

УДК 550.34

КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ В РАЙОНЕ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЯПОНИИ И КАТАСТРОФИЧЕСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ ТОХОКУ 11 МАРТА 2011 Г. (Mw=9.0)

²⁾Копничев Ю.Ф., ¹⁾Соколова И.Н.

¹⁾Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

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

Представлены результаты анализа сейсмичности для диапазонов глубин 0 – 33 км и 34 - 70 км перед восьмью сильными и сильнейшими землетрясениями с Mw=7.0 - 9.0 за 1989 - 2011 гг., произошедшими в районе северо-восточной Японии. Детально рассмотрены характеристики сейсмичности в очаговой зоне землетрясения Тохоку 11.03.2011 г. (Mw=9.0). Перед всеми сильными и сильнейшими землетрясениями формировались кольцевые структуры сейсмичности в обоих диапазонах глубин. Получены корреляционные зависимости размеров колец, времени их формирования, а также пороговых значений магнитуды от энергии главных событий. После землетрясения Тохоку резко ускорилось формирование новых колец сейсмичности на северной границе очаговой зоны. Предполагается, что здесь идут процессы подготовки нового сильного землетрясения, для которого оценена возможная магнитуда.

Работами последних лет установлено [1 - 6], что в зонах субдукции перед многими сильными и сильнейшими землетрясениями формируются кольцевые структуры сейсмичности в разных диапазонах глубин. В [4] для района северо-восточной Японии выделены такие структуры по данным до 01.07.2009 г. Полученные характеристики позволили сделать прогноз мест и магнитуд следующих возможных сильных землетрясений. 11 марта 2011 г. произошло катастрофическое землетрясение Тохоку (Mw=9.0), которое вместе с вызванным им цунами привело к грандиозным разрушениям в близлежащих префектурах на о. Хонсю. В статье заново рассматриваются характеристики сейсмичности исследуемого района с использованием данных, полученных после 01.07.2009 г., в том числе форшоков и афтершоков землетрясения Тохоку. Оцениваются эффективность ранее сделанного прогноза и возможность новых сильных землетрясений в районе северо-восточной Японии в ближайшие годы.

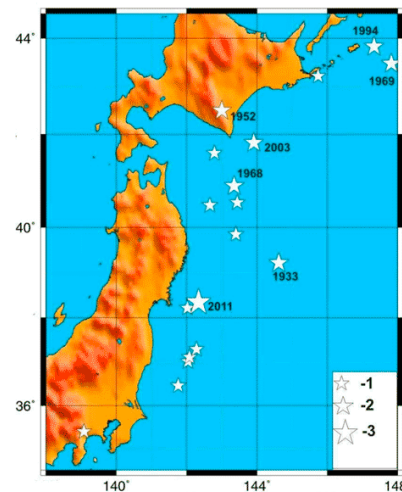
ИСТОРИЧЕСКАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ

Рассматривается район северо-восточной Японии и южных Курил между 34.5° и 44.5° N, где, начиная с 1900 г., произошло 18 сильных и сильнейших землетрясений с Mw≥7.7 (таблица 1, рисунок 1).

Большинство сильных событий имело механизмы типа надвига, характерных для зон субдукции, тогда как землетрясение Санрику-оки (02.03.1933 г., Mw=8.4) было сильнейшим из сбросов, произошедших на земном шаре за последние 110 лет [8]. Следует отметить, что до 2011 г. все инструментально зарегистрированные события с Mw≥8.0 происходили к северу от 39° N. Это было одной из причин того, почему катастрофическое землетрясение Тохоку 11.03.2011 г. (Mw=9.0) явилось для японских сейсмологов полной неожиданностью [7].

Таблица 1. Сильные землетрясения в районах северо-восточной Японии и южных Курил (зоны субдукции)

Дата	φ°, N	λ°, E	h, км	Mw
01.09.1923	35.4	139.08	35	7.9
09.03.1931	40.48	142.66	35	7.7
02.03.1933	39.22	144.62	35	8.4
23.05.1938	36.46	141.76	35	7.7
05.11.1938	37.01	142.04	35	7.9
05.11.1938	37.11	142.08	35	7.8
06.11.1938	37.29	142.28	35	7.7
04.03.1952	42.5	143	43	8.1
20.03.1960	39.85	143.4	35	7.8
16.05.1968	40.9	143.35	26	8.3
16.05.1968	41.6	142.79	11	7.8
11.08.1969	43.48	147.82	46	8.2
17.06.1973	43.22	145.74	44	7.8
12.06.1978	38.22	142.02	53	7.7
04.10.1994	43.83	147.33	33	8.3
28.12.1994	40.54	143.44	16	7.8
29.09.2003	41.82	143.91	13	8.3
11.03.2011	38.32	142.37	32	9.0



Эпицентры событий с магнитудой Mw: 1 – (7.7 - 7.9); 2 – (8.1 - 8.4); 3 – 9.0. Указаны годы для Mw>8.0

Рисунок 1. Эпицентры сильных землетрясений районов северо-восточной Японии и южных Курил

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Изучение характеристик сейсмичности района северо-восточной Японии и южных Курил проведено, как и в [4], для двух диапазонов глубин: 0 - 33 и 34 - 70 км. Используются каталоги землетрясений NEIC (National Event Information Center, Геологическая служба США). Проанализированы данные о землетрясениях, произошедших в окрестностях будущих очаговых зон, с магнитудами $M \geq M_{п1}$ и $M \geq M_{п2}$, где $M_{п1}$ и $M_{п2}$ – значения пороговых магнитуд соответственно для первого и второго диапазонов глубин варьировались от 3.9 до 5.9 (таблица 2).

Таблица 2. Характеристики кольцевых структур, сформировавшихся перед сильными и сильнейшими землетрясениями в районах северо-восточной Японии и южных Курил

N	Дата	φ°, N	λ°, E	h, км	Mw	Mп1	L, км	T1, лет	Mп2	l, км	T2, лет
1	01.11.1989	39.92	142.79	29	7.4	4.0	100	18	4.0	95	18
2	04.10.1994	43.83	147.33	33	8.3	5.0	80	25	5.1	80	27
3	28.12.1994	40.54	143.44	16	7.8	4.4	130	23	4.4	85	21
4	25.09.2003	41.82	143.91	13	8.3	5.0	85	28	5.0	40	29
5	31.10.2003	37.81	142.62	10	7.0	4.0	30	17	4.0	40	26
6	28.11.2004	43.01	145.12	39	7.0	4.0	65	31	3.9	40	31
7	19.07.2008	37.55	142.21	22	7.0	4.0	55	34	4.0	40	35
8	11.03.2011	38.32	142.37	32	9.0	5.9	140	30	5.4	75	35

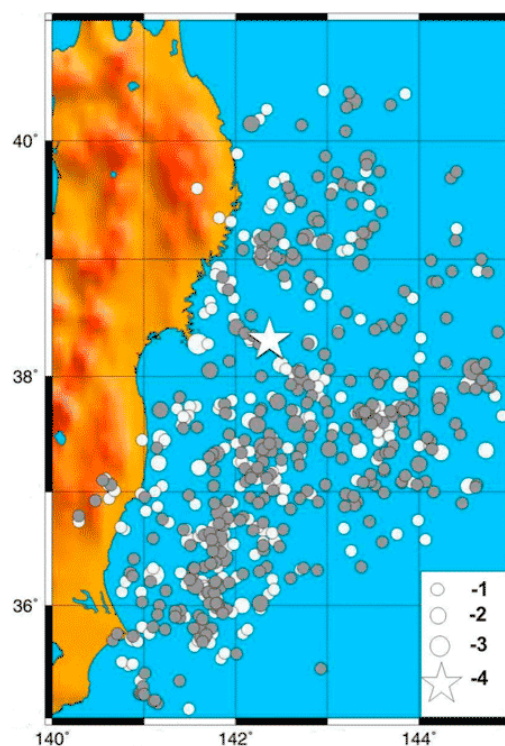
Примечание: L и l - длина большой оси, T1 и T2 – длительность формирования мелких и глубоких колец, соответственно.

