

УДК 550.34

КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ В ОКРЕСТНОСТЯХ ТОКИО: ВОЗМОЖНАЯ ПОДГОТОВКА СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

¹⁾ Копничев Ю.Ф., ²⁾ Соколова И.Н.

¹⁾ *Институт физики Земли Российской Академии наук, Москва, Россия*

²⁾ *Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан*

Рассматриваются некоторые характеристики сейсмичности в окрестностях столицы Японии Токио. Установлено, что в 1976–2018 гг. здесь сформировались две пары кольцевых структур сейсмичности на глубинах 0–33 и 34–70 км. Кольцевые структуры, как и в других зонах субдукции, формируются перед сильными землетрясениями, они характеризуются пороговыми значениями магнитуд ($Mn1$ и $Mn2$, соответственно), а также длинами больших осей (L и l). Первая пара колец, расположенная к югу от Токио, частично пересекается с афтершоковой зоной Великого землетрясения Канто 1923 г. ($Mw=7,9$), а вторая находится к востоку от мегаполиса. Ранее были построены корреляционные зависимости параметров $Mn1$ и $Mn2$ от магнитуд Mw главных событий для запада Тихого океана. С использованием этих зависимостей оценены магнитуды возможных сильных землетрясений: $Mw=7,9\pm 0,1$ и $8,1\pm 0,1$ для двух указанных областей, соответственно. Предполагается, что в ближайшие годы наиболее вероятно сильное землетрясение к востоку от Токио, поскольку в последнее десятилетие в области неглубокого кольца сейсмичности резко выросла скорость сейсмоструктурной деформации.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие установлено, что перед большинством сильных и сильнейших неглубоких землетрясений ($Mw \geq 7,0$; $h < \sim 40$ км) в зонах субдукции формируются кольцевые структуры сейсмичности [1–7]. Как правило, такие структуры, имеющие форму, близкую к эллипсам, образуются в двух диапазонах глубин: 0–33 и 34–70 км. Они характеризуются пороговыми значениями магнитуд (соответственно $Mn1$ и $Mn2$), а также длинами больших осей (L и l). Длительность формирования таких структур в подавляющем большинстве случаев не превышает 45 лет, в среднем она близка к 25–30 годам [4, 6, 7]. Полученные данные могут быть использованы для определения мест и оценки магнитуд готовящихся сильных землетрясений, а также, возможно, для их среднесрочного прогноза. Примеры успешного прогноза мест и магнитуд Великого землетрясения Тохoku 11.03.2011 г. ($Mw=9,1$) в северо-восточной Японии, а также землетрясения Икике 01.04.2014 г. ($Mw=8,2$) в северном Чили приведены в [4, 6]. В настоящей статье с этой же целью рассматриваются некоторые характеристики сейсмичности в районе центральной Японии (к востоку и юго-востоку от очага Великого землетрясения Канто, в окрестностях мегаполиса Токио).

ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

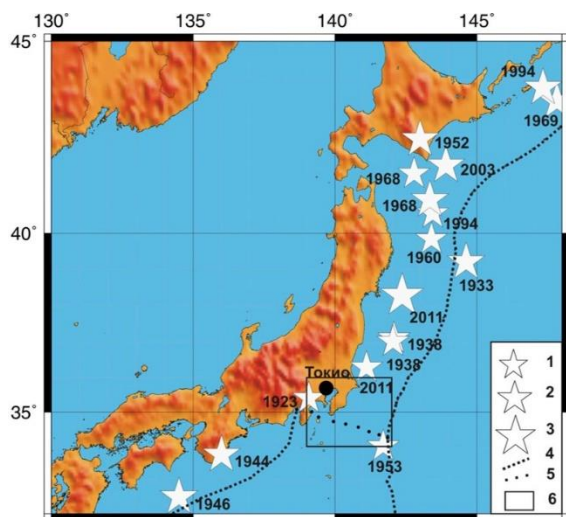
В рассматриваемом районе Тихоокеанская плита погружается под северо-восточную Японию со средней скоростью ~ 70 мм/год. К юго-западу от Японского глубоководного желоба находится желоб Нанкай, маркирующий зону субдукции плиты Филиппинского моря, которая погружается под юго-западную Японию (рисунок 1). Начиная с 1900 г. в районе Японии, между 32° и 44° N произошло 17 неглубоких ($h < 50$ км) землетрясений с $Mw \geq 7,8$ [8] (рисунок 1,

