

УДК 550.34

## КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ, ФОРМИРУЮЩИЕСЯ В КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ РАЙОНАХ ПЕРЕД СИЛЬНЫМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ С РАЗЛИЧНЫМИ МЕХАНИЗМАМИ ОЧАГОВ

© 2013 г. Ю.Ф. Копничев<sup>1</sup>, И.Н. Соколова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

<sup>2</sup> *Институт геофизических исследований Национального ядерного центра Республики Казахстан, г. Алма-Ата, Казахстан*

Рассматриваются характеристики сейсмичности перед 54 неглубокими сильными и сильнейшими землетрясениями с разными механизмами очагов, произошедшими во внутриконтинентальных районах. Установлено, что перед сильными межплитными землетрясениями в интервале глубин 0–33 км формируются кольцевые структуры сейсмичности; перед сильными внутриплитными событиями подобные структуры не выявлены. Показано, что размеры кольцевых структур ( $L$ ) и пороговые значения магнитуд для них ( $M_n$ ) существенно зависят от типа подвижки в очаге; получены корреляционные зависимости этих параметров от магнитуды главных событий. Предполагается, что природа кольцевых структур связана с миграцией глубинных флюидов.

**Ключевые слова:** кольцевые структуры сейсмичности, механизм очага, глубинные флюиды.

### Введение

В последние годы установлено, что перед многими сильными землетрясениями в течение нескольких десятилетий формируются кольцевые структуры (кольца) сейсмичности, оконтуривающие области относительного сейсмического затишья [Копничев, Соколова, 2009а,б, 2010а,б, 2011а, 2012а,б]. Эти структуры образованы эпицентрами событий с магнитудами  $M \geq M_n$ , где  $M_n$  – пороговые значения, которые растут с увеличением энергии главных толчков. Для нескольких зон субдукции получены корреляционные зависимости  $L(M_w)$  и  $M_n(M_w)$ , где  $L$  – длина больших осей колец сейсмичности,  $M_w$  – магнитуды соответствующих им сильных событий [Копничев, Соколова, 2009, 2010, 2011а, 2012а,б]. Использование этих зависимостей позволяет по характеристикам кольцевых структур прогнозировать места и энергию готовящихся сильных землетрясений [Копничев, Соколова, 2011а, 2012а,б]. Для уточнения прогнозов необходимо исследование связи параметров кольцевых структур с типами земной коры – континентальной и океанической; средней скоростью ее деформации, различной для межплитных и внутриплитных событий [Gangopadhyay, Talwani, 2003]. Важно также проследить их связь с механизмами очагов главных событий, поскольку хорошо известно, что при прочих равных условиях размеры очаговых зон существенно различны для подвижек разного типа [Копничев, 1985]. Решению этих задач и посвящена настоящая работа.

### Методика исследований и сейсмические данные

Было проанализировано 54 сильных и сильнейших землетрясений с  $M_w=6.0-8.6$ , произошедших в разные годы в ряде районов земного шара с корой континентального типа, восемь из которых были внутриплитными, остальные – межплитными. По типам механизмов все события были разделены на три группы – сбросы (сбросы и сбросос-

двиги); сдвиги; взбросы (взбрососдвиги и сдвигонадвиги). Характеристики землетрясений (главных событий) – дата, координаты ( $\varphi^\circ$ ,  $\lambda^\circ$ ) и глубина ( $h$ , км) очага, магнитуда ( $M_w$ ), механизм подвижки – приведены в таблице на с. 8. Там же представлены параметры сформировавшихся перед ними кольцевых структур – длина большой оси ( $L$ , км), пороговое значение магнитуды ( $M_n$ ), продолжительность формирования структуры ( $T_n$ ). Звездочкой в таблице отмечены внутриплитные землетрясения; серой заливкой выделены события, для которых на рис. 1, 2 приводятся характеристики сейсмичности в графическом виде.

Предшествующие главным событиям землетрясения с  $M \geq M_n$  и очагами на глубине 0–33 км, зарегистрированные в течение 50 лет, отбирались для анализа из каталогов *USGS*, *ISC* и каталогов, полученных в разных районах бывшего СССР. Для анализа использовались лишь те события, очаги которых находились достаточно далеко от активных окраин континентов, в связи с чем не рассматривались сильные землетрясения, произошедшие в Калифорнии, на Аляске и в некоторых других районах.

### Анализ данных

Межплитные землетрясения происходят на границах литосферных плит, в районах, характеризующихся относительно высокими скоростями деформации земной коры [*Gangopadhyay, Talwani, 2003*]. Характеристики сейсмичности перед пятью такими событиями, произошедшими в разные годы, приведены на рис. 1. Для удобства визуального сопоставления сформировавшихся кольцевых структур все пять фрагментов построены в едином масштабе.

