

УДК 550.340

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ, НЕ УДОВЛЕТВОРЯЮЩИЕ МОДЕЛИ ДВОЙНОГО ДИПОЛЯ: КРИТЕРИЙ ВЫЯВЛЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ В ОСТРОВНЫХ ДУГАХ

© 2009 г. А.И. Лутиков¹, С.Л. Юнга², М.С. Кучай¹

¹ Геофизическая служба РАН, г. Москва, Россия

² Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

Работа посвящена исследованию структуры очага землетрясения в плане возможности отнесения его к традиционной модели двойного диполя без момента или к более сложной “не двухдипольной”, так называемой *NDC*-модели. Эта модель описывает очаги, в которых вспарывание происходит одновременно по более чем одной плоскости; предложен критерий выявления подобных источников. С позиций анализа устойчивости знака детерминанта матрицы тензора центра сейсмического момента в области определения ее компонент исследованы очаги *NDC*-типа и их пространственное распределение в островных дугах на примере очагов землетрясений двух регионов – Курило-Камчатского и Тонга-Кермадек (юго-западная часть Тихого океана).

Ключевые слова: *NDC*-модель, детерминант, тензор центра сейсмического момента, сейсмический очаг, область определения.

Введение

Для уяснения природы сейсмических источников, не удовлетворяющих модели двойного диполя без момента, называемых источниками *NDC*-типа, используются представления о сложном характере разрывообразования в очагах отдельных коровых землетрясений, при которых напряжения реализуются по двум или более направлениям, не параллельным друг другу [Юнга, Вессон, 1979; Frohlich, 1995; Bruce, Angus, Miller, 1998; Yunga, Lutikov, Molchanov, 2005; Lutikov, Yunga, 2009]. При этом возникает естественный вопрос о критерии выявления таких источников.

В определенной степени почти все сейсмические источники, за исключением источников с механизмом чистого сдвига, могут быть отнесены к *NDC*-типу, поскольку характеризующие их коэффициент Лоде–Надаи или детерминант матрицы тензора центра сейсмического момента (ТЦМ), отличны от нуля. Поэтому выяснение типа источника требует анализа ТЦМ и выявления возможности отличия от нуля детерминанта матрицы $\text{Det}(M_{ij})$ с учетом погрешностей определения его компонент. Если удастся показать, что $\text{Det}(M_{ij})$ не меняет знака во всей области определения его компонент $[M_{ij} - E_{ij}, M_{ij} + E_{ij}]$, где E_{ij} – ошибки определения компонент ТЦМ ($i, j = 1, 2, 3$), то сейсмический источник может быть отнесен к *NDC*-типу.

С использованием этого критерия на примере двух островных дуг – Курило-Камчатской и Тонга-Кермадек – оценивается доля источников *NDC*-типа в зависимости от магнитуды событий и глубины их очагов, а также определяются режимы сеймотектонической деформации в различных интервалах глубин.

Детерминант матрицы тензора сейсмического момента

Детерминант матрицы тензора центроида сейсмического момента – важная характеристика сейсмического процесса, которая, с одной стороны, определяет режим сеймотектонической деформации, а, с другой, указывает на то, соответствует механизм рассматриваемых сейсмических событий модели двойного диполя без момента или нет. Удобство использования этой характеристики обусловлено тем, что детерминант, являясь инвариантом ТЦМ, не зависит от выбора системы координат.

Современными сейсмологическими наблюдениями установлено, что волновая картина, наблюдаемая при некоторых землетрясениях, не в полной мере соответствует модели двухдипольного источника, отвечающей подвижке по единственной плоскости разрыва. В таких случаях для интерпретации волновых полей привлекается модель очага, отличающаяся от общепринятой, которая в зарубежной литературе получила название *NDC*-источника (*Non Double Couple* – “не двухдипольный”) [Frohlich, 1995].

Следует отметить, что соответствующие таким сложным очагам эквивалентные точечные источники обладают по сравнению с обычными механизмами очагов дополнительной степенью свободы. Выяснение типа сейсмического источника требует анализа ТЦМ и выяснения возможности отличия от нуля детерминанта матрицы его компонент с учетом погрешностей их определения.

Известно, что знак детерминанта матрицы ТЦМ ($\text{Det}(M_{ij})$) определяет режим сеймотектонической деформации. В терминах главных значений

$$\text{Det}(M) = M_1 M_2 M_3, \quad (1)$$

где M_1, M_2, M_3 – собственные значения ТЦМ, определяемые соотношением $M_1 \geq M_2 \geq M_3$; при этом всегда $M_1 > 0$, $M_3 < 0$, а след матрицы ТЦМ

$$M_1 + M_2 + M_3 = 0. \quad (2)$$

В таком случае легко видеть, что режиму одноосного растяжения соответствуют значения

$$\text{Det}(M_{ij}) > 0 \quad (M_1 > 0, M_2 < 0, M_3 < 0);$$

режиму одноосного сжатия –

$$\text{Det}(M_{ij}) < 0 \quad (M_1 > 0, M_2 > 0, M_3 < 0);$$

чистому сдвигу –

$$\text{Det}(M_{ij}) = 0 \quad (M_1 = M_3, M_2 = 0).$$

По сравнению с коэффициентом Лодэ–Надаи эта картина обратна по знаку: режиму одноосного растяжения (удлинения) эллипсоида девиаторных деформаций или напряжений соответствует $\mu_M < 0$, а режиму одноосного сжатия (укорочения) – $\mu_M > 0$.

Отметим также, что если рассматриваются нормированные на скалярный момент матрицы ТЦМ, то $\text{Det}(M_{ij}/M_0)$ по абсолютной величине всегда заведомо меньше единицы. В самом деле, анализ *СМТ*-каталога (<http://saf.harvard.edu>) показывает, что норма матрицы ТЦМ

$$\sqrt{2} \leq \|(M_{ij}/M_0)\| \leq \sqrt{3}.$$

Это может быть проиллюстрировано гистограммой, построенной по результатам анализа более чем 5000 ТЦМ из *СМТ*-каталога и представляющей распределение относительного числа событий в зависимости от отношения нормы матрицы ТЦМ к скалярному сейсмическому моменту (рис. 1).

