

УДК 550.34

## ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ГЕНЕЗИСЕ ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ТОХОКУ 11.03.2011 г.

© 2011 г. Е.А. Рогожин, С.Л. Юнга, С.Н. Родина

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

Приводятся результаты исследования зоны подготовки катастрофического землетрясения 11.03.2011 г. ( $M=9$ ) вблизи восточного побережья о-ва Хонсю. Ретроспективный анализ фокальных механизмов глубоких землетрясений западной части Тихого океана позволил выявить их влияние на зону очага землетрясения Тохоку. Процесс его подготовки исследован также в рамках анализа сейсмостектонических деформационных процессов на региональном уровне, который включает оценку временного хода ряда ключевых параметров, выявление их вариаций и пространственной приуроченности аномалий к очаговой зоне.

*Ключевые слова:* землетрясение, фокальные механизмы, СМТ-решения, сейсмостектоническая деформация, аномалия, глубокофокусные форшоки, Хонсю, землетрясение Тохоку.

PACS 91.30.Bi, 91.30.Ga, 91.30.Px

### Введение

В связи с развитием и совершенствованием глобальной сети сейсмических станций, углублением методов интерпретации сейсмограмм и получением все более объемных данных особую роль приобретает изучение закономерностей в характере механизмов очагов землетрясений. Если долгое время эти данные использовались в основном при анализе структурной позиции очаговых зон крупных землетрясений, то сейчас резко возросший информационный поток открывает новые возможности мониторинга сейсмостектонического деформационного процесса [Рогожин и др., 1999].

С середины 1990-х годов до настоящего времени на восточной активной тихоокеанской окраине Евразии отмечается начало периода сейсмической активизации [Рогожин, Захарова, 1998]. Целая серия сильнейших землетрясений возникла в Японии на восточном побережье о-вов Хоккайдо и Хонсю. На Сахалине и Курило-Камчатской

островной дуге также произошли сильные землетрясения: Шикотанское 1994 г., Нефтегорское 1995 г., Кроноцкое 1997 г., Симуширские 2006 и 2007 гг. По уточненной оценке Японского метеорологического агентства (Japan Meteorological Agency – JMA), сейсмическая катастрофа 2011 г. имела магнитуду  $M=9$ . В провинции Тохоку (о-в Хонсю, Японский архипелаг) это значительно выше значений магнитуды всех ранее инструментально определенных в регионе сейсмических событий [Tohoku..., 2011]. Понимание генезиса очага землетрясения Тохоку по своим масштабам требует привлечения обширных, максимально полных и статистически представительных данных всей сейсмической истории региона в полном диапазоне глубин гипоцентров от земной коры и литосферы до верхней мантии. Процесс развития сейсмической обстановки в окрестности очага землетрясения Тохоку анализируется далее на разных масштабных уровнях в контексте выявления закономерностей и особенностей реализации сеймотектонических деформаций (СТД) и пространственно-временной приуроченности аномалий ключевых параметров к очаговой зоне.

### Использованные данные

Сейсмологические каталоги параметров очагов землетрясений – один из основных источников информации для анализа СТД и выявлению тенденций и особенностей их развития. В современной сейсмологической практике широко используется определение характеристик механизмов очагов землетрясений. Эти подходы разработаны после внедрения в систему стационарных наблюдений цифровых широкополосных сейсмических станций и создания глобальных сейсмических сетей. Их применение основано на анализе длиннопериодных сейсмических колебаний. С помощью инверсии волновых форм рассчитываются компоненты тензора момента, определенные методом центроида (СМТ-решения) [Dziewonski et al., 1981]. Возможность такого анализа существует даже в режиме, близком к реальному времени, как это делается, например, в Национальном центре информации о землетрясениях США (NEIC), в сейсмическом центре Гарвардского университета США и др.

С начала 70-х годов минувшего века в рамках научно-исследовательских проектов на регулярной основе по данным более чем 100 цифровых станций глобальной сейсмической сети определяются СМТ-решения и публикуется каталог параметров тензора момента центроида для всех землетрясений мира с  $M \geq 4.5$ . Каталог с 1976 г. доступен на Web-сайте [www.seismology.harvard.edu] и ряде других Web-сайтах. Поскольку при построении СМТ-решений используется длиннопериодная составляющая сейсмических волн, можно считать, что данные о механизме относятся к главной фазе разрыва в очагах сильных землетрясений и несут информацию об их общих интегральных характеристиках. В задачу настоящей работы входило выделение решений, существенно не согласующихся с типичными по целому ряду признаков, а также выявление пространственно-временной связи глубокофокусных форшоков, предваряющих крупные коровые землетрясения.

### Анализ глубокофокусных очагов зоны субдукции в окрестности о-ва Хонсю

Сильные сейсмические события в зоне желобов северо-западной части Тихого океана, по современным представлениям тектоники плит, обязаны своим возникновением процессу субдукции Тихоокеанской плиты под Евразию. Этим обстоятельством во

многим обусловлен механизм глубокофокусных форшоков, предваряющих крупные коровые землетрясения. В работах К. Моги [Mogi, 1973, 1988] отмечаются пространственно-временные связи между такими событиями. С терминологической точки зрения глубокофокусные очаги в зоне субдукции литосферной плиты в большинстве случаев могут быть отнесены к форшокам несколько условно, основываясь главным образом на их пространственно-временной позиции. В строгом понимании термин «форшок» предвосхищает необходимые для его применения обоснования взаимосвязи глубокофокусных и коровых очагов. Изучение распределения осей сжатия ( $P$ -осей) глубокофокусных очагов показало, что их проекции на поверхность пересекаются в зоне потенциально сильного землетрясения. На этом основании области их пересечения могут служить для «визуального» выделения потенциально опасных зон [Рогожин и др., 2000; Захарова, Рогожин, 2000, 2006]. Глубокофокусные форшоки (с гипоцентрами на глубине  $H > 70$  км) своими осями сжатия  $P$  как бы указывают на зоны подготовки будущих крупных землетрясений.