АНАЛИЗ ДАННЫХ

Афтершоковая область землетрясения Тохоку показана на рисунке 2 (события с $M \geq 5.0$ за первые 30 дней после этого события). Видно, что облако афтершоков вытянуто вдоль побережья, имеет длину около 600 км. Подавляющее большинство афтершоков приходится на океаническую область, при этом их плотность резко уменьшается к югу от $\sim 35.5^\circ N$ и к северу от $\sim 39.7^\circ N$. Наиболее сильные афтершоки ($M \geq 6.5$) сосредоточены между 36.0° и $39.3^\circ N$. Эпицентры сильнейших событий с $M_w = 7.9, 7.7$ и 7.1 расположены соответственно на юго-западном, восточном и западном флангах очаговой зоны. Самый сильный афтершок, произошедший к северу от $39^\circ N$ за первые 30 дней, был гораздо слабее ($M_w = 6.5$).

Кольцевые структуры, образовавшиеся до 01.07.2009 г. В [4] были предварительно рассмотрены характеристики кольцевых структур, сформировавшихся перед 7 сильными землетрясениями с $M_w = 7.0 - 8.3$ в рассматриваемом районе (таблица 2). Перед всеми 7 событиями, как и в других зонах субдукции [1 - 3, 5], проявились кольцевые структуры сейсмичности эллиптической формы. При этом эпицентры главных событий находились вблизи соответствующих областей пересечения или касания “мелких” ($h=0 - 33$) и “глубоких” ($h=34 - 70$ км) колец сейсмичности. Были проанализированы характеристики сейсмичности в области сейсмической бреши, соответствовавшей очаговой зоне землетрясения 11.03.2011 г.

Обработаны данные о сейсмичности перед 7 сильными и сильнейшими землетрясениями с $M_w = 7.0 - 8.3$, произошедшими в 1989 - 2008 гг. (таблица 2). Наиболее детально изучены характеристики сейсмичности в очаговой зоне сильнейшего землетрясения Тохоку 11.03.2011 г., где до него событий с $M_w \geq 8.0$ не было, вероятно, в течение нескольких сотен лет [7]. В выборку по каждому землетрясению из таблицы 2 включены данные, относящиеся к временному интервалу от 01.01.1964 г. до дня, предшествовавшего главному событию.



Эпицентры событий с магнитудой: 1 – (5.0 - 5.9); 2 – (6.0 - 6.9); 3 – ≥ 7.0 ; 4 – эпицентр землетрясения Тохоку.
Залитый значок – глубина 0 - 33 км, не залитый – 34 - 70 км

Рисунок 2. Афтершоки землетрясения Тохоку 11.03.2011 г.

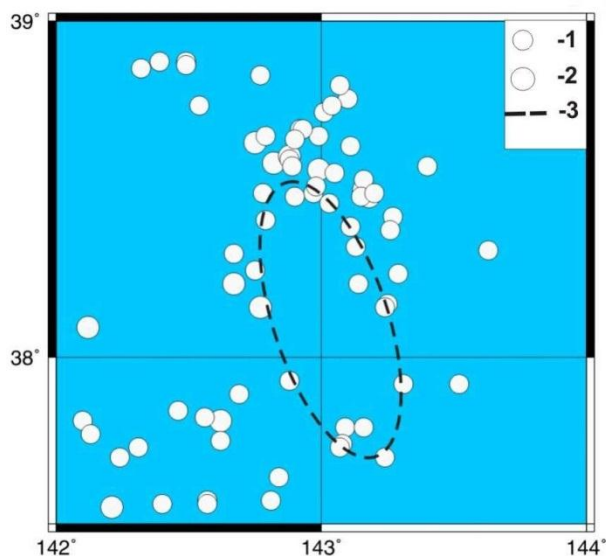
На рисунке 3 приведены данные о сейсмичности центральной части очаговой зоны землетрясения Тохоку, района между 37.5° и $39^\circ N$, за период 01.01.1973 - 01.07.2009 гг. Здесь за 20 месяцев до

**КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ В РАЙОНЕ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЯПОНИИ
И КАТАСТРОФИЧЕСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ ТОХОКУ 11 МАРТА 2011 г. (Mw=9.0)**

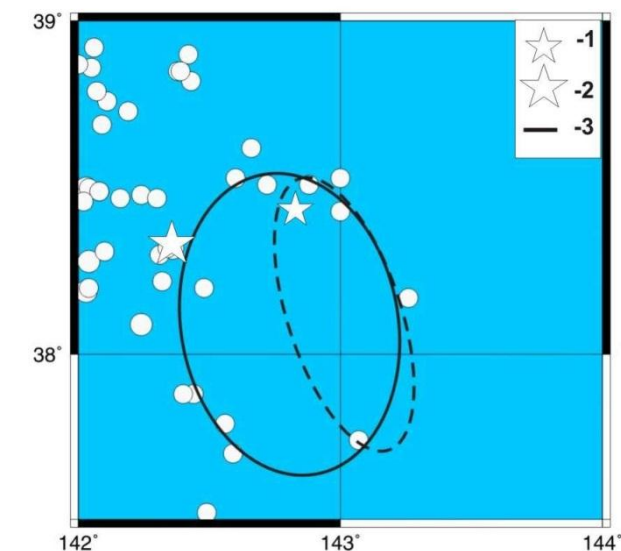
этого события сформировались кольцевые структуры – мелкая (Mп1=5.0, L~95 км) и глубокая (Mп2=5.0, l~100 км). При этом эпицентр сильного форшока 09.03.2011 г. (Mw=7.3) находился вблизи области пересечения мелкого и глубокого колец, а эпицентр главного события располагался на границе глубокого кольца, на расстоянии около 45 км от этой области.

Кольцевые структуры, сформировавшиеся до 11.03.2011 г. На рисунке 4 показана характеристика сейсмичности за период 01.01.1973 - 10.03.2011 гг. в районе между 39° и 41° N, т.е. в северной части очаговой зоны землетрясения Тохоку. Здесь образова-

лись кольцевые структуры: мелкая (Mп1=5.3, L~130 км), вытянутая в направлении на восток-северо-восток, и относительно большая глубокая (Mп2=5.3, l~140 км), ориентированная в северо-западном направлении. Кольца пересекаются вблизи параллели 40° N, в области наибольшей плотности гипоцентров событий с глубинами от 34 до 70 км. При этом кольцевые структуры остались такими же, как и сформировавшиеся до 01.07.2009 г. [4]. Вместе с тем в период между 01.07.2009 и 10.03.2011 гг. характеристики кольцевой сейсмичности существенно изменились в области, ограниченной координатами 37° и 39° N.

