

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММЫ ISOLA ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕНЗОРА
СЕЙСМИЧЕСКОГО МОМЕНТА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КУРИЛО-ОХОТСКОГО И
САХАЛИНСКОГО РЕГИОНОВ

Д.А. Сафонов^{1,2}, А.В. Коновалов¹

¹ФГБУН Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, ул. Науки 1Б, г. Южно-Сахалинск, 693022;
e-mail: a.konov@imgg.ru

²Сахалинский филиал ФГБУН ФИЦ Геофизической службы РАН, ул. Тихоокеанская 2А, г. Южно-Сахалинск,
693010; e-mail: d.safonov@imgg.ru

Поступила в редакцию 22 сентября 2015 г.

Работа содержит анализ применения программы ISOLA для массового определения тензоров сейсмического момента землетрясений Курило-Охотского и Сахалинского регионов. Выполнено сопоставление результатов определений с альтернативными вариантами оценок механизма очага и тензора сейсмического момента, полученными региональными и глобальными агентствами. Приводится оценка нижней границы применимости метода в региональных условиях юга Дальневосточного региона России.

Ключевые слова: тензор момента очага землетрясений, механизм очага землетрясений, Курило-Охотский регион, Сахалин.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время тензор сейсмического момента (СМТ – Centroid Moment Tensor) землетрясений приобрел широкое распространение в каталогах сейсмологической информации. Параметры тензора момента для сильных землетрясений определяются после оценок координат эпицентра, глубины и магнитуды события. СМТ содержит информацию об ориентации плоскости разрыва, направлении и масштабе подвижки в очаге землетрясения, отражает напряженно-деформированное состояние среды.

Наиболее распространенный метод определения СМТ – метод инверсии волновых форм. Наиболее известные и актуальные для территории Дальнего Востока России агентства, использующие данный метод для массового определения параметров механизмов землетрясений, GlobalCMT project (<http://www.globalcmt.org>) [13], определяющее СМТ землетрясений всей планеты с магнитуды $M \geq 5.0$, и агентство NIED (<http://www.fnet.bosai.go.jp>), определяющее СМТ землетрясений Японии и прилегающей территории с магнитудой $M \geq 3.5$, включая территорию южной части российского Дальнего Востока до 50° с.ш.

В России, включая Дальний Восток, интенсивно развивается сеть широкополосных сейсмических станций, что позволяет в перспективе ввести определение СМТ в практику рутинных определений пара-

метров землетрясений. Ряд исследователей занимается разработкой отечественных методик определения СМТ [2, 6]. Однако в настоящий момент проблема массового рутинного определения тензора сейсмического момента в России не решена.

Значительную известность в последние годы получил пакет программ ISOLA, разработанный доктором Е. Сокосом (Е. Sokos, University of Patras, Греция) и профессором Дж. Заградником (J. Zahradnik, Charles University, Прага, Чехия) [17, 18]. Алгоритм ISOLA, написанный на Фортране, получил удобный пользовательский интерфейс ISOLA-GUI, реализованный с использованием библиотек Matlab. Программный пакет свободно распространяется через интернет и внедряется авторами в ходе ознакомительных школ-тренингов, проводимых в разных странах (<http://seismo.geology.upatras.gr/isola>). Алгоритм позволяет методом инверсии записей землетрясений определить полный тензор момента очага, уточнить глубину и положение центра модельного центроида. ISOLA с 2012 г. применяется для расчета тензора сейсмического момента региональных землетрясений в ИМГиГ ДВО РАН.

ОПИСАНИЕ ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА

ISOLA-GUI – это графический интерфейс, разработанный в программной среде Matlab, позволяющий совместить скорость обработки программ-

ных алгоритмов ISOLA, написанных на Фортране, с удобным интерфейсом Матлаба. Особенностью ISOLA-GUI является эффективная обработка данных, интерактивное управление процессом поиска решения и широкие возможности графического отображения результатов. Свежие версии программы свободно распространяются через интернет (<http://seismo.geology.upatras.gr/isola>).

Метод определения тензора момента основывается на поиске оптимального совпадения синтетических волновых форм, рассчитанных методом функции Грина в предположении шести базовых источников, с реальными сейсмограммами, отфильтрованными в низкочастотном диапазоне. Метод итеративной деконволюции описан в [14], хотя в случае ISOLA есть отличие в наборе базовых источников. Положение центра центроида и времени t_0 уточняется методом поиска на сетке. Детальное описание методики приведено в [15].

Программа позволяет рассчитать полный тензор момента землетрясения, однако авторы рекомендуют ограничиваться девиаторной частью, как более стабильной. Показателем оптимальности решения служит параметр уменьшения дисперсии (Variance Reduction, Vr), отражающий сходимость реальной и синтетической волновых форм и имеющий смысл квадрата коэффициента корреляции. В версии 2013 г. [18] были добавлены дополнительные параметры оценки качества решения: Condition Number (CN), отражающий надежность инверсии с точки зрения конфигурации сети станций относительно очага, диапазона частот, используемой модели коры; Focal-Mechanism Variability Index (FMVAR) – показатель изменчивости решения в зависимости от координат и времени источника, представляет собой угол (k-angle) между лучшим и крайним допустимым решением внутри установленного диапазона корреляции, размер диапазона задан в 90 % от максимальной корреляции, но может изменяться. Space-Time Variability Index (STVAR) – показывает относительный размер области пространства-времени заданного диапазона корреляции, независимо от изменения СМТ. Качество полученного решения возможно оценить по совокупности этих параметров. Дополнительным критерием оценки качества может служить относительная величина двухдипольной компоненты решения DC, чаще ее величина ближе к 100 %, и отклонения свидетельствуют о некорректном положении центра искомого центроида, особенно по глубине [15], либо о других проблемах полученного решения, хотя возможны и естественные причины уменьшения величины DC, как, например, в случае вулканических землетрясений. Помимо использования расчетных коэффициентов оператор имеет возможность самостоятельно «на глаз» сопо-

ставить синтетические и реальные волновые формы, часто такой метод оценки качества получаемого решения оказывается наиболее оправданным.

