

УДК 550.34

КАТАСТРОФИЧЕСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ ТОХОКУ 11.03.2011 г.: ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

© 2011 г. А.И. Лутиков^{1,2}

¹ Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, г. Москва, Россия

² Геофизическая служба РАН, г. Обнинск (Калужская обл.), Россия

Приводятся результаты предварительных сейсмологических исследований зоны подготовки катастрофического землетрясения 11.03.2011 г. ($M_W=9.1$) вблизи восточного побережья о-ва Хонсю. За последние 110 лет прослежена сейсмическая история высвобождения кумулятивного скалярного сейсмического момента, а за последние 35 лет – временного хода индекса упорядоченности. Эти параметры – важные характеристики сеймотектонического деформационного процесса. По этим характеристикам изучены стадия форшоковой активизации и начальная фаза афтершокового процесса.

Ключевые слова: сейсмический момент, индекс упорядоченности, механизм очага, форшоковая активизация.

Введение

11 марта 2011 г. в 05 ч 46 мин по Гринвичу (в 08 ч 46 мин московского времени) у восточного побережья о-ва Хонсю (Япония) произошло катастрофическое землетрясение, повлекшее за собой многочисленные человеческие жертвы и разрушения. По данным Геофизической службы РАН (ГС РАН, www.gsras.ru), его магнитуда $M_S = 8.8$. По уточненным данным Геологической службы США (neic.cr.usgs.gov), значение моментной магнитуды $M_W = 9.0$, а по данным Гарвардского сейсмологического центра США (HARVARD, www.globalcmt.org) $M_W = 9.1$. Соответственно скалярный сейсмический момент этого землетрясения оценивается как $M_0 = 2.8 \cdot 10^{22}$ Н·м (NEIC) и $M_0 = 5.31 \cdot 10^{22}$ Н·м (HARVARD). Глубина его гипоцентра по данным ведущих мировых сейсмологических служб оценивается как 22–33 км. Землетрясению предшествовал сильный форшок 09.03.2011 г. ($M_W = 7.5$), который произошел в 02 ч 45 мин по Гринвичу приблизительно в 44 км к северо-востоку от эпицентра главного события 11 марта. Форшок 9 марта сопровождался собственной, достаточно интенсивной, последовательностью афтершоков, естественный ход которой был прерван землетрясением 11 марта.

Землетрясение 11 марта 2011 г. стало сильнейшим сейсмическим событием на Японских островах за всю историю инструментальных сейсмологических наблюдений, т.е. приблизительно с начала XX в. (в период раннеинструментальных сейсмологических наблюдений в первой половине XX в. наиболее сильные сейсмические события фиксировались уже достаточно надежно), и вошло в число пяти сильнейших землетрясений Земли за этот период.

После 1950 г. на Земле произошло всего 7 землетрясений с магнитудой $M_W \sim 9.0$: Камчатское, 04.11.1952 г. ($M_W = 9.0$), Алеутское, 09.03.1957 г. ($M_W = 9.1$), Чилийское, 22.05.1960 г. ($M_W = 9.5$), Аляскинское, 28.03.1964 г. ($M_W = 9.2$), Суматринское, 26.12.2004 г. ($M_W = 9.3$), Второе Чилийское, 27.02.2010 г. ($M_W = 8.8$) и, наконец, землетрясение 11 марта 2011 г. в Японии ($M_W = 9.1$). Можно заметить, что все сильнейшие землетрясения планеты за этот период распадаются на две группы: первая относится к периоду между 1952 и 1964 гг., вторая – к периоду 2004–2011 гг. Период времени продолжительностью около 40 лет между этими группами сильнейших событий характеризовался заметно более слабыми сейсмическими проявлениями. В связи с этим имеет смысл говорить о наличии двух фаз глобальной сейсмической активизации в период с 1950 г. по настоящее время. Вероятно, нынешняя фаза глобальной сейсмической активизации еще не завершена. К сожалению, мы лишены возможности сколько-нибудь надежно проследить сейсмическую историю за более ранний период, и чем дальше в глубь веков, тем отрывочнее и ненадежней становятся наши сведения.

Вернемся к землетрясению 11 марта. На рис. 1 представлена схема форшоков и афтершоков за первые 24 ч землетрясения 11.03.2011 г. Всего за первые сутки после главного события 11 марта по данным NEIC зарегистрировано 164 афтершока с $m_b \geq 4.6$. Считается, что афтершоки первых суток после землетрясения наилучшим образом отображают очаг землетрясения [Шебалин и др., 1991; Лутиков, Донцова, 2002]. Форшок 9 марта сопровождался последовательностью из 35 афтершоков с $m_b \geq 4.6$, в том числе трех наиболее сильных с $M_W = 6.0, 5.9$ и 5.7 . Видно, что эпицентр форшока 9 марта вместе с его афтершоками расположен внутри облака афтершоков главного события 11 марта.