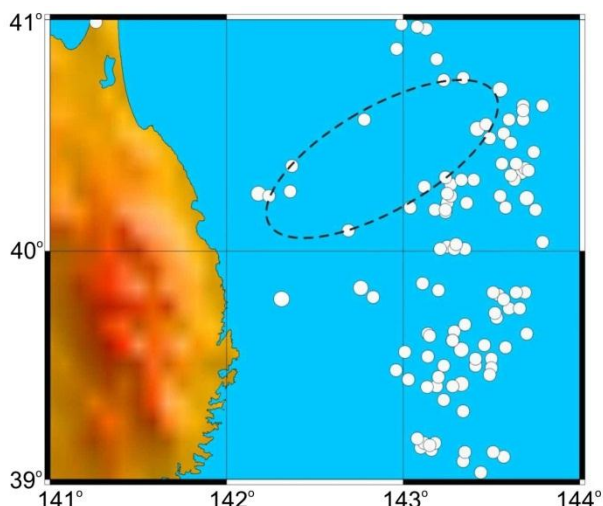


Эпицентры землетрясений: 1 – $5.0 \leq M < 6.5$, 2 – $M \geq 6.5$.
3 – мелкое кольцо
а – 0 - 33 км

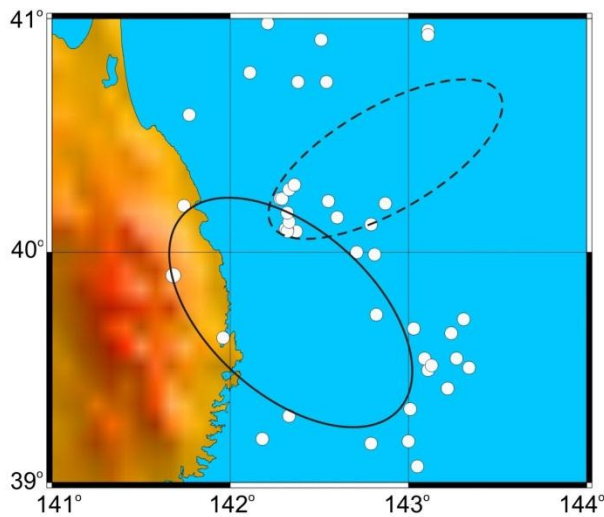


Эпицентры землетрясений: 1 – сильнейшего форшока (M=7.3),
2 – Тохоку. 3 – глубокое кольцо. Остальные обозначение – на рисунке 2а
б – 34 - 70 км

Рисунок 3. Кольцевая сейсмичность в районе между 37.5° и 39° N (по данным до 01.07.2009 г.)



Эпицентры землетрясений: маленький кружок $5.3 \leq M < 6.5$
Остальные обозначения – на рисунке 3
а – 0 - 33 км



Условные обозначение – на рисунках 3 и 4а
б – 34 - 70 км

Рисунок 4. Кольцевая сейсмичность в районе между 39° и 41° N (по данным до 10.03.2011 г.)

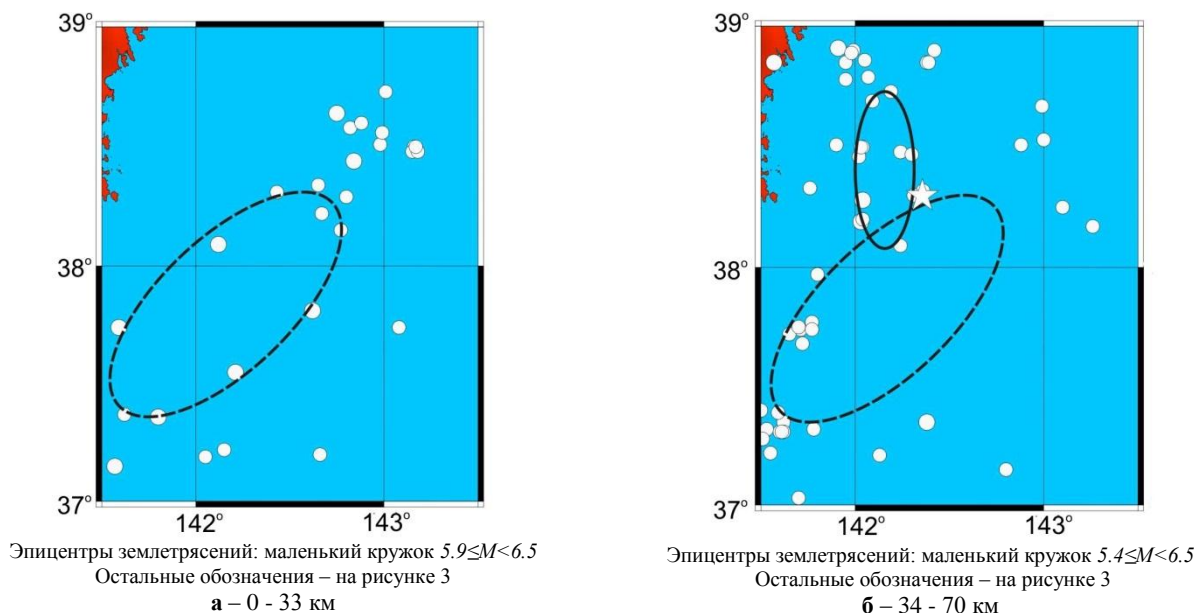


Рисунок 5. Кольцевая сейсмичность в районе между 37° и 39° N (по данным до 10.03.2011 г.)

Из рисунка 5 следует, что перед землетрясением 11.03.2011 г. образовались кольцевые структуры со значительно более высокими пороговыми величинами магнитуд: мелкая ($M_{п1}=5.9$, $L \sim 140$ км), ориентированная в северо-восточном направлении, и глубокая ($M_{п2}=5.4$, $L \sim 75$ км), вытянутая вдоль меридиана. Наибольшие магнитуды M_w событий в областях этих структур составляли соответственно 7.0 (19.07.2008 г.) и 7.7 (12.06.1078 г.). Кроме того, на расстоянии ~ 20 км к северо-востоку от мелкого кольца находился эпицентр сильнейшего форшока землетрясения Тохоку (09.03.2011 г., $M_w=7.3$). Важно отметить, что эпицентр землетрясения Тохоку также попал в область пересечения колец сейсмичности.

На рисунке 6 представлена зависимость магнитуды землетрясений от времени в районе мелкого кольца (рисунок 5а). График имеет близкую к U-образной форму и показывает, что наибольшая скорость сейсмо-тектонической деформации (СТД) наблюдалась в начале и в конце исследуемого интервала времени (1981 - 1987 и 2003 - 2011 гг., соответственно).

На рисунке 7 приведены характеристики сейсмичности в районе между 36° и 37.5° N. В рассматриваемый период времени (до 10.03.2011 г.) здесь также проявились кольцевые структуры: мелкая ($M_{п1}=5.0$, $L \sim 95$ км), ориентированная субширотно, и глубокая ($M_{п2}=5.0$, $L \sim 95$ км), вытянутая в северо-восточном направлении. Кольца сейсмичности пересекаются в области между 141.5° и 142.1° E.