Помимо шести компонент тензора неизвестными при поиске являются параметры центроида – координаты центра, глубина и время, определяемые относительно заданных стартовых величин. При необходимости алгоритмы ISOLA позволяют фиксировать эти параметры (вместе либо по-отдельности) либо уточнять при заданном механизме очага.

Важным входным параметром программы является одномерная дискретная скоростная модель строения геологической среды, тем сильнее влияющая на качество решения, чем более близкое и слабое землетрясение рассматривается. В версии ISOLA-GUI (2013) возможно использование нескольких скоростных моделей для различных сейсмостанций в случае сложного строения исследуемого региона.

Другими необходимыми данными являются координаты и калибровочные параметры сейсмических станций, записи которых используются для инверсии.

Основным управляющим параметром поиска оптимального решения, доступным оператору, служит диапазон частот фильтрации волновых форм, зависящий от множества факторов: магнитуды, глубины, удаленности гипоцентра землетрясения, относительного положения сейсмостанций, амплитудно-частотного уровня сейсмических помех. Помимо этого необходим подбор оптимального числа волновых форм, на которых землетрясение записано наилучшим образом, а также шага поиска решения по времени и координатной сетке.

РЕГИОНАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ

В настоящей статье рассматривается применение ISOLA для расчета тензора момента землетрясений южной части российского Дальнего Востока – территории Курильских островов, о. Сахалин и Приморья, примерно совпадающей с зоной ответственности Сахалинского филиала Геофизической службы РАН (рис. 1).

Для инверсии волновых форм, реализованной в программе ISOLA, необходимы записи сейсмоприемников, способных регистрировать без существенных искажений колебания земной поверхности в интервале частот 0.005–0.2 Гц, с такой задачей в Сахалинском и Курило-Охотском регионах справляются датчики STS-1, STS-2 и RefTek 151-120. Датчики Guralp CMG-6TD, установленные в большей части пунктов наблюдения СФ ГС РАН, работают в диапазоне от 0.03 Гц и потому не всегда записывают необходимые частоты, однако с некоторой осторожностью также могут быть использованы. В отдельных случаях для близких слабых землетрясений оказалось возможным

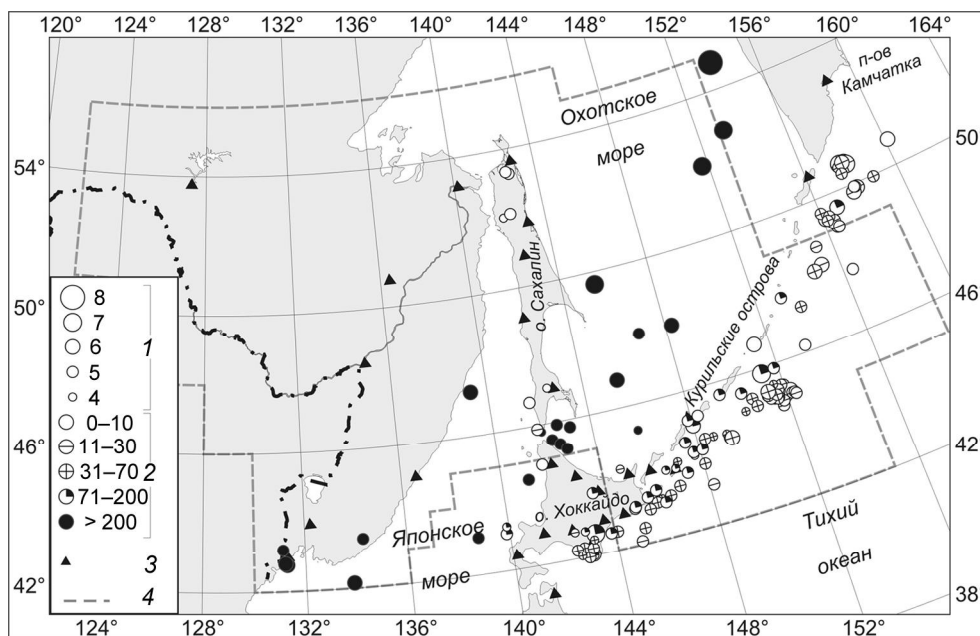


Рис. 1. Карта южной части Дальневосточного региона России. Показаны эпицентры землетрясений 2012–2013 гг., для которых определен тензор сейсмического момента с использованием ISOLA.

1 – магнитуда землетрясений; 2 – глубина центраида; 3 – широкополосные сейсмостанции, записи которых использовались для расчетов; 4 – граница зоны ответственности СФ ГС РАН.

использование записей короткопериодных сейсмографов LE-3DLite, действующих на севере о. Сахалин. Наиболее плотная сеть широкополосных сейсмостанций в рассматриваемом регионе расположена на о. Хоккайдо (Япония). Агентство NIED предоставляет возможность получить записи станций F-Net, хорошо подходящих для СМТ-метода (поскольку для этого сеть станций и применяется в NIED). Для сильных землетрясений региона также возможно использование записей станций международной сейсмологической сети GSN, предоставляемых интернет-сервисами IRIS/USGS (<http://ds.iris.edu/forms/webrequest/>).

В Сахалинском и Курило-Охотском регионах оптимальным условиям для использования метода инверсии отвечают районы Южных Курил (наличие трех широкополосных сейсмостанций СФ ГС РАН и большого числа станций на соседних островах Японии), Центрального и Северного Сахалина (сеть СФ ГС РАН, с учетом новых станций ДВО РАН [12], и короткопериодная сеть ИМГиГ ДВО РАН [11]). На остальной территории применимость методики зависит от каждого конкретного случая. Сильные землетрясения ($M \geq 6.0$), уверенно регистрируемые всеми станциями региона, в большинстве случаев могут быть успешно обработаны. Менее сильные события ($M \geq 5.0$) чаще всего достаточно хорошо записываются ближайшими сейсмостанциями и также могут быть обработаны. Для слабых событий ($M \leq 4.5$) даже в наиболее оп-

тимальных существующих условиях регистрации не всегда удастся получить надежное решение.