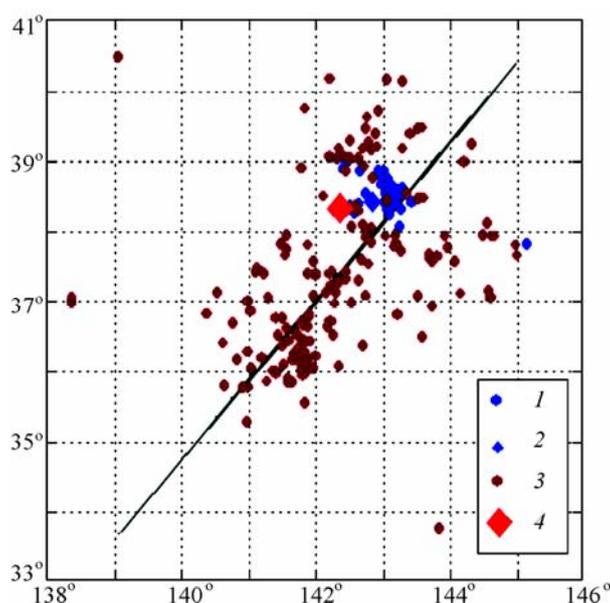


Рис. 1. Схема форшоков и афтершоков за первые 24 ч землетрясения 11.03.2011 г.

1 – афтершоки первых суток; 2 – форшок 9 марта; 3 – афтершоки форшока 9 марта; 4 – эпицентр главного события. Прямой линией показана ортогональная регрессия, наклон которой определяет азимут простираения облака афтершоков

Линейная протяженность очага (L), определенная по облаку афтершоков первых суток (см. рис. 1), оценивается приблизительно в 540 км. Рассчитанная по известной корреляционной зависимости между линейной протяженностью очага и магнитудой [Ризниченко, 1976] величина L составила около 520 км. Азимут простираания очага, оцененный по наклону линии регрессии облака афтершоков первых суток, $Az \approx 36^\circ$. Ширина облака афтершоков (W) изменяется от 210 км в юго-западной части до 410 км – в северо-восточной части.

Таким образом, видно, что ширина облака афтершоков почти сопоставима с его линейной протяженностью, что может указывать на полого падающий очаг. Вопрос о крутом или пологом падении очага может также прояснить распределение гипоцентров афтершоков по глубине. При этом, конечно, следует учитывать, что точность определения глубин, обеспечиваемая телесейсмическими сетями (даже такими, как NEIC), остается не слишком высокой.

На рис. 2 приведено распределение гипоцентров афтершоков первых суток по глубине, построенное, по данным каталога NEIC, по 158 афтершокам ($4.6 \leq M \leq 7.9$). Видно, что подавляющее число афтершоков (свыше 67.7 %) сосредоточено в интервале глубин 20–30 км. Если резкий максимум распределения в интервале глубин 20–30 км не связан с дефектом определения глубины гипоцентра телесейсмической сетью, а имеет объективный характер, наблюдаемый характер распределения уверенно говорит в пользу полого падающего очага. При этом предполагается, что основная масса повторных толчков концентрируется в пространственно-временной окрестности магистрального разрыва.

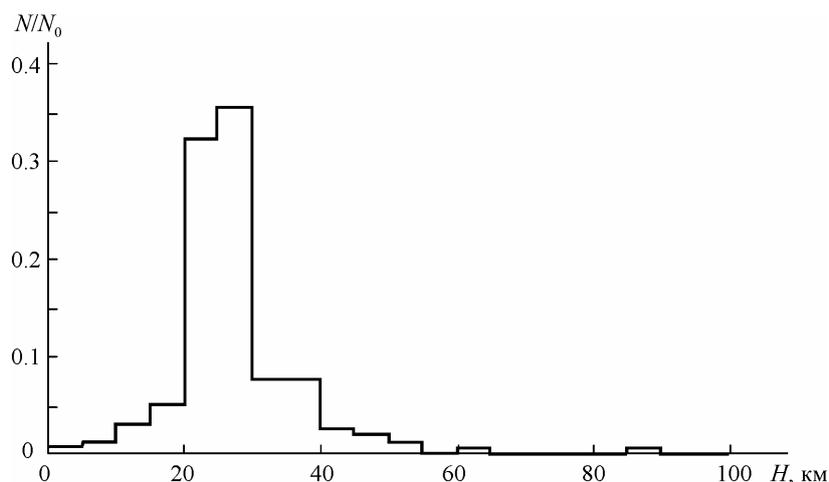


Рис. 2. Распределение афтершоков первых суток землетрясения 11 марта ($M_W = 9.1$) по глубине по данным каталога NEIC

Уместно сопоставить полученные на основании анализа афтершокового процесса некоторые характеристики очага землетрясения с имеющимися решениями фокального механизма. В табл. 1 приведены его решения по данным ряда ведущих сейсмологических служб мира (ГС РАН, NEIC и HARVARD).

Таблица 1. Решения фокального механизма землетрясения Тохоку

NP1			NP2			Источник
Stk	D_p	$Slip$	Stk	D_p	$Slip$	
141	19	19	33	84	108	ГС РАН
162	17	45	28	78	102	NEIC
201	9	85	26	81	91	HARVARD

Во всех трех решениях первая нодальная плоскость является пологой, а вторая – круто падающей. Однако если по второй нодальной плоскости все решения близки, то по первой нодальной плоскости решение Гарвардского сейсмологического центра заметно отличается от решений NEIC и ГС РАН – СМТ фиксирует северо-восточное простираие очага, NEIC и ГС РАН – северо-западное.