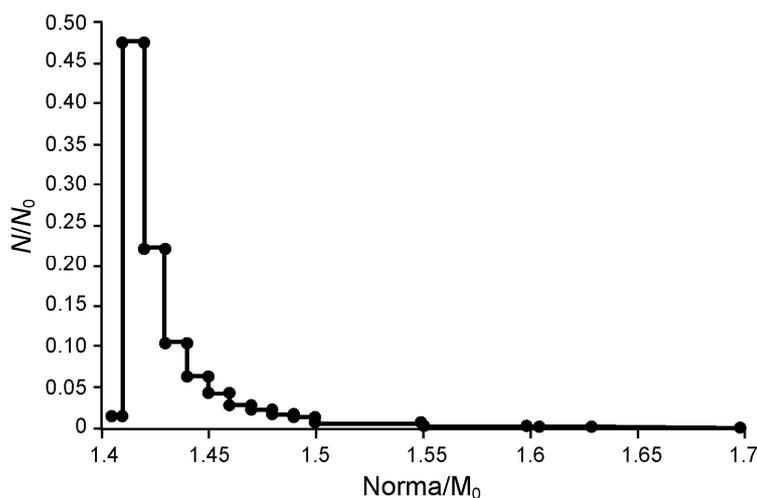


Рис. 1. Распределение относительного числа ТЦМ в зависимости от отношения нормы матрицы ТЦМ к скалярному сейсмическому моменту; $N_0 = 5134$

Можно видеть, что $\|(M_{ij}/M_0)\|$ действительно изменяется в пределах от $\sqrt{2}$ до $\sqrt{3}$. При этом случаи, когда $\|(M_{ij}/M_0)\| \approx \sqrt{2}$ (свыше 81% матриц ТЦМ), соответствуют традиционной модели очага в виде двойной пары сил без момента, а предельная величина квадрата нормы единичной матрицы вследствие размерности пространства равна 3. Таким образом, в терминах главных значений ТЦМ имеет место неравенство

$$2 \leq (M_1/M_0)^2 + (M_2/M_0)^2 + (M_3/M_0)^2 \leq 3.$$

С учетом этого неравенства и условия (2) можно показать, что всегда

$$|\text{Det}(M_{ij}/M_0)| < 1/\sqrt{2}. \tag{3}$$

Использование оценки (3) полезно при установлении степени отклонения механизма очага от модели двойного диполя без момента.

Исследование на экстремум детерминанта матрицы ТЦМ

Как было отмечено выше, выяснение типа сейсмического источника требует анализа компонент тензора сейсмического момента и выявления возможности отличия от нуля детерминанта $\text{Det}(M_{ij})$ с учетом погрешностей их определения. При определении величины $\text{Det}(M_{ij})$ с учетом погрешностей определения компонент ТЦМ представляется важным предварительное исследование его на локальные экстремумы, для чего используется известный в математическом анализе или линейной алгебре подход, сводящийся к выявлению знаков главных миноров квадратичной формы второго дифференциала детерминанта матрицы ТЦМ [Ильин, Позняк, 1965]

$$\text{Det}(M_{ij}) = \begin{vmatrix} M_{rr} & M_{rs} & M_{re} \\ M_{sr} & M_{ss} & M_{se} \\ M_{er} & M_{es} & M_{ee} \end{vmatrix}.$$

Если мы примем во внимание погрешности (ΔM_{ij}) компонент матрицы тензора сейсмического момента M_{ij} , то должны будем рассмотреть все возможные варианты вариаций $\text{Det}(M_{ij})$, когда M_{ij} принимает значения в сегменте $[M_{ij} - \Delta M_{ij}, M_{ij} + \Delta M_{ij}]$.

Можно показать, что функция шести переменных $\text{Det}(M_{ij})$ не имеет локальных экстремумов в пределах интервала $(M_{ij} - \Delta M_{ij}, M_{ij} + \Delta M_{ij})$ [Lutikov, Yunga, 2003]. Действительно, достаточное условие наличия экстремума функции $\text{Det}(M_{ij})$ заключается в том, что главные миноры квадратичной формы

$$d^2 \text{Det}(M_{ij}) = \sum_{i,j=1}^3 \frac{\partial^2 \text{Det}(M_{ij})}{\partial M_i \partial M_j} dM_i dM_j$$

имеют один и тот же знак [Ильин, Позняк, 1965]. В данном случае дифференцирование ведется по всем шести независимым компонентам тензора M_{ij} . Таким образом, мы должны рассмотреть главные миноры (M_1, M_2, \dots) детерминанта

$$\left| \frac{\partial^2 \text{Det}(M_{ij})}{\partial M_i \partial M_j} \right| = \begin{vmatrix} 0 & M_{ee} & M_{ss} & 0 & 0 & -2M_{se} \\ M_{ee} & 0 & M_{rr} & 0 & -2M_{re} & 0 \\ M_{ss} & M_{rr} & 0 & -2M_{rs} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2M_{rs} & 0 & 2M_{se} & 2M_{re} \\ 0 & -2M_{re} & 0 & 2M_{se} & 0 & 2M_{rs} \\ -2M_{se} & 0 & 0 & 2M_{re} & 2M_{rs} & 0 \end{vmatrix}.$$

В результате имеем:

$$\begin{aligned} M_1 &= 0, \\ M_2 &= -M_{ee}^2, \\ M_3 &= 2M_{rr} M_{ss} M_{ee}, \\ M_4 &= 4M_{re}^2 M_{ee}^2. \end{aligned}$$

Из рассмотрения уже первых четырех миноров видно, что условие наличия локальных экстремумов не выполняется, так как всегда $M_2 < 0$, а $M_4 > 0$, т.е. $\text{Det}(M_{ij})$ действительно не имеет внутренних локальных экстремумов.

Таким образом, оказалось, что $\text{Det}(M_{ij})$ может достигать максимальных или минимальных значений лишь на границах области своего определения. Поскольку границами шестимерного куба являются 12 пятимерных гиперплоскостей, доказательство отсутствия у функции шести переменных $\text{Det}(M_{ij})$ внутренних локальных экстремумов, вообще говоря, не освобождает от необходимости выявления его максимальных и минимальных значений во всей области определения функции $\text{Det}(M_{ij})$ численными методами.

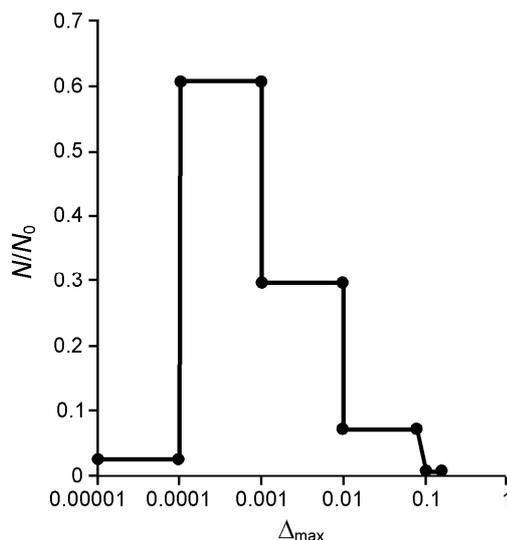
Для этой цели использовался расчет функции $\text{Det}(M_{ij})$ в узлах сетки, покрывающей область $[M_{ij} - \Delta M_{ij}, M_{ij} + \Delta M_{ij}]$ ($i, j = 1, 2, 3$). С учетом того, что функция $\text{Det}(M_{ij})$ меняется достаточно плавно, для оптимизации времени счета был принят шаг сетки, равный $\Delta M_{ij}/10$. Таким образом, окончательный выбор абсолютных максимумов и минимумов функции $\text{Det}(M_{ij})$ осуществлялся путем перебора $3.2 \cdot 10^7$ узлов сетки с фиксированием тех из них, где эти максимумы или минимумы достигались. Исходными данными для расчетов служил массив ТЦМ, включавший учетную информацию

о сейсмических событиях, компоненты ТЦМ и ошибки их определения, нормированные на скалярный момент. Время анализа одного детерминанта на современных персональных компьютерах составляло 4–5 с.

