

**АПРОБАЦИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ FOCMES ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ФОКАЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ 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: safonov@imgg.ru

²Сахалинский филиал Геофизической службы РАН, ул. Тихоокеанская 2а, г. Южно-Сахалинск, 693010

Поступила в редакцию 29 декабря 2011 г.

В работе представлены результаты апробации вычислительной программы FOCMES для единичного и массового определения механизмов очагов землетрясений Курило-Охотского и Сахалинского регионов. Выполнено массовое определение механизмов очагов землетрясений, произошедших в Курило-Охотском регионе в 2005–2009 гг. Оценена корректность вычислений путем сравнения полученных механизмов с решениями, приводимыми мировыми и региональными сейсмологическими агентствами. В данной работе приведены результаты определения механизмов очагов некоторых сахалинских землетрясений и их интерпретация с учетом местных тектонических условий. Сформулированы методические рекомендации.

Ключевые слова: землетрясение, механизм очага, сейсмостанция, цифровые записи, параметры сейсмодислокаций, Сахалинская область.

ВВЕДЕНИЕ

Данные об ориентации плоскости и направлении подвижки в очаге землетрясения дают ценную информацию о структуре разломной зоны и поле упругих напряжений сейсмически активных регионов.

Определение механизмов очагов землетрясений является актуальной задачей для Сахалинского и Курило-Охотского регионов, здесь ежегодно происходит большое число сейсмических событий (особенно в районе Курило-Камчатской островной дуги). Сахалинский и Курило-Охотский регионы, а также регион Приморье–Приамурье входят в зону ответственности Сахалинского филиала Геофизической службы РАН (СФ ГС РАН). Однако массовое определение механизмов очагов землетрясений в СФ ГС РАН в настоящий момент не ведется. Информацию о фокальных механизмах наиболее сильных событий можно почерпнуть из баз данных мировых сейсмологических агентств: USGS [19], GCMT [11] и др. Землетрясения, происходящие в южной части Сахалинского и Курило-Охотского регионов, обрабатываются японскими сейсмологическими агентствами (например, NIED [15]). Северная часть Курильских

островов входит в область интересов камчатских специалистов.

В рамках двухдипольного приближения механизм очага землетрясения представляется в виде условной сферы вокруг источника волн, разделенной на четыре квадранта, в двух из которых первое движение сейсмических волн направлено от источника, в двух других – к источнику. Нахождение угловых координат плоскостей, делящих фокальную сферу на квадранты, и ориентации подвижки по этим плоскостям называется поиском решения механизма очага землетрясения. В методе первых вступлений [1, 10, 17 и др.] механизм очага определяется азимутами и углами выхода лучей сейсмических волн из источника, определяемых для положения каждой точки наблюдения согласно их расстоянию до гипоцентра и скоростной модели среды. Решение механизма можно получить при достаточном количестве наблюдений и их непротиворечивости. Обычно при хорошем азимутальном окружении эпицентральной области сейсмическими станциями, как региональными, так и удаленными, и четких вступлениях на записях достаточно 20–30 знаков. Существует возможность определения механизма и при меньшем количестве

исходной информации, но однозначность и устойчивость полученного решения сильно уменьшается.

Расчет вариантов решений механизма очага землетрясения обычно автоматизируют.

Целью данной работы является апробация вычислительной программы FOCMEC [18] для оперативного массового и единичного определения механизмов очагов землетрясений в Сахалинском и Курило-Охотском регионах.

При этом ставятся следующие задачи:

1. Оценка обеспеченности данными в Сахалинском и Курило-Охотском регионах.

2. Апробация программы FOCMEC на реальных землетрясениях и сравнение полученных механизмов с результатами расчетов с использованием программы МЕН.

3. Сравнение полученных результатов с данными других сейсмологических агентств.

Ввиду специфики сейсмической активности и разной степени обеспеченности пунктами наблюдений необходимо ввести разделение территории, на которой производится определение механизмов: на Сахалинский и Курило-Охотский регионы и отдельно Южный Сахалин, где существует возможность регистрации землетрясений плотной локальной сетью сейсмостанций.

КРАТКИЙ ОБЗОР ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ

Программа FOCMEC является одной из вычислительных программ для поиска решений механизма очага землетрясения по методу первых вступлений в *P*-волне. Она разработана А. Сноуком [18] и интегрирована в комплекс сейсмологических программ SEISAN [16], широко используемый в международной сейсмологической практике и сочетающий современные методы детального анализа сейсмической информации с унифицированным форматом базы данных.

Комплекс вычислительных программ SEISAN позволяет визуализировать и комплексно обрабатывать волновые формы наиболее распространенных форматов записей, получать основные параметры очага землетрясения с привлечением как среднемировых, так и региональных (локальных) скоростных моделей строения Земли. В настоящий момент SEISAN применяется в Институте морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН) в рамках проведения детальных сейсмологических наблюдений на севере о. Сахалин [3].

Результаты обработки сохраняются в базе данных SEISAN в виде структурированных текстовых

файлов (S-файлов), в которых хранятся бюллетени, результаты расчета очаговых параметров землетрясений и другая информация о каждом сейсмическом событии. При обработке волновой формы возможно определение полярности первого вступления, отмечаемого как С (compression – сжатие) и D (dilatation – растяжение). Учитывается также четкость вступления (I, E). Для нечетких вступлений полярность отмечается как “+” и “-”, соответственно.

В задаче определения фокального механизма землетрясения важно удачно подобрать скоростной разрез и определить (или задать) глубину очага, т.к. значение угла выхода сейсмического луча зависит от типа волны и глубины гипоцентра. Азимут определяется исходя из координат пункта наблюдений и эпицентра очага землетрясения – последние могут быть автоматически определены в SEISAN либо заданы оператором. Таблица данных, содержащая наименование пункта наблюдений, азимут, угол выхода луча и четкость вступления, передается в модуль программы FOCMEC, который выполняет расчет, и выдает на экран возможные варианты решений. Результаты всех вычислений и операций сохраняются в соответствующие текстовые и графические файлы. Задачей оператора является верный подбор необходимого шага на сетке для поиска вариантов решения, корректировка входных данных, выбор наилучшего варианта из предлагаемых программой решений с одинаковым числом несогласованных знаков и т.д. Это требует определенных теоретических навыков и опыта работы. Программа предоставляет широкие возможности для оператора в задаче поиска решений и удобна для определения механизмов очагов землетрясений в условиях острого дефицита исходной информации (рис. 1).

Программа МЕН является адаптацией под MS-DOS алгоритма SOUR1, разработанного коллективом авторов ИФЗ РАН им. О.Ю. Шмидта [6] на основе более ранних разработок. Адаптация программы выполнена в ИМГиГ ДВО РАН О.А. Бобковым под методическим руководством Л.Н. Поплавской [7]. До недавнего времени эта программа применялась в ИМГиГ ДВО РАН и СФ ГС РАН для поиска решений механизма очага землетрясений.

В качестве исходных данных программа использует текстовый файл, содержащий вводные параметры расчета, основные из которых: наименование станции и знак вступления. Расчет азимута и угла выхода луча производится программой на основании среднемировых годографов по Джеффрису-Буллену. Варианты возможных решений выводятся на экран либо распечатываются.