таблица). До 2011 г. наиболее сильным зарегистрированным событием здесь было землетрясение Санрику-оки 1933 г. ($Mw=8,4$), имевшее механизм типа сброса, которое произошло к востоку от Японского желоба. Интересно, что до 2011 г. все события субдукционного типа с $Mw \geq 8,0$ в районе Японии происходили к северу от 40° или к югу от 35° N, в связи с чем японские сейсмологи даже предполагали, что к востоку от о-ва Хонсю в районе между указанными широтами в принципе не могут происходить столь сильные землетрясения, связанные с погружением Тихоокеанской плиты [9]. По этой причине Великое землетрясение Тохoku 11.03.2011 г. ($Mw=9,1$) явилось для них полной неожиданностью.

Таблица. Сильные землетрясения в районе Японии

Дата	φ°	λ°	h , км	Mw
01.09.1923	35,40	139,08	35	7,9
02.03.1933	39,22	144,62	35	8,4
05.11.1938	37,01	142,04	35	7,9
05.11.1938	37,11	142,08	35	7,8
07.12.1944	33,75	136,00	15	8,1
20.12.1946	32,50	134,50	15	8,1
04.03.1952	42,50	143,00	45	8,1
25.11.1953	34,00	141,70	33	7,9
20.03.1960	39,85	143,40	35	7,8
16.05.1968	40,90	143,35	26	8,3
16.05.1968	41,60	142,79	11	7,8
11.08.1969	43,48	147,82	46	8,2
04.10.1994	43,83	147,33	33	8,3
28.12.1994	40,54	143,44	16	7,8
25.09.2003	41,82	143,91	27	8,3
11.03.2011	38,30	142,37	29	9,1
11.03.2011	36,28	141,11	43	7,9

По официальным данным в результате этого события и последовавшего за ним мощнейшего цунами погибло около 16 тыс. человек. Отметим, что последнее достаточно сильное сейсмическое событие (Великое землетрясение Канто) в близких окрестностях Токио произошло 01.09.1923 г. ($M_w=7,9$). Во время этого события в районе Токио и его окрестностях погибли или пропали без вести более 700 тысяч человек. После него прошло уже почти 100 лет, что позволяет предполагать подготовку здесь нового сильного землетрясения [10].



M_w: 1 – 7,8–8,0; 2 – 8,1–8,4; 3 – 9,1; 4 – глубоководный желоб;
5 – граница плиты Филиппинского моря (здесь и ниже);
6 – область, в которой анализировалась сейсмичность

Рисунок 1. Район исследований. Эпицентры сильных землетрясений ($M_w \geq 7,8$) с начала XX-го века

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

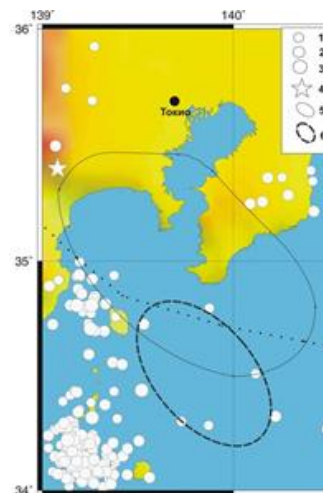
Использовались каталоги Геологической службы США USGS (за период 01.01.1973–01.10.2018 гг.). Рассматривались характеристики сейсмичности в районе, ограниченном координатами $34^\circ\text{--}36^\circ\text{N}$ и $139^\circ\text{--}142^\circ\text{E}$, в области столицы Японии г. Токио, а также к югу и востоку от нее.

Методика выделения кольцевых структур подробно описана в [6, 7]. Здесь мы только отметим, что изучались характеристики сейсмичности в двух диапазонах глубин: 0–33 и 34–70 км. В каждом диапазоне находились наибольшие пороговые значения магнитуд (соответственно M_{n1} и M_{n2}), для которых выделялись кольцевые структуры. Кроме пороговых значений магнитуд, структуры характеризуются также длинами больших осей (соответственно L и l).