Анализ приблизительно 2750 ТЦМ из *СМТ*-каталога, относящихся к различным интервалам магнитуд и глубин очагов, показал, что абсолютные максимумы или минимумы детерминантов достигаются преимущественно в краевых точках сегментов $[M_{ij} - \Delta M_{ij}, M_{ij} + \Delta M_{ij}]$ ($i, j = 1, 2, 3$), что отмечено более чем в 83% случаев. Более того, благодаря тому, что функция $\text{Det}(M_{ij})$ является плавно меняющейся, практически во всех случаях именно на основании перебора краевых точек сегментов $[M_{ij} - \Delta M_{ij}, M_{ij} + \Delta M_{ij}]$ можно оперативно определить, относится ли рассматриваемый очаг к *NDC*-типу или нет.

Гистограмма, приведенная на рис. 2, показывает максимальные расхождения (Δ_{\max}) в оценках границ изменения величины $\text{Det}(M_{ij})$ с учетом ошибок определения его элементов, получаемых двумя способами – путем перебора вершин шестимерного куба и в результате прямых расчетов по узлам сетки. Гистограмма построена по тем ТЦМ, у которых локальные экстремумы достигались не в вершинах шестимерного куба – среди всех рассмотренных 2750 ТЦМ таких оказалось 414.

Рис. 2. Гистограмма, показывающая максимальные расхождения в оценках границ изменения величины $\text{Det}(M_{ij})$ с учетом ошибок определения его элементов, полученных двумя способами – путем перебора вершин шестимерного куба и в результате прямых расчетов по узлам сетки



Можно видеть, что максимальные расхождения между расчетами двумя способами в 92.5% случаях не превышают 0.01. Только в двух случаях, что составляет менее 0.1% от всех рассмотренных ТЦМ из *СМТ*-каталога, при расчетах по узлам сетки и по вершинам шестимерного куба был получен разный вывод о принадлежности очага к *NDC*-типу.

Выяснилось, что в вычислительной практике для анализа устойчивости определения знака детерминанта при массовой статистической обработке достаточно проанализировать только значения детерминанта в вершинах шестимерного куба, когда компоненты матрицы возмущаются в пределах погрешностей максимальным образом, что составляет 64 варианта.

Некоторые замечания о структуре сейсмичности островных дуг

Вдоль северной и западной окраин Тихого океана расположена серия изогнутых цепочек островов – Алеутские острова, Курилы, Япония, острова Рюкю, Филиппины. К югу от Японии ответвляется Идзу-Бонинская – Марианская дуга. Еще дальше на юг

следуют Индонезия, Соломоновы острова, Новые Гибриды, острова Тонга и Кермадек. Все это – островные дуги [Уеда, 1980], характерной особенностью которых является высокая сейсмичность и проявления вулканизма.

Особый интерес представляет изучение сейсмичности в островных океанических дугах, поскольку в них возможен анализ всего диапазона глубин очагов землетрясений – от коровых и верхнелитосферных ($h < 70$ км) до мантийных (h до 600–700 км). Гипоцентры глубоких землетрясений располагаются вдоль некоторой наклоненной в сторону континента и уходящей вглубь плоскости, называемой зоной Вадати–Беньюфа или зоной Беньюфа по имени ученых, впервые открывших и исследовавших глубокофокусную сейсмичность.

Согласно представлениям, сформировавшимся еще в конце 60-х–начале 70-х годов прошлого века, причиной возникновения глубокофокусных землетрясений являются различного рода фазовые превращения вещества в мантии [Ringwood, 1967; Knopoff, Randall, 1970; Randall, 1971]. Предполагалось, что особенности глубокофокусной сейсмичности должны найти свое отражение в механизмах очагов глубоких землетрясений. Используя трехдипольную модель источника, Л.М. Балакина и В.В. Кисловская [1975] на примере трех глубоких землетрясений, произошедших у западного побережья Камчатки, показали, что соответствующие источники были объемными, а не плоскими (двойной диполь без момента). Было высказано предположение, что механизм очага этих землетрясений представлял собой некоторую комбинацию сдвиговых и объемных деформаций. В последние годы появились также данные, позволяющие связывать *NDC*-механизмы некоторых глубоких землетрясений с анизотропией в мантии [Vavryčuk, 2004]. Однако детальное обсуждение тех или иных причин, объясняющих возникновение *NDC*-очагов, лежит за рамками настоящей работы.

Известен ряд работ, сосредоточенных на выявлении *NDC*-составляющих в механизмах очагов отдельных землетрясений (см., например, [Kuge et al., 1994, 1999; Frohlich, 1995; Henry, Woodhouse, Das, 2002]). Примером может служить недавняя работа Ж.Я. Аптекман и Р.Э. Татевосяна [2007], в которой возможность выявления сложных землетрясений по данным *СМТ*-каталога исследуется на основе массового статистического анализа содержащихся в каталоге решений. Авторы этой работы выясняют возможность выявления *NDC*-очагов с использованием параметра ϵ , который, как и коэффициент Лодэ–Надаи, является некоторой комбинацией собственных значений тензора сейсмического момента, но меняется в пределах $-0.5 \dots +0.5$. В работе убедительно показано, что величина параметра ϵ не может служить прямым указанием для перехода к сложной модели источника. Очевидно, что ни коэффициент Лодэ–Надаи, ни параметр ϵ не могут быть надежным критерием выявления очагов *NDC*-типа, поскольку их абсолютная величина сама по себе никак не соотносится с величиной ошибок определения компонент тензора сейсмического момента. Поэтому эти характеристики могут быть применены при обсуждении принадлежности очагов к *NDC*-типу лишь на качественном уровне. Корректным могло бы быть их использование для оценки ошибок, возникающих при решении задачи.