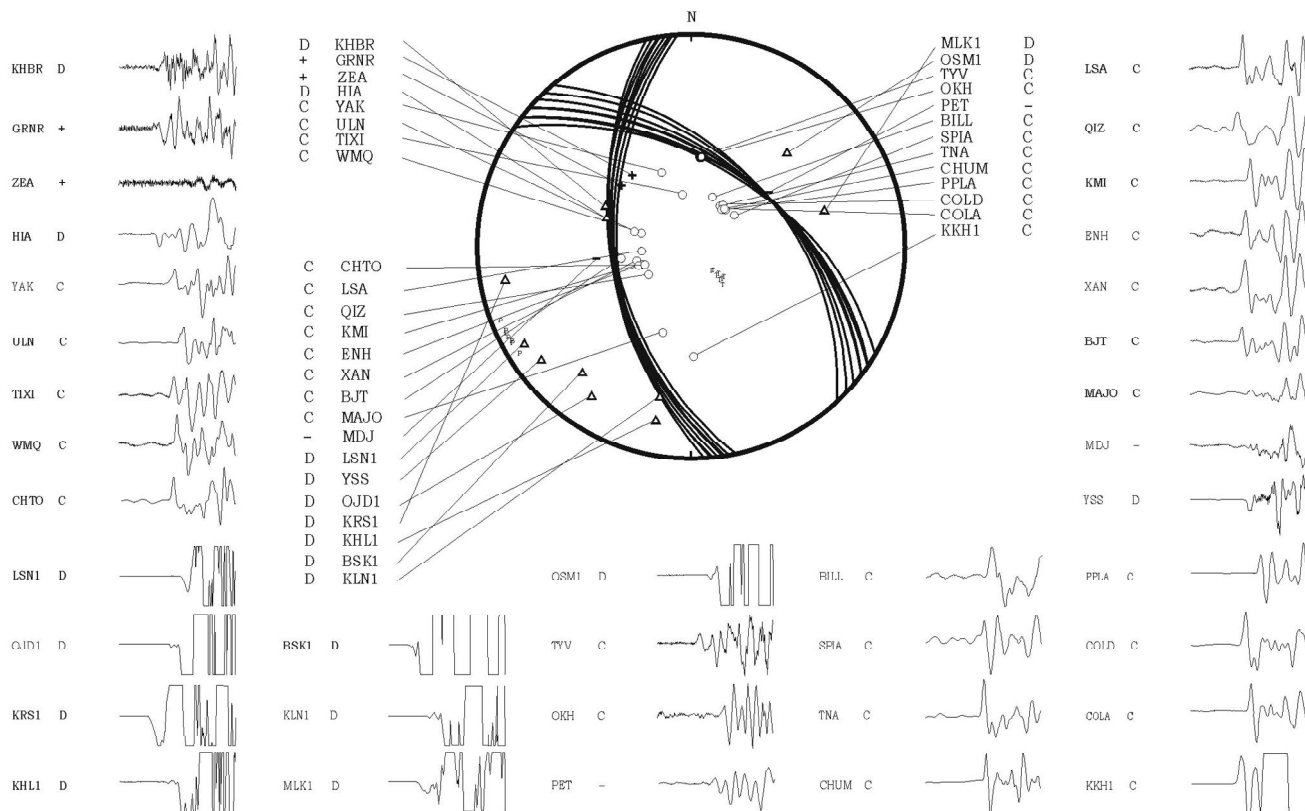


Рис. 1. Область поиска решения механизма очага землетрясения в вычислительной программе FOCMEC (на примере Горнозаводского землетрясения 17 августа 2006 г.).

Программа выполняет поиск решений механизма очага землетрясения с оценкой функции максимального правдоподобия полученного решения, на основании значений которой выбираются решения в заданной доверительной области. В качестве наилучшего варианта предлагается решение (группа решений) с максимальной функцией правдоподобия, а также средний механизм на основе решений, вошедших в 85 % доверительную область. Таким образом, роль оператора в выборе наилучшего механизма минимизируется – достаточно лишь оценить величину рассеяния полученных решений, при необходимости выполнить корректировку начальных данных и выбрать предложенное решение. Программа удобна для массовой обработки механизмов очагов землетрясений в условиях хорошей обеспеченности данными, не требующих тонкого индивидуального подхода.

ОЦЕНКА ОБЕСПЕЧЕННОСТИ ДАННЫМИ

Для расчета механизма очага землетрясения методом полярности первых вступлений большое значение имеет степень обеспеченности данными. Это в первую очередь зависит от количества привлекаемых

записей на различных сейсмостанциях и от равномерности распределения этих станций в области поиска решения (сетке Вульфа/Ламберта-Шмидта – проекции фокальной полусферы на плоскость).

Курило-Охотский регион довольно слабо обеспечен сейсмостанциями. В настоящий момент на Курильских островах действуют четыре сейсмостанции, одна из которых – на острове Шикотан – возобновила работу недавно. На Сахалине также четыре стационарных сейсмических станции, однако в последнее время развиваются сети автономных сейсмостанций как для регистрации слабой локальной сейсмичности, так и для наблюдений за региональными цунамигенными землетрясениями. Для регистрации Курильских землетрясений актуальны также станции регионов Приморья и Приамурья, характеризующиеся высокой чувствительностью оборудования и регистрационными возможностями. Оснащение этих станций цифровой аппаратурой началось в последние годы. Поэтому для расчета фокальных механизмов региональных землетрясений привлекались в первую очередь цифровые данные, либо, в редких случаях, бюллетени станционной обработки.

Также к оценке механизмов привлекались данные японской сейсмологической широкополосной сети, предоставленные агентством NIED [15], – главным образом использовались станции, расположенные на о. Хоккайдо (Япония), наиболее близкие к Курильским островам и, соответственно, к очагам рассматриваемых землетрясений. Большая часть данных о первых вступлениях получена из записей IRIS

[12]: китайской сети (IC), сети станций на Аляске (AK) и глобальной сейсмографической сети (IU).

На рис. 2 изображено положение на проекции фокальной полусферы используемых сеймостанций для модельного очага землетрясения, расположенного вблизи центра Курильской островной дуги. На рис. 2 а глубина очага задана 30 км, на рис. 2 б – 80 км.

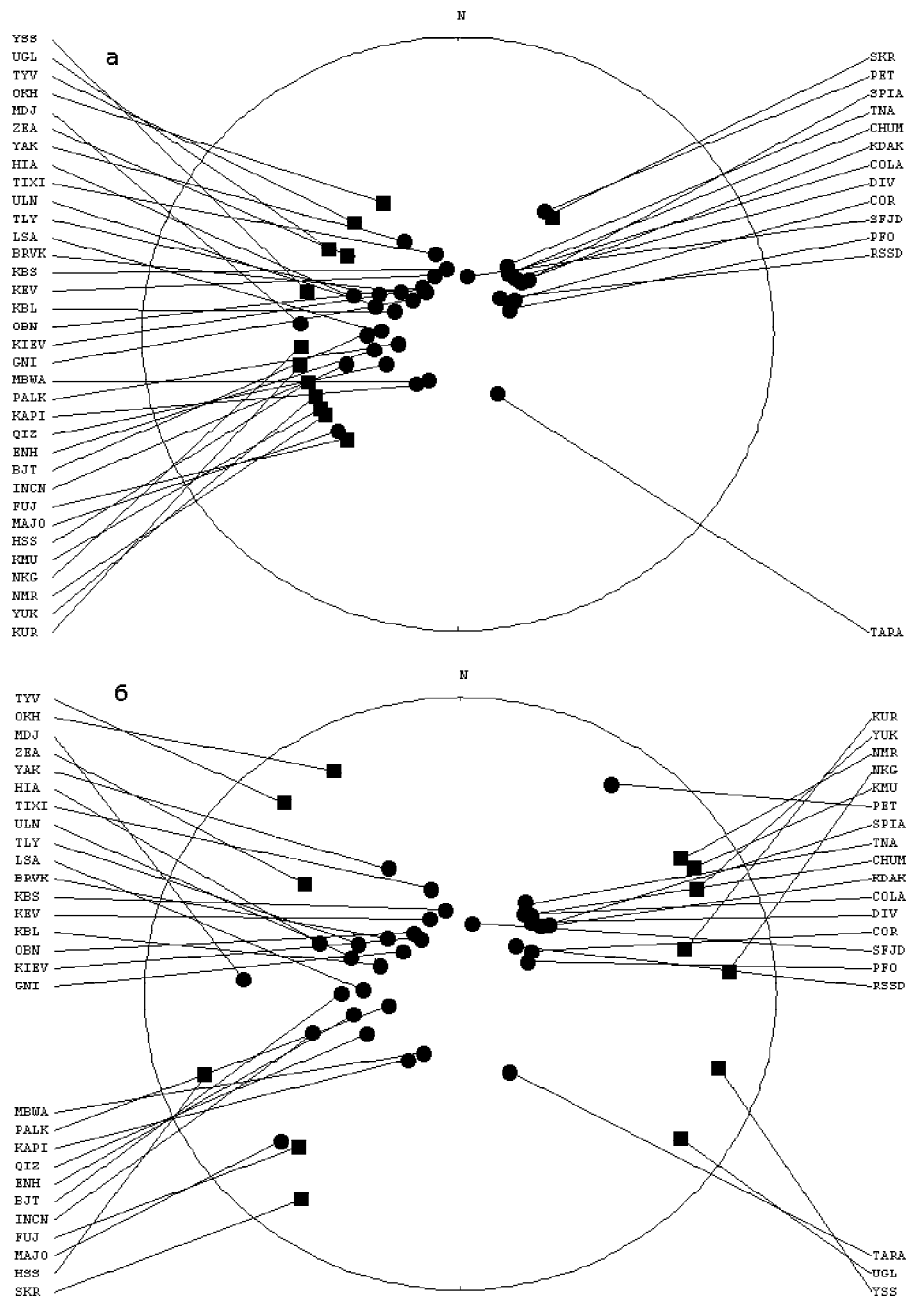


Рис. 2. Распределение сеймостанций для модельного очага землетрясения, расположенного вблизи центра Курильской островной дуги, в проекции на нижнюю фокальную полусферу: а – глубина очага 30 км; б – глубина очага 80 км. Пояснения к обозначениям на рисунке приведены в тексте.

Для расчета углов выхода использовалась скоростная модель строения Земли IASP91 [13]. Для неглубокого землетрясения (рис. 2 а) характерны углы выхода лучей со сравнительно небольшим отклонением от нормали к поверхности. Близких станций для среднекурильских землетрясений нет, поэтому внешняя часть области поиска решений остается незаполненной. На глубине 35 км, соответствующей в модели IASP91 границе земной коры, происходит скачок значения угла выхода в сторону его увеличения для региональных и близких телесеismicических станций. Так на рис. 2 б заметно более рассеянное распределение пунктов наблюдений, а часть сейсмостанций перешла в противоположный азимут, поскольку для такой глубины первое вступление соответствует прямой волне с углом выхода больше 90 градусов.