Если принять модель полого падающего очага, как это следует из результатов анализа пространственного распределения афтершоков, то следует отдать предпочтение решению Гарвардского сейсмологического центра по первой нодальной плоскости, хотя азимут простираия облака афтершоков и отличается от Stk СМТ примерно на 15° . Полого залегающая нодальная плоскость простирается с северо-востока на юго-запад, тип движения – надвиг с компонентами левостороннего сдвига ($D_P=9^\circ$). В то же время азимут простираия облака афтершоков наилучшим образом согласуется по Stk с решениями по второй, круто падающей нодальной плоскости (различие всего 3° для решения ИОЦ ГС РАН). Все это указывает на достаточно сложную структуру очага землетрясения 11 марта, в том числе на возможность существования круто падающих субочагов. Однако эти вопросы лежат вне рассмотрения настоящей статьи.

Сейсмическая история

Облако афтершоков (см. рис. 1) приблизительно очерчивает область анализа при изучении процесса подготовки землетрясения 11 марта. Поэтому для определенности ограничим область анализа координатами 35.0° – 40.0° с.ш., 138.0° – 145.0° в.д. Учитывая масштабы сейсмического события 11 марта и максимальную глубину распространения афтершоков, ограничим область анализа интервалом глубин 0–100 км.

Полагая, что процесс накопления напряжений в ходе подготовки сильного землетрясения сопровождается соответствующими характерными изменениями в сеймотектоническом деформационном процессе, будем при анализе использовать его две основные скалярные характеристики [Юнга, 1990] – индекс упорядоченности и кумулятивный скалярный сейсмический момент [Лутиков, 2008]. Информационной основой служат: выборка по региону из Каталога сильных землетрясений мира с 1897 г. (http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epic/epic_global.php), выборка по региону из каталога (<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epic/>), Каталог тензоров центра момента (www.globalcmt.org).

На рис. 3 представлена временная зависимость кумулятивного (накопленного) скалярного сейсмического момента в период с 1897 г. по начало 2011 г., являющаяся аналогом графика Беньофа [Рихтер, 1963] в терминах скалярного сейсмического момента. Период с 1897 г. по 1972 г. включительно обеспечен всего 31 сильными и очень сильными сейсмическими событиями с $M = 6.0$ – 8.7 (http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epic/epic_global.php). Для анализа периода с 1973 г. по 1976 г. использовался каталог (<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epic/>), насчитывавший 105 событий в рассматриваемом регионе ($4.8 \leq M \leq 6.5$). С 1977 г. по настоящее время использовался СМТ-каталог (www.globalcmt.org), являющийся представительным для магнитуд $M_W > 5.5$. Выборка из СМТ-каталога по рассматриваемой области насчитывала 337 сейсмических событий в интервале магнитуд $4.6 \leq M_W \leq 9.1$. Для всех сейсмических событий до 1977 г. все магнитуды условно принимались равными моментной магнитуде M_W .

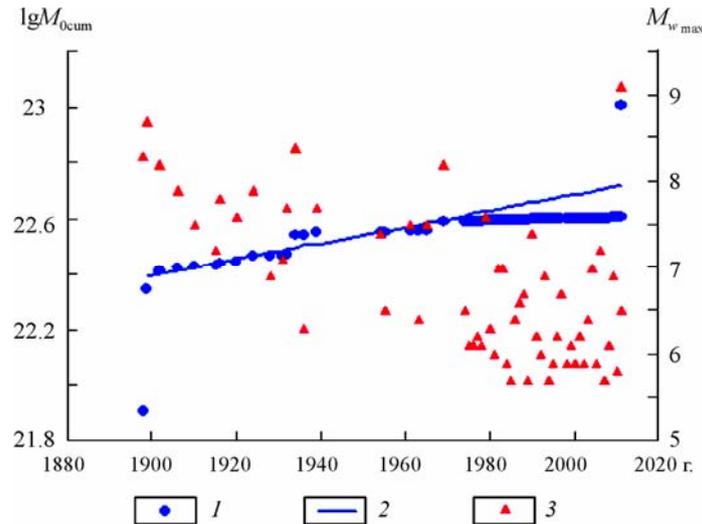


Рис. 3. Временная зависимость кумулятивного (накопленного) скалярного сейсмического момента (M_{0cum}) в период с 1897 г. по начало 2011 г.