Настоящая версия ISOLA-GUI (2013) использует в расчетах одномерную скоростную модель строения земной коры и мантии. Количество слоев модели может достигать 15, однако настолько усложнять расчеты обычно не имеет смысла, поскольку тонкая структура коры длинноволновым излучением в дальней зоне игнорируется, в то время как излишняя детальность значительно замедляет расчеты. Первоначально в качестве базовой для региона использовалась модель, применяемая для территории Японии агентством NIED [16], это имеет смысл, поскольку регион Японии геологически сходен с Сахалинским регионом и имеет много общего с Курило-Охотским. Модель насчитывает 8 слоев до глубины в 725 км (рис. 2).

Для Сахалинского региона также были составлены комбинированные модели, основанные на локальных скоростных разрезах коры отдельно для юга [4] и севера [11] острова в верхней коровой части модели (до 40 км) и модели NIED для мантийной части. Однако пока нельзя однозначно утверждать, что применение этих разрезов дает преимущество при определении СМТ локальных событий перед разрезом NIED. Для землетрясений умеренной магнитуды более простая модель NIED дает более устойчивые результаты, для слабых землетрясений ($M < 4.5$) результаты счета с использованием трех этих моделей неустойчивы.

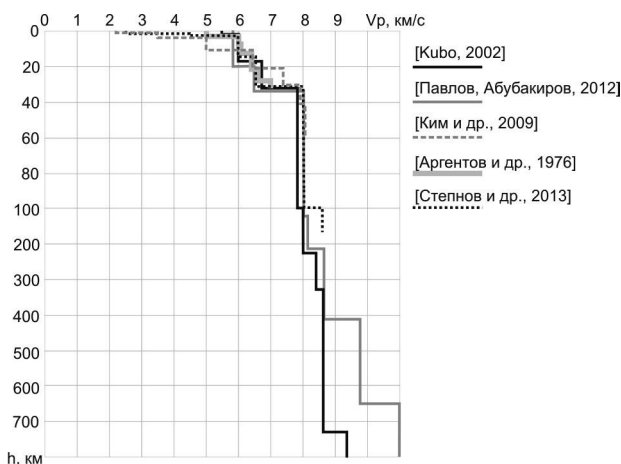


Рис. 2. Скоростные модели земной коры и верхней мантии, использованные в ISOLA.

Для коровых землетрясений Приморья планируется использовать скоростную модель из монографии [1], однако ввиду отсутствия в последние годы значительных событий в этом районе испытать модель пока не представилось случая. Для Курильских островов и глубокофокусных землетрясений Охотского моря была опробована упрощенная модель на базе АК135, рекомендованная в работе [6]. Результаты расчетов оказались практически идентичны получаемым с использованием модели NIED, в большинстве случаев незначительно уступая им по показателю V_r .

ПРИМЕНЕНИЕ

Апробация программы ISOLA проводилась в 2012–2015 гг. в несколько этапов. В 2012 г. основной целью ставилось освоение методики, уточнение калибровочных характеристик региональных станций, подбор скоростной модели. В этот период были определены с использованием записей телесеизмических сейсмостанций параметры СМТ некоторых наиболее сильных землетрясений Дальневосточного региона 2006–2012 г., включая землетрясение Тохоку 11 марта 2011 г. ($M_w = 9.0$). В 2013–2014 гг. проводилась отработка массового определения параметров тензора момента землетрясений Курило-Охотского региона, произошедших в 2012–2013 гг., получен каталог тензора сейсмического момента 43 землетрясений в 2012 г. и 107 землетрясений в 2013, более сейсмически активном году (рис. 1). Полученные решения сопоставлялись с данными GlobalCMT и результатами независимого определения механизмов землетрясений методом полярности первых вступлений по данным СФ ГС РАН [8]. В 2014 г. в ИМГиГ ДВО РАН была проведена работа по расчету механизмов очага умеренно-сильных ($M = 4.1–5.1$) землетрясений о. Сахалин, произо-

шедших в 2006–2014 гг., параллельно и независимо методом полярности первых вступлений с привлечением знаков в S -волне и с помощью ISOLA. Сравнение показало некоторые различия в полученных результатах, впрочем, укладывающиеся в пределы возможной погрешности [9]. В 2015 г. продолжена работа по составлению СМТ каталога землетрясений Сахалинского и Курило-Охотского региона за 2014–2015 г., определены тензоры момента еще 112 землетрясений.

В большинстве случаев проводилось определение девиаторной компоненты тензора момента землетрясений, как рекомендовано авторами программного комплекса, определение полного тензора момента осуществлялось для некоторых наиболее устойчивых решений.

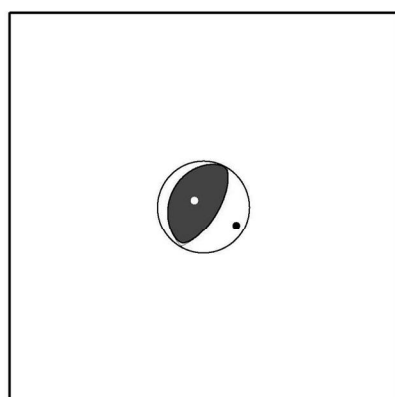
К моменту написания данного материала с использованием ISOLA в ИМГиГ ДВО РАН получены тензоры момента более 270 землетрясений. Каталог механизмов очагов землетрясений Курило-Охотского и Сахалинского регионов планируется опубликовать на сайте ИМГиГ ДВО РАН в рамках развиваемого сейсмологического сервиса (<http://imgg.ru/ru/srss>) совместно с малым инновационным предприятием Института ООО «ГЕОФИЗТЕХ». Каталог за 2012–2013 гг. опубликован в ежегоднике «Землетрясения России» [3], каталог за 2014 г. также находится в печати.

ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ ISOLA

На рис. 3 показан пример файла-отчета о работе ISOLA-GUI (2013). Представлен результат расчета СМТ землетрясения, произошедшего 9 января 2014 г. у побережья Хоккайдо. Это умеренно-сильное землетрясение ($M_w = 4.7$) оказалось успешно записано станциями Хоккайдо и Южных Курил. Результат обработки характеризуется хорошим значением контрольных параметров $V_r = 93$, $FMVAR = 9$, $STVAR = 0.27$. Расчет производился по записям шести трехкомпонентных сейсмостанций Хоккайдо, из которых для итогового решения были задействованы три ближайших (рис. 4). Данное землетрясение было также обработано GlobalCMT и NIED, сравнение результатов представлено в табл. 1.

Можно отметить расхождение значений глубины очага, взятой из оперативного каталога СФ ГС РАН и полученного при вычислении СМТ, разница составила 29 км. Однако значительного расхождения во времени между расчетным и взятым из того же каталога не возникло, отставание расчетного среднего времени центра в диапазоне одной секунды от t_0 вполне характерно для землетрясений подобной магнитуды.

Для решения использовались записи трех ближайших сейсмостанций, обычно таким образом удает-

**MOMENT TENSOR SOLUTION****H Y P O C E N T E R L O C A T I O N**
(SBGS-oper)Origin time 20140109 04:31:55.20
Lat 42.06 Lon 142.65 Depth 83**CENTROID**

Trial source number : 8 (Fixed Epicenter inversion)

Centroid Lat (N)42.06 Lon (E)142.65

Centroid Depth (km) : 54

Centroid time : +0.72 (sec) relative to origin time

Moment (Nm) : 1.632e+016

Mw : 4.7

VOL% :0

DC% :97.7

CLVD% :2.3

Var.red. : (for stations used in inversion):0.93 SNR NaN CN 3.9 FMVAR 9±5 STVAR 0.27

Var.red. (for all stations) :0.79

Strike Dip Rake | Frequency band used in inversion (Hz)

204 25 84 | 0.03 - 0.04 -- 0.09 - 0.095

Strike Dip Rake |

31 65 93 |

P-axis Azimuth Plunge | Stations-Components Used-Distance

119 20 | NS EW Z D(km)

KMU + + + 33

T-axis Azimuth Plunge | HID + + + 87

306 70 | URH + + + 128

HSS - - - 154

1.245 -0.271 -0.974 | IMG - - - 210

Mrt Mrp Mtp | YUK - - - 341

0.574 0.895 -0.496

Exponent (Nm): 16

Рис. 3. Пример результата работы ISOLA-GUI, файл отчета.

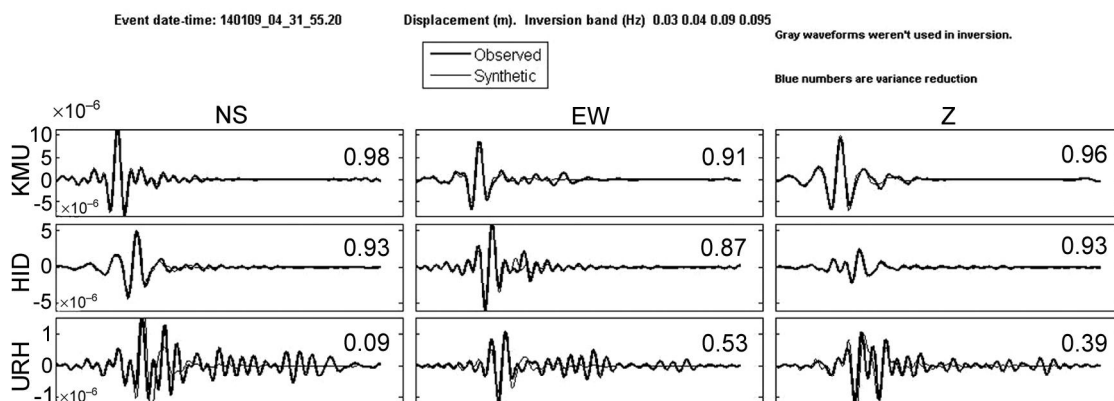


Рис. 4. Пример результата работы ISOLA-GUI: сравнение реальных и синтетических волновых форм.

ся получить достаточно устойчивое решение. Наихудший коэффициент V_r получен на NS канале станции URH, однако и там периоды волновой формы с максимальной амплитудой в первой трети записи зрительно хорошо совпадают (рис. 4). Записи еще трех более отдаленных пунктов наблюдения в поиске не участвовали, однако для них также оценивался коэффициент V_r . Уменьшение среднего значения V_r можно оценить по графе: Var red (for all stations), даже с учетом отдаленных станций он остается достаточно высоким.

В целом использованное для примера землетрясение можно считать крайне удачно обработанным,

в основном потому, что его эпицентр находится в окружении достаточно плотной сети сейсмостанций. Большинство других землетрясений региона находятся в менее «тепличных» условиях с точки зрения удобства обработки.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные решения тензора сейсмического момента очагов региональных землетрясений сравнивались с решениями, полученными другими агентствами (GCMT, NIED) и другими методами (метод первых вступлений: FOCMEC, МЕН [7]). Детальное сопо-

ставление решений ISOLA с данными СФ ГС (метод полярности первых вступлений, программа FOCMEC) и GlobalCMT опубликованы в статье, посвященной Урупской серии землетрясений 2012–2013 гг. в районе Средних Курил [10].

Ниже в табл. 1 показаны примеры сопоставления стереограмм некоторых обработанных землетрясений разных районов, глубин и магнитудных интервалов с решениями GlobalCMT и NIED, а также механизмами, полученными по методике полярности первых вступлений с использованием алгоритмов FOCMEC или МЕН.

Как видно из сопоставления стереограмм двухдипольного приближения тензоров сейсмического момента и механизма очага, полученного методом полярности первых вступлений (табл. 1), результаты в большинстве случаев достаточно близкие, по крайней мере, вариантов с противоположным типом сейсмодислокации отмечено не было. Разница в вариантах решения может быть связана со значительными погрешностями, вызванными дефицитом знаков первых вступлений в регионе, слабо обеспеченном пунктами

инструментальных наблюдений. Однако причиной может быть и принципиальное отличие методического подхода к поиску решения механизма очага: в случае анализа первых вступлений *P*-волны результат описывает модель первого разрыва, начинающего вспарывать тектонический очаг, в то время как метод инверсии имеет дело с осредненным модельным очагом, который может не совпадать с направлением первичной подвижки [5]. С уменьшением магнитуды обрабатываемых событий, а следовательно и качества получаемых результатов, разница растет. В [7] авторами утверждается, что для Дальневосточного региона России уверенно определять механизм землетрясений методом полярности первых вступлений возможно с магнитуды $M \geq 6.0$, в то время как для сравнительного анализа в настоящей работе использовались в основном более слабые события.