АНАЛИЗ ДАННЫХ

На рисунке 2 показаны элементы неглубокой ($h=0\text{--}33$ км) сейсмичности, проявившейся в области, ограниченной координатами $34\text{--}36^\circ\text{N}$, $139,0\text{--}140,5^\circ\text{E}$. Здесь в период 1976–2000 гг. сформировалась небольшая кольцевая структура, вытянутая в запад-северо-западном направлении ($M_{n1}=4,8$;

$L \sim 80$ км) и расположенная в основном в районе Филиппинской плиты. Максимальная магнитуда ($M=6,0$) соответствует событию, произошедшему в 1986 г. Заметим, что сумма магнитуд землетрясений, произошедших в единицу времени, может служить грубой оценкой скорости сейсмотектонической деформации (СТД). Из рисунка 3 следует, что наибольшие скорости СТД в области кольца сейсмичности наблюдались в 1986–1989 гг.



1 – $M=4,8\text{--}4,9$; 2 – $M=5,0\text{--}5,9$; 3 – $M=6,0\text{--}6,9$; 4 – эпицентры сильных землетрясений ($M_w \geq 7,8$); 5 – афтершоковая зона Великого землетрясения Канто; 6 – неглубокая кольцевая структура (здесь и ниже).
Другие обозначения – на рисунке 1

Рисунок 2. Элементы неглубокой сейсмичности в первой области

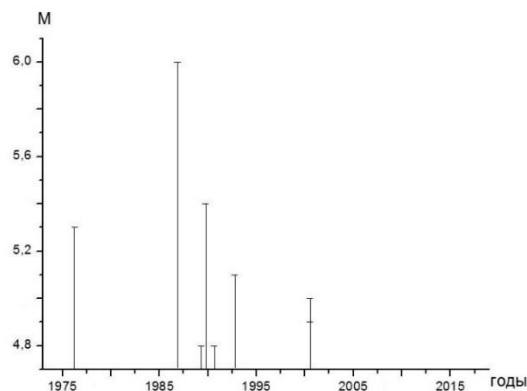
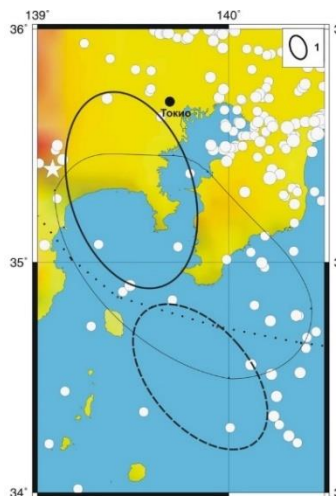


Рисунок 3. Зависимость магнитуд землетрясений от времени в области кольцевой структуры

Рисунок 4 иллюстрирует характеристики относительно глубоководной сейсмичности ($h=34\text{--}70$ км) в рассматриваемой области. В данном случае к северу от неглубокой проявилась более крупная кольцевая структура ($M_{n2}=4,6$; $l \sim 100$ км), вытянутая в субмеридиональном направлении. Структура сформировалась в 1976–2016 гг., наибольшая магнитуда ($M=5,4$) соответствует землетрясению 1982 г. (рисунок 5). Кольца сейсмичности почти касаются друг друга на границе Филиппинской плиты. Следует за-

**КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ В ОКРЕСТНОСТЯХ ТОКИО:
ВОЗМОЖНАЯ ПОДГОТОВКА СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ**

метить, что глубокая кольцевая структура в значительной степени пересекается с афтершоковой зоной Великого землетрясения Канто 01.09.1923 г.