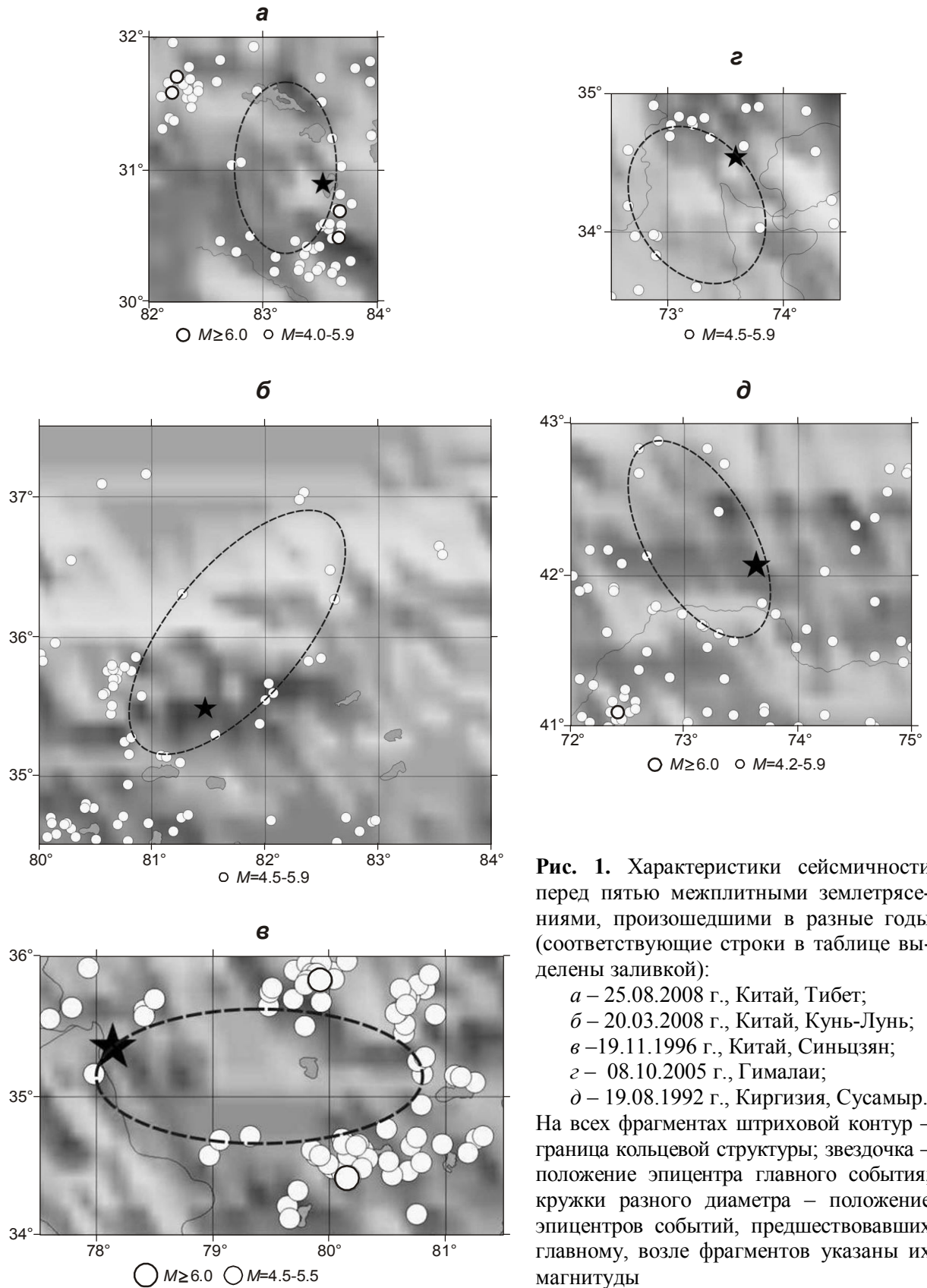
За 25 лет перед землетрясением 25.08.2008 г. ( $M_w=6.7$ , механизм – сброс) в Китае (Тибет) на глубинах 0–33 км образовалась вытянутая в субмеридиональном направлении кольцевая структура ( $M_n=4.5$ ) с длиной большой  $L=140$  км (рис. 1, *a*). Максимальная магнитуда событий в районе кольца сейсмичности  $M_{\max}=6.2$ . Эпицентр главного землетрясения находился на расстоянии около 10 км от восточной границы кольца.

На рис. 1, *б* представлены характеристики сейсмичности перед землетрясением 20.03.2008 г. в Китае в районе Кунь-Луны ( $M_w=7.2$ , механизм – сбрососдвиг). Здесь события с  $M=4.5$ –5.9 сформировали за 34 года кольцевую структуру ( $M_n=4.5$ ), вытянутую в северо-восточном направлении; длина большой оси составляет 240 км. Эпицентр главного землетрясения располагался на расстоянии около 25 км от юго-восточного края кольца; максимальная магнитуда событий в районе кольца  $M_{\max}=5.5$ .

На территории Западного Тибета перед землетрясением 19.11.1996 г. ( $M_w=6.9$ , механизм – почти чистый сдвиг) за 21 год событиями с  $M=4.5$ –5.5 было сформировано вытянутое в субширотном направлении кольцо с большой осью 260 км (рис. 1, *в*). Эпицентр главного землетрясения находился практически на границе кольцевой структуры.

Сильнейшее землетрясение с  $M_w=7.6$  произошло 08.10.2005 г. в Гималаях в районе Кашмира (механизм – сдвигонадвиг). За 28 лет, предшествующих этому землетрясению, образовалась кольцевая структура сейсмичности ( $M_n=4.2$ ), ориентированная в северо-западном направлении с большой осью около 130 км (рис. 1, *г*). Максимальная магнитуда событий в районе кольца составила 5.2. Эпицентр главного события располагался вблизи северо-восточной границы кольцевой структуры.

За 21 год перед произошедшим 19.08.1992 г. в Киргизии Сусамырским землетрясением ( $M_w=7.2$ , механизм – взброс) в районе Центрального Тянь-Шаня (рис. 1, *д*) сформировалось вытянутое в север–северо-западном направлении кольцо сейсмичности ( $M_n=4.2$ ) с большой осью длиной 160 км; максимальная магнитуда событий –  $M_{\max}=4.7$ . Эпицентр главного события находился на расстоянии около 10 км от восточной границы кольцевой структуры.



**Характеристики сильных землетрясений, произошедших в континентальных районах,  
и сформировавшихся перед ними кольцевых структур**  
(звездочкой отмечены внутриплитные землетрясения; серой заливкой – события,  
подробно описываемые в тексте)