1 – значения M_{0cum} ; 2 – прогнозная линейная зависимость высвобождения M_{0cum} ; 3 – сильнейшие на каждом шаге дискретизации сейсмические события (правая ось ординат)

Рассмотрим подробно рис. 3. Отметим при этом, что за достаточно большой интервал времени скалярный сейсмический момент высвобождается достаточно равномерно вследствие стационарности сейсмического режима. Период с 1898 г. по 1968 г. аппроксимирован линейной зависимостью в виде

$$\lg M_{0cum} = 0.0029 \cdot t + 16.891, \quad R_C = 0.941. \quad (1)$$

Достаточно высокий коэффициент линейной корреляции ($R_C = 0.941$) указывает на то, что в период с 1900 г. по 1970 г. сейсмический момент высвобождался практически линейно. Период с 1970 г. по февраль 2011 г. может рассматриваться как выраженная фаза сейсмического затишья перед катастрофическим землетрясением 11 марта 2011 г. Разность между прогнозным и фактическим значениями M_{0cum} составляет текущий дефицит в высвобождении M_{0cum} . На начало марта 2011 г. такой дефицит достиг $1.22 \cdot 10^{22}$ Н·м, что соответствует возникновению землетрясения с $M_W \approx 8.7$. Это неплохо согласуется с реально наблюдаемой $M_W = 9.0-9.1$ землетрясения 11 марта. Также можно заключить, что, во-первых, несмотря на их неполноту, сейсмологические данные в период с 1898 г. по 1968 г. достаточно адекватно отображают темпы высвобождения суммарного скалярного сейсмического момента и, во-вторых, наблюдавшийся приблизительно 40 лет период сейсмического затишья оказался достаточным для подготовки сильнейшего землетрясения 11 марта 2011 г. Наконец, из графика (рис. 3) естественно сделать вывод, что реализация землетрясения с $M_W = 9.1$ привела к достаточно полной разгрузке накопившихся в рассматриваемом регионе напряжений, так что в ближайшие 30–40 лет возникновение здесь землетрясений с $M_W \approx 9$ маловероятно. Фактически землетрясение 11 марта восполняет накопившийся более чем за 40 лет дефицит в высвобождении M_{0cum} и восстанавливает стационарность сейсмического режима. Тем самым как бы завершается сейсмический цикл по С.А. Федотову [2005].

Другой важной характеристикой развития сейсмического процесса является индекс упорядоченности κ ($0 \leq \kappa \leq 1$), определяющий степень подобия механизмов очагов фоновых землетрясений. Математически индекс упорядоченности вводится как отношение нормы средней по выборке нормированной на скалярный момент матрицы тензора сейсмического момента к средней по этой выборке норме таких матриц.

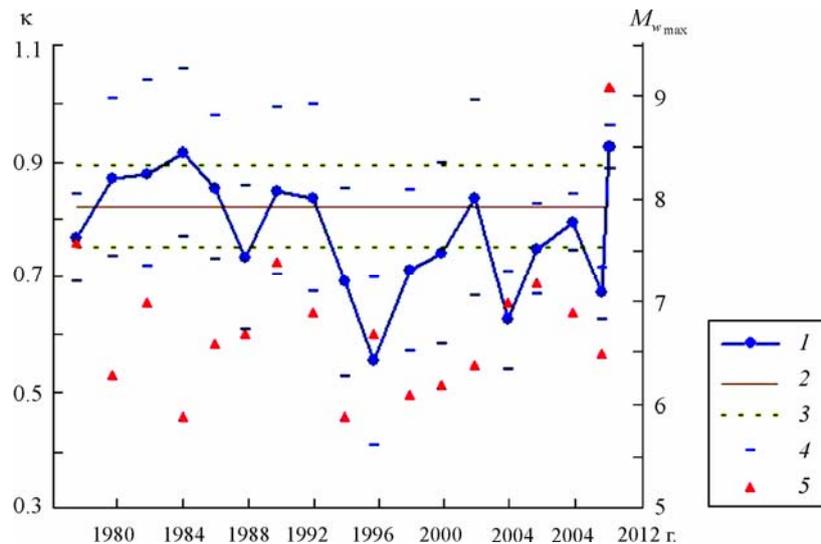


Рис. 4. Временной ход индекса упорядоченности (k) в период с 1976 г. по 11 марта 2011 г. в области с координатами $34.5^\circ - 40.3^\circ$ с.ш., интервал глубин 0–100 км

1 – временной ход k ; 2 – среднее значение k в период 1978–1994 гг.; 3 – коридор стандартных отклонений временного ряда за период с 1978 г. по 1994 г.; 4 – индивидуальные ошибки вычисления k ; 5 – магнитуды сильнейших на каждом шаге дискретизации сейсмических событий

Было установлено, что практически всегда сильное землетрясение возникает на фоне резкого возрастания параметра k , которому предшествует его глубокий минимум [Лутиков, 2008].

На рис. 4 представлена временная зависимость k в области возникновения землетрясения 11 марта 2011 г. за период с 1976 г. по март 2011 г. включительно (интервал дискретизации ≈ 2 года). Для построения этой зависимости было использовано 438 СМТ-решений, причем минимальное число решений на шаге дискретизации – 6 при среднем значении 24–25 точек на каждом шаге. Видно, что в период с 1978 г. по 1994 г. индекс k достаточно плавно колеблется возле средних значений временного ряда, находясь в пределах или вблизи коридора его стандартных отклонений.