○ – $M=4,7-4,9$. 1 – глубокая кольцевая структура (здесь и ниже).
Другие обозначения – на рисунке 2

Рисунок 4. Элементы глубокой сейсмичности в первой области

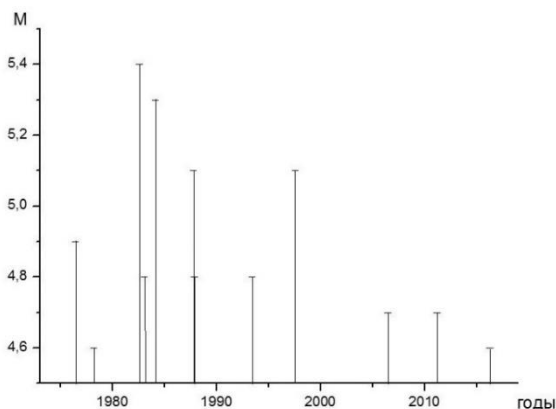
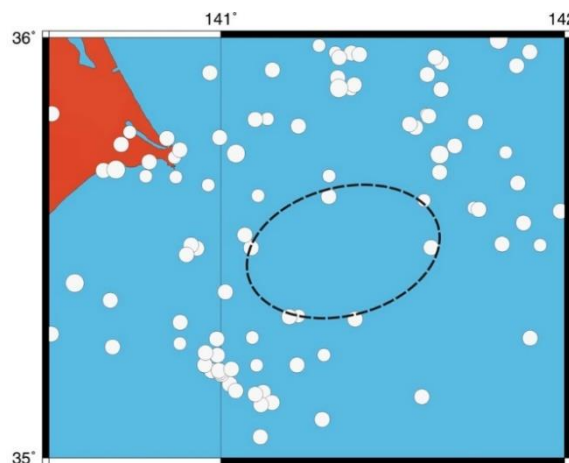


Рисунок 5. Зависимость магнитуд землетрясений от времени в области кольцевой структуры

На рисунке 6 показаны элементы неглубокой сейсмичности в области, расположенной к востоку от Токио и ограниченной координатами 35–36° N, 140,5–142,0° E. Здесь четко проявилось небольшое кольцо сейсмичности ($Mn1=4,9$; $L\sim 50$ км), вытянутое в субширотном направлении. Структура образовалась в 1988–2018 гг., наиболее сильное событие произошло в 1988 г. ($M=5,7$). Из рисунка 7 следует, что зависимость $M(T)$ в данном случае имеет U-образную форму, при этом скорости СТД в области структуры резко выросли в 2011–2018 гг.

Рисунок 8 иллюстрирует характеристики сейсмичности на глубинах 34 - 70 км. На рисунке выделяется малая ($Mn2=4,8$; $l\sim 25$ км) кольцевая структура, ориентированная в меридиональном направлении. Структура сформировалась в 1977–2018 гг., наибольшая магнитуда соответствует землетрясению 1996 г. ($M=6,2$, см. рисунок 9). Мелкое и глубокое кольца

сейсмичности пересекаются в области между 141,1 и 141,2° E. Отметим, что кольцевые структуры находятся поблизости от южной окраины очаговой зоны Великого землетрясения Тохоку 11.03.2011 г.



○ – $M=4,9$. Другие обозначения – на рисунке 2

Рисунок 6. Элементы неглубокой сейсмичности во второй области

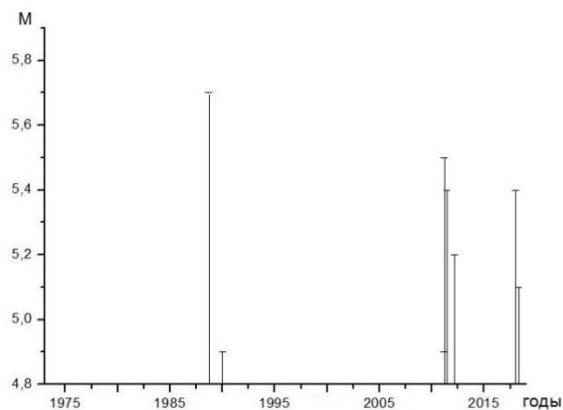
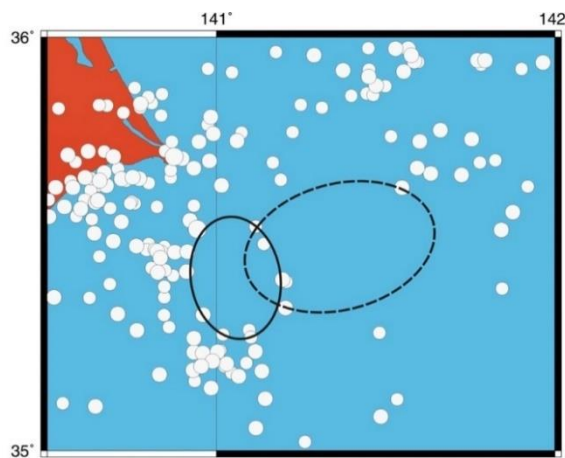