Результаты расчетов по методу инверсии (2–4 колонка стереограмм) более близки, по крайней мере, тип сейсмодислокации и ориентация нодальных плоскостей во всех случаях практически совпадает, кроме строки 2, где видно значительное отличие решения

Таблица 1. Примеры сравнения стереограмм двухдипольного приближения СМТ землетрясений, полученных при помощи ISOLA, с данными других агентств.

| № | Дата год мм.дд | Время | Широта, гр. с.ш. | Долгота, гр. в.д. | Глубина, км | M | FOCMEC/ МЕН | ISOLA- GUI | GCMT | NIED |
|---|-------------------|-----------|---------------------|----------------------|----------------|-----|----------------|---------------|------|------|
| 1 | 2006 11.10 | 8:53:48 | 52.63 | 142.54 | 9 | 4.7 | | | | |
| 2 | 2012 05.20 | 6:54:45.6 | 44.79 | 151.75 | 44 | 5.1 | | | | |
| 3 | 2012 07.11 | 2:31:15.8 | 45.02 | 151.88 | 40 | 5.6 | | | | |
| 4 | 2012 08.14 | 2:59:37 | 49.97 | 145.90 | 598 | 7.7 | | | | |
| 5 | 2013 04.19 | 3:05:50.2 | 45.80 | 151.27 | 118 | 7.0 | | | | |
| 6 | 2013 05.24 | 05:44:48 | 54.76 | 153.76 | 640 | 8.0 | | | | |
| 7 | 2013 10.14 | 8:36:26 | 51.44 | 143.40 | 4 | 4.2 | | | | |
| 8 | 2014 01.09 | 4:31:55.2 | 42.06 | 142.55 | 83 | 4.7 | | | | |

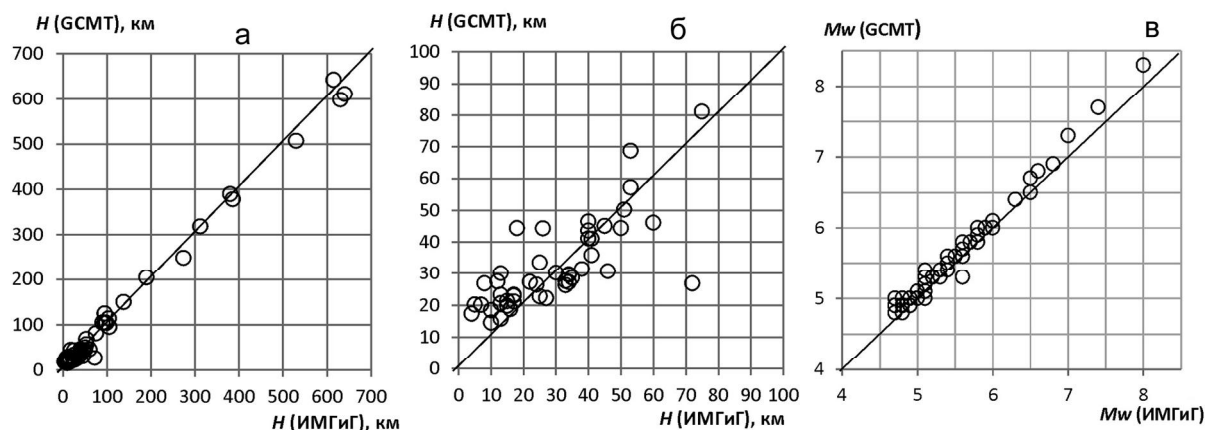


Рис. 5. Сравнение глубины центра и моментной магнитуды землетрясений, полученных при расчете тензора сейсмического момента землетрясений рассматриваемого региона 2012–2013 гг. при помощи ISOLA, с данными GlobalCMT.

а – глубина в диапазоне 0–700 км; б – глубина в диапазоне 0–100 км; в – моментная магнитуда.

агентства NIED. Здесь методический подход в основном идентичен, различие, по всей видимости, является следствием погрешностей определения. Также следует отметить, что в агентстве NIED используют сравнительно узкую полосу фильтрации, смещенную в область низких частот. В агентстве GCMT, вероятно, тоже, к тому же используются практически исключительно телесеismicические станции. В случае использования ISOLA автором полоса фильтрации по возможности оставалась достаточно широкой, в диапазоне 0.005–0.2 Гц, вынужденно урезаемая при наличии помех и в зависимости от магнитуды события, что уменьшало корреляцию реальной и синтетической волновых форм, однако, как нам видится, позволяло осуществлять более чувствительный подход к поиску решения.

Большинство обработанных землетрясений рассчитывалось с фиксированным положением двух координат центра, в качестве которых принимался инструментальный эпицентр землетрясения (за исключением сильного глубокофокусного землетрясения № 6, табл. 1, для которого был выполнен поиск оптимального положения центра центра). В ходе расчетов уточнялись глубина и время в очаге землетрясения (точнее, среднее время центра, которое запаздывает относительно t_0 тем сильнее, чем выше магнитуда землетрясения). Глубина землетрясения является наиболее сильно влияющей на результат координатой, к тому же использование ее в качестве вариативного параметра вместе со временем позволяет отслеживать устойчивость решения (STVAR, FMVAR). Также в процессе поиска решения оценивается сейсмический момент землетрясения M_0 и рассчитывается моментная магнитуда M_w . На рис. 5.

представлено сравнение полученных значений глубины и магнитуды с результатами GlobalCMT.

