а также браковали компоненты или станции, для которых согласие между наблюдаемыми и синтетическими волновыми формами было сочтено неудовлетворительным. Для полосовой фильтрации использовали фильтр Баттерворта 4-го порядка. Полосу периодов фильтра варьировали на отдельных станциях от 16–40 с до 40–100 с исходя из фактического отношения сигнал/шум, силы землетрясения и эпицентрального расстояния.

Результаты и их обсуждение

Оценки ТСМ и h получены для 36 землетрясений в диапазоне $K_S = 11.5–13.9$ ($M_w = 4.3–5.8$). Значение длительности τ не удалось оценить ни для одного из обработанных событий. Во всех случаях наилучшее согласие между реальными и синтетическими волновыми формами достигается при использовании модели мгновенного источника. Иначе говоря, значение τ во всех случаях оказалось равным нулю. В то же время, ожидаемые значения длительности τ_e для диапазона $M_w = 4.3–5.8$, вычисленные по корреляционной формуле $\tau_e = 2.1 \cdot (M_0[H \cdot м] \cdot 10^{-17})^{1/3}$ [9], находятся в интервале $\tau_e = 0.7–3.8$ секунд. Наблюдаемое расхождение в оценках τ и τ_e обусловлено тем обстоятельством, что применяемый нами подход не позволяет уверенно оценить величину τ в случае слабых и умеренной силы землетрясений, поскольку амплитуда и форма синтетических сейсмограмм в использованном диапазоне периодов от 16 с до 100 с слабо зависят от длительности ВФИ при малых значениях τ .

Для 4 землетрясений с $K_S = 11.6–12.0$ получить оценки ТСМ и h не удалось. Одно из этих событий относится к Командорскому сегменту Алеутской островной дуги, остальные – к южному сегменту сейсмофокальной зоны Камчатки. Для обоих сегментов действующая в настоящее время на Камчатке сеть широкополосных сейсмических станций не обеспечивает приемлемого азимутального покрытия. Поэтому достаточно надежные оценки механизмов для этих сегментов удастся построить лишь в отдельных случаях, когда в дополнение к волновым формам камчатских станций имеются записи нескольких дальневосточных станций с хорошим отношением сигнал/шум.

По результатам проведенных расчетов составлены каталоги механизмов для моделей NT и DC. Для каждого события в каталогах приведены следующие параметры: дата и время в очаге; координаты эпицентра и глубина гипоцентра; энергетический класс K_S ; угол наклона и азимут главных осей; углы, задающие ориентацию нодальных плоскостей и векторов подвижек; глубина h эквивалентного точечного источника, длительность τ ВФИ; скалярный сейсмический момент M_0 ; моментная магнитуда M_w ; число компонент, использованных в расчете; число станций, участвующих в расчете; коэффициент Лодэ-Надаи η ; остаточная невязка (минимальное значение функции невязки).

На рис. 1 представлена карта с механизмами, рассчитанными для модели DC (результаты для модели NT отличаются несущественно), вместе с эпицентрами землетрясений и частью использованных сейсмических станций.

Качество полученных оценок механизмов, моментных магнитуд и глубин проверяли, сопоставляя их с аналогичными оценками из каталога GCMT. Такое сопоставление удалось провести для 17 землетрясений из 36. Остальные 19 событий в каталоге GCMT отсутствуют.

При сопоставлении механизмов в качестве информативного параметра использовали величину наименьшего угла, на который нужно повернуть оси одного механизма, чтобы совместить их с соответствующими осями другого [12]. Гистограмма и эмпирическая функция распределения этого угла, обозначенного через K , и имеющего диапазон возможных значений от 0° до 120° , приведены для модели DC на рис 2. Как видно из рисунка, в 14 случаях из 17 угол K не превосходит 15° , что говорит о хорошем согласии рассчитанных механизмов с данными каталога GCMT; максимальное значение K равно 27° . Для модели NT наблюдается схожая картина; максимальное значение K в этом случае составляет 24° .

На рис. 3 приведено сопоставление полученных оценок M_w и h с аналогичными оценками из каталога GCMT. Этот рисунок демонстрирует наличие устойчивой корреляции между парами величин M_w , $M_w(\text{GCMT})$ и h , $h(\text{GCMT})$, а также незначительное систематическое смещение. Средние значения разности между нашими оценками M_w и $M_w(\text{GCMT})$ для моделей NT и DC составили -0.05 и -0.07, соответственно; стандартные отклонения для обеих моделей равны 0.06. Среднее значение разности $h - h(\text{GCMT})$ для моделей NT и DC составили -6 км и -7 км, соответственно; стандартные отклонения разностей для обеих моделей равны 7 км.

Заключение

Разработан предварительный вариант программного обеспечения для массового определения тензора сейсмического момента землетрясений из зоны ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН по широкополосным сейсмограммам дальневосточных станций.