Рисунок 7. Зависимость магнитуд землетрясений от времени в области кольцевой структуры



○ – $M=4,8-4,9$. Другие обозначения – на рисунках 2, 4

Рисунок 8. Элементы глубокой сейсмичности во второй области

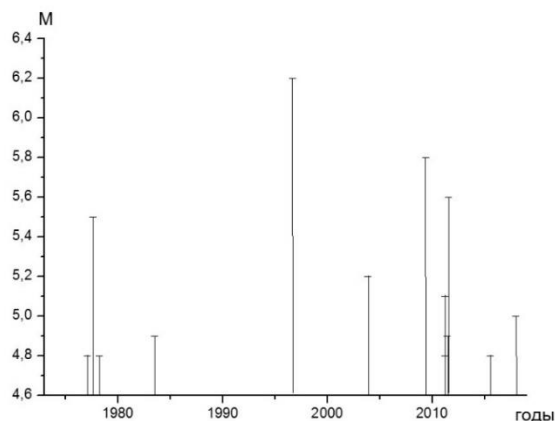


Рисунок 9. Зависимость магнитуд землетрясений от времени в области кольцевой структуры

Оценка магнитуд сильных землетрясений по параметрам кольцевых структур. Для этих целей использованы корреляционные зависимости пороговых значений магнитуд от энергии главных событий, полученные в [7] для зон субдукции на западе Тихого океана:

$$Mn1 = -1,88 + 0,85 M_w, r = 0,89, \quad (1)$$

$$Mn2 = -0,95 + 0,70 M_w, r = 0,94, \quad (2)$$

где r – коэффициент корреляции.

Отметим, что указанные выражения достаточно близки к аналогичным зависимостям, полученным для востока Тихого океана [7]. Из формул (1) и (2) с учетом полученных выше величин $Mn1$ и $Mn2$ следует, что первая пара колец сейсмичности может соответствовать подготовке землетрясения с $M_w = 7,9 \pm 0,1$. Для второй пары колец, проявившейся к 2018 г., по указанным формулам прогнозируется несколько большая магнитуда возможного события: $M_w = 8,1 \pm 0,1$.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные данные свидетельствуют о том, что в окрестностях Токио, на расстояниях примерно до 150 км от мегаполиса, начиная с 1976 г. формируются две пары кольцевых структур сейсмичности в двух диапазонах глубин. В [1–7] показано, что такие структуры обычно проявляются в различных зонах субдукции перед сильными и сильнейшими землетрясениями. При этом эпицентры большинства таких событий находятся вблизи областей пересечения или наибольшего сближения мелких и глубоких кольце-

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. 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.
4. Копничев, Ю.Ф. Кольцевые структуры сейсмичности и землетрясение 11.03.2011 г. ($M_w = 9,0$) в районе северо-восточной Японии / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Докл. РАН. – 2011. – Т. 440, № 2. – С. 246–249.

вых структур. Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что мелкие кольца оконтуривают жесткие блоки литосферы, а глубокие – относительно маловязкие блоки [3, 5]. На границах обоих типов блоков происходит подъем глубинных флюидов, о чем свидетельствует достаточно высокая сейсмичность по отношению к внутренним частям блоков (как показано в [11–18], подъем флюидов в литосфере сейсмоактивных районов происходит, в первую очередь, в результате землетрясений). В областях пересечения или наибольшего сближения мелких и глубоких колец сейсмичности достигается наибольшая мощность двухфазного слоя с присутствием заметной доли флюидов. В случае, если флюиды формируют связную сеть, на кровле такого слоя наблюдается концентрация напряжений, причем уровень избыточных напряжений пропорционален мощности слоя [19, 20]. Концентрация напряжений и может приводить к подвигке при сильном землетрясении. Следует заметить, что формирование кольцевых структур служит отражением процессов самоорганизации геологических систем, в конечном счете приводящих к уменьшению потенциальной энергии Земли [21].