Особенность данного землетрясения – наличие трех последовательных статистически значимых минимума индекса k в период с 1996 г. по 2010 г., причем землетрясение 11 марта произошло непосредственно после последнего минимума k на фоне его резкого аномального роста. Такой временной ход индекса k может указывать на то, что землетрясение реализовалось как бы «третьей попытки»: в первый раз оно могло произойти в период с 1997 г. по 2002 г., во второй – с 2005 г. по 2008 г. Таким образом, весь период с 1997 г. по 2010 г. был периодом неустойчивого состояния среды, когда сейсмотектонические условия в принципе уже «созрели» для реализации сильного землетрясения.

Следует отметить, что наличие трех последовательных минимумов параметра k , охватывающих интервал времени около 15 лет перед сильным землетрясением наблюдается впервые. Ранее временной ход индекса k был рассмотрен для ряда сильных землетрясений мира, в частности Суматринского, 26.12.2004 г. ($M_W = 9.3$) [Лутиков, 2005, 2008]; Симуширских, 15.11.2006 г. ($M_W = 8.3$) и 13.01.2007 г. ($M_W = 8.1$) [Lutikov, 2008]; Второго Чилийского, 27.02.2010 г. ($M_W = 8.8$) [Lutikov, 2010].

Форшок 9 марта ($M_W = 7.5$) и его афтершоковая последовательность

Как уже упоминалось выше, форшок 9 марта (рис. 1, 2), который произошел в 2 ч 45 мин (по Гринвичу), сопровождался последовательностью из 35 афтершоков ($4.6 \leq M_{NEIC} \leq 6.1$), которые продолжались в течение 44 ч после события 9 марта и закончились примерно за 7 ч до катастрофического землетрясения 11 марта.

На рис. 5 показан временной ход высвобождения кумулятивного скалярного сейсмического момента (M_{0cum}) в афтершоковой последовательности форшока 9 марта, представленный в долях скалярного сейсмического момента этого события ($M_0 = 2.1 \cdot 10^{20}$ Н·м).

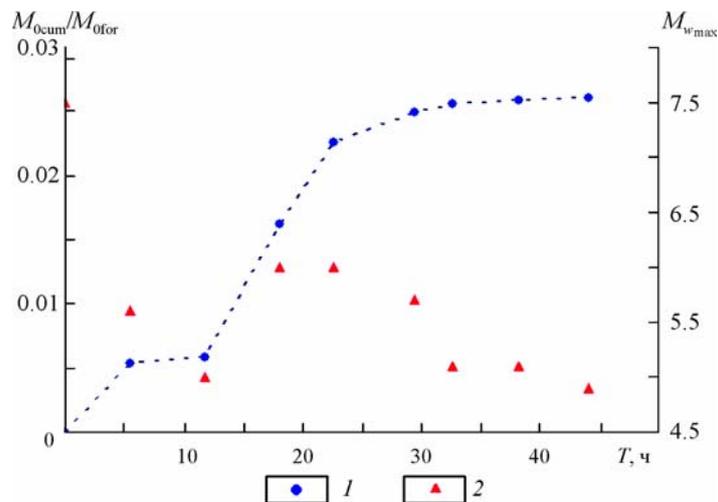


Рис. 5. Высвобождения кумулятивного скалярного сейсмического момента (M_{0cum}) в афтершоковой последовательности форшока 9 марта 2011 г.

1 – M_{0cum} ; 2 – максимальные наблюдаемые магнитуды афтершоков

Переход от магнитуд, представленных в каталоге NEIC, к моментной магнитуде M_W по данным Гарвардского сейсмологического центра осуществлялся по специально полученной корреляционной зависимости между M_{NEIC} и M_W , построенной по 44 парным определениям в интервале $5.3 \leq M_{NEIC} \leq 6.8$:

$$M_W = (0.931 \pm 0.105) M_{NEIC} + 0.291 \pm 0.675, \quad R_C = 0.813. \quad (2)$$

Переход от моментной магнитуды к скалярному моменту осуществлялся по известной зависимости Канамори [Kanamori, 1977].

Суммарный скалярный сейсмический момент, высвободившийся в афтершоках форшока 9 марта, составил $M_{0cum} = 5.47 \cdot 10^{18}$ Н·м, или 2.6 % от его скалярного момента.

Выполаживание графика на рис. 5 всего через 23 ч после сильного события 9 марта могло указывать на возможность возникновения вскоре еще одного сильного афтершока с $M_W \approx 6.4$, но само по себе не могло предвещать возникновения катастрофического землетрясения с $M_W = 9.1$.

Гораздо более тревожную картину дало бы сопоставление фокальных механизмов форшока 9 марта и трех его сильных афтершоков (www.globalcmt.org): 9.03, 18^h16^m ($M_W = 6.0$); 9.03, 18^h44^m ($M_W = 5.9$) и 10.03, 08^h24^m ($M_W = 5.7$) (рис. 6).