Нами для тех же целей был реализован другой, с нашей точки зрения, более простой в вычислительном плане подход, связанный с анализом величины детерминанта матрицы ТЦМ. С использованием такого подхода интересно выяснить вклад землетрясений с очагами *NDC*-типа в наблюдаемую на различных глубинах сейсмичность. Важно также оценить, как меняется доля *NDC*-очагов в общем числе событий в зависимости от их магнитуды.

В качестве критерия принадлежности очага к *NDC*-типу нами была выбрана величина детерминанта матрицы ТЦМ с учетом предельных ошибок его определения –

очаг может быть отнесен к *NDC*-типу, если детерминант матрицы ТЦМ анализируемого землетрясения меняет знака на сегменте $[\text{Det}(M_{ij}) - \Delta, \text{Det}(M_{ij}) + \Delta]$, где Δ – предельная ошибка его определения. Как было показано выше, $\text{Det}(M_{ij})$ может достигать максимальных или минимальных значений лишь на границах области своего определения. Более того, было установлено, что практически всегда вопрос о принадлежности рассматриваемого очага к *NDC*-типу может быть решен на основании перебора граничных точек сегментов $[M_{ij} - \Delta M_{ij}, M_{ij} + \Delta M_{ij}]$ ($i, j = 1, 2, 3$). Тем не менее, для анализа устойчивости определения знака $\text{Det}(M_{ij})$ расчеты проводились в узлах сетки, как это описано выше.

Была предпринята попытка статистического анализа структуры разноглубинной сейсмичности в островных дугах с использованием детерминанта матрицы ТЦМ. В качестве примеров рассматривались Курило-Камчатская дуга и дуга Тонга–Кермадек. Информационной основой служил каталог ТЦМ сильнейших землетрясений мира с 1976 по 2007 гг., созданный и постоянно наращиваемый исследовательской группой Гарвардского университета США [Dziewonski, Chou, Woodhouse, 1981; Dziewonski, Woodhouse, 1983, <http://saf.harvard.edu>].

Обратимся к анализу зависимости доли землетрясений с очагами *NDC*-типа от магнитуды на различных глубинах.

Доля землетрясений с очагами NDC-типа в зависимости от магнитуды

Рассмотрим сначала область дуги Тонга–Кермадек. Схема сейсмичности дуги по данным ТЦМ-каталога (<http://saf.harvard.edu>) за 1976–2006 гг. приведена на рис. 3, где показаны гипоцентры землетрясений с $M_w \geq 5.3$. Каталог содержит сведения о 1583 событиях, произошедших в указанный период с магнитудами от 4.8 до 7.9 при глубине очагов 0–690 км и для которых были определены ТЦМ. Представление о распределении числа ТЦМ по различным интервалам магнитуд и глубин дает табл. 1.

Для каждого приведенного в табл. 1 события в соответствии с описанной выше процедурой рассчитывались максимальные и минимальные значения $\text{Det}(M_{ij})$ и значения $\text{Det}(M_{ij})$ без учета ошибок определения компонент матрицы ТЦМ. Затем для каждого интервала глубин и магнитуд определялось отношение числа событий, для которых знак максимальных и минимальных значений детерминанта сохранялся (*NDC*-механизмы), к общему числу событий (рис. 4).

Таблица 1. Распределение числа ТЦМ по разным интервалам глубин и магнитуд.
Дуга Тонга–Кермадек

Глубина h , км	Магнитуда M_w							Всего
	4.8–5.2	5.3–5.7	5.8–6.2	6.3–6.7	6.8–7.2	7.3–7.7	7.8–8.2	
0–70	181	349	139	31	1	1	1	703
71–150	36	59	26	8	3	0	0	132
151–250	12	54	23	9	5	1	0	104
251–350	17	33	8	2	1	0	0	61
351–450	14	35	20	7	2	0	0	78
451–550	16	57	19	3	2	1	0	98
551–690	34	281	66	16	8	2	0	407
N_0	310	868	301	76	22	5	1	1583