Наибольшее значение для поиска решения имеют региональные сейсмостанции и станции о. Хоккайдо (квадраты на рисунке), поскольку перекрывают значительную часть внешней области фокальной полусферы. Удаленные сейсмостанции глобальной сети (круги на рисунке) в основном заполняют центральную часть и позволяют хорошо зафиксировать положение близвертикальной нодальной плоскости, если такая в решении существует. Юго-западную часть области поиска решения (а так же северо-восточную для глубоких событий) покрывают японские сейсмостанции – на рисунке их представлено всего несколько (FUJ, HSS, KMU, NKG, NMR), хотя можно использовать гораздо большее количество данных. Гораздо меньший вклад вносят сейсмостанции Аляски (TNA, CHUM, KDAK, DIV, SPIA): из двух десятков доступных записей стоит использовать 3–5 для надежной фиксации первого вступления в этом районе. Большая часть области все же остается незаполненной.

Южная и юго-восточная части на проекции фокальной полусферы – это Тихий океан: сейсмостанции здесь редки и, как правило, слишком удалены. Так на рис. 2 представлена одна из немногочисленных станций этого региона TARA (о. Тарава, Республика Кирибати), расположенная на одном из островов вблизи экватора. Северная часть области – это Охотское море, здесь, по понятным причинам, станций также нет. Центральная часть области заполняется данными наиболее удаленных сейсмостанций. Как видно из рисунка, особой ценности записи станций, удаленных более чем на 45°, не несут, а для относительно слабых землетрясений идентифицировать четкий знак первого вступления на таких записях достаточно сложно, поэтому они используются только в случае острой необходимости.

По причине такой неравномерной наполненности области поиска решения данными возникают сложности однозначной интерпретации механизмов даже сильных землетрясений, уверенно зарегистрированных региональными и мировыми сетями. Знаки первых смещений, измеренные на удаленных телесеismicических станциях, распределяются, в основном, в узком диапазоне стереографической проекции – в центре фокальной полусферы, а получаемые решения оказываются неустойчивыми. В редких случаях, когда в решении механизма очага преобладают сдвиговые компоненты, можно надеяться на поквadrантное разделение знаков и получение статистически значимого и устойчивого решения. Поэтому наиболее трудно интерпретируются взбросовые и сбросовые механизмы неглубоких землетрясений с близгоризонтальной нодальной плоскостью и с вертикальной плоскостью субмеридионального простирания. Примеры таких механизмов представлены ниже (например, № 34 на рис. 3).

Сахалинский регион лучше обеспечен инструментальными наблюдениями, чем Курильский. Хотя на самом Сахалине стационарных сейсмостанций всего четыре, хорошо дополняют картину сейсмостанции Приморья и Приамурья. Однако для поиска механизма очага сахалинских землетрясений региональной сети недостаточно. Использование телесеismicических станций затруднено низким отношением сигнал-шум в начальной части *P*-волны, сложным характером записи и малым углом выхода сейсмического луча для мелкофокусных землетрясений. По этой причине поиск механизма очага сахалинских землетрясений столь же сложен, как и курильских. Кроме того, большой интерес представляют механизмы относительно слабых землетрясений с магнитудой $M \leq 5.0$, которые неуверенно регистрируются телесеismicическими сейсмостанциями.

На юге о. Сахалин последнее десятилетие действует сеть короткопериодных цифровых сейсмостанций, предназначенная для регистрации слабой сейсмичности. Кроме того, в последний год в трех дополнительных пунктах наблюдений установлены акселерометры на базе цифровых станций, предназначенные для регистрации опасных цунамигенных землетрясений. Всего в настоящее время на юге острова действует до 14 пунктов наблюдений, что в совокупности создает дополнительные возможности для поиска механизмов очагов слабых землетрясений.

На севере о. Сахалин детальные сейсмологические наблюдения проводятся ИМГиГ ДВО РАН для изучения влияния промышленной эксплуатации

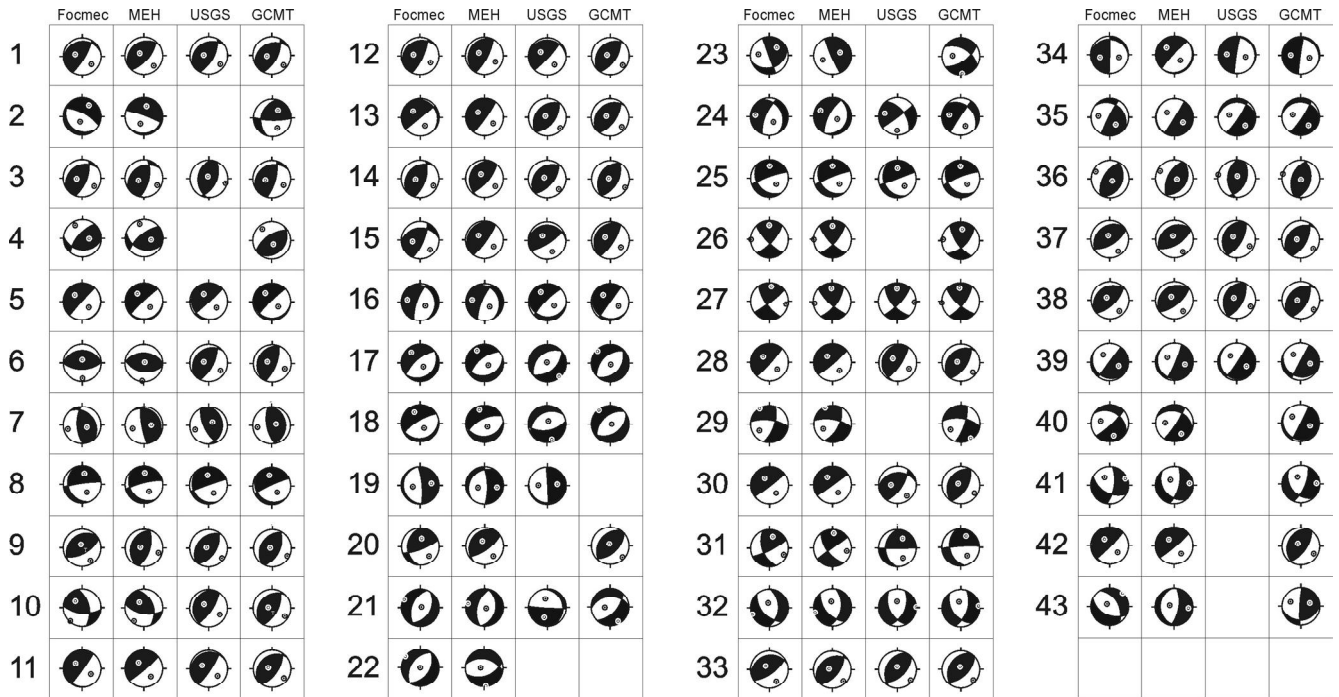


Рис. 3. Стереогаммы механизмов очагов землетрясений Курило-Охотского региона, полученных с применением вычислительных программ FOCMEC (1-ая колонка) и MEH (2-ая колонка). Решения мировых сейсмологических агентств USGS и GCMT приведены в 3-ей и 4-ой колонках, соответственно. Все решения приведены в проекции на нижнюю фокальную полусферу.

нефтегазовых месторождений на динамику сейсмического режима.

Поиск однозначного решения для слабых землетрясений в средней части Сахалина чаще всего невозможен ввиду дефицита данных.

Существенно дополняют картину пространственного распределения сейсмических станций региональной сети СФ ГС РАН сеть широкополосных сейсмических станций [9], недавно развернутая на юге Дальневосточного региона в рамках реализации Комплексной программы фундаментальных научных исследований ДВО РАН “Современная геодинамика, активные геоструктуры и природные опасности Дальнего Востока России”.

Тем не менее, при определении механизма очага землетрясения присутствует ряд трудностей: проявляется сильная зависимость получаемого решения от выбора глубины очага землетрясения; проявляется сильная зависимость от выбора типа волны, что в свою очередь зависит как от выбранного скоростного разреза, так и от правильной интерпретации первого вступления на записи; дефицит знаков первых вступлений далеких сейсмостанций, а следовательно – пустой центр области поиска решения на стереографической сетке.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ОЧАГОВ КРУПНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КУРИЛО-ОХОТСКОГО РЕГИОНА И СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЯПОНСКОГО МОРЯ

В рамках апробации методики, реализованной в вычислительной программе FOCMEC, была проведена работа по массовому определению фокальных механизмов землетрясений, произошедших в 2005–2009 гг. в районе Курильских островов, акватории Охотского моря, Татарского пролива и северной части Японского моря. Для расчетов были выбраны наиболее сильные землетрясения с магнитудой MLN или MSH, близкой или превышающей шесть единиц. В работе использовались сейсмограммы IRIS, агентства NIED и цифровые данные СФ ГС РАН, а также бюллетени региональных сейсмостанций Сахалинского и Курильского регионов и региона Приморье–Приамурье. Для определения механизмов использовались параметры гипоцентра землетрясений из каталога Курило-Охотского региона СФ ГС РАН, либо, если в нем данные отсутствовали, из оперативного каталога СФ ГС РАН, либо рассчитывались независимо. В последнем случае использовалась средняя модель строения Земли IASP91 [13].