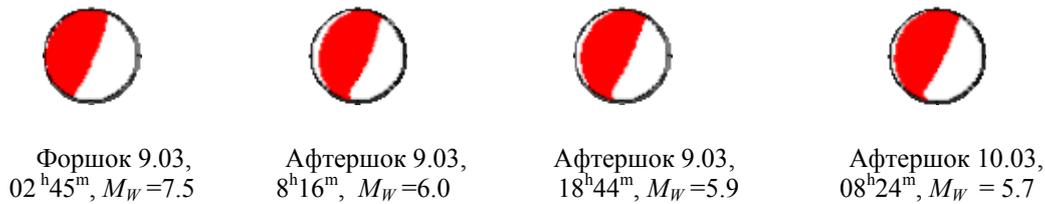


Рис. 6. Стереогаммы фокальных механизмов форшока 9 марта и трех его сильных афтершоков

Видно, что фокальные механизмы этих четырех событий практически идентичны. Рассчитанный по ним индекс упорядоченности $\kappa = 0.986 \pm 0.034$, т.е. очень близок к 1. Аномально высокое значение индекса упорядоченности после его значительного падения накануне (см. рис. 4) может рассматриваться как предвестник сильного землетрясения, магнитуда которого, согласно ходу высвобождения M_{0cum} (см. рис. 3), была грубо оценена как $M_W \approx 8.7$.

Начальная фаза афтершокового процесса катастрофического землетрясения 11 марта 2011 г.

Землетрясение 11 марта сопровождается интенсивным афтершоковым процессом, который находится в своей начальной стадии. Область распространения афтершоков охватывает территорию между $34\text{--}41^\circ$ с.ш. и $138\text{--}146^\circ$ в.д. За первые 12 сут после землетрясения, т.е. к 24.03.2011 г., по данным NEIC произошло уже свыше 700 афтершоков с $m_b \geq 4.5$, причем сильнейшие из них, имевшие $M_W = 7.9$ и 7.6 , произошли в первый час после основного толчка. Характер развития афтершокового процесса в первые 11 сут после землетрясения представлен на рис. 7.

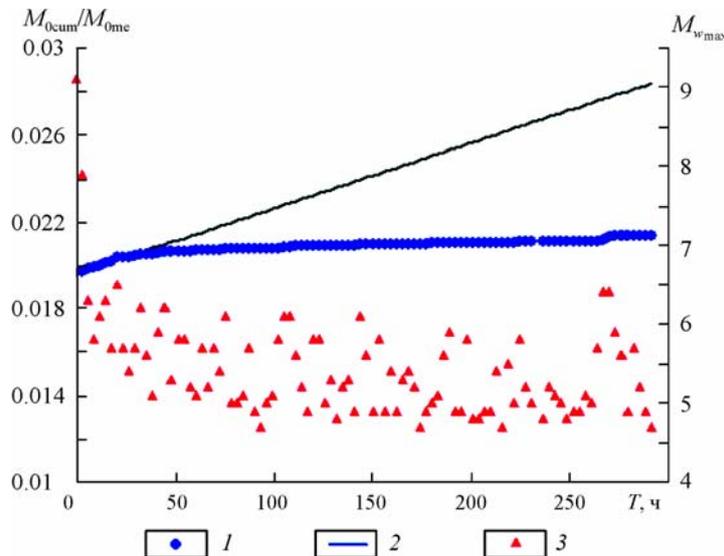


Рис. 7. Высвобождение скалярного сейсмического момента (M_{0cum}) в афтершоках за первые 11 сут (11 марта – утро 23 марта 2011 г.) в долях от скалярного момента главного события (M_{0me})

1 – отношение M_{0cum}/M_{0me} ; 2 – линейная аппроксимация высвобождения M_0 за первые 21 ч после главного события (интервал дискретизации 3 ч); 3 – магнитуды максимальных на каждом шаге дискретизации афтершоков (правая ось ординат)

Суммарный скалярный сейсмический момент, высвободившийся в афтершоках за это время, составил $M_{0cum} = 3.68 \cdot 10^{20}$ Н·м, или $\sim 2.13\%$ от M_0 главного события. Афтершоковый процесс столь сильного землетрясения, вероятно, будет продолжаться по крайней мере 3–4 года. Поэтому на своей начальной стадии, т.е. как минимум первые несколько недель после главного события, следует ожидать в среднем линейного высвобождения кумулятивного скалярного сейсмического момента, темп которого задается начальной фазой процесса. В данном случае линейное высвобождение M_0 продолжалось около 18 ч, причем коэффициент линейной корреляции аппроксимации, представленной на рис. 1, составил $R_C = 0.983$.

Из рис. 8 видно, что впоследствии фактическое высвобождение M_0 в афтершоках происходило значительно медленнее, чем по прогнозной линейной зависимости. Разность между прогнозным и фактическим значениями M_{0cum} составляет текущий дефицит в высвобождении M_{0cum} . На утро 23 марта такой дефицит достиг $\sim 3.7 \cdot 10^{20}$ Н·м, что соответствует возникновению повторного события с $M_W \approx 7.6$.

Проследим изменения индекса k в начальной стадии афтершокового процесса. Для этой цели использовались текущие решения тензора сейсмического момента из СМТ-каталога (www.globalcmt.org). За первые 13 сут афтершокового процесса было получено 70 таких решений для афтершоков с $5.2 \leq M_W \leq 7.9$.