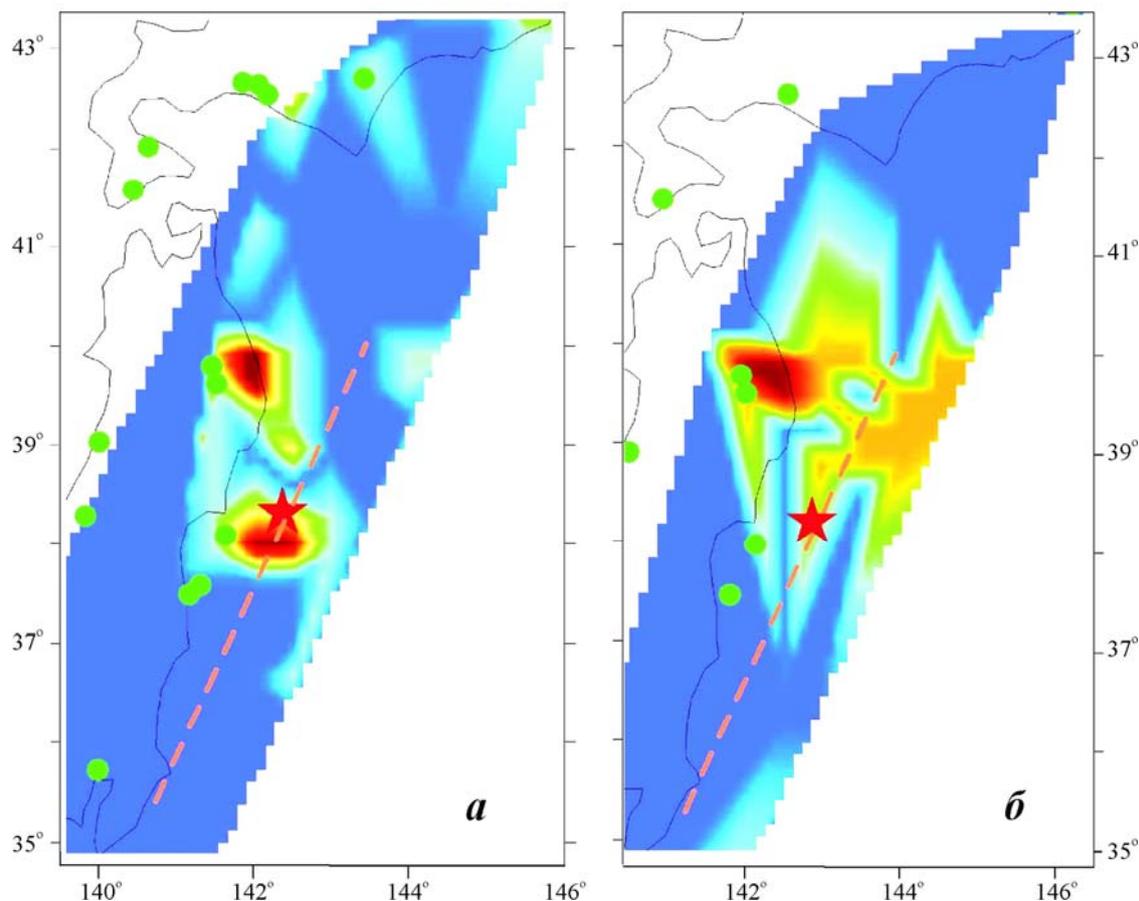
В контексте среднесрочного прогноза сильных землетрясений в сейсмофокальной зоне Беньофа авторы опираются на результаты исследования пространственно-временной взаимосвязи глубокофокусных землетрясений задугового бассейна, предваряющих сильнейшие мелкофокусные сейсмические толчки в районе океанического глубоководного желоба. В результате таких исследований время и место возникновения Кроноцкого землетрясения были предсказаны более чем за полгода до события в феврале 1997 г. В процессе исследований, проводимых в развитие метода К. Моги [Mogi, 1973, 1988], были рассмотрены глубокофокусные форшоки Шикотанского 1994 г. ( $M_w=8.3$ ) и Кроноцкого 1997 г. ( $M_w=7.8$ ) землетрясений и установлена связь особенностей механизмов глубоких удаленных форшоков с последующими сильными коровыми событиями. Аналогичным образом выявлены и проанализированы глубокофокусные форшоки крупных Симуширских землетрясений 2006 и 2007 гг., прогноз которых заблаговременно был реализован и опубликован [Захарова, Рогожин, 2006]. В этих исследованиях глубокофокусной сейсмичности предпринимались попытки ретроспективно оценить по данным за 1982–2004 гг. длительность форшоковой стадии этапа подготовки сильных землетрясений [Рогожин и др., 2000; Захарова, Рогожин, 2000, 2006].

В работе [Захарова, Рогожин, 2006] изучены очаговые зоны сильных землетрясений региона (1999 г.,  $M_w=6.9$ ; 2001 г.,  $M_w=6.4$ ; 2002 г.,  $M_w=6.4$ ; 2003 г.,  $M_w=7.0$ ). Важно подчеркнуть, что зона 2003 г. к востоку от о-ва Хонсю также была выделена в качестве очага возможного существенно более крупного землетрясения и делался вывод, что вскоре здесь могут возникнуть землетрясения с  $M_w \geq 8.1$  [Zakharova, Rogozhin, 2004]. Эта зона в последующем и реализовалась в исследуемом очаге землетрясения Тохоку 11.03.2011 г. (рис. 1).

Поскольку продолжения осей не пересекаются точно в одном месте, нами разработан модифицированный подход, позволяющий ввести количественную характеристику для данной методики посредством подсчета числа плотности пересечений в ячейках заданной сетки, покрывающей область ожидаемых сильных землетрясений. Такая модернизация этой методики позволила построить карту введенного параметра плотности пересечений и путем проведения изолиний ранжировать и оконтуривать выявляемые прогнозные зоны.

Построения, опирающиеся на предпринятый в работе анализ глубокофокусных форшоков катастрофического землетрясения 11.03.2011 г. при последовательном приближении к событию за периоды 10, 5 и 3 года до его реализации представлены на рис. 2 и 3,а,б, соответственно.