На рисунке 8 представлены данные о сейсмичности в районе между 34.5 и 36.5° N, т.е. на южной границе землетрясения Тохоку и к югу от нее. В период с 01.01.1973 по 01.07.2009 гг. здесь проявились кольцевые структуры: мелкая ($M_{п1}=5.2$, $L \sim 130$ км), ори-

ентированная субмеридионально, и глубокая ($M_{п2}=5.2$, $L \sim 70$ км), расположенная севернее и вытянутая в направлении на запад-северо-запад. Кольца касаются друг друга в области $\sim 35.9^\circ$ N. При этом, в районе между 34.5° и 36.5° N не было сильных землетрясений ($M_w \geq 7.5$) с 1938 по 2010 гг. Существенно, что эпицентр сильнейшего афтершока землетрясения Тохоку 11.03.2011 г. ($M_w=7.9$, $h=48$ км) находится вблизи северной границы глубокого кольца. Сопоставление полученных данных с данными, приведенными в [4], показывает, что кольцевые структуры, показанные на рисунках 7 и 8, не изменились за период 01.07.2009 - 10.03.2011 гг.

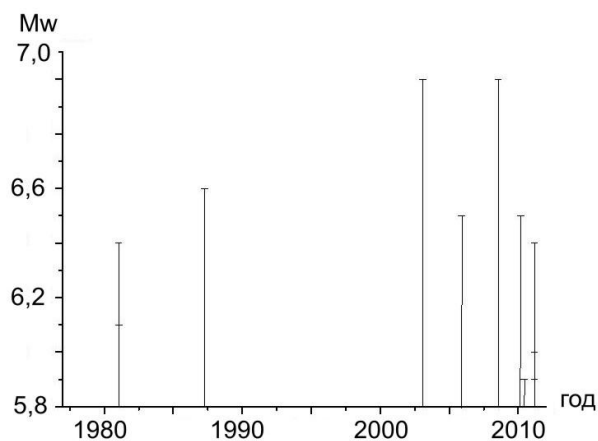


Рисунок 6. Зависимость магнитуд землетрясений от времени в районе мелкого кольца сейсмичности (рисунок 5а)

**КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ В РАЙОНЕ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЯПОНИИ
И КАТАСТРОФИЧЕСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ ТОХОКУ 11 МАРТА 2011 г. ($M_w=9.0$)**

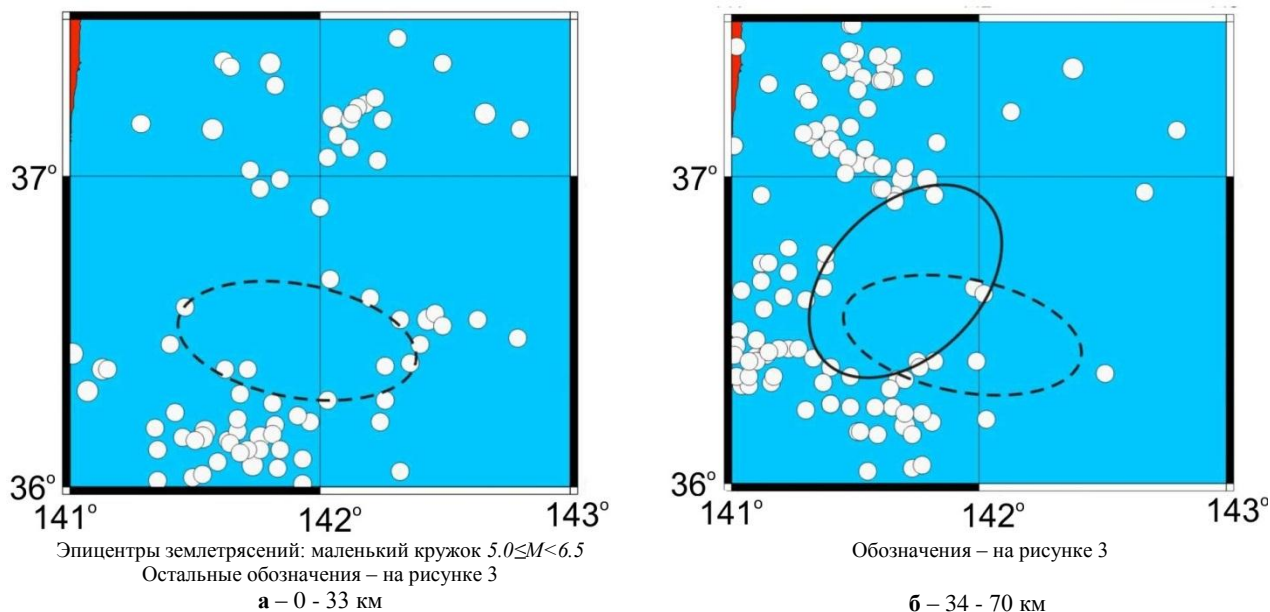


Рисунок 7. Кольцевая сейсмичность в районе между 36° и $37.5^\circ N$ (по данным до 10.03.2011)

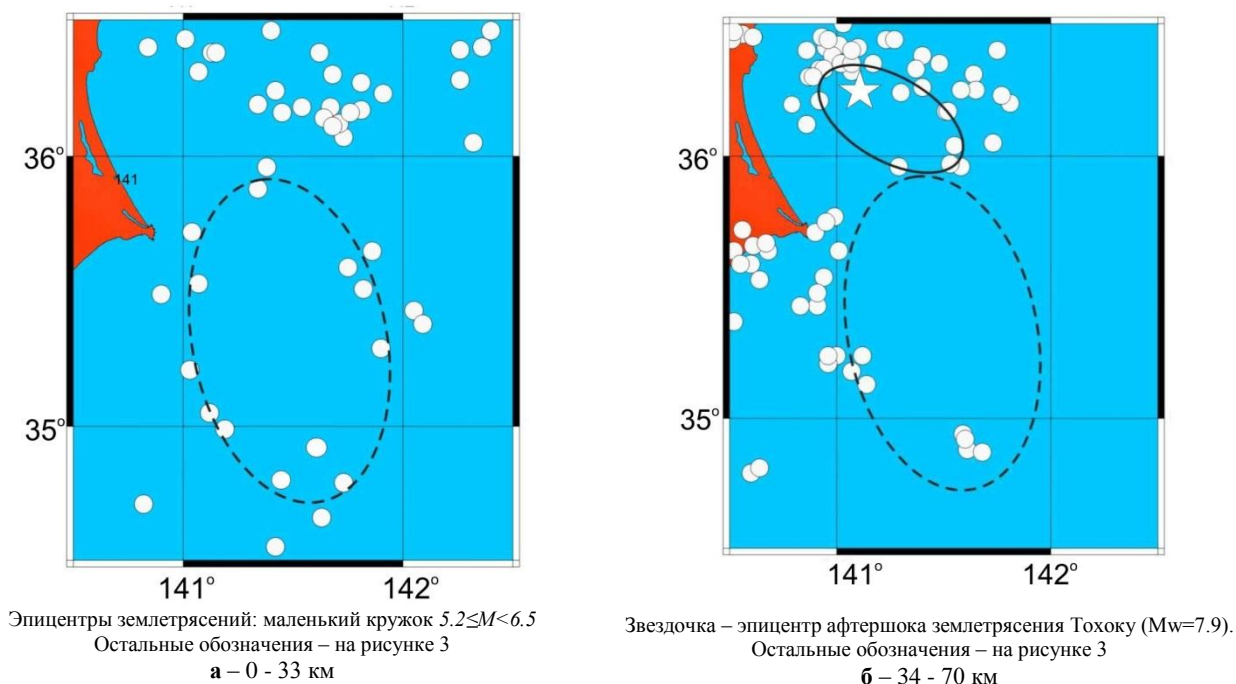


Рисунок 8. Кольцевая сейсмичность в районе между 34.5° и $36.5^\circ N$ (по данным до 10.03.2011 г.)