Разработанное программное обеспечение позволяет проводить массовый расчет ТСМ землетрясений с $K_S \geq 11.5$ для большей части зоны ответственности. К проблемным районам относятся Командорский сегмент Алеутской островной дуги и южный сегмент сейсмофокальной зоны Камчатки. Для слабых и умеренных землетрясений из этих районов получить надежные оценки параметров очага удастся лишь в отдельных случаях, когда в дополнение к волновым формам камчатских станций имеются записи нескольких дальневосточных станций с хорошим отношением сигнал/шум.

Проведен массовый расчет ТСМ для землетрясений 2014 г. из зоны ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН с $K_S \geq 11.5$. По результатам расчетов составлен каталог механизмов. Тем самым, заложена основа для создания однородного каталога механизмов землетрясений Камчатки и Командорских островов с $K_S \geq 11.5$ по региональным широкополосным волновым формам.

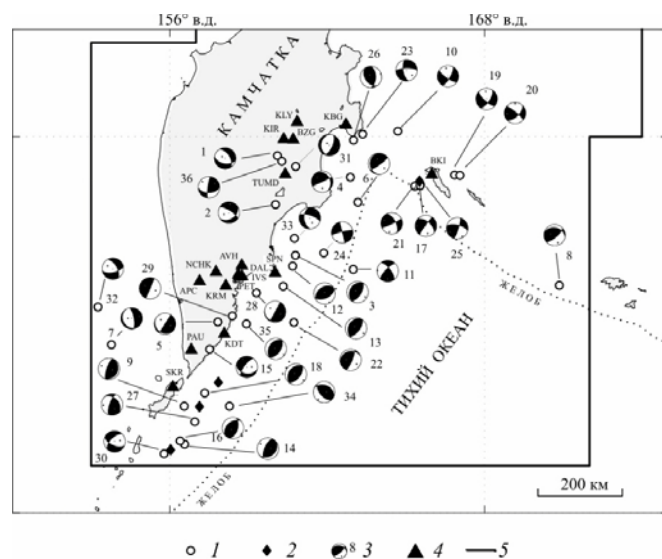


Рис. 1. Карта механизмов и эпицентров землетрясений Камчатки и Командорских островов с $K_S \geq 11.5$ за 2014 г. вместе с сейсмическими станциями, записи которых использованы при расчете механизмов (показаны лишь те станции, которые расположены в пределах показанного на карте региона).

1 – эпицентры землетрясений, для которых определены механизмы;
2 – эпицентры землетрясений, для которых рассчитать механизм не удалось;
3 – диаграмма механизма в равноплощадной проекции нижней полусферы;
4 – сейсмические станции;
5 – границы зоны ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН.

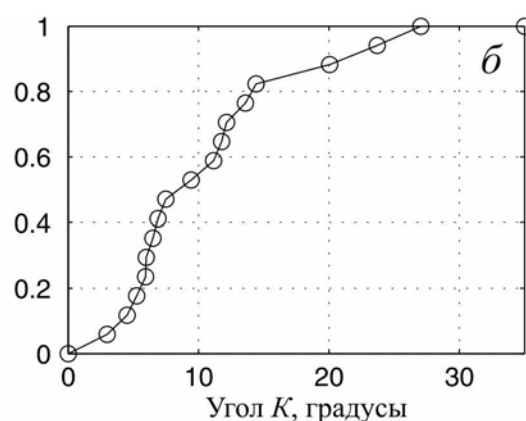
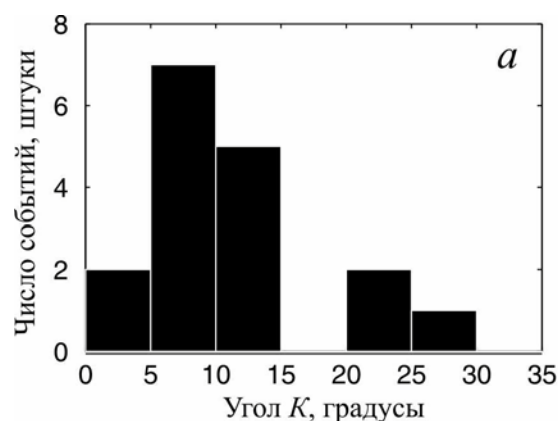


Рис. 2. Гистограмма (а) и эмпирическая функция распределения (б) угла K .