**Рис. 3.** Проявления очаговой зоны землетрясения Тохоку на основе анализа глубокофокусных форшоков в задуговом бассейне за различные периоды до события: *а* – 5 лет, *б* – 3 года

Зона подготовки катастрофического землетрясения 11.03.2011 г. отчетливо оконтуривается по результатам модифицированного метода анализа глубокофокусных очагов.

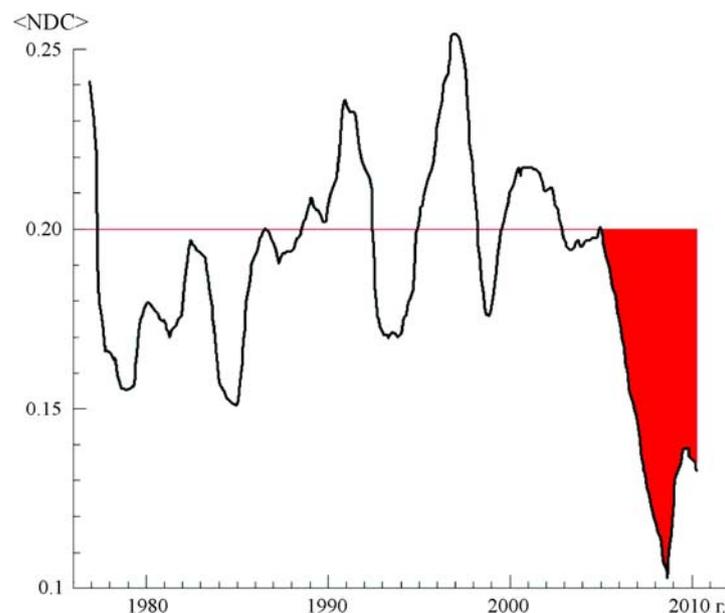
Тем самым проявления глубокофокусной сейсмичности на долговременном интервале времени могут быть использованы для решения проблемы идентификации предвестников сильных коровых событий.

### Особенности реализации СТД и их пространственно-временная приуроченность к очаговой зоне Тохоку

Рассматриваемые тензоры центроидов-моментов, представленные в СМТ-каталоге, определяются для каждого тензора  $\mathbf{m}$  при условии нулевого следа  $\text{spur}(\mathbf{m}) = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 0$ , где  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  ( $\lambda_1 \geq \lambda_2, \lambda_2 \geq \lambda_3$ ) – собственные значения тензора  $\mathbf{m}$ . Вместе с тем для детерминанта  $\det(\mathbf{m}) = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3$  условие равенства нулю ( $\det(\mathbf{m}) = 0$ ) не накладывает, так что появляется отличие СМТ от модели двойных диполей без момента, традиционно используемой в решениях фокальных механизмов. Если двухдипольные источники отвечают подвижке по одной плоскости разрыва, то в СМТ-решениях используется более общая трехдипольная модель, получившая в зарубежной литературе название NDC-источника (non double couple) [Frohlich, 1995].

Для уяснения физической природы трехдипольных источников, как правило, используются представления о сложном характере разрывообразования в очагах, так что подвижки одновременно реализуются по нескольким плоскостям [Лукк и др., 1976; Юнга, Вессон, 1979; Frohlich, 1995; Лутиков и др., 2010; Шевченко и др., 2010]. Заметим, что очаги ряда крупных землетрясений Евразии не только по сейсмологическим данным, но и по результатам полевых обследований характеризуются сложным строением [Рогожин, 2000]. В качестве параметра, отражающего меру сложности очагов землетрясений NDC-типа, может быть использован коэффициент Лоде–Надаи  $\mu_{\text{СМТ}} = 3\lambda_2/(\lambda_1 - \lambda_3)$ , абсолютная величина которого меняется от 0 до 1. При  $\mu_{\text{СМТ}} = 0$  моделью очага является пара двойных диполей без момента DC (double couple). При  $|\mu_{\text{СМТ}}| = 1$  NDC очаги относятся к наиболее сложно построенным, так называемым CLVD-источникам (compencated linear vector dipole). Однако значения, близкие к предельному, в рассматриваемом регионе не отмечаются.

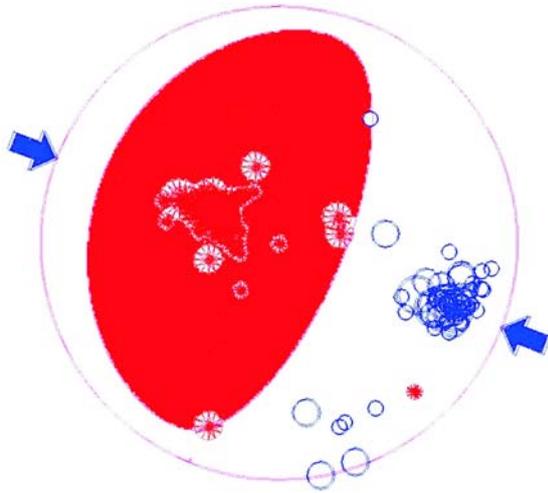
Построения проводились с целью выявления особенностей во временном ходе параметра  $|\mu_{\text{СМТ}}|$  на протяжении всего доступного для анализа набора данных, в котором целесообразно выделить пятилетний период с 2006 по 2011 гг. (рис. 4). Анализ показывает, что на последнем интервале (2010–2011 гг.) отмечается значимая вариация, приуроченная к периоду подготовки землетрясения Тохоку.



**Рис. 4.** Временной ход осредненных значений модуля коэффициента Лоде–Надаи  $|\mu_{\text{СМТ}}|$ , отражающего тип деформации СМТ-решений и соотношение DC и NDC компонент в окрестности  $R=2.5^\circ$  очаговой зоны землетрясения Тохоку. На рис. 4, 6–8 аномальный период выделен красным цветом

Для выявления возможных временных вариаций реконструируемой картины развития сейсмотектонического деформационного процесса использовалась методика расчетов средних СМТ-решений, выявления их характеристик и оценки показателя отклонений типичных и индивидуальных фокальных механизмов [Юнга, 1990]. Расчет характеристик СТД проводился как для всего доступного этапа времени с 1976 г. по 2011 г., так и для скользящих годовых интервалов со сдвигом на один месяц. В пределах каждого временного интервала в круговой области осреднения с радиусом  $R=2.5^\circ$  и в интервале глубин 0–70 км выполнялось суммирование матриц СМТ-тензоров  $\mathbf{m}$ , приве-

денных к единичной интенсивности (интенсивность определяется квадратичным инвариантом в степени  $\frac{1}{2}$ ). Диаграмма рассчитанного среднего механизма за период 2006–2011 гг. в круговой цилиндрической окрестности очага землетрясения Тохоку представлена на рис. 5.