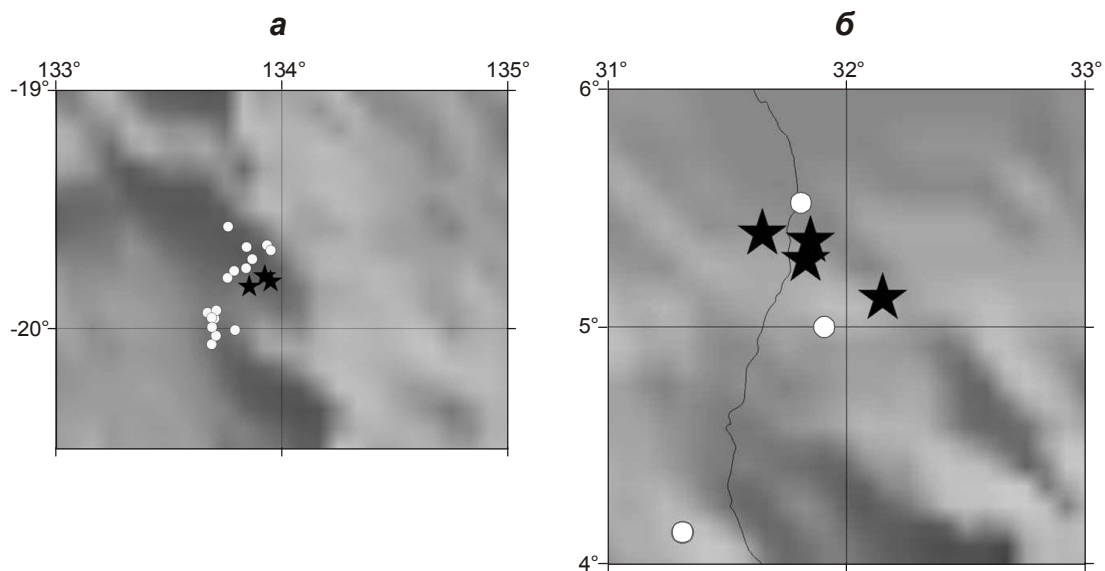
Землетрясения						Кольца сейсмичности			Район
Дата	$\varphi^\circ$	$\lambda^\circ$	$h$ , км	$M_w$	Механизм	$L$ , км	$M_p$	$T_p$ , годы	
15.08.1950 г.	28.70	96.60	30	8.6	сдвигонадвиг	820	6.0	27	Ассам, Индия
16.12.1954 г.	39.30	-118.10	16	7.1	сбрососдвиг	210	5.5	22	Невада, США
18.08.1959 г.	44.70	-110.80	10	7.5	сброс	440	4.0	25	Вайоминг, США
08.04.1976 г.*	40.31	63.77	33	6.6	взброс	–	$\geq 4.0$	–	Газли, Узбекистан
28.10.1983 г.	44.06	-113.86	10	7.0	сброс	340	4.0	20	Айдахо, США
22.12.1983 г.*	11.87	-13.53	11	6.3	сбрососдвиг	–	$\geq 3.0$	–	Гвинея
23.08.1985 г.	39.44	75.24	6	7.0	взбрососдвиг	110	4.0	16	Синьцзян, Китай
22.01.1988 г.*	-19.83	133.88	5	6.6	взбрососдвиг	–	$\geq 3.0$	–	Центр. Австралия
25.12.1989 г.*	60.08	-73.45	5	6.3	взброс	–	$\geq 3.0$	–	Канада
05.03.1990 г.	37.04	72.85	18	6.1	сброс	170	3.8	17	Афганистан
20.05.1990 г.*	5.11	32.18	7	7.2	сбрососдвиг	–	$\geq 3.0$	–	Судан
20.06.1990 г.	37.01	49.21	18	7.4	сдвиг	420	4.4	17	Иран
29.04.1991 г.	42.43	43.67	7	7.0	взброс	150	4.0	23	Грузия
19.10.1991 г.	30.78	78.77	10	6.8	взброс	150	4.5	24	Индия
19.08.1992 г.	42.11	73.61	13	7.2	взброс	160	4.2	21	Киргизия
29.09.1993 г.*	18.07	76.45	6	6.3	взброс	–	$\geq 3.0$	–	Индия
27.05.1995 г.	52.60	142.82	11	7.1	взбрососдвиг	240	4.0	22	Сахалин, Россия
19.11.1996 г.	35.35	78.13	33	6.9	сдвиг	260	4.5	21	Синьцзян, Китай
04.02.1997 г.	37.66	57.29	10	6.5	сдвиг	140	4.5	27	Туркмения
27.02.1997 г.	29.94	68.19	24	7.1	взбрососдвиг	85	4.2	24	Пакистан
10.05.1997 г.	33.83	59.80	12	7.2	сдвиг	260	4.1	19	Иран
08.11.1997 г.	35.11	87.37	24	7.5	сдвиг	480	5.0	24	Тибет, Китай
30.05.1998 г.	37.11	70.11	33	6.6	сдвиг	110	4.5	20	Таджикистан
28.03.1999 г.	30.51	79.40	15	6.6	взбрососдвиг	60	4.0	22	Индия
17.08.1999 г.	40.75	29.94	17	7.6	сдвиг	280	4.5	24	Турция
25.11.2000 г.	40.25	49.95	26	6.5	сброс	120	3.6	17	Азербайджан
06.12.2000 г.	39.57	54.80	30	7.0	взбрососдвиг	75	4.2	23	Туркмения
26.01.2001 г.*	23.42	70.23	16	7.6	взбрососдвиг	–	$\geq 3.8$	–	Индия
14.11.2001 г.	35.95	90.54	10	7.8	сдвиг	700	5.5	28	Тибет, Китай
24.10.2002 г.	-1.88	29.00	11	6.2	сброс	160	4.2	25	Руанда
20.11.2002 г.	35.41	74.52	33	6.3	сбрососдвиг	120	3.7	22	Индия
27.01.2003 г.	39.50	39.88	10	6.1	сдвиг	60	3.8	25	Турция
01.05.2003 г.	39.01	40.64	10	6.3	сдвиг	120	4.0	28	Турция
21.09.2003 г.	19.92	95.67	10	6.6	сдвиг	150	3.8	28	Мьянма
27.09.2003 г.	50.04	87.81	16	7.3	сдвиг	220	4.1	21	Алтай, Россия
22.02.2005 г.	30.75	56.82	14	6.4	взброс	90	4.0	28	Иран
07.04.2005 г.	30.49	83.16	11	6.3	сбрососдвиг	120	4.0	20	Тибет, Китай
08.10.2005 г.	34.54	73.59	26	7.6	сдвигонадвиг	130	4.0	28	Гималаи
05.12.2005 г.	-6.22	29.83	22	6.8	сбрососдвиг	150	4.0	32	Танзания
22.02.2006 г.	-21.32	33.58	11	7.0	сбрососдвиг	200	4.3	33	Мозамбик
02.08.2007 г.	47.12	141.80	5	6.2	взброс	65	4.0	20	Сахалин, Россия
09.01.2008 г.	32.30	85.32	13	6.4	сбрососдвиг	130	3.6	34	Синьцзян, Китай
20.03.2008 г.	35.49	81.47	10	7.2	сбрососдвиг	240	4.5	34	Кунь-Лунь, Китай
12.05.2008 г.	31.00	103.32	19	7.9	взбрососдвиг	370	5.0	33	Сычуань, Китай
25.08.2008 г.	30.90	83.52	12	6.7	сброс	140	4.5	25	Тибет, Китай
27.08.2008 г.	51.61	104.16	16	6.1	сбрососдвиг	190	3.4	17	Прибайкалье, Россия
05.10.2008 г.	39.53	73.82	27	6.7	взбрососдвиг	55	4.0	32	Киргизия
08.03.2010 г.	38.86	39.99	12	6.1	сдвиг	85	3.7	35	Турция
13.04.2010 г.	33.17	96.55	17	6.9	сдвиг	180	3.7	33	Цинхай, Китай
20.12.2010 г.	28.41	59.18	12	6.5	сдвиг	130	4.0	20	Иран
24.03.2011 г.	20.69	99.82	8	6.8	сдвиг	190	4.0	30	Мьянма
18.09.2011 г.	27.72	88.06	20	6.9	сдвиг	160	3.7	31	Сикким, Индия
14.10.2011 г.*	54.08	123.72	15	6.1	сдвиг	–	$\geq 3.5$	–	Приамурье, Россия
23.10.2011 г.	38.63	43.49	20	7.2	взбрососдвиг	95	3.7	14	Турция