Полученные данные позволяют предполагать, что к югу и востоку от мегаполиса Токио могут готовиться сильные сейсмические события. Вместе с тем, как показано в [3–7, 18], во многих случаях наблюдается резкий рост скорости STD в областях мелких кольцевых структур в течение ~10–15 лет до сильных землетрясений, которым они соответствуют. Учитывая это обстоятельство, можно предполагать, что в ближайшие годы наиболее вероятно сильное сейсмическое событие с $M_w \sim 8$ к востоку от Токио, где сформировалась вторая пара колец сейсмичности. Об этом же может свидетельствовать и отсутствие в этой области достаточно сильных землетрясений в течение, по-видимому, нескольких сотен лет [10] (в отличие от первой области, где произошло Великое землетрясение Канто 1923 г.).

По аналогии с данными по многим событиям в зонах субдукции можно ожидать, что эпицентр такого землетрясения будет располагаться вблизи одной из областей пересечения мелкого и глубокого колец. В этих областях целесообразно проводить мониторинг различных геофизических и геохимических полей с целью среднесрочного прогноза возможного сильного сейсмического события.

5. Копничев, Ю.Ф. Неоднородности поля поглощения короткопериодных S-волн в районе очага землетрясения Мауле (Чили, 27.02.2010, $M_w=8.8$) и их связь с сейсмичностью и вулканизмом / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Геофизические исследования. – 2011. – Т. 12, № 3. – С. 22–33.
6. Копничев, Ю.Ф. Кольцевые структуры сейсмичности в районе северного Чили и успешный прогноз места и магнитуды землетрясения Икике 01.04.2014 г. ($M_w=8.2$) / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК. – 2015. – Вып. 4. – С. 153–159.
7. Копничев, Ю.Ф. Кольцевые структуры сейсмичности, формирующиеся перед сильными и сильнейшими землетрясениями на западе и востоке Тихого океана / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Геофизические процессы и биосфера. – 2018. – Т. 17, № 1. – С. 109–124.
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. Goldfinger, C. Superquakes and supercycles / C. Goldfinger, Ya. Ikeda, R. Yeats, J. Ren // Seismol. Res. Lett. – 2013. – V. 84, N 1. – P. 24–32.
10. Rikitake, T. Assessment of earthquake hazard in the Tokyo area, Japan / T. Rikitake // Tectonophysics. – 1991. – V.199, N 1. – P. 121–131.
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. Копничев, Ю.Ф. Пространственно-временные вариации поля поглощения S-волн в очаговых зонах сильных землетрясений Тянь-Шаня / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Физика Земли. – 2003. – № 5. – С. 73–86.
13. Копничев, Ю.Ф. Подъем мантийных флюидов в районах очагов сильных землетрясений и крупных разломных зон: геохимические свидетельства / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК. – 2005. – Вып. 2. – С. 147–155.
14. Копничев, Ю.Ф. Пространственно-временные вариации поля поглощения короткопериодных S-волн в районе Гиндукуша и их связь с сейсмичностью / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вулканология и сейсмология. – 2018. – № 6. – С. 70–79.
15. Yamazaki, T. Double seismic zone and dehydration embrittlement of the subducting slab / T.Yamazaki, T.Seno // J. Geophys. Res. – 2003. – V. 108. – N B4. doi: 10/1029/2002JB001918.
16. Ogawa, R. Slow postseismic recovery of geoid depression formed by the 2004 Sumatra-Andaman earthquake by mantle water diffusion / R. Ogawa, K. Heki // Geophys. Res. Lett. – 2007. – V. 34. – L06313. doi: 10.1029/2007GL029340.
17. Копничев, Ю.Ф. Пространственно-временные вариации поля поглощения поперечных волн в сейсмически активных и слабосейсмичных районах / Ю.Ф. Копничев, Д.Д.Гордиенко, И.Н. Соколова // Вулканология и сейсмология. – 2009. – № 1. – С. 49–64.
18. Копничев, Ю.Ф. Кольцевые структуры сейсмичности в районе Южной Калифорнии: возможная подготовка сильного землетрясения в окрестностях г. Лос-Анджелес / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Геофизические процессы и биосфера. – 2017. – Т. 16, № 1. – С. 42–54. – DOI 10.21455/GRB2017.1-3.
19. Каракин, А.В. Гидродинамика и структура двухфазной астеносферы / А.В.Каракин, Л.И. Лобковский // ДАН СССР. – 1982. – Т. 268, № 2. – С. 324–329.
20. 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.
21. Летников, Ф.А. Синергетика геологических систем / Ф.А. Летников. - Новосибирск: Наука. – 1992. – 229 с.