Как видно из рис. 5 а, в масштабе всех возможных глубин региональных землетрясений переопределенная глубина приблизительно соотносится, однако в более крупном масштабе (рис. 5 б) становится очевидно существующее различие в оценках глубины центра относительно неглубоких землетрясений по данным ИМГиГ ДВО РАН (настоящая работа) и GlobalCMT, примерно также разнятся между собой оценки глубины гипоцентра курильских и охотоморских землетрясений по данным СФ ГС РАН, JMA и NIED. Причиной этого, вероятно, является сложное строение региона, наличие погружающейся в мантию океанической плиты, вносящей искажения в расчет траекторий сейсмических волн на основе одномерной скоростной модели, и отсутствие сейсмических станций на Средних Курилах и в окружающих акваториях. При этом искажения подвержена не только глубина землетрясения, но и параметры тензора момента, особенно такой чувствительный, как соотношение DC и CLVD компонент полученного решения. По этой причине к оценкам этих параметров землетрясений региона пока следует относиться с осторожностью.

На рис. 5 в показано сопоставление магнитудных оценок региональных землетрясений по данным ИМГиГ ДВО РАН (ISOLA) и GlobalCMT. Как видно из диаграммы, в большинстве случаев расхождение не превышает 0.2, что можно признать хорошим результатом. Наблюдается некоторое систематическое занижение в области высоких значений магнитуды, возможная причина этого – вынужденное смещение

диапазона фильтрации при расчете СМТ в область высоких значений частот (следствие использования CMG-6TD), однако для подробного исследования пока материала накоплено недостаточно.

ПРЕДЕЛЫ ПРИМЕНИМОСТИ

ISOLA не имеет программно обусловленных пределов применимости по магнитуде землетрясений, нижний магнитудный порог определения СМТ зависит от различимости полезного сигнала на фоне микросейсмического шума. Для оценки нижних значений применимости программы в условиях сейсмологической сети изучаемого региона был проведен эксперимент. В районе о. Хоккайдо, наиболее обеспеченного данными, были определены тензоры момента группы коровых и верхнемантийных землетрясений. Был составлен каталог событий по данным JMA [19–21], произошедших в течение мая, сентября и декабря 2013 г., чтобы снизить возможные сезонные вариации микросейсмического шума. Использовались события глубиной очага не ниже 90 км. Всего обработано 23 события с магнитудой от $M_j = 4.6$ до $M_j = 2.6$ (табл. 2). Расчет СМТ проводился от большей магнитуды к меньшей. Удалось получить 12 решений СМТ, признанных удовлетворительными.

Для оценки качества полученных решений использовались коэффициенты V_r , FMVAR и STVAR (CN не использовался, т.к. не привязан непосредственно к сейсмическому событию), приоритет отдавался V_r . Значения $V_r \geq 0.8$ принято считать отличными, $0.8 > V_r \geq 0.5$ хорошими, эти значения в табл. 2 затемнены, $0.5 > V_r \geq 0.2$ – посредственными, ниже – плохими. Для FMVAR и STVAR сравнивать значения коэффициентов возможно только для сопоставимой области поиска решения. Для данного случая было принято считать хорошими значения $FMVAR \geq 10^\circ$ и $STVAR \geq 0.3$. Исходя из этого, отличными оказались только два решения землетрясений относительно высоких магнитуд. Для остальных событий одно или два оценочных значения оказались ниже нормы. Самым слабым из обработанных землетрясений оказалось событие 17 мая, однако его моментная магнитуда $M_w = 3.5$ оказалась существенно выше $M_j = 3.1$, в то время как для других событий такого расхождения не наблюдается. Таким образом, граничную магнитуду, ниже которой в основном следовали провальные попытки определить СМТ землетрясений, можно установить на уровне $M = 3.2$.

Как интересный пример, вероятно, ошибочного решения стоит отметить событие 8 декабря ($M_j = 3.4$). Расчетная глубина землетрясения $H = 2$ км сильно отличается от каталожного значения $H = 19$ км, что сказалось и на величине DC компоненты этого события,

составившей всего 11 %, и на завышенной магнитуде $M_w = 3.8$. К сожалению, в каталоге СМТ NIED этого события нет, поскольку для землетрясений с $M_j < 3.5$ решения не публикуются. Точность же определения более сильных землетрясений $M_j \geq 3.5$ можно оценить из сравнения стереограмм двухдипольных приближений на рис. 6. Как видно из сопоставления, полученные решения достаточно хорошо соответствуют друг другу.

В других районах самым слабым успешно обработанным оказалось событие 25 мая 2013 г. на территории Южного Сахалина ($M_w = 3.4$). К определению СМТ этого землетрясения были привлечены две широкополосные и одна короткопериодная временная станции, находящиеся на расстоянии 15–17 км от гипоцентра, при этом два других произошедших здесь же события близкой магнитуды обработать не удалось. В районе Северного Сахалина магнитуда самых слабых успешно обработанных событий $M_w = 3.8$. На Южных Курилах $M_w = 3.9$. Другие районы слабее обеспечены сейсмическими станциями, поэтому пороговое значение магнитуды там еще выше.

Агентство NIED публикует СМТ землетрясений, начиная с магнитуды $M_w = 3.5$. По всей видимости, эту оценку минимальной магнитуды, для которой имеет смысл искать параметры СМТ, можно принять и для ISOLA при расчете СМТ землетрясений на территории Южных Курил, Сахалина и, возможно, Приморья.

ВЫВОДЫ

Проведенная апробация вычислительной программы ISOLA показала высокую эффективность метода и программных средств для определения тензора сейсмического момента региональных землетрясений. Получен каталог СМТ землетрясений, в котором представлены сейсмические события разных глубинных и магнитудных диапазонов с эпицентрами в районе Курильской островной дуги, о. Хоккайдо, акваторий Охотского и Японского морей, территории о. Сахалин. Сравнение полученных результатов с альтернативными вариантами из других источников показало, что отличие полученных вариантов СМТ землетрясений не превышает отличие вариантов других источников друг от друга. Тип сейсмодислокации в очаге определяется уверенно, магнитудные оценки соответствуют таковым по данным других источников. Глубина, переопределяемая в ходе расчета центра центроида, может отличаться от оценок других источников, чему есть объективные причины.