Кольца сейсмичности были выделены и для других отобранных для анализа межплитных землетрясений (характеристики землетрясений и колец см. в таблице). Отметим, что в подавляющем большинстве случаев максимальные значения магнитуд событий ( $M_{\max}$ ), формирующих кольцевые структуры, значительно ниже магнитуд соответствующих главных землетрясений, эпицентры которых обычно находятся вблизи границ кольцевых структур.

Рассмотрим землетрясения, происходящие внутри литосферных плит, характеризующихся очень низкими скоростями деформации [Gangopadhyay, Talwani, 2003]. Примером таких внутриплитных событий могут служить три землетрясения, произошедшие 22.01.1988 г. в слабосейсмичном районе Центральной Австралии ( $M_w=6.3-6.6$ , механизмы – взбросы), и четыре сильных землетрясения в Судане, которые произошли в течение двух месяцев, начиная с 20.05.1990 г. ( $M_w=6.5-7.2$ , механизмы – сбрососдвиги).

Перед роem землетрясений в Австралии в период с 01.01.1964 г. по 21.01.1988 г. был зарегистрирован ряд событий с  $M=3.5-5.2$ , эпицентры большей части которых сгруппированы в узкой полосе длиной  $\sim 50$  км (рис. 2, а). Сколько-нибудь заметной кольцевой структуры в данном регионе за названные 24 года сформировано не было.

Перед событиями в Судане на протяжении 26 лет – с 01.01.1964 по 19.05.1990 гг. – имели место всего три землетрясения с магнитудами более 3.0 ( $M=4.1-5.1$ ) (рис. 2, б), в связи с чем и в этом районе кольцо сейсмичности сформироваться не могло.



**Рис. 2.** Характеристики сейсмичности перед внутриплитными землетрясениями, произошедшими в Центральной Австралии 22.01.1988 г. с  $M_w=6.3-6.6$  (а) и в Судане в 1990 г. (б). Звездочки – эпицентры названных землетрясений; кружки – эпицентры событий, зарегистрированных перед ними с  $M \geq 3.5$  (а) и  $M \geq 3.0$  (б)

Сходные результаты были получены и при анализе остальных рассмотренных нами внутриплитных землетрясений (см. таблицу). Таким образом, можно утверждать, что перед сильными внутриплитными землетрясениями, в отличие от межплитных, кольцевые структуры сейсмичности не формируются.

#### *Зависимость параметров кольцевых структур от механизмов главных событий*

Графики зависимости размеров кольцевых структур от магнитуды для трех разных типов подвижек в очагах главных событий показаны на рис. 3. Все три графика

зависимости  $\lg L(M_w)$  имеют линейный характер; уравнения линейной регрессии описываются формулами:

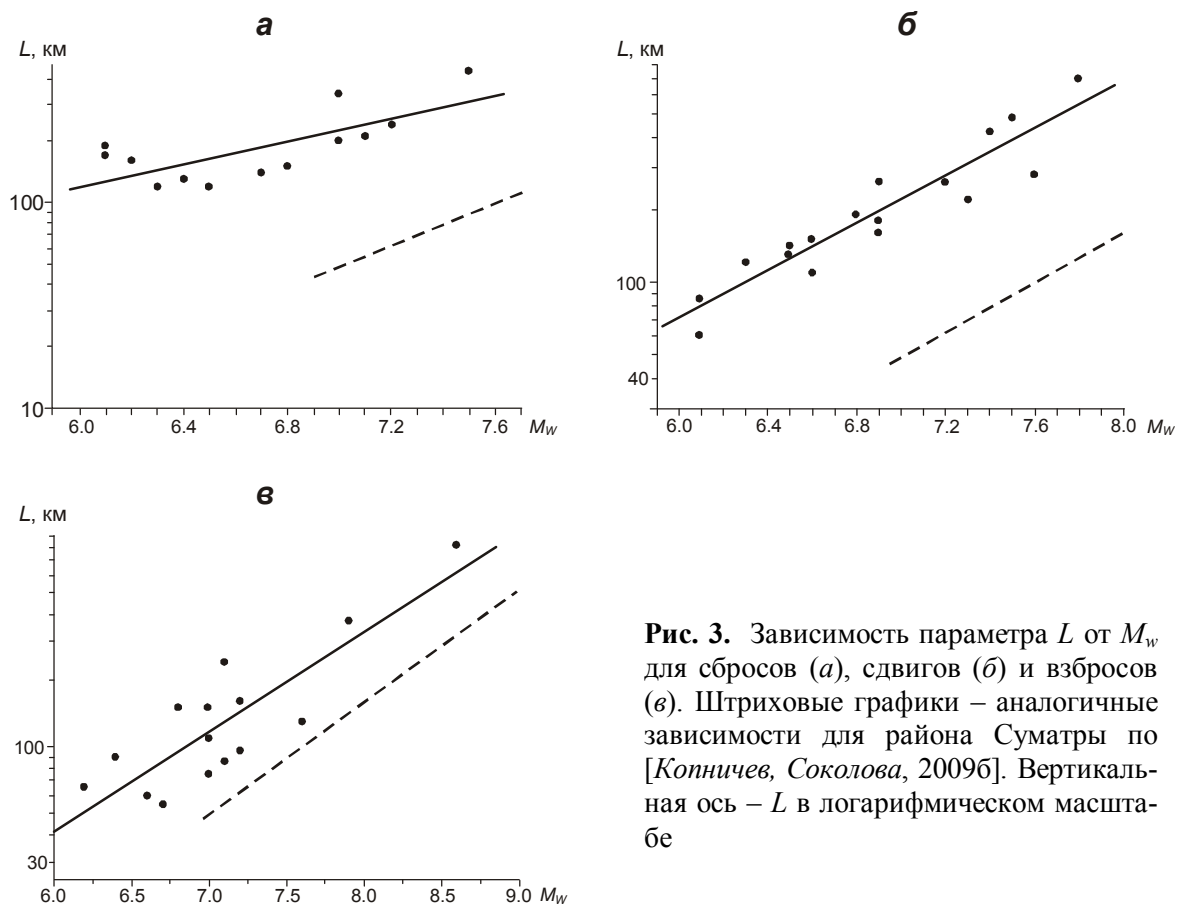
$$\text{для сбросов} \quad -\lg L = 0.40 + 0.28 M_w, \quad r=0.73; \quad (1)$$