ТОКИО МАҢАЙЫНДАҒЫ СЕЙСМИКАЛЫҚТЫҢ ШЕҢБЕРЛІ ҚҰРЫЛЫМДАРЫ: ҚАТТЫ ЖЕРСІЛКІНУГЕ ЫҚТИМАЛ ДАЙЫНДЫҚ

¹⁾ Ю.Ф. Копничев, ²⁾ И.Н. Соколова

¹⁾ *Ресей Ғылыми академиясының жер физикасы институты, Мәскеу, Ресей*

²⁾ *Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан*

Жапония астанасы Токио маңайындағы сейсмикалықтың кейбір сипаттамалары қарастырылады. 1976–2018 жж. мұнда 0–33 және 34–70 км тереңдіктерде сейсмикалықтың екі шеңберлі құрылымдары қалыптасқандығы белгілі болды. Шеңберлі құрылымдар субдукцияның басқа аймақтарындағыдай қатты жерсілкінулер алдында қалыптасады, олар магнитуданың төменгі шектік мәндерімен ($Mn1$ және $Mn2$, тиісті), сондай-ақ үлкен өс ұзындықтарымен (L және l) сипатталады. Токиодан оңтүстікке қарай орналасқан шеңбердің бірінші данасы жартылай 1923 ж. Канто Ұлы жерсілкінуінің ($M_w=7,9$) кейінгі дүмпу аймағымен қиылысады, ал екіншісі мегаполистен шығысқа қарай орналасқан. Бұрын Тынық мұхиттың батысы үшін бас оқиғалардың магнитудаларынан $M_w Mn1$ және $Mn2$ параметрлерінің корреляциялық тәуелділіктері құрылған болатын. Осы тәуелділіктерді пайдалана отырып, болуы мүмкін қатты жерсілкінулердің магнитудалары бағаланды: $M_w=7,9\pm 0,1$ және $8,1\pm 0,1$ екі аймаққа тиісті көрсетілген. Таяудағы жылдары Токиодан шығысқа қарай қатты жерсілкіну болуы мүмкін деп болжау жасалады, себебі соңғы онжылдықта сейсмикалықтың терең емес шеңбері аймағында сейсмостектоникалық деформацияның жылдамдығы тез өсуде.

**RING-SHAPED SEISMICITY STRUCTURES IN VICINITY OF TOKYO:
POSSIBLE PREPARATION FOR GREAT EARTHQUAKE**

¹⁾ Yu.F. Kopnichev, ²⁾ I.N. Sokolova

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

²⁾ *Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan*

We have been studying some seismicity characteristics in the vicinity of Japanese capital, Tokyo. It was established that two pairs of ring-shaped seismicity structures at depths of 0–33 and 34–70 km have been formed here in 1976–2018. Ring-shaped structures, as in the other subduction zones form prior to large and great earthquakes. They are characterized by threshold magnitude values ($Mt1$ and $Mt2$ correspondingly) as well as big axes lengths (L and l). The first ring pair, located mainly to the south of Tokyo, intersects partly with the rupture zone of the Great Kanto earthquake of 1923 ($M_w 7,9$), and the second one is to the east of the city. Earlier we have found correlation dependences of parameters $Mt1$ and $Mt2$ on magnitudes M_w of the main events for the west of the Pacific. Using these dependences we estimated magnitudes of possible great earthquakes: $M_w 7,9 \pm 0,1$ and $8,1 \pm 0,1$ for the two areas mentioned correspondingly. It is supposed that in the near years the great earthquake is most probable to the east of Tokyo, because a rate of seismo-tectonic deformation has increased sharply in the area of the ring structure during the last decade.