Для метода инверсии ситуация в регионе умеренно благоприятная ввиду наличия некоторого количества широкополосных сейсмических станций,

Таблица 2. Каталог землетрясений Хоккайдо 2013 г., для которых производилось определение СМТ.

| № | Дата (д.мес) | Время (ч:мин:с) | ϕ (°) | λ (°) | H_{JMA} | M_j | H_{IMGG} | Mw | DC | Vr | FMFAR (°) | STVAR |
|----|-----------------|--------------------|------------|---------------|-----------|-------|------------|-----|------|------|-----------|-------|
| 1 | 16.12 | 2:17:41.9 | 43.10 | 145.00 | 78 | 4.6 | 70 | 4.5 | 67.5 | 0.66 | 3 | 0.35 |
| 2 | 17.05 | 4:20:26.5 | 42.67 | 143.42 | 74 | 4.3 | 69 | 4.3 | 98.5 | 0.84 | 2 | 0.06 |
| 3 | 12.12 | 23:8:42.9 | 42.72 | 142.88 | 90 | 3.9 | 84 | 4 | 89.3 | 0.68 | 3 | 0.17 |
| 4 | 21.12 | 23:45:20 | 42.75 | 142.48 | 20 | 3.8 | 23 | 3.7 | 90.4 | 0.62 | 13 | 0.59 |
| 5 | 09.12 | 22:51:5.3 | 42.04 | 142.60 | 61 | 3.7 | 55 | 3.7 | 99 | 0.67 | 12 | 0.51 |
| 6 | 08.09 | 1:16:40.2 | 42.16 | 144.47 | 37 | 3.5 | | | | | | |
| 7 | 13.09 | 10:10:15.7 | 42.03 | 142.59 | 61 | 3.5 | 44 | 3.7 | 57.1 | 0.45 | 20 | 0.28 |
| 8 | 08.12 | 3:14:46 | 44.26 | 144.73 | 19 | 3.4 | 2 | 3.8 | 11.4 | 0.5 | 11 | 0.43 |
| 9 | 08.05 | 3:29:23.2 | 42.33 | 143.00 | 51 | 3.3 | 43 | 3.4 | 69.5 | 0.54 | 11 | 0.16 |
| 10 | 01.09 | 18:34:42.3 | 42.69 | 143.64 | 13 | 3.3 | 9 | 3.3 | 93.7 | 0.38 | 8 | 0.28 |
| 11 | 10.09 | 22:10:27.3 | 42.07 | 142.96 | 39 | 3.3 | 30 | 3.2 | 89.6 | 0.41 | 15 | 0.13 |
| 12 | 06.12 | 9:42:36.6 | 42.43 | 143.16 | 48 | 3.3 | 42 | 3.3 | 72 | 0.18 | 6 | 0.68 |
| 13 | 27.09 | 3:6:41.7 | 42.35 | 143.12 | 50 | 3.2 | | | | | | |
| 14 | 13.05 | 7:17:43.1 | 42.69 | 143.28 | 61 | 3.1 | | | | | | |
| 15 | 17.05 | 8:46:50.6 | 42.07 | 142.49 | 67 | 3.1 | 71 | 3.5 | 53.1 | 0.21 | 6 | 0.12 |
| 16 | 06.09 | 2:13:19.1 | 42.16 | 143.80 | 66 | 3.1 | | | | | | |
| 17 | 18.12 | 22:50:18.1 | 43.18 | 144.11 | 132 | 3.1 | | | | | | |
| 18 | 04.05 | 13:56:49.4 | 42.81 | 144.97 | 83 | 3 | | | | | | |
| 19 | 22.05 | 19:35:8.6 | 42.09 | 142.76 | 46 | 2.9 | | | | | | |
| 20 | 05.09 | 11:40:51.3 | 42.31 | 142.63 | 53 | 2.9 | | | | | | |
| 21 | 29.05 | 21:28:19 | 43.36 | 144.01 | 4 | 2.8 | | | | | | |
| 22 | 03.12 | 9:38:31.2 | 42.84 | 144.61 | 56 | 2.7 | | | | | | |
| 23 | 19.12 | 21:9:33.1 | 42.28 | 144.55 | 35 | 2.6 | | | | | | |

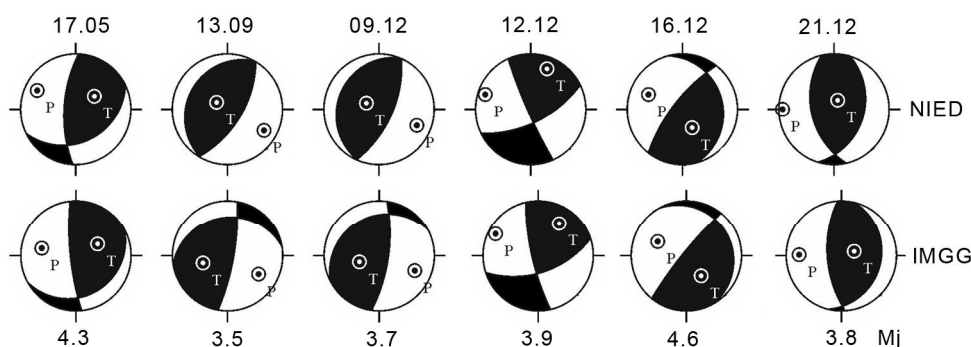


Рис. 6. Сопоставление стереограмм механизмов землетрясений, полученных агентством NIED, с решениями землетрясений с $M_j \geq 3.5$ согласно табл. 2.