Таким образом, характеристики кольцевых структур примерно за 20 месяцев до будущего землетрясения Тохоку претерпели существенные изменения только в близких окрестностях его эпицентра.

Кольцевые структуры, образовавшиеся после 11.03.2011 г. На рисунке 9 приведена характеристи-

ка сейсмичности за период 01.01.1973 - 01.07.2011 г., включающей афтершоки землетрясения Тохоку, для района, который ограничен координатами $39 - 41^\circ N$ и $141.5 - 143.5^\circ E$.

КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ В РАЙОНЕ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЯПОНИИ
И КАТАСТРОФИЧЕСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ ТОХОКУ 11 МАРТА 2011 г. (Mw=9.0)

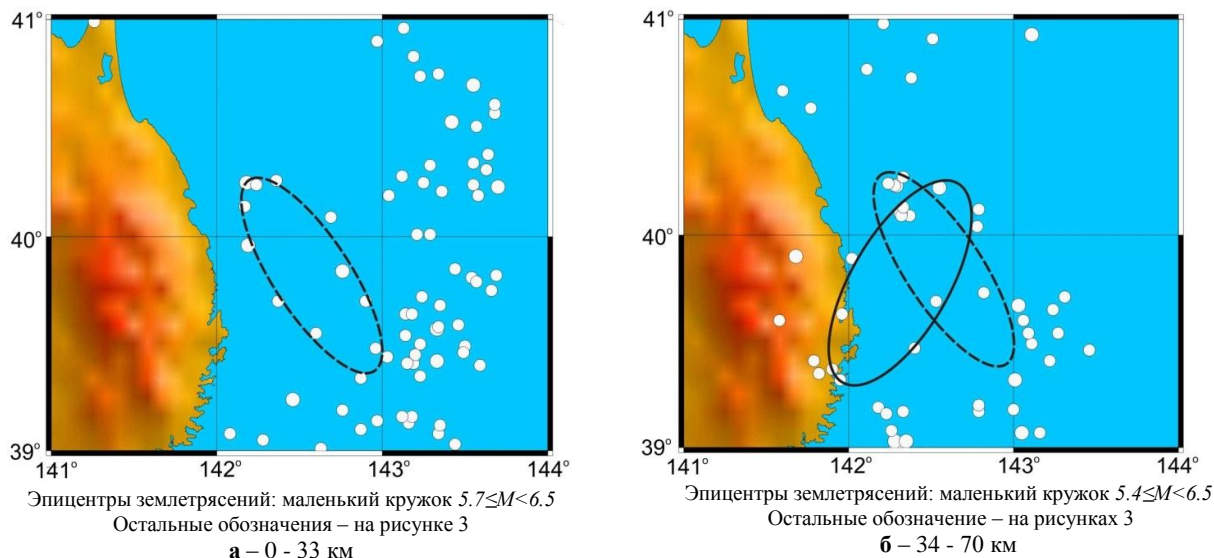


Рисунок 9. Кольцевая сейсмичность в районе между 39° и 41° N (по данным до 01.07.2011 г.)

Из сопоставления рисунков 4 и 9 следует, что через 3.5 месяца после главного события четко проявились новые кольцевые структуры с достаточно высокими пороговыми величинами магнитуды. Мелкое кольцо ($M_{п1}=5.7$, $L \sim 110$ км) вытянуто в направлении на северо-северо-запад, а глубокое ($M_{п2}=5.4$, $l \sim 110$ км) – на северо-северо-восток. Наибольшие магнитуды событий в районе мелкого кольца составляют 7.4 (01.11.1989 г.) и 7.0 (06.01.1995 г.). Текущие величины T1 и T2 для рассматриваемых колец в 2011 г. равнялись 22 и 31 годам, соответственно. Кольца пересекаются на северной границе афтершоковой зоны землетрясения Тохоку, между 39.6° и 40.2° N. К северной области пересечения колец приурочен эпицентр наиболее сильного афтершока землетрясения Тохоку, произошедшего к северу от 39° N в течение 3.5 месяцев после него (22.06.2011 г., $h=5$ км, $M_w=6.7$). Для этого события наблюдался явный дефицит собственных афтершоков (их наибольшая магнитуда составляла 4.7). На рисунке 10 показана зависимость магнитуды землетрясений от времени в районе мелкого кольца (рисунок 9а). В данном случае снова наблюдается близкая к U-образной форма графика – наибольшие скорости СТД имели место в начале (1989 - 1995 гг.) и в конце (2009 - 2011 гг.) изучаемого интервала времени.

Зависимости параметров кольцевых структур от магнитуды. На рисунке 11 приведены зависимости $\lg L(M_w)$ и $\lg l(M_w)$, построенные по данным для 8 землетрясений с $M_w=7.0 - 9.0$, которые произошли в 1989 - 2011 гг. в районе северо-восточной Японии и южных Курил (таблица 2).

Из рисунка 11а видно, что наблюдается увеличение размеров мелких колец с ростом магнитуды, уравнение линейной регрессии имеет вид:

$$\lg L(\text{км}) = 0.20M_w + 0.33, \quad r = 0.70, \quad (1)$$

где r - коэффициент корреляции.

Аналогичная зависимость для глубоких колец сейсмичности (рисунок 11б) имеет вид:

$$\lg l(\text{км}) = 0.10M_w + 1.01, \quad r = 0.43 \quad (2)$$

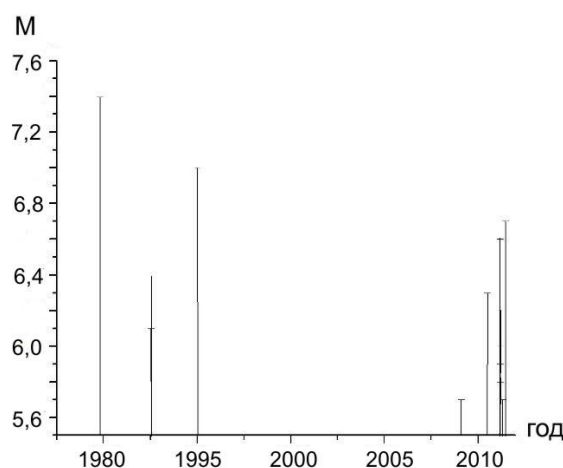


Рисунок 10. Зависимость магнитуды землетрясений от времени в районе мелкого кольца (рисунок 9а)

Использование новых данных о землетрясении Тохоку позволило существенно повысить значения коэффициента корреляции по сравнению с оценкой, приведенной в [4] (где $r=0.58$ и $r=0.13$ для мелких и глубоких колец сейсмичности, соответственно). Из полученных зависимостей следует, что в диапазоне $M_w=7.0 - 9.0$ наблюдается слабый рост параметра L с увеличением магнитуды. Судя по полученным данным, зависимость величины l от M_w практически отсутствует. При этом для района северо-восточной Японии и южных Курил величины L и l в диапазоне $M_w=8.3 - 9.0$ очень малы по сравнению с районом Суматры [3].