$$\text{для сдвигов} \quad -\lg L = -1.12 + 0.49 M_w, \quad r=0.94; \quad (2)$$

$$\text{для взбросов} \quad -\lg L = -1.11 + 0.45 M_w; \quad r=0.85, \quad (3)$$

где  $r$  – коэффициент корреляции.

Можно видеть, что средние размеры колец сейсмичности существенно различны для трех рассматриваемых групп событий. Для одних и тех же величин  $M_w$  параметры  $L$  для взбросов (рис. 3, в) значительно (в диапазоне  $M_w=6.0-7.0$  – в 1.5–3 раза) ниже, чем для сдвигов (рис. 3, б) и сбросов (рис. 3, а). При  $M_w \sim 6.0$  размеры колец максимальны для сбросов, однако они растут с магнитудой медленнее, чем для других типов подвижек, поэтому при  $M_w > 7.0$  становятся меньше, чем для сдвигов. Сопоставляя приведенные зависимости с аналогичными для района Суматры, где преобладают типичные для зон субдукции надвиговые механизмы, можно видеть, что для всех рассматриваемых в данной статье механизмов величины  $L$  значительно выше – в диапазоне магнитуд  $M_w=7.0-8.0$  различия достигают 2.5–4 раз (см. рис. 3).



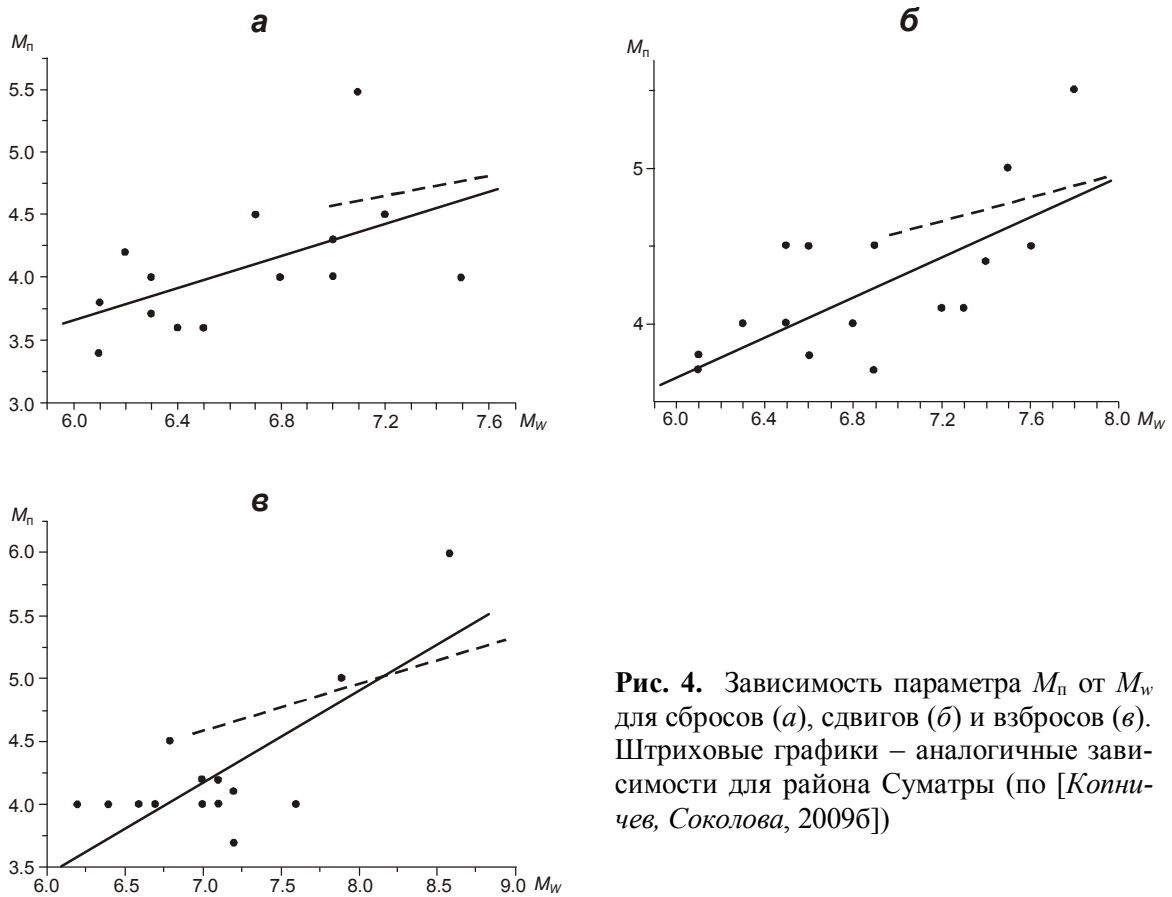
**Рис. 3.** Зависимость параметра  $L$  от  $M_w$  для сбросов (а), сдвигов (б) и взбросов (в). Штриховые графики – аналогичные зависимости для района Суматры по [Копничев, Соколова, 2009б]. Вертикальная ось –  $L$  в логарифмическом масштабе