однако наиболее представительные и стабильные результаты можно получать лишь вблизи Южных Курил и Хоккайдо, где достаточно плотная сеть позволяет обрабатывать землетрясения с магнитудой $M_w \geq 3.5$, а в некоторых случаях и более слабые. На Северном и Центральном Сахалине плотность сети также позволяет обрабатывать относительно слабые землетрясения ($M_w \geq 4.0$), однако требуется дальнейшее уточнение скоростной модели среды. Для остальной территории региона обработка сильных землетрясений ($M_w \geq 5.0$) в основном трудностей не вызывает, т.к. влияние погрешностей скоростной модели падает с ростом размера очага землетрясения, а возможность выбора из

большого числа успешно записавших землетрясение сейсмических станций позволяет получить более стабильный результат. Обработка землетрясений умеренной магнитуды ($M_w = 4.5-5.0$) в целом возможна, но лишь в условиях отсутствия значительных сейсмических помех. Потому можно получать представительный каталог тензоров сейсмического момента землетрясений с магнитудой $M_w \geq 5.0$ на всей территории юга Дальнего Востока России, а в отдельных районах – $M_w \geq 4.0$. Землетрясения с магнитудой ниже $M_w = 3.5$ в условиях нынешнего развития сетей сейсмостанций уверенно определять возможным не представляется.

Улучшению ситуации может способствовать уточнение скоростной модели строения земной коры и верхней мантии региона, переход к использованию трехмерных моделей среды, а также расширение сети широкополосных сейсмических станций.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-05-31060 МОЛ_А).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аргентов В.В., Гнибиденко Г.С., Попов А.А., Потапьев С.В. Глубинное строение Приморья по данным ГСЗ. М.: Наука, 1976. 92 с.
2. Букчин Б.Г. Об определении параметров очага землетрясения по записям поверхностных волн в случае неточного задания характеристик среды // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1989. № 9. С. 34–41.
3. Землетрясения России в 2012 году. Обнинск: ГС РАН, 2014. 224 с.
4. Ким Ч.У., Михайлов В.И., Сен Р.С., Семенова Е.П. Невельское землетрясение 02.08.2007: анализ инструментальных данных // Тихоокеан. геология. 2009. Т. 28, №5. С. 4–15.
5. Костров Б.В. Механика очага тектонического землетрясения. М.: Наука, 1975. 176 с.
6. Павлов В.М., Абубакиров И.Р. Алгоритм расчета тензора сейсмического момента сильных землетрясений по региональным широкополосным сейсмограммам объемных волн // Вестн. Краунц. Науки о земле. 2012. Вып. 20. № 2. С. 149–158.
7. Сафонов Д.А., Коновалов А.В. Апробация вычислительной программы FOCMES для определения фокальных механизмов землетрясений Курило-Охотского и Сахалинского регионов // Тихоокеан. геология. 2013. Т. 32, № 3. С. 102–117.
8. Сафонов Д.А., Коновалов А.В. Определение тензора сейсмического момента землетрясений Курило-Охотского и Сахалинского регионов // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы Девятой Междунар. сейсмологической школы. Республика Армения, 8–12 сентября 2014 г. Обнинск: ГС РАН, 2014. С. 294–298.
9. Сафонов Д.А., Нагорных Т.В., Коновалов А.В. Тензор момента и механизмы очагов землетрясений Северного Сахалина // Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска: Всерос. науч. конф. с междунар. участием. Южно-Сахалинск, 26–30 мая 2015 г. / Сб. материалов. В 2-х томах. Владивосток: Дальнаука, 2015. Т. 1. С. 174–178.
10. Сафонов Д.А., Коновалов А.В., Злобин Т.К. Урупская серия землетрясений 2012–2013 гг. // Вулканология и сейсмология. 2015. № 6. С. 60–70.
11. Степнов А.А., Гаврилов А.В., Коновалов А.В., Отемолер Л. Новая архитектура автоматизированной системы сбора, хранения и обработки сейсмологических данных // Сейсмические приборы. 2013. Т. 49, № 2. С. 27–38.
12. Ханчук А.И., Коновалов А.В., Сорокин А.А. и др. Инструментальное и информационно-технологическое обеспечение сейсмологических наблюдений на Дальнем Востоке России // Вестн. ДВО РАН. 2011. № 3. С. 127–137.
13. Ekström G., Nettles M., Dziewon'ski A.M. The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes // Phys. Earth Planet. Int. 2012. 200–201. P. 1–9.
14. Kikuchi, M., Kanamori H. Inversion of complex body waves // Bull. Seism. Soc. Am. 1991. V. 81. P. 2335–2350.
15. Křížová D., Zahradník J., Kiratzi A. Resolvability of isotropic component in regional seismic moment tensor inversion // Bull. Seism. Soc. Am. 2013. V. 103, N 4. P. 2460–2473.
16. Kubo A., E. Fukuyama, H. Kawai, K. Nonomura NIED seismic moment tensor catalogue for regional earthquakes around Japan: quality test and application // Tectonophysics. 2002. 356. P. 23–48.
17. Sokos E. N., Zahradník J. ISOLA a Fortran code and a Matlab GUI to perform multiple-point source inversion of seismic data // Computers & Geosci. 2008. V. 34, Is. 8. P. 967–977.
18. Sokos E., Zahradník J. Evaluating Centroid–Moment–Tensor Uncertainty in the New Version of ISOLA Software // Seismological Research Letters. 2013. V. 84. P. 656–665.
19. The Seismological and Volcanological Bulletin of Japan for May 2013. 2014. V. 25, N 5. – 1 el. disk (CD-ROM).
20. The Seismological and Volcanological Bulletin of Japan for September 2013. 2014. V. 25, N 9. – 1 el. disk (CD-ROM).
21. The Seismological and Volcanological Bulletin of Japan for December 2013. 2014. V. 25, N 12. – 1 el. disk (CD-ROM).

Рекомендована к печати Б.В. Левиным

D.A. Safonov, A.V. Kononov

Moment tensor inversion in the Kuril-Okhotsk and Sakhalin Regions using ISOLA software

Applicability of ISOLA software to regional moment tensor inversion is studied. The low magnitude threshold of moment tensor catalog is found for different areas in the Far East of Russia. The comparison between focal mechanisms and moment tensor solutions given by regional and global agencies and ISOLA moment tensor solutions is carried out. Results of mass determination of moment tensor in Kuril-Okhotsk and Sakhalin regions are analyzed in this study.

Key words: moment tensor inversion, focal mechanism, Kuril-Okhotsk region, Sakhalin.