На рисунке 12 показана зависимость параметров $M_{п1}$ и $M_{п2}$ от M_w .

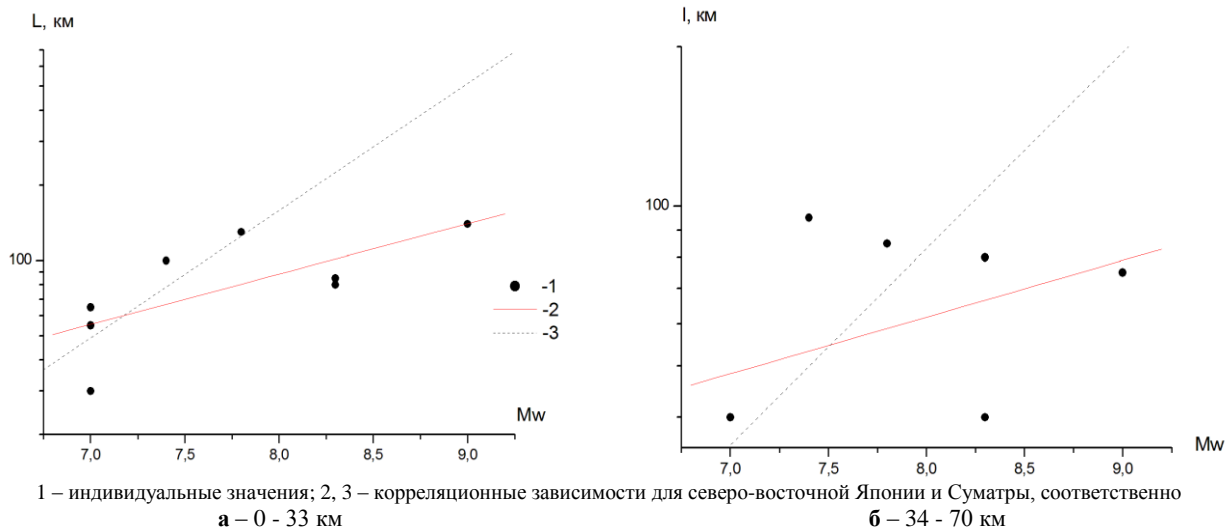


Рисунок 11. Зависимости размеров колец сейсмичности от Mw

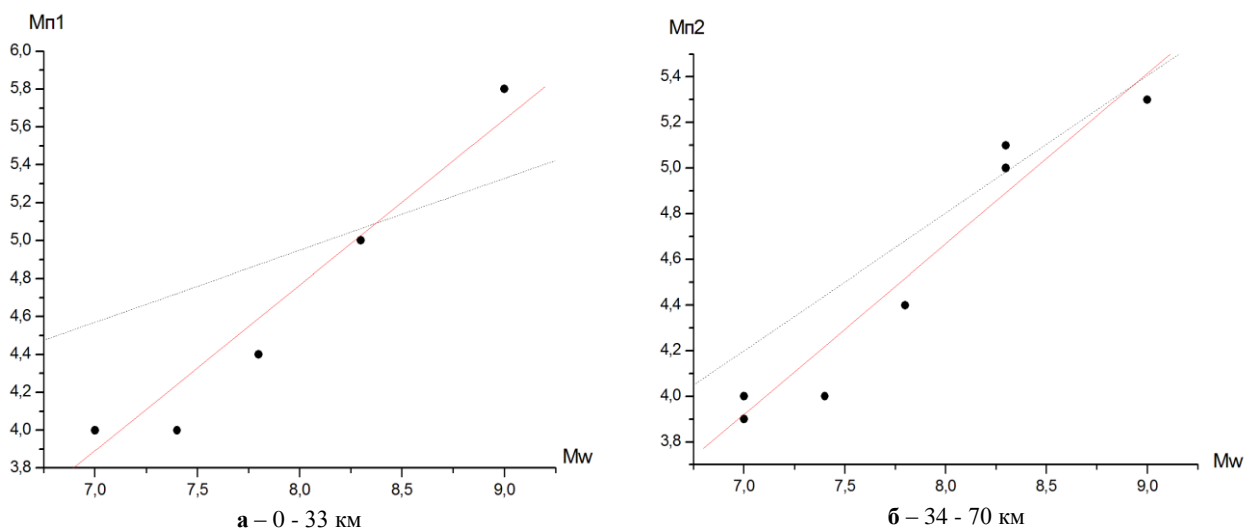


Рисунок 12. Зависимости пороговых значений магнитуды от Mw (обозначения – на рисунке 11)

Из графиков следует, что пороговые значения магнитуд растут с увеличением энергии главного события, при этом корреляционные зависимости описываются следующими формулами:

$$M_{п1} = 0.91 M_w - 2.46, r = 0.97, \quad (3)$$

$$M_{п2} = 0.78 M_w - 1.54, r = 0.98. \quad (4)$$

При малых Mw величины Mп1 и Mп2 значительно ниже, чем для района Суматры [3], однако они растут с увеличением магнитуды гораздо быстрее (особенно параметр Mп1).

Зависимости времени формирования кольцевых структур от магнитуды показаны на рисунке 13.

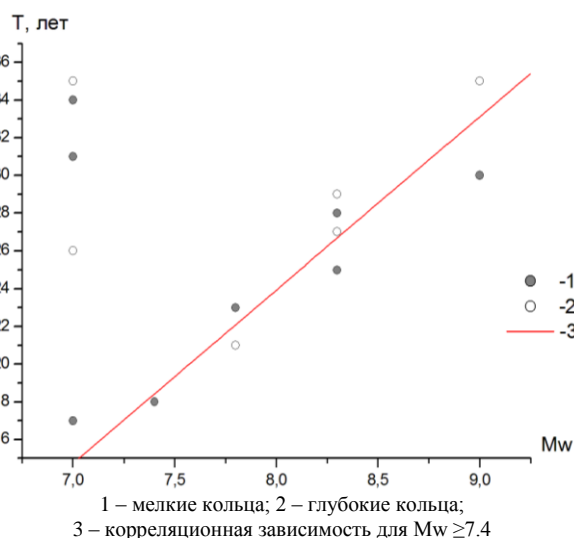


Рисунок 13. Зависимости времени формирования колец сейсмичности от Mw

Из рисунка 13 следует, что для трех событий с Mw=7.0 имеет место довольно большой разброс данных (T1=17 - 34, T2=26 - 35 лет). В то же время в диапазоне Mw=7.4 - 9.0 наблюдается закономерный рост величин T1 и T2 с магнитудой (от 18 до 30 - 35 лет). Корреляционная зависимость по объединенным величинам T1 и T2 выражается формулой

$$T(\text{лет})=9.18 M_w - 49.51, r=0.95 \quad (5)$$

Оценки магнитуд возможных землетрясений в районе северо-восточной Японии. В [4] по данным о сейсмичности, полученным до 01.07.2009 г., была сделана оценка магнитуд возможных сильных землетрясений в районе северо-восточной Японии. При этом были использованы только зависимости, аналогичные формулам (3) и (4), поскольку из-за большого разброса данных прогноз линейных размеров кольцевых структур (по аналогам формул (1) и (2)) представлялся нецелесообразным. В таблице 3 приведены величины Mw, которые соответствовали пороговым значениям магнитуд по состоянию на 01.07.2009 г.