Графики зависимости пороговых значений магнитуд от величин  $M_w$  для сбросов, сдвигов и взбросов приведены на рис. 4. Значения параметра  $M_n$  растут с увеличением магнитуды  $M_w$  основного события; корреляционные зависимости описываются следующими формулами:

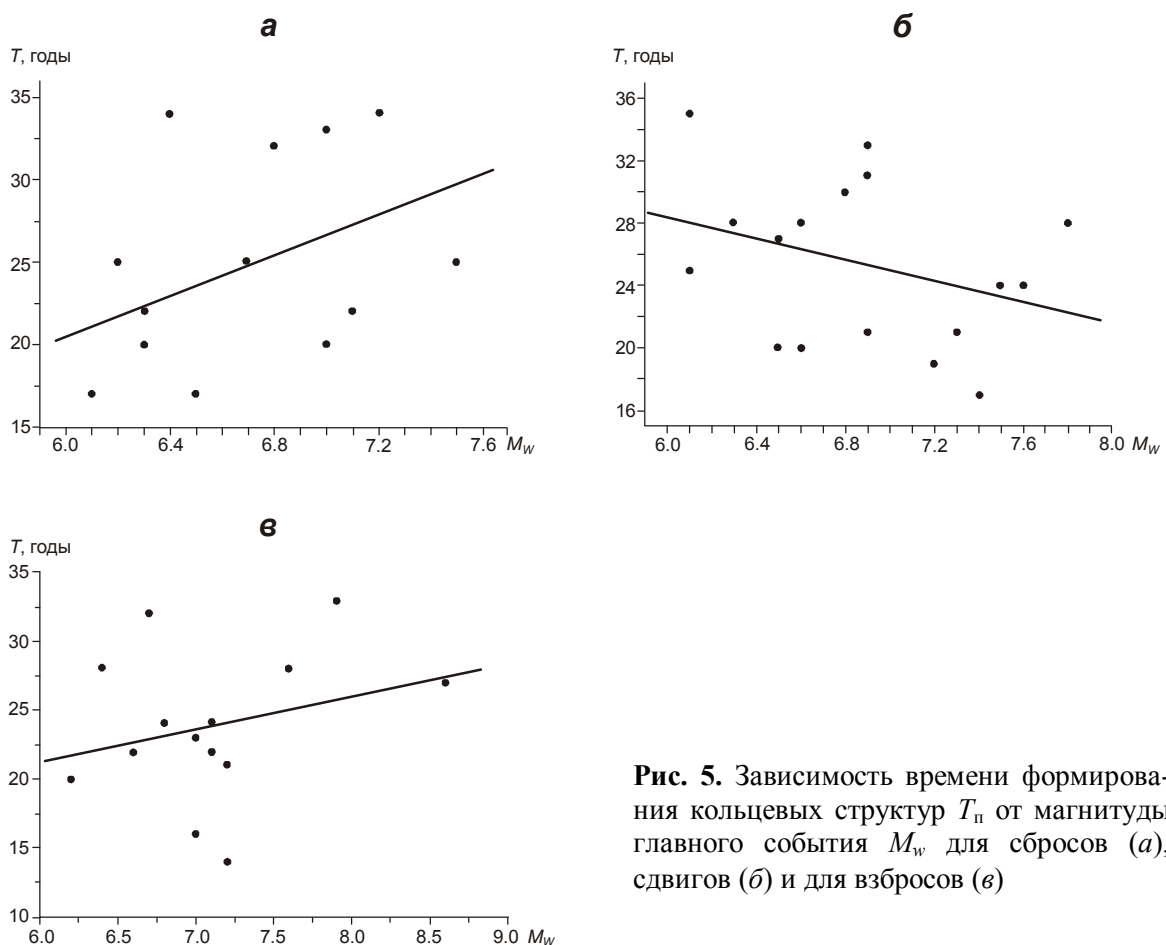
$$\text{для сбросов} \quad - M_n = -0.19 + 0.64 M_w, \quad r=0.55; \quad (4)$$

$$\text{для сдвигов} \quad - M_n = -0.17 + 0.64 M_w, \quad r=0.67; \quad (5)$$

$$\text{для взбросов} \quad - M_n = -0.92 + 0.73 M_w; \quad r=0.77. \quad (6)$$



**Рис. 4.** Зависимость параметра  $M_n$  от  $M_w$  для сбросов (*а*), сдвигов (*б*) и взбросов (*в*). Штриховые графики – аналогичные зависимости для района Суматры (по [Копничев, Соколова, 2009б])



**Рис. 5.** Зависимость времени формирования кольцевых структур  $T_n$  от магнитуды главного события  $M_w$  для сбросов (*а*), сдвигов (*б*) и для взбросов (*в*)

Можно видеть, что в отличие от размеров колец (см. рис. 3), параметры  $M_p$  почти одинаковы для всех типов подвижек. Кроме того, в диапазоне  $M_p \sim 7.0-8.0$  они достаточно близки к аналогичным параметрам, полученным для зоны субдукции в районе Суматры [Копничев, Соколова, 2009б]. Следует заметить, что коэффициенты корреляции для зависимостей (4)–(6) существенно ниже, чем для (1)–(3).

Графики зависимости времени формирования кольцевых структур  $T_p$  от магнитуды главного события  $M_w$  для трех типов механизмов приведены на рис. 5. Из графиков следует, что в рассматриваемом диапазоне магнитуд время формирования колец сейсмичности для всех типов подвижек варьирует в диапазоне от 14 до 35 лет и практически не зависит от магнитуды. Средние значения  $T_p$  составляют  $24 \pm 6$  лет для сбросов,  $25 \pm 5$  лет для сдвигов и  $24 \pm 5$  лет для взбросов. Таким образом, судя по имеющимся данным, длительность формирования колец сейсмичности не зависит от механизма готовящегося землетрясения.

### Обсуждение

Полученные данные свидетельствуют о том, что во внутриконтинентальных районах так же, как и в зонах субдукции, перед сильными межплитными землетрясениями формируются неглубокие кольцевые структуры сейсмичности. В то же время, по нашим данным, глубокие кольца сейсмичности (на глубинах 34–70 км), в отличие от активных окраин континентов [Копничев, Соколова, 2009а,б, 2010а,б, 2011а, 2012а,б], проявляются здесь достаточно редко. Мелкие кольцевые структуры в континентальных районах не выделяются перед сильными внутриплитными землетрясениями. Отметим, что ранее аналогичный эффект был установлен для двух внутриплитных землетрясений ( $M_w = 7.9$  и  $7.8$ ), произошедших в 1987 и 1988 гг. в океанической плите к югу от Аляски [Копничев, Соколова, 2012а].