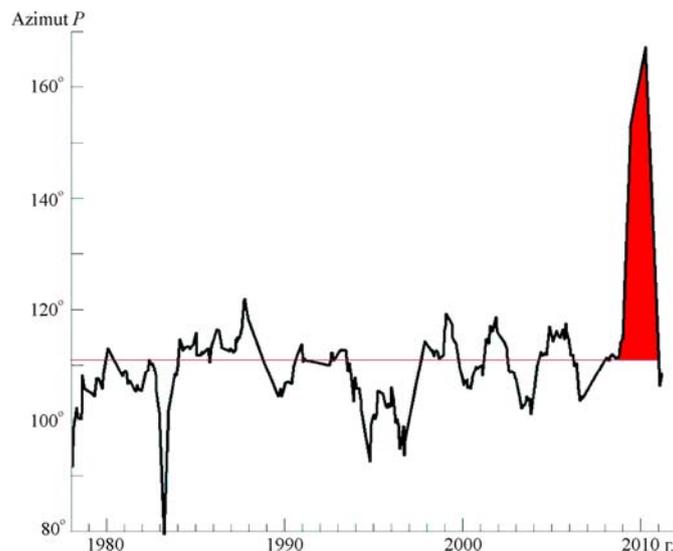


**Рис. 5.** Диаграмма среднего механизма, построенного по СМТ-решениям за период 2006–2011 гг. в очаговой зоне землетрясения Тохоку; использована проекция нижней полусферы; точки выхода главных осей растяжения и сжатия на фокальную сферу даны залитыми красным и полыми синими кружками, соответственно; область растяжения залита красным цветом; сходящимися стрелками показано направление максимального сжатия

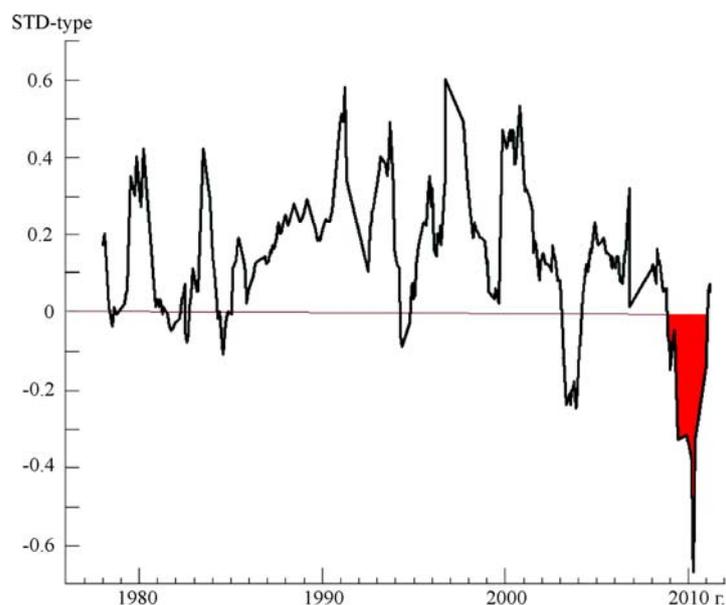
Для средних тензоров  $\langle \mathbf{m} \rangle$ , а также их составляющих, отвечающих обобщенно-плоским и перерезывающим деформациям, проводился анализ на собственные значения, определялись соотношения Лоде–Надаи  $\mu_{\text{СТД}}$  между собственными значениями (тип деформации) и ориентация главных осей. При  $\mu_{\text{СТД}} = -1$  в макрообъеме имеет место двухстороннее сжатие (одноосное удлинение), при  $\mu_{\text{СТД}} = +1$  – одноосное сжатие.

На настоящем этапе исследований представляется затруднительным зафиксировать четкие пороговые значения. В качестве таковых значений взяты характерные величины, полученные из средних за вычетом характерного размаха вариаций за весь период наблюдений до 2011 г.

Результаты расчетов фоновых характеристик СТД в очаговой зоне землетрясения Тохоку за период 2006–2011 гг. представлены на рис. 6 и 7.



**Рис. 6.** Временной ход азимута оси максимального сжатия  $P$  за период 1976–2011 гг. в окрестности очаговой зоны землетрясения Тохоку

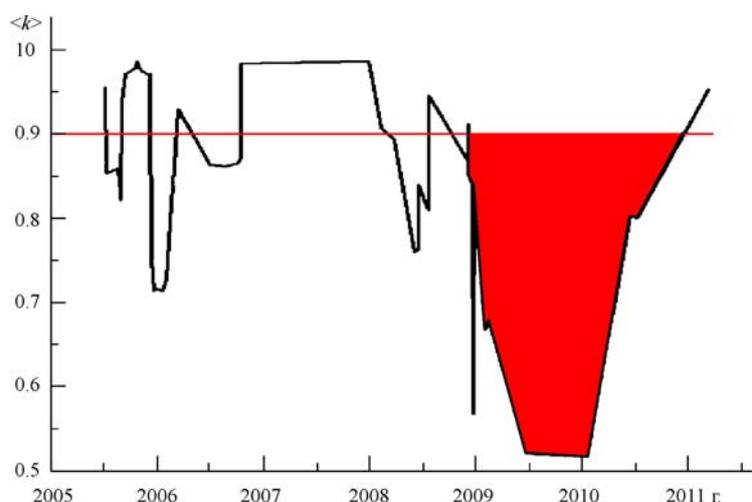


**Рис. 7.** Временной ход коэффициента Лове–Надаи в окрестности очаговой зоны землетрясения Тохоку за период 1976–2011 гг.