Как видно из таблицы 3, прогнозные значения Mw для таких событий варьировались от 8.4±0.1 (внутри очаговой зоны землетрясения Тохоку) до 8.8±0.2 и 8.5±0.2 (на ее северной и южной границах, соответственно). Использование дополнительных данных, полученных за период 01.07.2009 – 10.03.2011 гг., позволяет с помощью формул (3) и (4) существенно уточнить оценку магнитуды события, соответствующего кольцевым структурам, которые проявились непосредственно перед землетрясением Тохоку: Mw=9.1±0.4.

Резкое ускорение процессов формирования новых кольцевых структур в северной части очаговой зоны дает возможность по формулам (1), (3) и (4) уточнить также оценку энергии сильного события, которое может произойти к северу от 40° N: Mw=8.8±0.2. Следует отметить, что она совпадает с оценкой, соответствующей данным, полученным до 01.07.2009 г. В то же время использование формулы (5) дает гораздо более низкую прогнозную величину Mw (8.3±0.5).

Таблица 3. Прогнозные значения Mw в зоне сейсмической бреши, существовавшей до 11.03.2011 [4]

φ°, N	λ°, E	Mw	Mп1	L, км	Mп2	l, км
39-41	141-144	8.8±0.1	5.3	130	5.3	140
37.5-39.0	142-144	8.4±0.1	5.0	95	5.0	100
36.0-37.5	141-143	8.4±0.1	5.0	95	5.0	85
34.5-36.5	140.5-142.5	8.5±0.2	5.2	130	5.0	70

ОБСУЖДЕНИЕ

Данные, приведенные ранее [4] и в настоящей статье, свидетельствуют о том, что в районе северо-восточной Японии перед сильными и сильнейшими землетрясениями с гипоцентрами на глубинах 10 - 39 км формируются, как и в других зонах субдукции, кольцевые структуры сейсмичности в двух диапазонах глубин [1 - 3, 5]. Существенно, что эпицентры сильных событий здесь располагались также вблизи областей пересечения или наибольшего сближения колец сейсмичности, как это установлено в других районах земного шара. В [1 - 6] отмечено, что появление кольцевых структур, скорее всего, связано с миграцией мантийных флюидов, играющих важную роль в процессах подготовки сильных землетрясений. Полученные в [9] результаты позволяют считать, что мелкие кольцевые структуры оконтуривают сравнительно жесткие блоки, на границах которых стимулируется постепенный подъем глубинных флюидов. Возможно, что аналогичный процесс происходит и на границах глубоких колец (в [10, 11] сделан вывод, что подъем флюидов в зонах субдукции происходит в основном в результате землетрясений). В областях пересечения или касания мелких и глубоких колец постепенно достигается максимальная толщина двухфазного слоя с присутствием заметной доли флюидов. Если флюиды формируют связную сеть, то на кровле этого слоя будет иметь место концентрация напряжений, кото-

рые могут превысить предел прочности горных пород, инициируя подвижку при сильном землетрясении [12, 13]. Косвенным подтверждением такой трактовки природы колец может служить слабая зависимость времени их формирования от магнитуды (есть основания предполагать, что это связано с практическим постоянством средней скорости подъема флюидов [10]). Из рисунка 13 следует, что в диапазоне Mw=7.4 - 9.0 наблюдается медленный рост величин T1 и T2 с магнитудой при высокой коэффициенте корреляции. В то же время, при Mw=7.0 имеет место большой разброс значений этих параметров. Скорее всего, это связано с меньшей надежностью оценок величин T1 и T2 для сравнительно слабых землетрясений, которым соответствуют низкие величины Mп1 и Mп2 (для событий с M~4 заметно уменьшается точность определения координат и глубин гипоцентров).

Зависимости размеров колец и пороговых значений магнитуд от энергии главных событий в рассматриваемом районе резко отличаются от зависимостей, полученных в других зонах субдукции [3, 5]. Из рисунка 9 следует, что размеры мелких колец растут с ростом Mw в исследуемом районе гораздо слабее, чем, например, для района Суматры [3]. Судя по имеющимся данным, величины l в районе северо-восточной Японии в диапазоне Mw=7.0 - 9.0 практически не зависят от магнитуды. В то же время величины Mп1 и Mп2 растут с ростом Mw здесь

значительно быстрее, чем в районе Суматры. Причины этих эффектов пока остаются неясными. Можно предположить, что они связаны, в частности, с вариациями содержания флюидов в земной коре и верхах мантии различных зон субдукции.

По данным, полученным до 01.07.2009 г., выделены четыре пары относительно крупных кольцевых структур к югу от 41° N, в том числе две в очаговой зоне будущего сильнейшего землетрясения Тохоку [4, 6]. Предполагалось, что эти структуры связаны с подготовкой сильных землетрясений, при этом непосредственно в очаговой зоне прогнозировались два события с Mw=8.4±0.1. Анализ новых данных, полученных до 11.03.2011 г., показал, что характеристики поля сейсмичности существенно изменились, и в северной части будущей очаговой зоны четко проявились кольцевые структуры со значительно более высокими величинами Mп1 и Mп2. Использование этих данных позволило существенно уточнить прогноз магнитуды и положения эпицентра сильнейшего землетрясения.

Таким образом, вместо двух ожидавшихся событий, произошло одно событие, значительно более сильное. Такой ход явлений не противоречит общим закономерностям пространственно-временной самоорганизации геологических систем. Как известно, в самоорганизующихся системах, к которым относится и Земля в целом, существует иерархия переменных, связанная с различием их масштабов [14]. Стоящие на верхних ступенях иерархии наиболее крупные переменные определяют в целом состояние системы, а переменные более низких рангов приспособляются к ним. Можно полагать, что в исследуемом случае, формирование до 01.07.2009 г. двух пар относительно больших кольцевых структур, обеспечивавших подъем флюидов, облегчило подготовку крупнейшего землетрясения (хотя бы потому, что благодаря образованию северной пары колец произошел сильный форшок с Mw=7.3).

Из рисунка 7 следует, что после землетрясения Тохоку на северной границе очаговой зоны резко ускорилось формирование новой пары кольцевых структур с достаточно высокими величинами Mп1 и Mп2. Столь сильные изменения структуры колец сейсмичности происходят, как правило, в течение нескольких лет или даже десятилетия [5, 9]. Это может свидетельствовать о подготовке нового сильного события к северу от 40° N. Полученные по формулам (1), (3) и (4) оценки магнитуды этого события, скорее всего, завышены, поскольку после землетрясения Тохоку резко изменилось поле напряжений в ближайших окрестностях его очага, и возможное сильное событие со сравнительно небольшим запаздыванием уже не будет независимым, как другие, данные для которых приведены на рисунках 9, 10. Не исключено, что ситуация здесь аналогична району Суматры, где всего через три месяца после Суматра-Андаманского землетрясения 26.12.2004 г. (Mw=9.0) произошло сильное событие с Mw=8.6 к югу от его очаговой зоны [3].