В работе [Копничев и др., 2009] было показано, что в очаговых зонах сильных межплитных землетрясений сразу после них наблюдается высокое поглощение короткопериодных  $S$ -волн, что свидетельствует о достаточно большом содержании флюидов в нижней коре и верхах мантии. Формирование кольцевых структур связывается с эффектом самоорганизации геологических систем, обеспечивающим подъем глубинных флюидов, что, в конечном счете, ведет к уменьшению потенциальной энергии Земли [Копничев, Соколова, 2009а,б, 2010а,б, 2011а, 2012а,б]. В связи с этим отсутствие колец сейсмичности перед сильными внутриплитными землетрясениями можно объяснить низким содержанием свободных флюидов в районах, где они происходят.

Можно полагать, что формирование колец сейсмичности свидетельствует об образовании слоя двухфазной среды со связной сетью флюидов, которая обеспечивает концентрацию напряжений на его кровле [Копничев, Соколова, 2009а,б, 2010а,б, 2011а,б, 2012а,б]. Как известно, величина дополнительных напряжений пропорциональна мощности двухфазного слоя [Gold, Soter, 1984/1985]. В работах [Копничев, Соколова, 2009а,б, 2010б, 2011а, 2012а,б] показано, что в зонах субдукции обычно формируются кольцевые структуры сейсмичности в двух диапазонах глубин – 0–33 и 34–70 км. При этом эпицентры сильных землетрясений, как правило, находятся вблизи областей пересечения или наибольшего сближения этих структур, где достигается максимальная мощность двухфазного слоя со связной сетью флюидов. Это позволяет объяснить известный парадокс, сформулированный Дж. Райсом: горизонтальные напряжения малы на границах плит, движущихся с большими скоростями, где и происходят сильнейшие землетрясения, и велики во внутриконтинентальных районах, где сильные землетрясения происходят относительно редко (см. [Sibson, 2002]). Большие дополнительные напряжения на кровле субвертикальной зоны двухфазного материала обеспечивают триггерный эффект, приводящий к инициированию сильного землетрясения при сравнительно низком уровне общих горизонтальных напряжений.



Сопоставление с полученными ранее данными для районов Суматры, Южной Америки, северо-восточной Японии, Алеут и Аляски [Копничев, Соколова, 2009б, 2010б, 2011а, 2012а,б] показывает, что размеры колец сейсмичности для одного и того же значения  $M_w$  во внутриконтинентальных районах в несколько раз больше, чем в зонах субдукции. Для объяснения этого эффекта можно предположить, что энергия готовящегося сильного землетрясения пропорциональна потенциальной энергии, высвобождающейся при подъеме глубинных флюидов. В таком случае значительно более низкое по сравнению с зонами субдукции среднее содержание флюидов в литосфере внутриконтинентальных районов, о чем можно судить по характеристикам поля поглощения [Щукин, Рябой, 1987], компенсируется увеличением размеров колец сейсмичности, на границах которых перед сильными землетрясениями и происходит подъем флюидов [Копничев, Соколова, 2010а].

Данные, полученные в последние годы, дают основания считать, что подъем флюидов в литосфере происходит в значительной степени в результате землетрясений [Копничев и др., 2009; Yamazaki, Seno, 2003]. Это может объяснить близкие пороговые значения магнитуд (для данной  $M_w$ ) в зонах субдукции и внутриконтинентальных районах [Копничев, Соколова, 2009б, 2010б, 2011а, 2012а,б].

Таким образом, разные размеры колец сейсмичности в зонах субдукции и внутри континентов, а также то, что перед внутриплитными событиями они не формируются, согласуется с вариациями содержания флюидов в литосфере различных районов. Отметим, что различие доли свободных флюидов, вероятно, позволяет объяснить и разные периоды повторяемости  $T$  для сильных землетрясений в этих районах. Как известно, для магнитуды  $M_w \sim 8$  эти величины в зонах субдукции составляют в среднем около 100 лет, в то время как в районах Алтая и Монголии –  $\sim 2-3$  тыс. лет [Рогожин, Платонова, 2002]. В то же время для гораздо более слабых внутриплитных событий с  $M_w \sim 6-7$  в слабосейсмичных районах Австралии и Индии, где кольцевые структуры не формируются, по палеосейсмическим данным величины  $T$  оцениваются в несколько десятков тысяч лет [Gangopadhyay, Talwani, 2003]. Возможно, что данный эффект связан с резким различием скорости вертикальной миграции флюидов в разных тектонических структурах до начала этапа формирования колец сейсмичности. (Такая миграция происходит по граням зерен под действием сдвиговых напряжений относительно медленно [Hier-Majumder, Kohlstedt, 2006]). В то же время сам этот этап, скорее всего, начинается после достижения определенной пороговой концентрации флюидов в нижней коре и верхах мантии в окрестностях будущего очага землетрясения.

Можно предполагать, что существенное различие средних размеров колец сейсмичности при прочих равных условиях для разных механизмов очагов также обусловлено вариациями содержания флюидов в литосфере. Дело в том, что для сбросов (и в меньшей степени для сдвигов, для которых формируются кулисообразные структуры [Антикаева и др., 1995]), в условиях близгоризонтального растяжения имеет место наибольшая проницаемость горных пород. Это должно приводить к большей скорости миграции флюидов и к гораздо более быстрому “осушению” литосферы. Существует ряд экспериментальных данных, подтверждающих данный вывод. Во-первых, в работе [Щукин, Рябой, 1987] показано, что в районе Байкальской рифтовой зоны, одной из крупнейших на континентах, наблюдается достаточно слабое поглощение  $S$ -волн в литосфере по сравнению с теми районами Центральной Азии, где доминирует напряжение сжатия, например, Тянь-Шанем. Во-вторых, по мировым данным, после сильных землетрясений подъем флюидов из верхов мантии действительно происходит гораздо интенсивнее для сбросов и сдвигов, чем для взбросов и надвигов [Копничев и др., 2009].