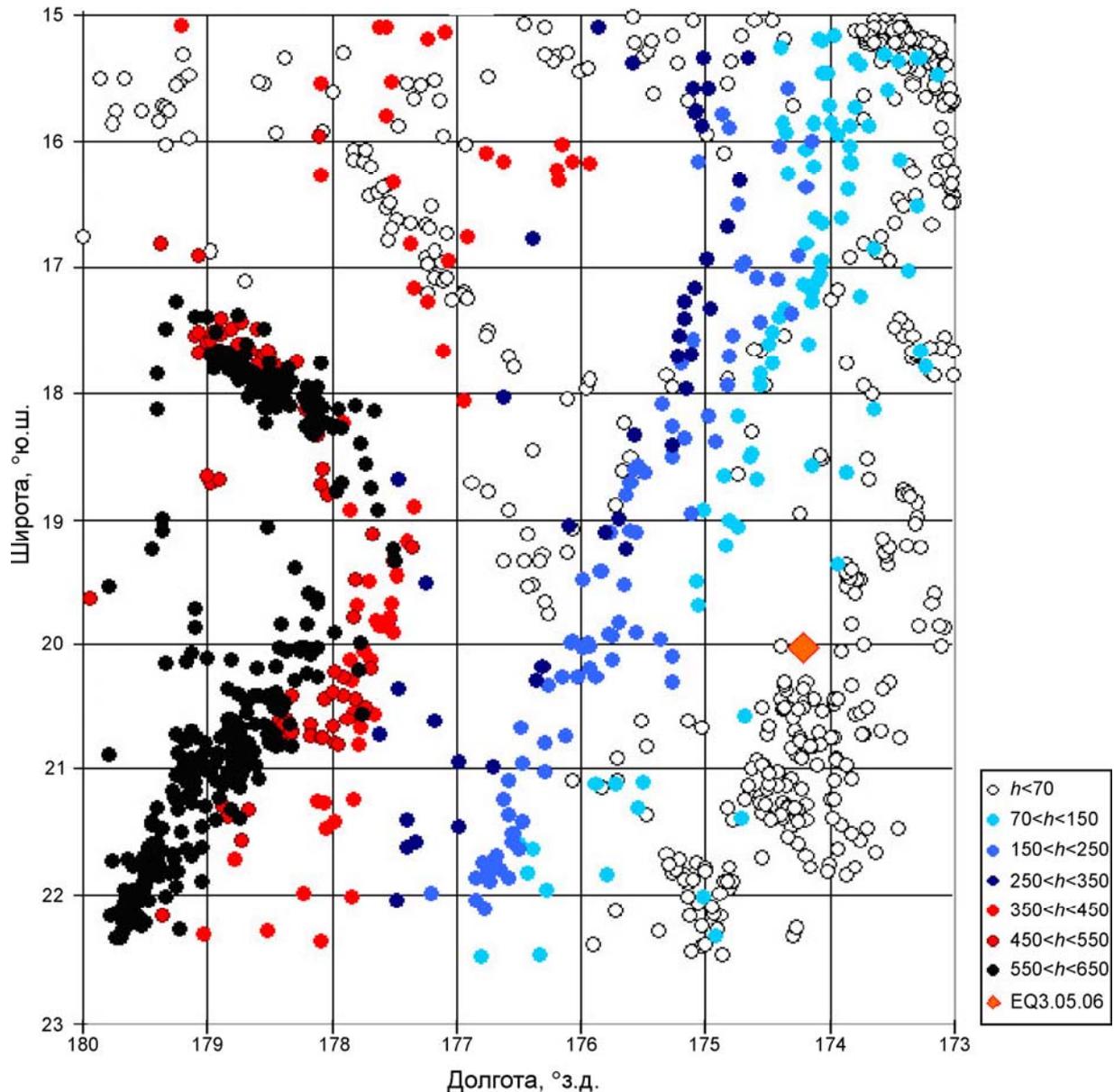


Рис. 3. Сейсмичность дуги Тонга–Кермадек за 1976–2006 гг. Круги – гипоцентры событий с $M_W \geq 5.3$; цвет заливки соответствует разным интервалам глубин. Красный ромб – гипоцентр землетрясения 03.05.2006 г., $M_W = 8.53$

Полученный результат кажется, на первый взгляд, неожиданным. То, что число событий с очагами *NDC*-типа растет с магнитудой, в общем, представляется естественным, поскольку в больших очагах более вероятно возникновение подвижек по нескольким плоскостям. Но оказывается, что очаги *NDC*-типа резко преобладают уже для магнитуд 6–6.5 даже при неглубоких ($h < 70$ км) землетрясениях. Неожиданно и то, что доля очагов *NDC*-типа на больших глубинах часто даже меньше, чем у мелкофокусных землетрясений. При этом уменьшение доли очагов *NDC*-типа для больших магнитуд в интервалах 71–150 км и 451–550 км, вероятно, связано с недостаточной статистикой сейсмических событий для этих глубин.

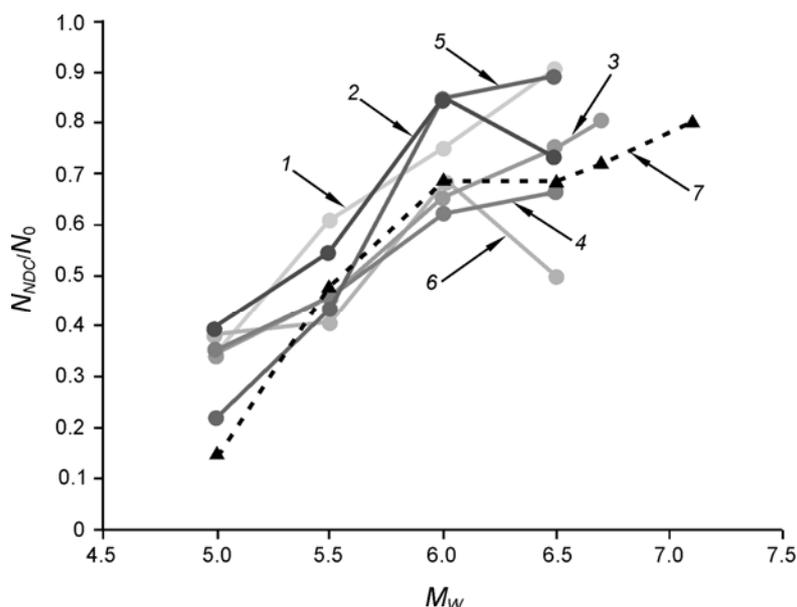


Рис. 4. Дуга Тонга–Кермадек. Зависимость доли событий с очагами *NDC*-типа от магнитуды M_w в разных интервалах глубин: 1 – 0–70 км, 2 – 71–150 км, 3 – 151–250 км, 4 – 251–350 км, 5 – 351–450 км, 6 – 451–550 км, 7 – 551–690 км

Перейдем к рассмотрению событий, произошедших в области Курило-Камчатской дуги. Данные о распределении ТЦМ по разным интервалам магнитуд и глубин приведены в табл. 2. Приведенные данные позволяют построить зависимости доли очагов *NDC*-типа от магнитуды лишь для интервалов глубин 0–80 км и 81–150 км (рис. 5), так как для больших глубин число событий оказывается недостаточным для получения сколько-нибудь надежных результатов. Как и в первом случае (дуга Тонга–Кермадек), прослеживается быстрое увеличение доли событий *NDC*-типа с ростом магнитуды.

Таблица 2. Распределение числа ТЦМ по разным интервалам глубин и магнитуд. Курило-Камчатская дуга

Глубина h , км	Магнитуда M_w								Всего
	4.7	4.8–5.2	5.3–5.7	5.8–6.2	6.3–6.7	6.8–7.2	7.3–7.7	7.8–8.3	
0–80	6	355	364	135	40	15	3	5	923
81–150	0	43	59	14	3	2	1	0	122
151–250	0	10	7	8	2	0	0	0	27
251–350	0	5	13	3	0	0	0	0	21
351–450	0	1	11	5	3	0	0	0	20
451–550	0	7	10	3	2	0	0	0	22
551–680	0	0	7	7	2	3	1	0	20
N_0	6	421	471	175	52	20	5	5	1155

В то же время ситуация такова, что для глубин менее 70–80 км число событий, происходящих в обстановке режима сжатия ($\text{Det}(M_{ij}) < 0$), уравнивается числом событий, характеризующихся режимом растяжения ($\text{Det}(M_{ij}) > 0$), так что в этом интервале глубин в среднем геодинамическая ситуация как бы соответствует *DC*-источникам (*Double Couple*). Анализ детерминантов средних механизмов (см. ниже) приводит к сходным результатам, однако на больших глубинах это далеко не всегда так.