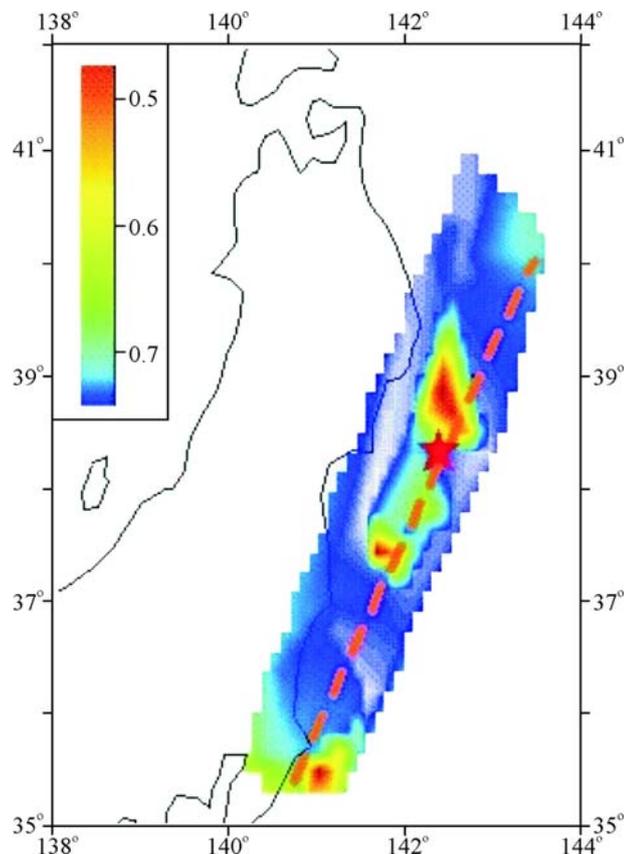
При временной развертке направления деформации максимального сокращения отражается устойчивая фоновая ориентация главной оси сжатия  $P$  в диапазоне  $Az=90\text{--}120^\circ$  со средним значением  $Az=111^\circ$ . Резкое уклонение от этого диапазона прослеживается в течение 2010–2011 гг. (рис. 6). Во временном ряде параметра  $\mu_{\text{STD}}$  типа сейсмотектонических деформаций фоновый режим сжатия, или транспрессии, на последнем критическом интервале сменяется режимом растяжения (рис. 7).

Коэффициент  $k$  сходства индивидуальной нормированной СМТ-матрицы  $\mathbf{m}$ , приведенной к единичной интенсивности, и среднего СМТ-решения  $\langle \mathbf{m} \rangle^*$ , определяется скалярным произведением  $k = \mathbf{m} : \langle \mathbf{m} \rangle^*$ , где двоеточие означает свертку тензоров по двум индексам. Временной ход коэффициента сходства индивидуальных механизмов и среднего СМТ-решения, построенный за период 2006–2011 гг., представлен на рис. 8.

Резкая аномалия отчетливо проявляется на интервале рассогласования 2009–2011 гг.



**Рис. 8.** Временной ход коэффициента сходства индивидуальных механизмов и среднего решения за период 2006–2011 гг. в очаговой зоне землетрясения Тохоку



**Рис. 9.** Пространственная картина аномалий коэффициента схождения индивидуальных механизмов и среднего решения

Соответствующая этим построениям пространственная картина аномалий коэффициента схождения индивидуальных механизмов среднему решению дана на рис. 9.

Таким образом, процесс реализаций СТД в регионе о-ва Хонсю и глубоководного желоба характеризуется наличием устойчивых долговременных тенденций, на фоне которых выявляются резкие аномалии, приуроченные к пространственно-временной окрестности очага катастрофического землетрясения Тохоку. Эти особенности реализации СТД, по всей видимости, могут ассоциироваться с процессом подготовки зоны вспарывания магистрального разрыва.

### Обсуждение результатов

Анализ СМТ-решений с позиций оценки особенностей сейсмогенезиса позволил на фоне долговременного доминирования сравнительно усложненных очагов NDC-типа выявить стадию более заметной встречаемости и преобладания одноактных подвижек. Для этой стадии имеет место уменьшение доли очагов NDC-типа и, соответственно, СМТ тензоры в наименьшей мере отклоняются от модели двойных диполей без момента. При этом подвижки в очагах в массовом порядке реализуются по единичным плоскостям разрывов, а сложные по строению очаги оказываются существенно более редкими. Нужно отметить, что по аналогии с проведенным нами анализом данных с целью верификации NDC-методики был выполнен такой же анализ СМТ-решений для окрест-

ности очаговых зон разрушительного землетрясения 12 сентября 2007 г. ( $M_w=8.5$ ) в районе Южной Суматры и сильнейшего катастрофического землетрясения 27 февраля 2010 г. ( $M_w=8.8$ ) в Чили, что дало сходные результаты по особенностям проявлений NDC-очагов.

В работе [Yunga et al., 2005] NDC-источники такого усложненного характера деформаций в очаге с одновременными множественными подвижками по взаимодействующим разрывам предложено рассматривать с позиций проявления самоорганизующейся критичности SOC (self-organizing criticality) [Turcotte, 1999]. Во временном аспекте физическая интерпретация NDC-эффектов может ассоциироваться с влиянием формирующегося очага крупного землетрясения на окружающий объем геофизической среды, проявляющей на качественном уровне свойства динамических систем [Лукк и др., 1996]. Поведение подобных динамических систем характеризуется как этапами стабильности, так и периодами бифуркации с переходами в критическую неустойчивую стадию развития [Гохберг и др., 2004]. Этапы доминирования в сейсмотектоническом деформационном процессе хаотической составляющей сменяются периодами проявлений детерминированной компоненты.