Первичная информация о полярности и четкости первых вступлений, идентифицированных по записям, использовалась для составления файлов вводных данных программ FOCMEC и МЕН. Некоторые из результатов этих определений представлены в виде опубликованного каталога механизмов [2].

Дальнейший расчет азимутов, углов выхода и вариантов решений механизма проводился программами независимо. Помимо некоторых различий в методических подходах рассматриваемых программ существует одно принципиальное отличие – использование в FOCMEC модели скоростного строения Земли IASPI91, а в МЕН – таблиц Джеффриса.

Таблица 1. Решения механизмов очагов землетрясений Курильских о-ов, Охотского моря, Татарского пролива и северной части Японского моря, полученные с использованием вычислительной программы FOCMEC.

№ п/п	Дата, д.мес.год	Время, ч:мин:сек	Широта, гр.	Долгота, гр.	Глубина, км	Магнитуда		NP1			NP2		
						MLH	MSH	Stk	Dip	Rake	Stk	Dip	Rake
1	18.01.2005	14:08:07	43.00	145.00	65	6.1	6.5	31	78	78	258	17	136
2	25.01.2005	18:54:12	49.38	154.30	158	4.8	5.8	131	18	-77	298	72	-94
3	16.03.2005	13:23:32	43.60	147.00	46	5.1	5.5	21	67	74	238	28	123
4	10.08.2005	12:47:40	48.80	157.80	40	4.8	5.8	221	67	63	95	35	138
5	21.09.2005	2:25:08	44.10	146.40	113	5.5	6.5	222	88	-90	42	2	-90
6	15.10.2005	10:06:15	46.80	154.50	36	6	6.4	90	60	90	270	30	90
7	23.11.2005	19:33:42	49.80	147.70	584	5.1	6.2	321	29	58	177	66	106
8	22.06.2006	10:53:12	45.40	149.40	106	5.5	6.7	159	23	-15	262	84	-112
9	24.08.2006	21:50:35	51.00	157.60	56	6.1	6.8	231	28	82	61	62	95
10	28.09.2006	1:36:42	45.90	154.30	38	6.2	6.5	96	63	37	347	57	147
11	30.09.2006	17:50:20	46.10	153.70	28	6.8	7	170	6	45	36	86	94
12	01.10.2006	9:05:59	46.40	153.70	23	6.7	6.9	25	76	80	242	17	127
13	13.10.2006	13:47:39	46.20	153.50	18	6.3	6.4	51	90	80	321	10	-180
14	12.11.2006	21:27:42	48.00	154.70	49	5.7	6.5	18	64	77	227	29	115
15	15.11.2006	11:14:15	46.70	153.20	37	8.5	7.6	23	74	63	265	31	148
16	15.11.2006	21:22:22	47.10	154.50	43	6.4	6.7	200	74	-78	340	20	-128
17	16.11.2006	6:20:22	46.40	154.40	22	6.1	6.3	230	69	-90	50	21	-90
18	07.12.2006	19:10:22	46.40	154.10	19	6.4	6.7	78	16	-71	239	75	-95
19	09.12.2006	14:48:50	47.30	147.30	384	5.1	6.3	355	80	-90	170	10	-90
20	26.12.2006	15:19:50	48.50	154.80	63	5.7	6.5	183	29	26	69	77	117
21	13.01.2007	4:23:24	46.20	154.50	45	8.6	8.3	33	41	-81	201	49	-98
22	13.01.2007	9:18:32	45.70	153.70	14	6.1	6.3	215	45	-90	35	45	-90
23	13.01.2007	17:37:07	47.10	156.20	14	5.9	6.2	160	90	60	70	30	180
24	12.03.2007	18:59:23	46.70	152.00	152	5.1	6.4	203	71	-69	333	28	-137
25	01.07.2007	4:12:07	43.70	144.70	136	5.3	6.4	142	28	-20	250	81	-116
26	03.09.2007	16:14:53	45.60	150.20	106	5.7	7	136	76	17	42	73	165
27	25.10.2007	13:50:02	46.00	154.20	30	6	6.5	145	71	6	53	84	161
28	03.03.2008	9:30:59	46.10	153.90	24	6.4	6.9	42	85	90	222	5	90
29	19.05.2008	10:08:36	42.55	132.09	518	5.4	6.5	278	69	-26	18	66	-157
30	23.06.2008	12:32:14	46.30	153.60	46	5.8	6.3	206	4	63	53	86	92
31	29.06.2008	20:53:02	45.00	137.51	319	5.5	7	160	56	13	63	80	145
32	05.07.2008	2:12:02	53.80	152.90	604	6.7	8.1	2	47	-56	138	52	-121
33	24.07.2008	1:43:19	51.01	157.53	57	6	6.6	55	69	84	252	22	106
34	04.08.2008	4:42:14	49.73	156.41	79	5.2	6.6	0	90	75	270	15	180
35	24.11.2008	9:02:58	54.11	154.42	483	6.5	7.6	309	25	13	207	85	114
36	15.01.2009	17:49:37	46.88	155.37	41	6.9	7.6	22	32	82	211	58	95
37	07.04.2009	4:23:33	46.83	152.12	69	6.7	7.1	229	26	81	59	64	94
38	18.04.2009	19:17:57	45.85	152.09	54	6.3	7	237	24	69	46	66	86
39	21.04.2009	5:26:12	50.47	155.70	144	5.7	7	217	90	76	126	14	-180
40	10.10.2009	21:24:37	47.94	153.06	121	5.4	6.4	302	35	-18	47	80	-124
41	10.12.2009	2:30:46	53.79	153.69	650	5.3	6.9	9	68	-41	118	52	-151
42	12.12.2009	18:38:50	48.89	156.19	49	5.9	6.7	180	7	45	45	85	95
43	24.12.2009	0:23:28	41.78	135.21	382	5.7	6.7	330	48	-65	116	48	-115

Всего получены решения механизмов для 43 землетрясений (табл. 1).

Для сравнения полученных решений составлена таблица стереограмм механизмов (рис. 3). В таблице в первой колонке представлен механизм, рассчитанный методом первых вступлений с использованием программы FOCMEC, во второй колонке – тот же механизм, но рассчитанный с помощью МЕН. Для сравнения приведены механизмы очагов землетрясений, публикуемые на сайтах сейсмологических агентств USGS (3 колонка – 32 землетрясения) и GCMT (4 колонка – 41 землетрясение).

Краткая информация об агентствах. Геологическая служба Соединенных Штатов Америки (USGS) публикует полученные механизмы очагов землетрясений на сайте [14]. За 2005–2009 гг. в каталоге USGS присутствуют 65 механизмов очагов землетрясений, произошедших в исследуемом районе, в том числе 32 из определенных в ходе данной работы. В качестве методической основы в поиске решения механизма принят традиционный метод определения по знакам первых вступлений. С недавнего времени используется метод инверсии волновых форм (ИВФ).

Global Centroid-Moment-Tensor Project (GCMT) [11] публикует механизмы очагов землетрясений всего мира, полученные методом ИВФ, и является продолжением Гарвардского каталога механизмов очагов землетрясений. В каталоге присутствует 306 механизмов очагов землетрясений, произошедших в исследуемом районе в 2005–2009 гг., в том числе 41 из определенных в настоящей работе. Для сравнительного анализа были построены стереограммы в двухдипольном приближении согласно приводимым параметрам нодальных плоскостей.

Каталоги механизмов USGS и GCMT получены независимо и могут отличаться, как видно на примере механизмов № 3 и № 21 (рис. 3).

В целом 33 из 43 сравниваемых механизмов получились близкими (не отличается тип дислокации, положение осей и направление подвижки вдоль плоскостей может несколько отличаться). Ниже рассмотрены полученные решения механизмов очагов землетрясений, где имеются наиболее существенные отличия между четырьмя приведенными вариантами с целью предположить возможную причину отличия. При этом важным считается установить причины отличия между решениями, полученными в FOCMEC и МЕН с использованием одинаковых входных данных, в то время как отличие полученных результатов от данных других сейсмологических агентств вполне предсказуемы – отличаются параметры гипоцентра и

применяемые методики. В методе ИВФ оценивается обобщенный механизм очага землетрясения (центроида), в то время как метод первых вступлений привязан к моменту начала вспарывания разрыва.

Механизм очага землетрясения 25 января 2005 г. в 18 ч 54 мин (№ 2 на рис. 3) в результате расчетов по программам FOCMEC и МЕН получился сбросовым (пологий сброс) с близвертикальным положением одной из плоскостей, а механизм GCMT – взбросовый, одна из плоскостей также субвертикальна, но простирание отличается почти на 45° . Хотя настоящее решение получено с дефицитом знаков первых вступлений – их всего 21 – сбросовый характер механизма устанавливается довольно хорошо, а значит различие в полученных механизмах обусловлено, по всей видимости, различием методик.