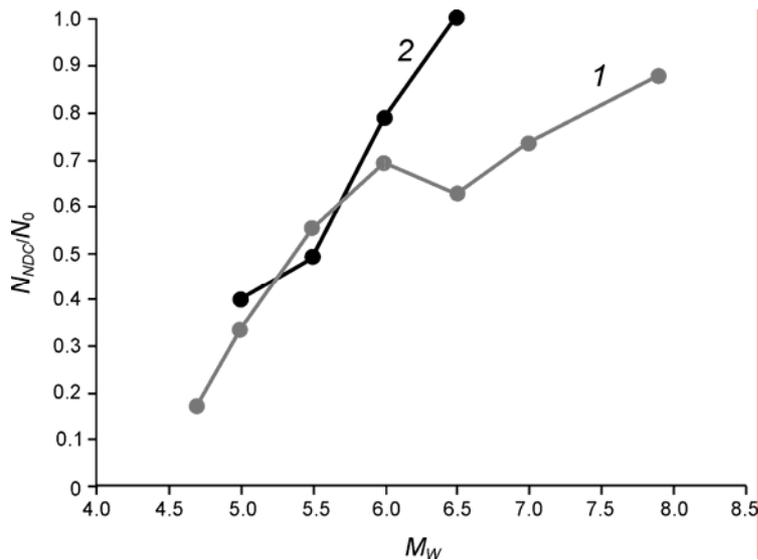


Рис. 5. Курило-Камчатская дуга. Зависимость доли событий с очагами NDC-типа от магнитуды M_W в разных интервалах глубин: 1 – 0–80 км, 2 – 81–150 км

Исследование типов сеймотектонических деформаций в разных интервалах глубин

Проанализируем изменение типов сеймотектонических деформаций в разных интервалах глубин на основании анализа детерминантов средних матриц ТЦМ, начав рассмотрение с Курило-Камчатской дуги. Исследуемая область охватывала практически всю дугу (43° – 55° с.ш. и приблизительно 130° – 164.5° в.д.). Дуга была разбита на три близких по размеру сегмента – северный, центральный и южный. Детерминанты средних матриц ТЦМ рассматривались для них раздельно. Чтобы исключить подавляющее влияние более сильных землетрясений, все ТЦМ предварительно нормировались на свои скалярные моменты, благодаря чему при статистической обработке события независимо от магнитуды имели одинаковый вес. Сведения о числе ТЦМ и магнитудах в разных интервалах глубин для трех названных сегментов Курило-Камчатской дуги приведены в табл. 3.

Таблица 3. Сведения о числе ТЦМ и магнитудах в разных интервалах глубин для трех сегментов Курило-Камчатской дуги

Сегмент	Глубина h , км	Магнитуда M_W	Число ТЦМ
Северный (Камчатка) 1976–2007 гг.	0–80	4.6–7.8	221
	81–150	4.7–7.5	24
	151–250	5.2–6.3	8
	251–350	–	–
	351–450	–	–
	451–550	5.1–5.5	8
Центральный (Северные – Средние Курилы) 1976–2006 гг.	551–680	5.4–6.1	6
	0–80	4.8–6.8	172
	81–150	5.1–5.8	32
	151–300	5.0–5.9	5
	301–400	5.0–6.5	5
Южный (Средние – Южные Курилы) 1976–2006 гг.	401–500	5.2–7.3	13
	501–650	5.2–7.2	13
	0–80	4.6–8.3	486
	81–150	5.0–7.8	53
	151–250	5.0–6.5	16
	251–350	5.1–6.0	15
	351–450	5.3–6.8	7
	451–600	5.2–7.2	7

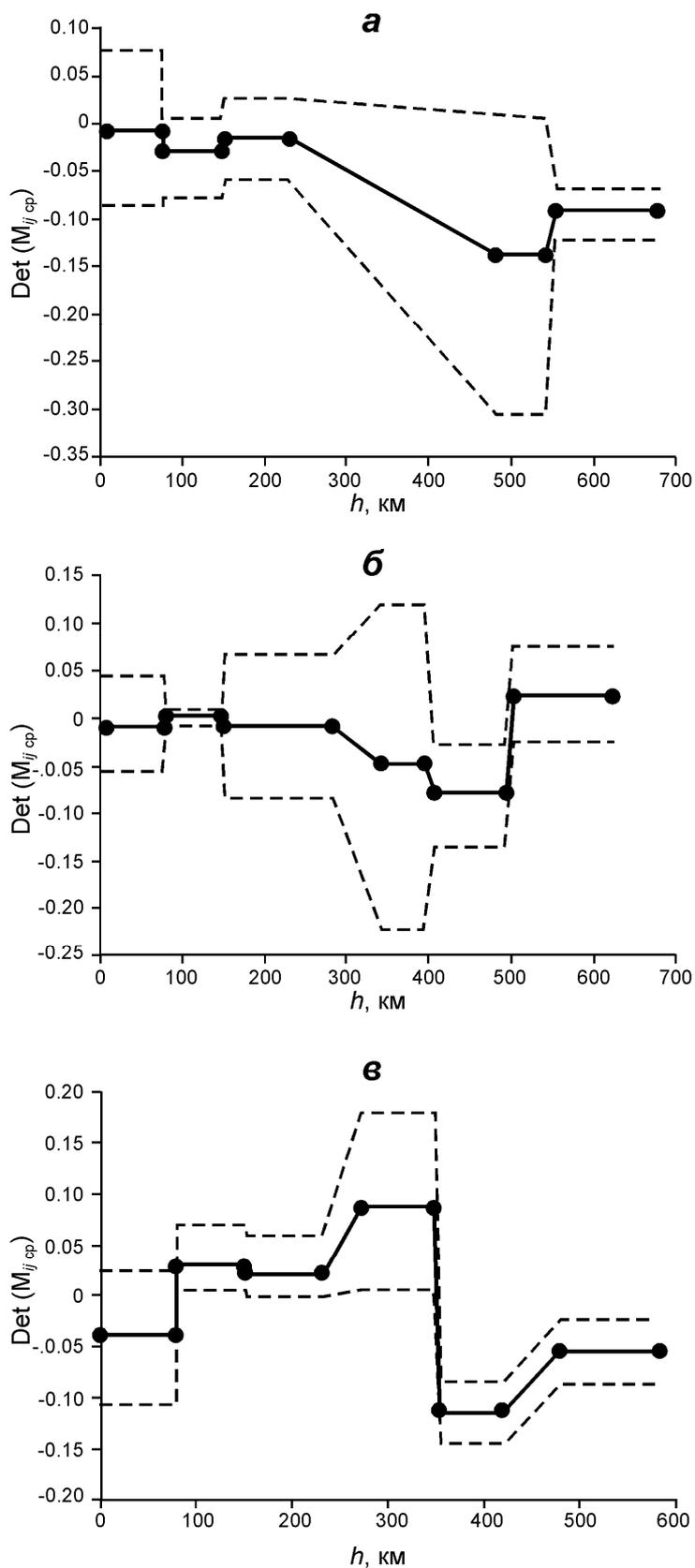


Рис. 6. Изменение величины $\text{Det}(M_{ij\text{cp}})$ с глубиной в северном (а), центральном (б) и южном (в) сегментах Курило-Камчатской дуги. Сплошная линия – среднее значение детерминанта, штриховые – его максимальные и минимальные значения с учетом ошибок определения элементов матрицы $M_{ij\text{cp}}$

Изменение поведения $\text{Det}(M_{ij\text{cp}})$ на разных глубинах с учетом ошибок его определения отображают графики, построенные для каждого сегмента (рис. 6).