Временной ход индекса k в афтершоковом процессе представлен на рис. 8. Минимальное число решений на шаге дискретизации – 5 при среднем значении 7–8 точек на каждом шаге. Среднее значение шага дискретизации – 1–2 сут.

Начальный этап высоких ($k \approx 0.98$) значений индекса упорядоченности соответствует периоду времени между сильным форшоком 09.03.2011 г. ($M_W = 7.5$) и главным событием 11.03.2011 г. ($M_W = 9.1$). С самого начала афтершокового процесса происходит резкое падение величины индекса упорядоченности до значения $k \approx 0.2$. Последующие 10 сут k колеблется между значениями 0.2–0.5, т.е. его уровень оказывается заметно ниже фонового (пунктирные линии).

В качестве иллюстрации физического смысла резкого падения индекса k в начале афтершокового процесса на рис. 9 приведены стереограммы фокальных механизмов главного события 11 марта ($M_W = 9.1$) и трех его ближайших по времени афтершоков: 11.03, 06^h15^m ($M_W = 7.9$); 11.03, 06^h25^m ($M_W = 7.6$); 11.03, 18^h59^m ($M_W = 6.3$).

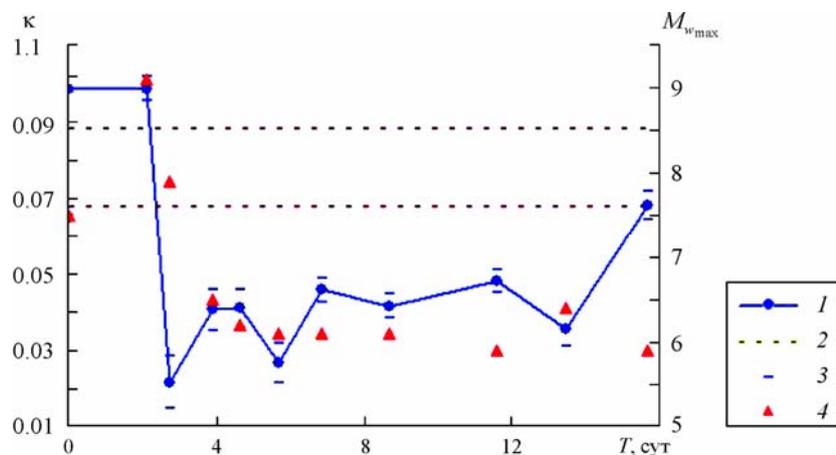


Рис. 8. Временной ход индекса k в форшоковом и афтершоковом процессе

1 – временной ход k ; 2 – коридор стандартных отклонений временного ряда k в период с 1977 г. по 11.03.2011 г.; 3 – индивидуальные ошибки определения k ; 4 – магнитуды максимальных на каждом шаге дискретизации афтершоков

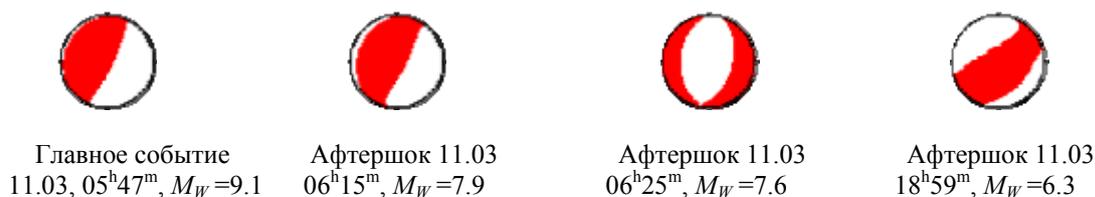


Рис. 9. Стереогаммы фокальных механизмов главного события 11 марта ($M_W=9.1$) и трех его ближайших по времени сильных афтершоков

Видно, что механизм главного события и его первого афтершока практически идентичны механизмам форшоков (см. рис. 7), что определяет экстремально высокое значение индекса упорядоченности на начальном участке графика на рис. 8. Фокальные механизмы последующих афтершоков, два из которых приведены на рис. 9, уже резко отличаются от фокального механизма главного события, что связано с процессом перестройки сейсмического процесса, связанного с перераспределением напряжений в очаговой зоне после возникновения сильного землетрясения. Это фиксируется резким падением величины индекса k . Последующий его рост означает возникновение нового упорядочивания фокальных механизмов афтершоков, которое, вообще говоря, может уже не совпадать с ориентацией главных осей тензора сейсмического момента главного события. Если наблюдаемый в последнее время рост индекса k окажется устойчивым, это может указывать на близость возникновения сильного повторного события с $M_W \approx 7.5$. Поэтому текущий анализ изменения величины k в ходе развития афтершокового процесса является важным элементом мониторинга сейсмической обстановки.

Заключение

Сформулируем основные выводы.