Механизм очага землетрясения 15 октября 2005 г. в 10 ч 06 мин (№ 6 на рис. 3) оказался взбросом при всех интерпретациях, однако простирание нодальных плоскостей в полученных решениях и вариантах USGS и GCMT отличается приблизительно на 45° . Так как решение опирается на довольно разноречивые знаки первых вступлений на сейсмограммах сейсмостанций с о. Хоккайдо, возможно, имеет место ошибка в интерпретации полярностей знаков.

Землетрясение 28 сентября 2006 г. в 01 ч 36 мин (№ 10 на рис. 3) имеет существенно разные механизмы: по данным расчетов это взбросо-сдвиг, а по данным USGS и GCMT – почти чистый взброс, при этом простирание оси растяжения отличается почти на 90° . Наиболее вероятной причиной различия в решениях этого достаточно сильного и неплохо обеспеченного данными механизма являются различные оценки глубины очага. Так по каталогу СФ ГС РАН глубина очага составляет 38 км, в то время как USGS использовал в расчетах глубину 8 км, а GCMT – 12 км.

Симуширское землетрясение 13 января 2007 г. в 04 ч 23 мин (№ 21 на рис. 3) явилось, согласно полученным решениям, следствием сброса в условиях субгоризонтального растяжения в направлении, ортогональном простиранию Курильской островной гряды. Близкий механизм, но с небольшой сдвиговой компонентой, получен и по данным GCMT. Агентство USGS публикует механизм типа пологий сброс с субширотной-ориентированной субвертикальной плоскостью.

Механизм очага землетрясения 13 января 2007 г. в 9 ч 18 мин (№ 22 на рис. 3) отсутствует в базах USGS и GCMT. Данное сейсмическое событие – афтершок Симуширского землетрясения 13 января 2007 г. Его механизм получен в условиях дефицита

данных и очень неубедителен. Потому даже при идентичных начальных данных решения, полученные в FOCMEC и MЕН, различаются. Фактически можно утверждать лишь, что это землетрясение произошло в условиях растяжения, явилось результатом сброса, а направление основной оси растягивающего напряжения четко не фиксируется, величина диапазона вариантов ее простирания составляет около 60° .

Еще один афтершок Симуширского землетрясения 13 января 2007 г. в 17 ч 37 мин (№ 23 на рис. 3) оказался пологим надвигом с простиранием субвертикальной нодальной плоскости вкрест острой дуге. При этом небольшая сдвиговая компонента, присутствующая в решении, полученном в FOCMEC, и ее отсутствие в решении по MЕН объясняются неопределенностью положения второй нодальной плоскости. По данным GСMT, механизм очага землетрясения – взбросо-сдвиг с меридионально-ориентированной горизонтальной осью сжатия и осью растяжения с падением на запад.

Механизм очага землетрясения 12 марта 2007 г. в 18 ч 59 мин (№ 24 на рис. 3) по результатам расчета в MЕН интерпретируется как почти чистый сброс, в то время как по данным USGS это взбросо-сдвиг с большой сдвиговой компонентой. Тем не менее, оба варианта являются крайними возможными решениями при расчете методом первых вступлений. Разброс возможных положений нодальных плоскостей механизма данного землетрясения очень велик.

Есть отличия в интерпретации механизма очага землетрясения 29 июня 2008 г. в 20 ч 53 мин (№ 31 на рис. 3). По совокупности анализируемых данных механизм очага землетрясения – взбросо-сдвиг, однако по результатам вычислений в FOCMEC и MЕН простирание нодальных плоскостей отличается на 30° от данных USGS и GСMT. Сложно объяснить такую разницу в интерпретации механизма достаточно сильного и хорошо обеспеченного данными землетрясения, однако стоит отметить его большую глубину – более 300 км.

Механизм очага землетрясения 4 августа 2008 г. в 04 ч 42 мин (№ 34 на рис. 3) в случае его оценки по программе MЕН отличается от решения по FOCMEC и данных других агентств – субвертикальная плоскость имеет простирание на 40° больше. Причина отличия – различие скоростных разрезов, использованных в FOCMEC и MЕН. Первое вступление на близкой региональной станции SKR интерпретировано программой MЕН как рефрагированная волна, а не прямая, как при расчете по FOCMEC, следовательно ее положение на области поиска решения отличается на 180° – это и вызвало поворот проекции нодальной плоскости.

Решение механизма очага землетрясения 24 декабря 2009 г. (№ 43 на рис. 3) допускает два равновероятных варианта, один из них был выбран в FOCMEC, другой в – MЕН. Оба варианта – сброс – отличаются от решения GСMT – пологого надвига.

Таким образом, основной причиной отличия в интерпретации механизмов между полученными результатами и решениями других агентств является дефицит данных, что проявляется при определении механизмов очагов землетрясений с магнитудой менее 6.0, либо в условиях зашумленной записи, например, афтершоков более сильных событий. Особенно сильно дефицит данных влияет на определение положения близгоризонтальных нодальных плоскостей неглубоких землетрясений в связи с очень малым количеством близких сейсмостанций и недостаточным азимутальным окружением.

Разница в определении механизмов с помощью программ FOCMEC и MЕН оказалась невелика. В 25 случаях полученные механизмы оказались идентичны, еще в 14 случаях отличие проявилось в небольшом смещении положения осей в пределах $15\text{--}30^\circ$ без изменения типа сейсмодислокаций. Наконец, в четырех описанных выше случаях наблюдался значительный поворот простирания нодальных плоскостей, при этом тип сейсмодислокаций оставался прежним. Причина этого – использование различных подходов к выбору лучшего из доступных вариантов решений, одинаково удовлетворяющих исходным данным.

Вывод: программа FOCMEC, как и программа MЕН, позволяет интерпретировать механизм очага землетрясения при достаточной обеспеченности данными, при этом значительных различий в том, с помощью какой программы велось определение, нет.

Недостатком программы FOCMEC является полное отсутствие программных методов оценки достоверности найденного решения и разброса полученных значений параметров механизма. Полное извлечение всех доступных решений, найденных программой для заданных условий расчета, позволяет оценить разброс координат осей либо плоскостей механизма, однако это требует отдельной обработки данных. В последних версиях программы SEISAN (версия 9.0 и выше) реализованы программные компоненты для автоматической оценки рассеяния в ориентации подвижки.

Программа MЕН позволяет сравнивать полученные варианты решений по уровню максимального правдоподобия. Также здесь есть возможность оценки рассеяния результатов, однако сам подсчет непрозрачен.

Неоспоримым преимуществом программы FOCMEC, а вместе с ней и SEISAN, является удобный интерфейс и автоматизация рутинной обработки данных. Это позволяет на каждом этапе корректировать исходные данные без существенных временных затрат на переформатирование и т.д. Другим важным преимуществом FOCMEC является возможность использования скоростных разрезов, отличных от среднемировых моделей, и корректировки входных параметров программы без строгой привязки к исходной модели.

ПРИМЕРЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЗМОВ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ САХАЛИНСКОГО РЕГИОНА

Другим этапом проверки возможностей программы является расчет механизмов очагов относительно слабых коровых землетрясений, произошедших на о. Сахалин. Т.к. выше были показаны принципиально одинаковые результаты определений по программам FOCMEC и МЕН, ниже будут приводиться только результаты расчета по FOCMEC. Здесь она более наглядна и удобна при поиске механизмов очагов землетрясений в условиях дефицита исходных данных.

Сахалин значительно менее сейсмичен, чем Курильские острова. Сильные землетрясения здесь достаточно редки, но зато происходят в земной коре вблизи поверхности в значительно более населенных областях. Как уже отмечалось, Сахалинский регион лучше обеспечен инструментальными наблюдениями, чем Курильский. Развиваемые в последнее время современные системы детальных сейсмологических наблюдений в южной и северной частях о. Сахалин предоставляют дополнительные возможности для поиска механизмов очагов относительно слабых землетрясений.

Ниже в качестве примера будут приведены результаты определения механизмов трех сахалинских землетрясений: Горнозаводского 2006 г. (MLH=5.6), Чаплановского 2009 г. (MLH=4.6) и Уангского 2010 г.

(MLH=5.7). Во всех случаях удалось получить устойчивое решение, хорошо согласующееся со структурно-тектоническими и геологическими особенностями района.

Горнозаводское землетрясение произошло 17 августа 2006 г. в 15 ч 20 мин по Гр. времени, или – 18 августа в 2 ч 20 мин по местному времени. Его эпицентр располагался у западного побережья вблизи п. Горнозаводск Невельского района. Главный толчок с магнитудой MLH=5.6 локализован на суше на глубине около 8 км.