Кинематика подвижек также может отражать фрактальное устройство геофизической среды и проявления эффектов SOC [Лукк, Юнга, 1989; Yunga, 1993]. Механизмы очагов коровых землетрясений и выделение на их основе аномальных зон, отражающих возмущения в характере развивающегося деформационного процесса, представляют прогностический интерес [Yamashina, 1979; Юнга, 1996]. Выделенные по этому признаку механизмы очагов действительно являются аномальными с нехарактерной ориентацией плоскостей разрыва и подвижек по ним. Так, например, на основании анализа вариаций СМТ-решений как в ретроспективном аспекте, так и при мониторинге сейсмической обстановки в реальном времени ранее были выявлены очаговые зоны землетрясения Хоккайдо 25.09.2003 г., а также Симуширских землетрясений 15.11.2006 г. и 13.01.2007 г. [Рогожин и др., 1999; Rogozhin, Yunga, 2000; Юнга, 1996; Захаров и др., 2009].

Результаты реконструкции регионального поля сейсмотектонической деформации позволяют по-новому осветить пространственно-временные взаимоотношения очагов внутриплитного и межплитного типа. В рассматриваемой сейсмофокальной зоне главная ось сжатия ориентирована вкрест простирания островных дуг и полого погружается в сторону глубоководного желоба [Юнга, Рогожин, 1998, 2000]. Ось растяжения круто наклонена в сторону океана. При такой ориентировке осей сжатия скалывающимися плоскостями являются взаимно пересекающиеся поверхности, параллельные островной дуге, одна из которых представляет собой почти чистый надвиг островной дуги на глубоководный желоб, а вторая – круто падающий под желоб взброс более нижних частей приостровного склона на более верхние.

Этим поверхностям на приостровном склоне отвечают выявленные с помощью геоморфологических и сейсмических методов реальные геологические структуры: крупный, погружающийся под островную дугу пологий надвиг кристаллических пород, подстилающих приостровной склон, на рыхлые осадочные образования желоба, с одной стороны, и серия круто падающих в восточных румбах взбросов, выраженных в рельефе склона несколькими субпараллельными грядами с выступающими в них среди рыхлых осадков на склоне породами акустического фундамента – с другой. Именно к этим структурам приурочены действующие плоскости в очагах «межплитных» и «внутриплитных» землетрясений островной дуги. Более того, очаги того и другого типа,

перекрещиваясь в недрах под приостровным склоном, как бы взаимно обуславливают друг друга.

Близвертикальный взброс «запирает» свободное перемещение по поверхности глубинного надвига. Возникающий барьер взламывается землетрясением «межплитного» типа, и в тот же момент на близвертикальном разломе возникает новый сейсмический барьер, препятствующий на сей раз свободному смещению крыльев взброса. Этот барьер через некоторое время взламывается в процессе землетрясения «внутриплитного» типа. При этом часто наблюдается быстрая смена подвижек того и другого типа в очагах в одних и тех же местах или по соседству.

Существование протяженных сейсмических барьеров под материковым склоном островной дуги – возможная причина появления нетипичных подвижек и проявления элементов несовместности регионального поля сейсмотектонических деформаций и резкой неоднородности напряжений в литосфере и всей зоне Беньофа и, как следствие, возникновения сейсмологических и других аномальных явлений, которые проявляются на больших территориях и могут служить предвестниками готовящихся сильных землетрясений [Юнга, 1993; Рогожин и др., 1999].

На фоне типичных сейсмических событий на приостровном склоне и желобе представляет интерес рассмотреть особенности афтершокового процесса. Если в целом для сейсмических событий здесь типичны условия субгоризонтального сжатия вкрест простирания структур, то практически сразу вслед за главным событием отмечается изменение соотношения перерезывающей и горизонтальной компонент СД. Главная ось максимального сжатия приобретает существенно более крутой наклон под океаническую плиту.

Доминируют близвертикальные сбросы с нисходящими движениями приостровного блока по отношению к структурам глубоководного желоба. Ориентация сжатия в горизонтальной плоскости при этом определяется не вполне устойчиво, варьируя во всем возможном диапазоне направлений от субширотного до меридионального. Многие фокальные механизмы афтершоковой серии значительно отличаются от типичных решений, характерных для всего предшествующего времени. Так, за весь период детальных исследований с 1976 г. вплоть до марта 2011 г. заведомо аномальные решения ( $k < 0$ ) составляли всего 4 %, а в период после главного удара их относительное число резко возросло до 16 %.

Наличие сложнопостроенных очагов как в афтершоковый, так и в предшествующий этапы характеризуется близкими значениями  $\langle \text{NDC} \rangle = 0.12$  и  $\langle \text{NDC} \rangle = 0.15$ , соответственно, т.е. в среднем заметно эти показатели статистически не различаются. Значимые различия отмечаются для индекса упорядоченности механизмов очагов  $\chi = \langle k \rangle$ , выражающегося также через интенсивность матрицы среднего механизма, рассчитываемую посредством осреднения единичных матриц [Юнга, 1990]. Временной ход параметра  $\chi$  по информативности уступает временному ряду коэффициентов соответствия  $k$  и поэтому здесь не приводится. Тем не менее на этапе 1976–2011 гг.  $\chi = 0.85$ , а для афтершоковой серии 11 марта – 11 апреля 2011 г. имеем  $\chi = 0.42$ . Заметим, что такое низкое значение этого параметра отвечает в данном случае весьма существенной разупорядоченности сейсмотектонического деформационного процесса в его афтершоковой реализации.

Чтобы получить статистически достоверный результат при  $\chi = 0.42$  на уровне 95 % значимости, рассчитываемые выборки должны состоять не менее чем из 13 индивидуальных фокальных механизмов [Юнга, 1990]. Иными словами, при малых объемах выборок, характерных для афтершоковой последовательности событий, при анализе вре-

менного ряда параметра  $\chi$  риск получить случайный результат оказывается неоправданно велик, что едва ли способствует продвижению в понимании природы крайне сложных процессов реализации СТД. Вместе с тем результаты расчетов СТД несут важную информацию о сейсмическом процессе с позиций самоорганизующейся критичности.

Разупорядоченность отражает хаотичность сеймотектонического деформационного процесса и проявляется во взаимном частичном подавлении приращений деформаций. Расчеты вида (или типа) СТД, описываемого коэффициентом Лоде–Надаи, для периода 1976–2011 гг. дают значения  $\mu_{\text{СТД}}=0.3$ , а для периода 11.03–11.04.2011 г. –  $\mu_{\text{СТД}}=0$ .