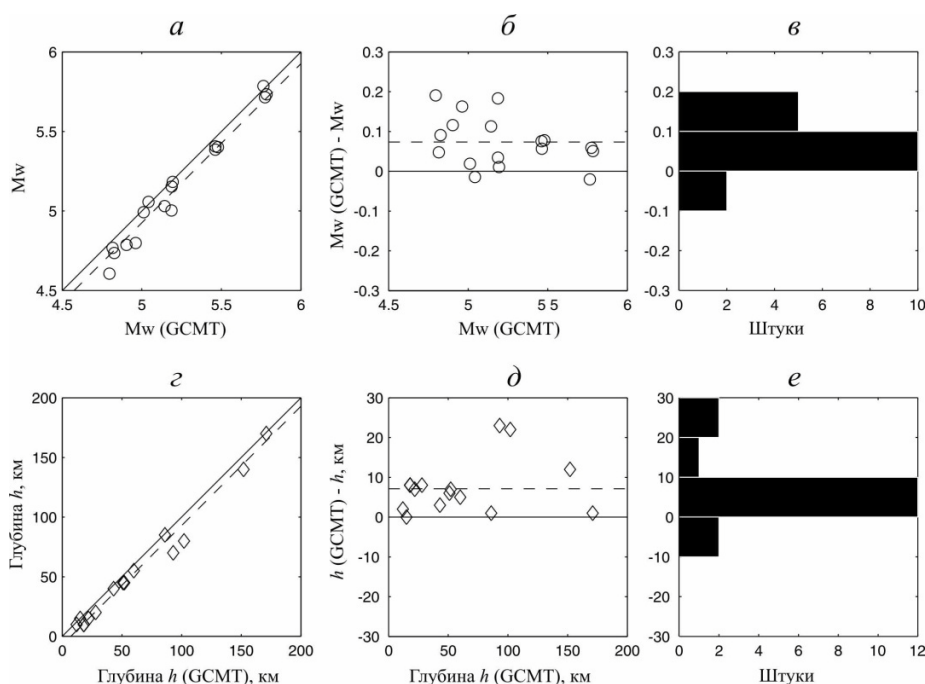


Рис. 3. Сопоставление полученных оценок моментной магнитуды M_w (а) и глубины h (д) с аналогичными оценками из каталога GCMT. На панели б приведена зависимость разности $\delta M_w = M_w(\text{GCMT}) - M_w$ от M_w из каталога GCMT, на панели в – гистограмма δM_w ; на панелях д и е – аналогичные графики для разности глубин $\delta h = h(\text{GCMT}) - h$. Сплошные линии на панелях а–д – прямые, для точек которых два типа оценок совпадают; штриховые – линии регрессии с угловым коэффициентом $\beta=1$ (а, д) и $\beta=0$ (б, е).

Список литературы

1. Бахтиярова Г.М. Цифровой архив региональных станций Камчатского филиала ГС РАН. // Геофизический мониторинг Камчатки. Материалы научно-технической конференции 17-18 января 2006 г. Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2006. С. 29–31.
2. Дроздин Д.В., Дроздина С.Я. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46. № 3. С. 22–34.
3. Иванова Е.И., Ландер А.В., Токарев А.В., Чеброва А.Ю., Шевченко С.А. Каталог механизмов очагов землетрясений Камчатки и Командорских островов за период 1980–2007 гг. // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды третьей научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 9–15 октября 2011 г. – Обнинск: ГС РАН, 2011. С. 74–79.
4. Павлов В.М. Алгоритмы расчета синтетических сейсмограмм от дипольного источника с использованием производных функций Грина // Физика Земли. 2017. № 4. С. 67–75.
5. Павлов В.М., Абубакиров И.Р. Алгоритм расчета тензора сейсмического момента сильных землетрясений по региональным широкополосным сейсмограммам объемных волн // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2012. №. 2. С. 149–158.
6. Павлов В.М., Абубакиров И.Р. Расчет тензора сейсмического момента слабых камчатских землетрясений: первые результаты // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды шестой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 1–7 октября 2017 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. С. 138–142.
7. Чебров В.Н., Дроздин Д.В., Кугаенко Ю.А., Левина В.И., Сеньюков С.Л., Сергеев В.А., Шевченко Ю.В., Яцук В.В. Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. №1. С. 18–40.
8. Чемарёв А.С., Токарев А.В. Подсистема ЕИС для формирования и хранения волновых форм землетрясений // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Четвертой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября – 5 октября 2013 г. – Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 359–361.
9. Ekström G., Nettles M., Dziewoński A.M. The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2012. V. 200–201. P. 1–9.
10. Hanks T.C., Kanamori H. A moment magnitude scale // Journal of Geophysical Research. 1979. V. 84. No. B5. P. 2348–2350.
11. Henry C., Woodhouse J.H., Das S. Stability of earthquake moment tensor inversions: effect of the double-couple constraint // Tectonophysics. 2002. T. 356. No. 1–3. С. 115–124.
12. Kagan Y.Y. Simplified algorithms for calculating double-couple rotation // Geophysical Journal International. 2007. V. 171. No. 1. P. 411–418.