Афтершоковый процесс Горнозаводского землетрясения продолжался до конца месяца в виде слабых толчков с магнитудами MLH=2.0–3.0, то есть затух достаточно быстро, однако благодаря близкому расположению сейсмических станций локальной сети оказался хорошо зарегистрирован и локализован (рис. 4). Всего за месяц зарегистрировано более 500 афтершоков. Оказалось, что облако афтершоков вытянуто в северо-западном направлении, с одновременным погружением в сторону моря. При этом гипоцентр главного толчка расположен в юго-восточ-

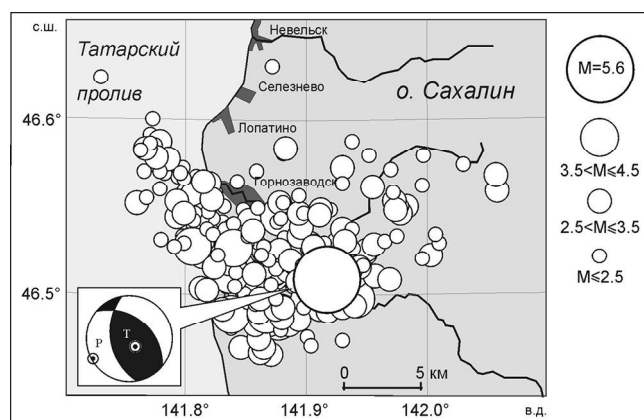


Рис. 4. Положение эпицентра главного толчка Горнозаводского землетрясения 17 августа 2006 г. и облака его афтершоков. Во врезке изображен механизм очага Горнозаводского землетрясения в нижней проекции фокальной полусферы.

Таблица 2. Решения механизма очага Горнозаводского землетрясения 17 августа 2006 г.

Агентство	Широта, гр.	Долгота, гр.	Глубина, км	Магнитуда	NP1			NP2		
					Stk	Dip	Rake	Stk	Dip	Rake
ИМГиГ настоящая работа	46.51	141.92	7.7	MLH=5.6	170	52	117	310	46	60
NIED	46.73	141.86	11.0	Mw=5.5	174	58	90	355	32	90
GCMТ	46.54	141.77	18.1	Mw=5.6	162	55	87	347	35	95
USGS	46.54	141.91	13	Mw=5.5	157	47	82	348	43	98

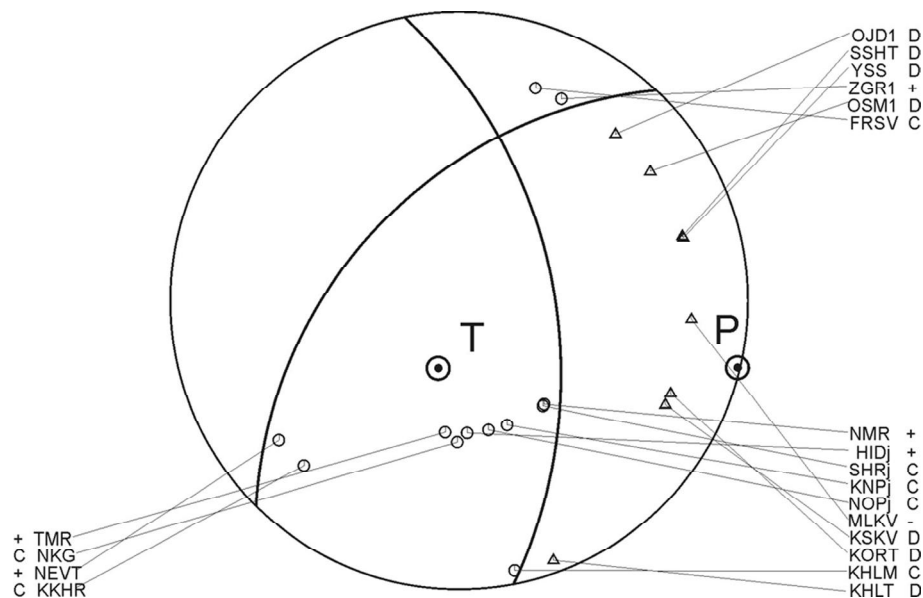


Рис. 5. Область поиска решения механизма очага Чаплановского землетрясения 13 сентября 2009 г. с указанием положения знаков в *P*-волне и проекций нодальных плоскостей на нижнюю полусферу.

Таблица 3. Решения механизма очага Чаплановского землетрясения 13 сентября 2009 г.

Агентство	Широта, гр.	Долгота, гр.	Глубина, км	Магнитуда	NP1			NP2		
					Stk	Dip	Rake	Stk	Dip	Rake
ИМГиГ настоящая работа	46.84	142.16	11.4	MLH=4.6	224	50	131	350	55	52
NIED	47.2	142.3	8	Mw=4.4	209	53	111	356	42	64

ной приподнятой части облака, а гипоцентры афтершоков более позднего времени смещены на северо-запад [5].

Для поиска механизма очага Горнозаводского землетрясения 2006 г. привлекались все доступные записи как локальной и региональной сетей, так и удаленных сейсмостанций. Всего было получено 56 знаков полярностей первых вступлений (рис. 1). Устойчивое решение было получено при 2 несогласованных знаках. Решение довольно точное, разброс положения основных осей находится в пределах 6–10°.

Положение эпицентров афтершоков (рис. 4) не позволяет однозначно выбрать рабочую плоскость, однако общий наклон афтершоковой области на запад позволяет предположить, что эта плоскость южного простирания. Таким образом, Горнозаводское землетрясение явилось следствием взброса вдоль наклонной плоскости, падающей приблизительно на запад с одновременным правосторонним сдвигом.

При этом верхнее западное крыло сместилось на северо-восток, а нижнее – на юго-запад. Очаг землетрясения находился под воздействием диагонального островным геологическим структурам горизонтального напряжения сжатия, ориентированного с северо-востока на юго-запад.

Решение механизма получено основными мировыми и региональными агентствами. Сравнительные результаты определений представлены в табл. 2. Как видно из таблицы, в решениях агентств USGS, GCMT и NIED отсутствует сдвиговая компонента, а ориентация нодальных плоскостей субмеридианальна, что плохо согласуется с ориентацией афтершокового облака.

Чаплановское землетрясение. 13 сентября 2009 г. в 0 ч 13 мин под Камышовым хребтом в западной части Южного Сахалина произошло землетрясение с магнитудой MLH = 4.6. По названию населенного пункта, в котором макросейсмический эф-

факт был максимален, землетрясение было названо Чаплановским [8].

В первые двое суток было локализовано 33 афтершока. Магнитуда самого сильного из них, произошедшего спустя 6 ч 42 мин после главного толчка, составила $MLH=3.4$. Точность определения координат эпицентров афтершоков в совокупности с небольшим размером очага этого относительно слабого землетрясения затрудняет оценку ориентации афтершокового облака.

Чаплановское землетрясение недостаточно уверенно зарегистрировалось удаленными сейсмостанциями, поэтому решение механизма очага землетрясения получено на основе записей локальной сети цифровых сейсмостанций, опорной станции YSS (Южно-Сахалинск), а также ближайших широкополосных станций на о. Хоккайдо. Всего в решении задействовано 20 знаков первых вступлений P -волны. Область поиска решения с выбранным вариантом показана на рис. 5.

Как видно из рис. 5, при небольшом количестве используемых знаков удалось достаточно четко зафиксировать положение нодальных плоскостей. Отдельно стоит отметить станции локальной сети KHLM и KHLT, расстояние между пунктами установки этих станций – несколько километров, однако из-за близости к очагу (22–24 км) угловое расстояние оказалось достаточно большим, чтобы зарегистрировать разнонаправленное первое вступление, зафиксировав таким образом одну из нодальных плоскостей. Разброс полученного решения довольно небольшой – около $5-8^\circ$ для положения основных осей, однако устойчивость решения ввиду малого количества знаков невелика – уже при допуске одного неверного знака решение становится неоднозначным.

Решение механизма данного землетрясения приведено в табл. 3, там же приведено решение, полученное агентством NIED на базе записей сейсмостанций с Хоккайдо (использовались параметры гипоцентра, определенные Японским метеорологическим агентством). Как видно из таблицы, несмотря на расхождение в локализации гипоцентра, варианты механизма довольно близки.

Можно сделать вывод, что землетрясение произошло в условиях субширотного сжатия. Тип подвижки – взбросо-сдвиг.

Чаплановское землетрясение служит хорошим примером определения методом первых вступлений механизма очага слабого землетрясения, произошедшего в районе действия локальной сети сейсмостанций. Такое определение принципиально возможно,

однако лишь в пределах южной части острова, где действует плотная локальная сеть.

Уангское землетрясение. 16 марта 2010 г. в 9 ч 44 мин всемирного времени в северо-западной части о. Сахалин в верховьях рек Уанга и Погиби произошло землетрясение с магнитудой $MLH = 5.7$. За инструментальный период непрерывных сейсмологических наблюдений, проводимых на Сахалине с 1905 г., это землетрясение является сильнейшим в северо-западной части острова.