Изложенные выше наблюдения позволяют предположить наличие на афтершоковой стадии своего рода диссипативного эффекта «дилатансионной релаксации», когда под статическим действием гравитации при динамическом воздействии магистрального разрыва и последующих крупных сдвигов и сбросов в сложных гидродинамических, геотермальных, реологических условиях происходит поэтапное неравномерное проседание элементов всей иерархической структуры многомиллионного объема (в кубических километрах) массива горных пород, нарушенного природной катастрофой [Agarionian et al., 1992].

### Заключение

В настоящей работе выполнено исследование зоны подготовки землетрясения Тохоку 11 марта 2011 г. на восточной окраине о-ва Хонсю, относящегося к Японскому архипелагу. Предпринята попытка анализа взаимосвязи сейсмичности в литосфере и мантии на двух существенно разных интервалах глубин, характерных для сейсмофокальной зоны субдукции. Зона подготовки отчетливо выявляется на основе последовательного анализа глубокофокусных очагов.

На базе данных СМТ-каталога проведена реконструкция сеймотектонических деформаций и пространственно-временных реализаций высвобождения СТД. На фоне долговременных тенденций сеймотектонического деформационного процесса выявлены пространственно-временные аномалии в его ходе, ассоциируемые с проявлениями процесса подготовки очага катастрофического события. События, для которых механизм существенно отличается от типичных, рассматриваются как признак аномальных физических условий в очагах. Выявленные эффекты требуют дальнейшего специального рассмотрения в рамках исследования природы сейсмогенеза.

Таким образом, геодинамические проявления как коровой, так и глубокофокусной сейсмичности могут быть отнесены к предвестниковым признакам катастрофического землетрясения Тохоку 11 марта 2011 г., что открывает перспективы их дальнейшего продвижения в области сеймопрогностических исследований [Родкин, Тихонов, 2011; Сидорин, 2011; Шебалин, 2011].

### Благодарности

Авторы признательны А.Я. Сидорину и анонимному рецензенту, рекомендации и замечания которых учтены в работе.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 11-05-00205-а).

## Литература

- Гохберг М.Б., Гарагаш И.А., Нечаев Ю.В., Рогожин Е.А., Юнга С.Л. Геомеханическая модель сейсмического кластера «Чайна-Лейк» Южной Калифорнии // Исследования в области геофизики. М.: ОИФЗ РАН, 2004. С. 90–98.
- Захаров В.С., Симонов Д.А., Коптев А.И. Интегральный анализ прогнозной информации для выделения потенциальных зон сильных землетрясений (на примере Курило-Камчатской дуги) // Георазрез: Электр. науч. изд. Дубна, 2009. Вып. № 1 (3.) С. 19.
- Захарова А.И., Рогожин Е.А. Сильные землетрясения северо-западной окраины Тихого океана и их глубокофокусные предвестники // Вестн. ОГГГН РАН: Электр. науч.-инф. журн. 2000. № 2(12), Т. 1. С. 82–94. [http://www.scgis.ru/russian/cp1251/dgggms/2\(12\)-2000/\\*.htm](http://www.scgis.ru/russian/cp1251/dgggms/2(12)-2000/*.htm).
- Захарова А.И., Рогожин Е.А. Предвестники сильных землетрясений в регионе Курильских островов после 2004 г. // Геофизика XXI столетия: 2005 год. Сборник трудов Седьмых геофизических чтений им. В.В. Федынского, 3–5 марта 2005 г. М.: Науч. мир, 2006. С. 268–275.
- Лукк А.А., Юнга С.Л. Фрактальность и напряженно-деформированное состояние земной коры Гармского района // Геология и геофизика Таджикистана. Душанбе: Дониш, 1989. № 2. С. 259–276.
- Лукк А.А., Юнга С.Л., Леонова В.Г. Общий вид нодальной поверхности при коровых землетрясениях // Сборник Советско-американских работ по прогнозу землетрясений / Под ред. акад. М.А. Садовского. Душанбе; Москва: Дониш, 1976. Т. 1, кн. 2. С. 60–72.
- Лукк А.А., Дещеревский А.В., Сидорин А.Я., Сидорин И.А. Вариации геофизических полей как проявление детерминированного хаоса во фрактальной среде. М.: ОИФЗ РАН, 1996. 210 с.
- Лутиков А.И., Юнга С.Л., Кучай М.С. Объективный критерий выявления сейсмических источников, не удовлетворяющих модели двойного диполя без момента, и их распределение в островных дугах // Геофизические исследования. 2010. Т.11, № 3. С. 11–25.
- Рогожин Е.А. Строение очаговых зон сильных землетрясений России в конце XX столетия // Природные опасности России. Т. 2. Сейсмические опасности. М.: Крук, 2000. С. 19–37.
- Рогожин Е.А., Захарова А.И. Тектоническая природа сейсмической активизации 1994–1996 гг. на восточной активной окраине Азии // Тектоника и геодинамика: общие и региональные аспекты. Материалы совещания. Т. II. М.: ГЕОС, 1998. С. 118–121.
- Рогожин Е.А., Страхов В.Н., Юнга С.Л. Новая концепция прогноза землетрясений // Комплексирование сейсмологических и наземно-космических геофизических методов в целях среднесрочного и краткосрочного прогноза землетрясений. М.: ОИФЗ РАН, 1999. С. 3–17.
- Рогожин Е.А., Захарова А.И., Юнга С.Л. Геодинамическая позиция очаговых зон трех сильных землетрясений Курило-Камчатской и Японской островных дуг // Геоэкология. 2000. № 5. С. 446–456.
- Родкин М.В., Тихонов И.Н. Мегаземлетрясение в Японии 11 марта 2011 г.: величина события и характер афтершоковой последовательности // Геофизические процессы и биосфера. 2011. Т. 10, № 1. С. 64–80.
- Сидорин А.Я. Выдающееся достижение Российской академии наук: успешный прогноз землетрясения в Японии 11 марта 2011 г. // Геофизические процессы и биосфера. 2011. Т. 10, № 1. С. 5–8.
- Шебалин П.Н. Широкомасштабная краткосрочная активизация сейсмичности перед сильнейшими землетрясениями Японии и Курил // Геофизические процессы и биосфера. 2011. Т. 10, № 1. С. 36–46.