Из рисунка 6 следует, что скорость СТД в районе мелкого кольца резко выросла начиная с 2003 г., в интервале Tr1=8 лет перед землетрясением Тохоку. Аналогичные результаты были получены ранее для кольцевых структур в очаговых зонах Куньлуньского землетрясения 14.11.2001 г. (Mw=7.8 [9]), Суматра-Андаманского землетрясения 26.12.2004 г. (Mw=9.0 [9]) и землетрясения Мауле 27.02.2010 г. (Mw=8.8) в районе Чили [5] (величины Tr1 для них равнялись 4, 9 и 7 годам, соответственно). Приведенные данные свидетельствуют о том, что параметры T1 и T2, а также Tr1 могут быть использованы для целей среднесрочного прогноза времени сильных землетрясений в зонах субдукции. Вместе с тем, в связи с неравномерностью процессов формирования кольцевых структур, связанной с особенностями самоорганизации геологических систем, необходимо проводить постоянный мониторинг сейсмичности в интересующих районах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Копничев, Ю.Ф. Кольцевая сейсмичность в разных диапазонах глубин перед сильными и сильнейшими землетрясениями в зонах субдукции / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Докл. РАН, 2009. – Т. 425, № 4. – С. 539 - 542.
2. Копничев, Ю.Ф. Характеристики кольцевой сейсмичности в разных диапазонах глубин перед сильными и сильнейшими землетрясениями в районе Суматры / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Докл. РАН, 2009. – Т. 429, № 1. – С. 106 - 109.
3. Копничев, Ю.Ф. Кольцевая сейсмичность в разных диапазонах глубин перед сильными и сильнейшими землетрясениями в районе Суматры / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК, 2009. – Вып. 3. – С. 67 - 75.
4. Копничев, Ю.Ф. Характеристики кольцевой сейсмичности в разных диапазонах глубин в районе северо-восточной Японии / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК, 2009. – Вып. 3. – С. 88 - 97.
5. Копничев, Ю.Ф. Характеристики кольцевой сейсмичности в разных диапазонах глубин в регионе Южной Америки / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК, 2010. – Вып. 1. – С.100 - 110.
6. Копничев, Ю.Ф. Кольцевые структуры сейсмичности и землетрясение 11.03.2011 г. (Mw=9.0) в районе северо-восточной Японии / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Докл. РАН, 2011. – Т. 440, № 2.
7. Showstack, R. Concerns over modeling and warning capabilities in wake of Tohoku earthquake and tsunami// EOS, transactions, AGU, 2011. – V.82, N 17. – P. 143 - 144.
8. Engdahl, E. Global seismicity: 1990-1999. In: Earthquake & engineering seismology. Part A. / E. Engdahl, A. Villasenor // Academic Press. An imprint of Elsevier Science, 2002. - P. 665 - 690.

9. Копничев, Ю.Ф. О корреляции характеристик сейсмичности и поля поглощения S-волн в районах кольцевых структур, формирующихся перед сильными землетрясениями / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вулканология и сейсмология, 2010. - № 6. - С. 34 - 51.
10. Копничев, Ю.Ф. Пространственно-временные вариации поля поглощения поперечных волн в сейсмически активных и слабосейсмичных районах / Ю.Ф. Копничев, Гордиенко Д.Д., И.Н. Соколова // Вулканология и сейсмология, 2009. - № 1. - С. 49 - 64.
11. Husen, S. Postseismic fluid flow after the large subduction earthquake of Antofagasta, Chile / S. Husen, E. Kissling // Geology, 2001. - V. 29, N 9. - P. 847 - 850.
12. Каракин, А.В. Гидродинамика и структура двухфазной астеносферы / А.В. Каракин, Л.И. Лобковский // ДАН СССР, 1982. - Т. 268, № 2. - С. 324 - 329.
13. Gold, T. Fluid ascent through the solid lithosphere and its relation to earthquakes / T. Gold, S. Soter // Pure Appl. Geophys., 1984/1985. - V. 122. - P. 492 - 530.
14. Летников, Ф.А. Синергетика геологических систем. - Новосибирск: Наука, 1992. - 229 с.

СОЛТҮСТІК ЖАПОНИЯ АУДАНЫДА СЕЙСМИКАЛЫҚТЫҢ САҚИНАЛЫ ҚҰРЫЛЫМДАРЫ ЖӘНЕ 2011 Ж. 11 НАУРЫЗДАҒЫ ТОХОКУ АЛАПАТТЫ ЖЕРСІЛКІНУІ (Mw=9.0)

²⁾Копничев Ю.Ф., ¹⁾Соколова И.Н.

¹⁾ҚР ҰЯО геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан
²⁾РФА О.Ю. Шмидт атындағы Жер физикасы институты, Мәскеу, Ресей

Солтүстік Жапония ауданында 1989-2011 ж.ж. болған Mw = 7.0 - 9.0 сегіз қатты және өте қатты жерсілкінулері алдында 0 – 33 км. және 34 - 70 км. тереңдіктер ауқымдарына сейсмикалылығын талдау нәтижелері келтірілген. 2011 ж. 03.11-індегі Тохоку жерсілкінуінің (Mw=9.0) ошақ зонасындағы сейсмикалылықтың сипаттамалары түбегейлі қаралған. Барлық қатты және өте қатты жерсілкінулері алдында тереңдіктің екі ауқымында сақиналы құрылымдары қалыптасырылған. Сақиналар мөлшерлерінің, олар қалыптастырылу уақытының, сондай-ақ басты оқиғалардың қуатынан магнитудалардың табалдырық мәндерінің корреляциялық байланысы алынған. Тохоку жерсілкінуінен кейін ошақ зонаның солтүстік шекарасында сейсмикалылықтың жаңа сақиналары қалыптастырылуы шұғыл тезделген. Бұл жерде жаңа қатты жерсілкінуі дайындалу процесстері жүру болжамда, ол үшін ықтимал амплитудасы бағаланған.

RING-SHAPED SEISMICITY STRUCTURES IN THE REGION OF NORTH-EASTERN JAPAN AND CATASTROPHIC TOHOKU EARTHQUAKE OF MARCH 11, 2011 (Mw=9.0).

²⁾Yu.F. Kopnichev, ¹⁾I.N. Sokolova

¹⁾Institute of the Earth Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
²⁾Institute of Geophysical Research NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

Analysis of seismicity data for two depth ranges: 0 – 33 and 34-70 km, before eight large and great earthquakes (Mw=7.0 - 9.0) for the period from 1989 to 2011 occurred in north-eastern Japan region have been produced. The seismicity characteristics in a focal area of the Tohoku earthquake of March 11, 2011 (Mw=9.0) have been considered in the paper. Before all large and great earthquakes ring-shaped structures of seismicity formed in both depth ranges. The correlation dependence of ring dimensions, their formation time as well as magnitude threshold values from energy of main events were obtained. Formation of new rings speed up at the northern border of focal zone after the Tohoku earthquake. It is supposed that a new large earthquake is preparing in this area. Possible magnitude of such event was estimated.