Результаты детального анализа пространственно-временного распределения афтершоков [4] позволяют уверенно оконтурить очаговую зону Уангского землетрясения, простирающуюся в северо-северо-западном направлении вдоль северного продолжения Центрально-Сахалинского глубинного разлома – линии Западно-Энгизпальского разлома (рис. 6). Эпицентр главного события ($MLH = 5.7$) приурочен к

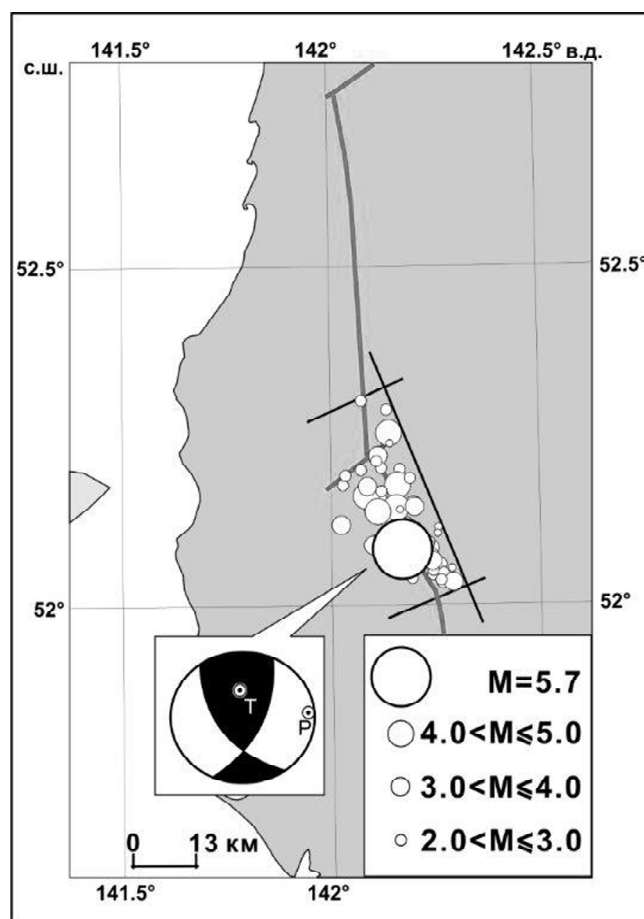


Рис. 6. Положение эпицентра главного толчка Уангского землетрясения 16 марта 2010 г., облака его афтершоков и сегмента разломной зоны. Во врезке изображен механизм очага Уангского землетрясения в нижней проекции фокальной полусферы.

южному краю группы повторных толчков, а очаги афтершоков с магнитудами $MLH \geq 4.0$ сконцентрированы в северо-западной части очаговой зоны. Наибольшей силы афтершок с $MLH = 5.1$ был зарегистрирован спустя трое суток. Слабая обеспеченность района близкими сейсмостанциями не позволяет точно определить глубину афтершоков, однако характер записей позволяет утверждать, что большая часть афтершоков локализована на глубинах менее 10 км, где, по-видимому, и происходит накопление упругих деформаций, обусловленных общим региональным сжатием зоны разлома. Протяженность области афтершоков составила приблизительно 30 км.

Для определения фокального механизма использовались записи локальной сети детальных сейсмологических наблюдений ИМГиГ ДВО РАН, региональной сети широкополосных сейсмических станций СФ ГС РАН, глобальной сейсмологической широкополосной сети IRIS [12], японской сейсмологи-

ческой широкополосной сети NIED [15], а также сети широкополосных сейсмических станций ДВО РАН [9].

В расчете задействовано 44 знака четких вступлений первых смещений, зарегистрированных на вертикальной компоненте записей сейсмических колебаний. Поиск решений осуществлялся на сетке с шагом, равным 1° , при этом предполагалось отсутствие несогласованных знаков. Соответствующие этим условиям решения механизма очага в показаны на рис. 7. Параметры сейсмодислокаций характеризуются следующими оценками рассеяния в ориентации осей главных действующих напряжений: ось растяжения – $\pm 10^\circ$; ось сжатия – $\pm 5^\circ$.

Как видно из решения фокального механизма (рис. 6), землетрясение с подвижкой взбросо-сдвигового типа произошло в условиях субширотного сжатия, что в целом хорошо согласуется с современными представлениями о характере деформирования

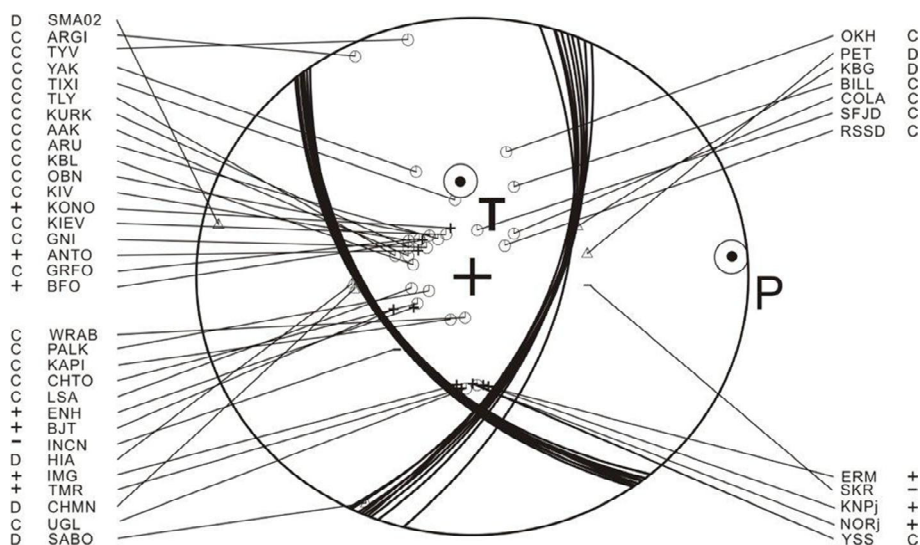


Рис. 7. Область поиска решения механизма очага Уангского землетрясения 16 марта 2010 г. с указанием положения знаков в P-волне и проекций нодальных плоскостей на нижнюю полусферу.

Таблица 4. Решения механизма очага Уангского землетрясения 16 марта 2010 г.

Агентство	Широта, гр.	Долгота, гр.	Глубина, км	Магнитуда	NP1			NP2		
					Stk	Dip	Rake	Stk	Dip	Rake
ИМГиГ настоящая работа	52.08	142.17	4.7	$MLH = 5.7$	144	52	42	25	58	134
GСMT	52.14	142.09	12	$M_w = 5.8$	166	50	88	349	40	93
ОВN	52.12	142.28	10	$MS = 5.5$	164	55	26	58	69	142

Северного Сахалина. Одна нодальная плоскость (NP1) простирается в юго-восточном направлении, другая (NP2) – в северо-восточном (табл. 4). Направление простирания первой из плоскостей разрыва (NP1) достаточно уверенно согласуется с конфигурацией разрывов Центрально-Сахалинского глубинного разлома в данном районе и картиной пространственного распределения афтершоков, что в совокупности предопределяет выбор ее в качестве рабочей плоскости механизма очага. Таким образом, по данным детальных эпицентральных наблюдений можно сделать вывод, что при основном толчке 16 марта 2010 г. разрыв в очаге произошел по плоскости, ориентированной субмеридионально. Сравнение механизмов очага Уангского землетрясения, полученных разными агентствами, приведено в табл. 4. В решении GCMT отсутствует сдвиговая компонента, в то время как решение агентства OBN более похоже на решение, полученное в настоящей работе, хотя и повернуто по часовой стрелке примерно на 20° .

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И НЕКОТОРЫЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Исходя из результатов приведенной работы, можно сформулировать несколько методических замечаний, касающихся как общих вопросов применения метода первых вступлений при определении механизмов очагов сильных землетрясений Курило-Охотского и Сахалинского регионов, так и относящихся к особенностям программы FOCMEC.

1. Опыт использования при определении механизмов очагов землетрясений данных о полярности первых вступлений, полученных из различных бюллетеней, показал их низкую точность. В предыдущие десятилетия, когда использовать для определения механизма непосредственно сейсмограммы землетрясений было затруднительно, сбор данных из бюллетеней был оправдан. Сейчас возможности использования цифровых записей значительно возросли, следует отдавать им абсолютное предпочтение. В идеальном случае от использования данных бюллетеней нужно полностью отказаться, использовать только те записи, которые видел оператор.

2. В условиях, когда для расчета механизма привлекались данные бюллетеней, возрастание числа данных положительно сказывалось на точности решения. В случае же, когда оператор сам снимает данные непосредственно с сейсмограмм, излишние данные затрудняют работу, не неся дополнительной информации. Следует стремиться к максимальному азимутальному и достаточному дистанционному покрытию области поиска решения, при этом отдавая

предпочтение наиболее надежным станциям. В случае нахождения большой группы станций в одном азимуте от эпицентра достаточно взять два-три наиболее четких вступления (например, группа сейсмостанций Аляски на рис. 2).

3. Наиболее полезны для определения механизма очага землетрясения записи близких сейсмостанций. С возрастанием эпицентрального расстояния число доступных данных растет, а их качество и полезность падают. Поэтому авторы работы считают допустимым ограничить эпицентральное расстояние сейсмостанций, используемых для определения механизма, дистанцией в 45° . Более далекие станции можно выборочно привлекать для фиксации субвертикальной нодальной плоскости.