Северный сегмент (Камчатка) – 51° – 55° с.ш., 149.6° – 164.4° в.д. Для этого сегмента дуги (см. табл. 3 и рис. 6, а) отсутствуют сведения о землетрясениях промежуточной глубины (250–450 км). В каждом интервале глубин по всем имеющимся ТЦМ рассчитывался детерминант средней матрицы $\text{Det}(M_{ij\text{cp}})$ и определялись его наибольшие и наименьшие значения с учетом ошибок элементов матрицы ТЦМ.

Во всех интервалах глубин средний механизм характеризуется режимом одноосного сжатия ($\text{Det}(M_{ij\text{cp}}) < 0$), а на глубинах свыше 550 км может быть уверенно отнесен к *NDC*-типу.

Центральный сегмент (Северные – Средние Курилы) – 47° – 51° с.ш., 139° – 160.5° в.д. В этом сегменте (см. табл. 3 и рис. 6, б) механизм характеризуется режимом одноосного сжатия на глубинах 0–500 км, а на самых больших глубинах (501–625 км) его сменяет режим одноосного растяжения. Средние механизмы лишь в интервале глубин 400–500 км относятся к *NDC*-типу.

Южный сегмент (Средние – Южные Курилы) – 43° – 47° N, 129.9° – 158.2° E. Здесь (см. табл. 3 и рис. 6, в) средний механизм характеризуется режимом одноосного сжатия на глубинах 0–80 км и 350–600 км; для большей же части интервала промежуточных глубин (81–350 км) характерен режим одноосного растяжения. Начиная с глубин 80 км, средние механизмы повсеместно относятся к *NDC*-типу, причем режим растяжения на глубинах более 350 км сменяется режимом сжатия.

На рис. 6 хорошо видно, что в разных сегментах Курило-Камчатской дуги изменение типа сеймотектонической деформации с глубиной существенно различается, отражая, вероятно, некоторое различие геодинамических условий. Во всех сегментах дуги прослеживаются области, характеризуемые средними *NDC*-механизмами. Их наибольшее распространение отмечено в южном сегменте дуги – здесь они представлены во всех интервалах глубин кроме самого верхнего слоя (до 80 км). В центральном сегменте Курило-Камчатской дуги эти механизмы представлены в меньшей степени.

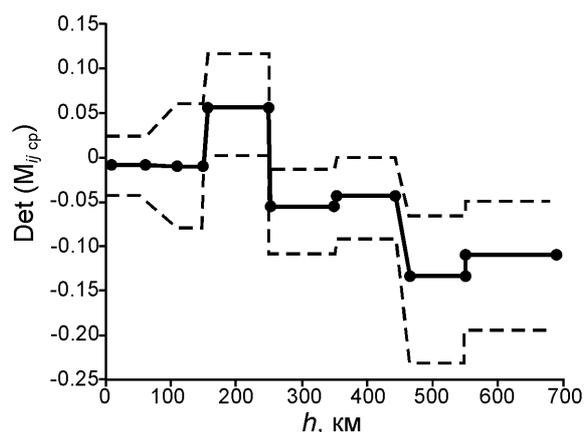
Результаты, полученные для Курило-Камчатской дуги, интересно сопоставить с аналогичными для дуги Тонга–Кермадек, которая является крайним юго-западным обрамлением Тихого океана. Принадлежность дуги Тонга–Кермадек к области сочленения трех литосферных плит обуславливает чрезвычайно сложную картину разноглубинной сейсмичности в ней. Типы сеймотектонических деформаций в разных интервалах глубин изучались отдельно в четырех приблизительно равных квадрантах, на которые была разделена область, изображенная на рис. 3.

С позиций проводимого анализа наиболее интересен юго-западный квадрант рассматриваемой области (22.5° – 19.0° ю.ш., 180° – 176.0° з.д.), в котором сейсмичность представлена во всех интервалах глубин – от 0 до почти 700 км. Сведения о числе ТЦМ и магнитудах M_W в разных глубинных интервалах за 1976–2006 гг. для этой области приведены в табл. 4, зависимость $\text{Det}(M_{ij\text{cp}})$ от глубины – на рис. 7.

При сопоставлении рис. 6 и 7 прослеживается определенное сходство в поведении представленных на них графиков. В случае юго-западной части островной дуги Тонга–Кермадек средний механизм характеризуется режимом одноосного сжатия на глубинах 0–150 км и 250–700 км, часть интервала, относящегося к промежуточным глубинам (151–250 км), характеризуется режимом одноосного растяжения. Начиная с глубин

Таблица 4. Сведения о числе ТЦМ и магнитудах в разных интервалах глубин для юго-западной части дуги Тонга–Кермадек

Глубина h , км	Магнитуда M_W	Число ТЦМ
0–70	4.9–6.5	21
71–150	4.9–6.8	13
151–250	5.0–7.7	37
251–350	5.2–6.9	16
351–450	5.0–7.2	38
451–550	5.1–7.4	49
551–690	5.0–7.6	255

**Рис. 7.** Изменение величины $\text{Det}(M_{ij \text{ ср}})$ с глубиной в юго-западной части островной дуги Тонга–Кермадек (22.5° – 19.0° ю.ш., 180° – 176.0° з.д.). Условные обозначения см. на рис. 6

более 150 км, средние механизмы повсеместно относятся к *NDC*-типу; режим растяжения на глубинах более 250 км сменяется режимом сжатия. Это почти в точности повторяет ситуацию в южном сегменте Курило–Камчатской дуги.

Таким образом, можно считать установленным, что средние механизмы *NDC*-типа широко распространены на больших глубинах в областях островных дуг, в то время как средние механизмы в земной коре и верхней части литосферы повсеместно удовлетворяют традиционной модели двойного диполя без момента. Это может указывать на несколько различную природу сейсмичности на больших глубинах по сравнению с сейсмическими проявлениями в литосфере. Хотя сам по себе этот вывод и не является новым, тем не менее, важно отметить, что он впервые получен на основании строгого количественного анализа.

Заключение

На основе анализа устойчивости знака детерминанта матрицы тензора сейсмического момента ($\text{Det}(M_{ij})$) с учетом погрешностей определения его компонент разработана методика выявления сейсмических источников, не удовлетворяющих модели двойного диполя без момента (так называемые источники *NDC*-типа). С ее использованием на примере двух островных дуг – Курило–Камчатской и Тонга–Кермадек – оценена доля источников *NDC*-типа в зависимости от магнитуды и глубины очага, а также определены режимы сеймотектонической деформации в различных интервалах глубин (0–690 км). Основные выводы выполненной работы сводятся к следующему.