1. Линейная протяженность очага (L), определенная по облаку афтершоков первых суток, составляет примерно 540 км. Азимут простирания очага, оцененный по наклону линии регрессии облака афтершоков, равен $Az \approx 41.4^\circ$. Ширина облака афтершоков (W) изменяется от 210 км в юго-западной части до 410 км – в северо-восточной. Как большая ширина облака афтершоков, так и распределение их гипоцентров по глубине указывают на полого падающий очаг. В соответствии с этим предпочтение отдается первой нодальной плоскости решения фокального механизма по данным Гарвардского сейсмологического центра.

2. Анализ сейсмической истории региона за последние 110 лет выявил, что скалярный сейсмический момент в период 1898–1968 гг. высвобождался почти линейно. Последующие 42 года могут рассматриваться как период сейсмического затишья. Это неплохо согласуется с реально наблюдаемой моментной магнитудой землетрясения 11 марта $M_W = 9.0-9.1$. Реализация землетрясения с $M_W = 9.1$ привела к достаточно полной разгрузке накопившихся в рассматриваемом регионе напряжений, так что в ближайшие 30–40 лет возникновение здесь землетрясений подобной силы маловероятно.

3. Особенностью данного землетрясения является наличие трех последовательных статистически значимых минимумов индекса k в период с 1996 г. по 2010 г., причем землетрясение 11 марта произошло непосредственно после последнего минимума k на фоне его резкого аномального роста. Такой временной ход индекса упорядоченности может указывать на то, что землетрясение реализовалось как бы «с третьей попытки»: в первый раз оно могло произойти в период с 1997 г. по 2002 г., во второй – с 2005 г. по

2008 г. Таким образом, весь период с 1997 по 2010 г. был периодом неустойчивого состояния среды, когда сеймотектонические условия в принципе уже «созрели» для реализации сильного землетрясения.

4. Аномально высокое значение индекса упорядоченности в форшоковых событиях 9–10 марта ($\kappa = 0.986 \pm 0.034$) может рассматриваться как предвестник сильного землетрясения, магнитуда которого, согласно ходу высвобождения M_{0cum} , была грубо оценена как $M_W \approx 8.7$.

5. Характер высвобождения M_{0cum} в начальной фазе афтершокового процесса позволяет сделать вывод о возможности возникновения сильного афтершока с $M_W \approx 7.5$ или несколько выше.

Литература

- Лутиков А.И. Предварительный сейсмологический анализ катастрофического землетрясения 26.12.2004 г., $M_W=9$, в Юго-Восточной Азии // Активный геофизический мониторинг литосферы Земли: II Международный симпозиум. Материалы международной конференции 12–16 сентября 2005 г. Новосибирск, 2005. С. 401–406.
- Лутиков А.И. Сейсмический мониторинг очаговых зон сильных землетрясений // Физика Земли. 2008. № 3. С. 9–21.
- Лутиков А.И., Донцова Г.Ю. Оценка линейных размеров очагов землетрясений Камчатки по размерам облака афтершоков // Физика Земли. 2002. № 6. С. 46–56.
- Ризниченко Ю.В. Протяженный очаг и сеймотектоническое течение горных масс // Исследования по физике землетрясений. М.: Наука, 1976. С. 236–262.
- Рихтер Ч.Ф. Элементарная сейсмология. М.: Иностран. лит., 1963.
- Шебалин Н.В., Дорбат К., Татевосян Р.Э. Размеры, форма и положение очага Спитакского землетрясения // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1991. № 11.
- Федотов С.А. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги. М.: Наука, 2005. 302 с.
- Юнга С.Л. Методы и результаты изучения сеймотектонических деформаций. М.: Наука, 1990. 191 с.
- Kanatori H. The energy release in great earthquakes // J. Geophys. Res. 1977. V. 82. P. 2981–2987.
- Lutikov A. Seismotectonic deformation process in the Source Area of Simushire earthquakes of 2006–2007 ($M_s=8.3, 8.1$) in Mid Kuriles Occurrence. 31st General Assembly, European Seismological Commission. Hersonissos, Crete Island, Greece, 7–12 September, 2008.
- Lutikov A. Destructive earthquake at coast of Central Chile on 27 February, 2010: Seismic history and the preliminary analysis of aftershock process initial stage. 2010. http://www.conference-service.com/ESC2010/download/gi3u7ox5/d0654_0843.pdf

Сведения об авторе

ЛУТИКОВ Александр Иванович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, г. Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10. Тел.: 8 (499) 254-99-50. E-mail: ail@ifz.ru; Геофизическая служба РАН. 249035, г. Обнинск (Калужская обл.), проспект Ленина, д. 189.

GREAT TOHOKU EARTHQUAKE OF 11.03.2011: PRELIMINARY SEISMOLOGICAL ANALYSIS

A.I. Lutikov^{1,2}

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, Obninsk (Kaluga district), Russia

Abstract. Results of a preliminary seismological analysis of the source zone of 2011 Tohoku earthquake ($M_W=9.1$) near Honshu eastern coast were considered. We traced the seismic history of releasing the cumulative scalar seismic moment for the recent 110 years and temporal changes in an ordering index for the recent 35 years. These parameters are the important characteristics of seismotectonic deformation process. The foreshock activation stage and initial phase of aftershock process were studied.

Keywords: seismic moment, ordering index, focal mechanism, foreshock activation.