4. Следует с осторожностью подходить к использованию знаков на локальных эпицентральных расстояниях, особенно когда затруднена однозначная интерпретация типа волны в диапазоне расстояний 100–150 км. Вступления прямых и рефрагированных волн на таких расстояниях могут не разделяться во времени. Поэтому разумным будет помечать вступления станций в диапазоне расстояний 100–150 км как нечеткие (E).

5. Существенное влияние оказывает на качество определения механизма проблема локализации параметров гипоцентра, особенно глубины. В отдельных случаях имеет смысл варьировать взятые из каталога первоначальные значения глубины в целях получения лучшего схождения решения механизма. Особенно актуально это при положении глубины очага вблизи отметки 35 км (граница M в IASP91) и глубине более 500 км.

Метод первых вступлений, реализованный в программе FOCMEC, может быть использован как для индивидуального, так и для массового определения механизмов очагов землетрясений Сахалинского и Курило-Охотского регионов. Для повышения достоверности результатов определения в неоптимальных системах наблюдений можно привлекать данные о поляризации *SV*- и *SH*-волн. Эта возможность реализована в программе FOCMEC.

Однако в целях повышения количества надежно обрабатываемых событий стоит острая необходимость применения современных подходов определения тензора сейсмического момента по волновым формам.

ВЫВОДЫ

1. Проанализирована работа двух программ для расчета механизма очага землетрясения: FOCMEC и МЕН. Показано, что обе программы достаточно хо-

рошо позволяют определять механизм очага, однако обладают рядом особенностей. Программа FOCMEC удобна для индивидуальных расчетов механизмов в “сложных условиях”, когда необходим детальный подход. FOCMEC, встроенная в комплекс SEISAN, удобна в ходе комплексного анализа землетрясений. Программа MEN менее требовательна к квалификации оператора и удобна для массовых определений механизмов, однако устаревший интерфейс накладывает ограничения на ее возможности.

2. Показано, что обеспеченность данными для поиска механизмов очагов землетрясений в Курило-Охотском регионе методом первых вступлений довольно слабая. Удастся уверенно определять механизмы наиболее сильных землетрясений с магнитудой $M=6.0$ и более, зарегистрированных мировой сейсмологической сетью. Для более слабых событий возникает неопределенность решения, вызванная дефицитом данных о полярностях вступлений близких станций.

3. Для Сахалинского региона ситуация в целом благоприятная. Несколько лучшие условия для определения механизмов очагов землетрясений складываются на юге о. Сахалин, где действует локальная сеть сейсмостанций. При их удачном расположении возможно определение механизмов относительно слабых землетрясений практически без привлечения удаленных сейсмических станций.

4. Выполнено массовое определение фокальных механизмов землетрясений, произошедших в 2005–2009 гг. в районе Курильских островов, акватории Охотского моря, Татарского пролива и северной части Японского моря. Уточнены механизмы очагов некоторых сахалинских землетрясений, которые произошли в 2006–2010 гг.

5. Сравнение механизмов очагов землетрясений, определенных в ходе данной работы, с вариантами механизмов, полученными сейсмологическими агентствами USGS и GCMT, показало хорошее совпадение результатов, большая часть решений не имеет отличий по типу сейсмодислокации. Однако в количественном отношении полученный каталог механизмов очагов землетрясений существенно уступает данным основных мировых агентств, полученным методом ИВФ.

Таким образом, вычислительная программа FOCMEC может быть рекомендована для оперативного и массового определения механизмов очагов землетрясений Сахалинского и Курило-Охотского регионов. Наибольшие перспективы видятся в определении механизмов очагов относительно слабых землетрясений в южной части о. Сахалин, хорошо обеспеченной сейсмостанциями. Однако в целях повышения количе-

ства надежно обрабатываемых событий стоит острая необходимость применения современных методов определения тензора сейсмического момента.

Авторы благодарны Сахалинскому филиалу Геофизической службы РАН, а также японскому Национальному исследовательскому институту наук о Земле и предотвращению катастрофических явлений (National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention) и Объединенному институту сейсмологических исследований (Incorporated Research Institutions for Seismology) за предоставление сейсмологических данных.

Работа выполнена при финансовой поддержке Комплексной программы фундаментальных научных исследований ДВО РАН “Современная геодинамика, активные геоструктуры и природные опасности Дальнего Востока России” и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 10-07-98000-р_сибирь_a), а также в рамках международного соглашения о научном сотрудничестве с Институтом сейсмологии и вулканологии Хоккайдского университета (Япония).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гоцадзе О.Д., Кейлис-Борок В.И., Кириллова И.В. и др. Исследование механизма очага землетрясения. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 148 с.
2. Каталог механизмов очагов сильных ($M \geq 6.0$) землетрясений Курило-Охотского региона 1964–2009 гг. / Л.Н. Поплавская, М.И. Рудик, Т.В. Нагорных, Д.А. Сафонов. Владивосток: Дальнаука, 2011. 131 с.
3. Коновалов А.В., Сычев А.С., Гаврилов А.В. Детальные сейсмологические наблюдения на севере Сахалина с целью обнаружения техногенных землетрясений // Проблемы сейсмичности и современной геодинамики Дальнего Востока и Восточной Сибири: Докл. науч. симпоз., 1–4 июня 2010, г. Хабаровск / Под ред. В.Г. Быкова, А.Н. Диденко. Хабаровск: ИТиГ им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, 2010. С. 126–129.
4. Коновалов А.В., Семенова Е.П., Сафонов Д.А. Результаты детального изучения очаговой зоны землетрясения 16 марта 2010 г. ($M_w=5.8$) на северо-западе о. Сахалин // Вулканология и сейсмология. 2012. № 4. С. 37–49.
5. Левин Б.В., Ким Ч.У., Тихонов И.Н. Горнозаводское землетрясение 17(18) августа 2006 г. на юге о-ва Сахалин // Тихоокеан. геология. 2007. Т. 26, № 2. С. 102–108.
6. Определение механизма землетрясений на цифровой электронной вычислительной машине / Т.С. Желанкина, В.И. Кейлис-Борок, В.Ф. Писаренко, И.И. Пятецкий-Шапиро // Алгоритм интерпретации сейсмических данных. М.: Наука, 1971. С. 3–27. (Вычислит. сейсмол., вып. 5).
7. Принципы формирования и состав алгоритмического обеспечения регионального центра обработки сейсмологических наблюдений на Дальнем Востоке (на примере Дальнего Востока) / Л.Н. Поплавская, А.О. Бобков, В.Н. Кузнецова, Т.В. Нагорных, М.И. Рудик // Сейсмологические

- наблюдения на Дальнем Востоке (методические работы ЕССН). М.: Наука, 1989. С. 32–51.
8. Сафонов Д.А., Семенова Е.П., Михайлов В.И., Фокина Т.А. Чаплиновское землетрясение 13 сентября 2009 г. с $M=4.6$ на Сахалине // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы 5-ой Международной сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2010. С. 198–203.
 9. 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.
 10. Юнга С.Л. Методы и результаты определения сейсмостектонической деформации. М.: Наука, 1990. 191 с.
 11. GCMT, <http://www.globalcmt.org>, The Global Centroid-Moment-Tensor Project.
 12. IRIS, <http://www.iris.edu>, Incorporated Research Institutions for Seismology.
 13. Kennett B.L.N., Engdahl E.R. Travel times for global earthquake location and phase identification // Geophys. J. Int. 1991. V. 105. P. 429–466.
 14. NEIC, <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/sopar/>, National Earthquake Information Center.
 15. NIED, <http://www.bosai.go.jp>, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention.
 16. Ottemoller L., Voss P., Havskov J. Seisan earthquake analysis software for Windows, Solaris, Linux and Macosx. 2011, <https://www.uib.no/rg/geodyn/artikler/2010/02/software>.
 17. Snoke J.A., Munsey J.W., Teague A.C., Bollinger G.A. A program for focal mechanism determination by combined use of polarity and SV-P amplitude ratio data // Earthquake Notes. V. 55, N 3. 1984. P. 15.
 18. Snoke J.A. FOCMEC: FOCal MEChanism determinations. A manual. 2003, <http://www.geol.vt.edu/outreach/vtso/focmec/>.
 19. USGS, <http://earthquake.usgs.gov>, U.S. Geological Survey.

Рекомендована к печати Б.В. Левиным

D.A. Safonov, A.V. Kononov

FOCMEC computer program testing for determination of earthquake source mechanism, the Kuril-Okhotsk and Sakhalin Regions

The results of FOCMEC computer program testing for single and mass determination of earthquake source mechanisms in the Kuril-Okhotsk and the Sakhalin regions were considered. Mass determination of source mechanism of earthquakes, occurred in the Kuril-Okhotsk region in 2005-2009, was carried out. Accuracy of the calculations was estimated by comparing the determined mechanisms with the solutions of world and regional seismological agencies. The paper presents the results of earthquake source mechanism determination, considering some seismic events in Sakhalin Island, local tectonic settings and its interpretation, and suggests methodological recommendations.

Key words: earthquake, source mechanism, seismic station, digital recordings, seismic dislocation parameters, Sakhalin region.