1. На основании анализа знаков главных миноров квадратичной формы второго дифференциала $\text{Det}(M_{ij})$ установлено, что $\text{Det}(M_{ij})$ может достигать своих максимальных или минимальных значений лишь на границах области своего определения.

2. Сопоставление прямых расчетов $\text{Det}(M_{ij})$ с переборами в узлах шестимерной сетки показало, что в вычислительной практике, для анализа устойчивости определения знака детерминанта при массовой статистической обработке достаточно проанализировать значения детерминанта в вершинах шестимерного куба, когда компоненты матрицы варьируются в пределах погрешностей максимальным образом, т.е. рассмотреть всего 64 варианта.

3. Установлен характер зависимости доли землетрясений с очагами *NDC*-типа от магнитуды. Оказывается, что очаги такого рода резко преобладают уже для магнитуд 6–6.5 даже для неглубоких ($h < 70$ км) землетрясений. Отчетливой зависимости изменения доли очагов *NDC*-типа от рассматриваемого интервала глубин не выявлено. В то же время ситуация такова, что для глубин менее 70–80 км число событий, происходящих в обстановке режима сжатия ($\text{Det}(M_{ij}) < 0$), уравнивается числом событий, характеризующихся режимом растяжения ($\text{Det}(M_{ij}) > 0$), так что в среднем в этом интервале глубин геодинамическая ситуация как бы соответствует источникам *DC*-типа.

4. Анализ детерминантов средних матриц ТЦМ показал, что средние механизмы *NDC*-типа широко распространены на больших (более 100–150 км) глубинах в областях островных дуг, в то время как средние механизмы в земной коре и верхней части литосферы повсеместно удовлетворяют традиционной модели двойного диполя без момента.

Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 07-05-00436а).

Литература

- Аптекман Ж.Я., Татевосян Р.Е. О возможности выявления сложных землетрясений по данным каталога // Физика Земли. 2007. № 5. С.17–23.
- Балакина Л.М., Кисловская В.В. Особенности механизма очага некоторых глубоких землетрясений в Охотском море // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1975. № 8. С.17–28.
- Ильин В.А., Позняк Э.Г. Основы математического анализа. М.: Наука, 1965. 571 с.
- Уеда С. Новый взгляд на Землю. М.: Мир, 1980. 213 с.
- Юнга С.Л., Вессон Р.Л. Особенности механизма землетрясений в районе Гарма // Сборник Советско-Американских работ по прогнозу землетрясений. Москва; Душанбе: Дониш, 1979. Т. 2, кн.1. С.50–56.
- Bruce R.J., Angus D., Miller G.D. Foulger Non-double-couple earthquakes. I // Theory. Rev. Geophys. 1998. V. 36, N 4. P.525–549.
- Dziewonski A.M., Chou T.A., Woodhouse J.H. Determination of earthquake source parameters from wave-form data for studies of global and regional seismicity // J. Geophys. Res. 1981. V. 86. P.2825–2852.
- Dziewonski, A.M., Woodhouse J.H. An experiment in systematic study of global seismicity; centroid-moment tensor solutions for 201 moderate and large earthquakes of 1981 // J. Geophys. Res. 1983. V. 88. P.3247–3271.
- Frohlich C. Characteristics of Well-Determined Non-Double-Couple Earthquakes in the Harvard CMT Catalog // Phys. Earth Planet. Inter. 1995. V. 91, Iss 4. P.213–228.
- Henry C., Woodhouse J.H., Das S. Stability of earthquake moment tensor inversions: effect of the double-couple constraint // Tectonophysics. 2002. V. 356. P.115–124.
- Knopoff L., Randall M.J. The compensated linear vector dipole: a possible mechanism for deep earthquakes // J. Geophys. Res. 1970. V. 75, N 26. P.4957–4963.

- Kuge K., Lay T.* Data-dependent non-double-couple components of shallow earthquake source mechanisms; effects of waveform inversion instability // *Geophys. Res. Lett.* 1994. V. 21. P.9–12.
- Kuge K., Kikuchi M., Yamanaka Y.* Non-double-couple moment tensor of the March 25, 1998, Antarctic earthquake: composite rupture of strike-slip and normal faults // *Geophys. Res. Lett.* 1999. V. 26. P.3401–3404.
- Lutikov A., Yunga S.* Non Double Couple Seismic Sources and its Stress Environment. 2003. European Geophysical Society. Abstracts of EGS-AGU-EUG Joint Assembly. V. 5. EAE03-A-14053.
- Lutikov A., Yunga S.* Objective criteria of non double couple seismic sources revealing and some insites of its distribution in island arches // EGU2009-12338, EGU General Assembly, Vienna, Austria, 2009.
- Randall M.J.* Shear Invariant and Seismic Moment for Deep-Focus Earthquakes // *J. Geophys. Res.* 1971. V. 76, N 20. P.4091–4092.
- Ringwood A.E.* The piroxene-granet transformation in the earth's mantle // *Earthq. Planet. Sci. Lett.* 1967. N 2.
- Vavryčuk V.* Inversion for anisotropy from non-double-couple components of moment tensors // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109, B07306. P.1–13.
- Yunga S., Lutikov A., Molchanov O.* Non double couple seismic sources, faults interaction and hypothesis of self-organized criticality // *Natural Hazard and Earth System Sciences.* 2005. V. 5. P.11–15.

Сведения об авторах

ЛУТИКОВ Александр Иванович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Геофизическая служба РАН, 249035, Россия, Калужская область, г. Обнинск, пр. Ленина, 189. Тел.: 499-254-99-50. E-mail: ail@ifz.ru

ЮНГА Сергей Львович – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, профессор, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10. Тел.: 499-254-53-50. E-mail: syunga@ifz.ru

КУЧАЙ Марк Соломонович – инженер-исследователь, Геофизическая служба РАН, 249035, Россия, Калужская область, г. Обнинск, пр. Ленина, 189. Тел.: 499-254-99-50. E-mail: kuchai@ifz.ru

SEISMIC SOURCES NOT SATISFYING DOUBLE COUPLE MODEL: CRITERION OF REVEALING, AND DISTRIBUTION IN ISLAND ARCHES

A.I. Lutikov¹, S.L. Yunga², M.S. Kuchai¹

¹ *Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

² *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

Abstract. Paper is devoted to study of seismic source structure from point of view to relate them to traditional double couple model or to more complicated, so-called NDC-model. Models of the last type describe the source in which seismic rupture occurs simultaneously on more than one plane. The objective criterion of revealing of such sources is offered. From positions of CMT matrix determinant stability analysis in the field of its components definition the NDC-type seismic sources and their spatial distribution on an example of Kuriles-Kamchatka and Tonga arc regions were investigated.

Keywords: NDC-model, determinant, seismic moment tensor, the seismic source, a range of definition.