- Шевченко В.И., Добровольский И.П., Лукк А.А. Деформация одноосного удлинения и аномальные механизмы очагов землетрясений в земной коре Таджикской депрессии // Геофизические исследования. 2010. Т. 11, № 1. С. 15–26.
- Юнга С.Л. Методы и результаты изучения сейсмотектонических деформаций. М.: Наука, 1990. 191 с.
- Юнга С.Л. Анализ несовместности поля сейсмотектонических деформаций применительно к проблеме прогноза землетрясений // Построение моделей развития сейсмического процесса и предвестников землетрясений. М.: Наука, 1993. Вып. 1. С. 64–70.
- Юнга С.Л. Ретроспективный анализ временных вариаций тензоров сейсмических моментов в очаговой зоне Шикотанского землетрясения // Федеральная система сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений: Инф.-анал. бюл. / Министерство РФ по чрезвычайным ситуациям, РАН. М., 1996. № 1/2. С. 83–89.
- Юнга С.Л., Вессон Р.Л. Особенности механизма землетрясений в районе Гарма // Сборник Советско-американских работ по прогнозу землетрясений. Т. 2, кн. 1. Москва; Душанбе: Дониш, 1979. С. 50–56.
- Юнга С.Л., Рогожин Е.А. Современная нелинейная геодинамика Курило-Камчатской островной дуги и ее отражение в особенностях сейсмичности и других геолого-геофизических проявлений // Вопросы нелинейной геологии и геодинамики. М.: Наука, 1998. С. 85–93.
- Юнга С.Л., Рогожин Е.А. Сейсмичность, механизмы очагов землетрясений и сейсмотектонические деформации в пределах активных блоков литосферы // Новейшая тектоника, геодинамика и сейсмичность Северной Евразии. М.: Пробел, 2000. С. 383–420.
- Agarionian V.G., Geodakian E., Danilova M., Yunga S.L. Aftershock focal mechanisms of the Spitak earthquake // Tectonophysics. 1992. V. 202, N 2/4. P. 227–231.
- Dziewonski A.M., Chou T.A., Woodhouse J.H. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity // J. Geophys. Res. 1981. V. 86. P. 2825–2852.
- Frohlich C. Characteristics of well-determined non-double-couple earthquakes in the Harvard CMT Catalog // Phys. Earth and Planet. Inter. 1995. V. 91, iss 4. P. 213–228.
- Mogi K. Relationship between shallow and deep seismicity in the western Pacific region // Tectonophysics. 1973. V. 17, iss. 1/2. P. 1–22.
- Mogi K. Earthquake prediction. San Diego; California; Tokyo: Acad. Press, 1988. 366 p.
- Rogozhin E.A., Yunga S.L. Parameters of the strongest earthquakes in Northern Eurasia at the end of the 20th Century from geological and seismological data // J. Earthq. Pred. Res. 2000. V. 8, N 2. P. 228–232.
- Tohoku 2011 earthquake. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2011. <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/eng/>
- Turcotte D.L. Seismicity and self-organized criticality // Phys. Earth and Planet. Inter. 1999. V. 111. P. 275–293.
- Yamashina K. A possible factor which triggers shallow intra-plate earthquakes // Phys. Earth and Planet. Inter. 1979. V. 18, iss. 2. P. 153–164.
- Yunga S.L. Self-similarity of seismotectonic deformation process // International Symposium on Fractals and Dynamical Systems in Geoscience. Frankfurt on Main, 1-3 April, 1993. P. 45.
- 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.
- Zakharova A.I., Rogozhin E.A. Methodical elaborations for earthquakes place, magnitude and possible time forecasting // Fifth Asian Seismological Commission General Assembly. Sess. 5. Current seismic hazard assesment, early warning, earthquake forecast and prediction. Erevan, October 18, 2004. P. 201–202.

*Сведения об авторах*

**РОГОЖИН Евгений Александрович** – доктор геолого-минералогических наук, профессор, заместитель директора ИФЗ РАН, руководитель Координационного прогностического центра ИФЗ РАН, Институт физики Земли им.О.Ю.Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, г. Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10. Тел.: (499) 254-87-15. E-mail: eurog@ifz.ru

**ЮНГА Сергей Львович** – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, заместитель руководителя Координационного прогностического центра ИФЗ РАН, Институт физики Земли РАН. 123995, ГСП-5, г. Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10. Тел.: (499) 254-53-50. E-mail: syunga@ifz.ru

**РОДИНА Светлана Николаевна** – аспирант, Институт физики Земли РАН. 123995, ГСП-5, г. Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10. Тел.: (499) 254-92-50. E-mail: rodinasvetlana@mail.ru

## FEATURES OF SEISMIC STRAIN RELEASE IN GENESIS OF TOHOKU 2011 EARTHQUAKE

**E.A. Rogozhin, S.L. Yunga, S.N. Rodina**

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

**Abstract.** Seismic strain release and earthquake parameters were considered in the source zone of 2011 Tohoku earthquake. CMT-catalogue of centroid moment tensors have been studied to focus attention on the nature of deformation in the Tohoku-Honshu region. Non double couple (NDC) sources are considered. A measure of the NDC part of CMT-tensors was calculated. Dealing with seismic manifestations, one may identify NDC-component caused by manifold slips in earthquake sources. Statistical study of focal mechanisms in terms of seismotectonic strain was performed. The temporal and spatial pattern of seismotectonic deformation jointly with CMT-solutions were studied. Seismic strain perturbations as possible factor which triggers large shallow intra-plate earthquakes were revealed. Relationship between shallow and deep seismicity was investigated. Tohoku source zone was outlined based on directivity diagrams and focal mechanisms of deep-focus foreshocks. The USGS and Harvard University kindly provide access to centroid-moment tensor data used in calculation of seismic strain release.

*Keywords:* earthquake, centroid moment tensors, CMT-catalogue, seismic strain release, deep foreshocks, Honshu, earthquake Tohoku.