Пока неясно, с чем связана практическая независимость времени формирования кольцевых структур от магнитуды и механизма очага. (Отметим, что для зоны субдукции в районе северо-восточной Японии средняя величина  $T_n$  для мелких колец в диапазоне магнитуд  $M_w = 7.0-9.0$  составляет  $26 \pm 6$  лет [Копничев, Соколова, 2012б], и это достаточно

близко к полученным нами оценкам для внутриконтинентальных районов). Возможно, такой эффект объясняется практическим постоянством средней скорости подъема флюидов на этапе формирования кольцевых структур (в отличие от этапа миграции флюидов по граням зерен [Hier-Majumder, Kohlstedt, 2006]).

Полученные результаты позволяют существенно уточнить прогноз магнитуд готовящихся сильных землетрясений во внутриконтинентальных районах, хотя бы потому, что механизмы сильных землетрясений достаточно устойчивы в определенных тектонических структурах. Так, хорошо известно, что в рифтовых зонах доминируют сбросы и сбрососдвиги [Грачев, 1977; Tapponier, Molnar, 1979], а в районе Тянь-Шаня – взбросы и взбрососдвиги [Tapponier, Molnar, 1979]. При этом, судя по коэффициентам корреляции для зависимостей (1)–(6), наиболее надежные оценки величин  $M_w$  могут быть получены на основании оценок размеров кольцевых структур. Исключение составляет группа взбросов, для которой с этой целью можно также использовать параметр  $M_{\text{п}}$  (для нее получен относительно высокий коэффициент корреляции).

Далее, исходя из полученных средних величин  $T_{\text{п}}$ , можно приблизительно (с точностью до 5–10 лет) оценивать возможные времена реализации сильных сейсмических событий. Это имеет особое значение для внутриконтинентальных землетрясений, периоды повторяемости которых нередко определяются с точностью до нескольких сотен лет [Рогожин, Платонова, 2002].

Поскольку в континентальных районах кольца сейсмичности имеют относительно большие размеры, для уточнения положения будущих очаговых зон необходимо привлекать дополнительные данные (палеосейсмические, геофизические и т.д.). Кроме того, для более точной оценки времени готовящихся сильных землетрясений в районах кольцевых структур целесообразно устанавливать дополнительные сейсмические станции, по записям которых можно выделять относительно слабые форшоки, а также исследовать временные вариации поля поглощения  $S$ -волн, отражающие процессы миграции глубинных флюидов [Копничев и др., 2009].

## Литература

- Антикаева О.И., Арефьев С.С., Кветинский С.И., Копничев Ю.Ф., Мишаткин В.Н. Неоднородности литосферы и астеносферы в очаговой зоне Рачинского землетрясения 1991 года // Докл. РАН. 1995. Т. 344, № 4. С.533–538.
- Грачев А.Ф. Рифтовые зоны Земли. Л.: Недра, 1977. 247 с.
- Копничев Ю.Ф. Короткопериодные сейсмические волновые поля. М.: Наука, 1985. 176 с.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Кольцевая сейсмичность в разных диапазонах глубин перед сильными и сильнейшими землетрясениями в зонах субдукции // Докл. РАН. 2009а. Т. 425, № 4. С.539–542.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Характеристики кольцевой сейсмичности в разных диапазонах глубин перед сильными и сильнейшими землетрясениями в районе Суматры // Докл. РАН. 2009б. Т. 429, № 1. С.106–109.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. О корреляции характеристик сейсмичности и поля поглощения  $S$ -волн в районах кольцевых структур, формирующихся перед сильными землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2010а. № 6. С.34–51.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Характеристики кольцевой сейсмичности в разных диапазонах глубин в регионе Южной Америки // Вестник НЯЦ РК. 2010б. Вып. 1. С.100–110.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Кольцевые структуры сейсмичности и землетрясение 11.03.2011 г. ( $M_w=9.0$ ) в районе северо-восточной Японии // Докл. РАН. 2011а. Т. 440, № 2. С.246–249.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Неоднородности поля поглощения короткопериодных  $S$ -волн в районе очага Чилийского землетрясения 27.02.2010 г. ( $M_w=8.8$ ) и их связь с сейсмичностью и вулканизмом // Геофизические исследования. 2011б. Вып. 3. С.22–32.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Кольцевые структуры сейсмичности в разных диапазонах глубин перед сильными и сильнейшими землетрясениями в районах Алеут и Аляски // Вестник НЯЦ РК. 2012а. Вып. 1. С.137–146.

- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Кольцевые структуры сейсмичности в районе северо-восточной Японии и катастрофическое землетрясение Тохоку 11 марта 2011 г. ( $M_w = 9.0$ ) // Вестник НЯЦ РК. 2012б. Вып. 1. С.121–130.
- Копничев Ю.Ф., Гордиенко Д.Д., Соколова И.Н. Пространственно-временные вариации поля поглощения поперечных волн в сейсмически активных и слабосейсмичных районах // Вулканология и сейсмология. 2009. № 1. С.49–64.
- Рогожин Е.А., Платонова С.Г. Очаговые зоны сильных землетрясений Горного Алтая в голоцене. М.: ОИФЗ РАН, 2002. 130 с.
- Щукин Ю.К., Рябой В.З. (ред.) Глубинное строение слабосейсмичных регионов СССР. М: Наука, 1987. 238 с.
- Gangopadhyay A. Talwani P. Symptomatic features of intraplate earthquakes // Seismol. Res. Lett. 2003. V. 74, N 6. P.863–883.
- Gold T., Soter S. Fluid ascent through the solid lithosphere and its relation to earthquakes // Pure Appl. Geophys. 1984/1985. V. 122. P.492–530.
- Hier-Majumder S., Kohlstedt D. Role of dynamic grain boundary wetting in fluid circulation beneath volcanic arcs // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. L08305.
- Sibson R. Geology of the crustal earthquake source // International handbook of earthquake and engineering seismology. Academic Press. An imprint of Elsevier Science. 2002. Part 1. P.455–473.
- Tapponnier P., Molnar P. Active faulting and cenozoic tectonics of the Tien Shan, Mongolia and Baikal regions // J. Geophys. Res. 1979. V. 84. P.3425–3459.
- Yamazaki T., Seno T. Double seismic zone and dehydration embrittlement of the subducting slab // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. N B4. doi: 10.1029/2002JB001918.

*Сведения об авторах*

**КОПНИЧЕВ Юрий Федорович** – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7-7272-956350. E-mail: yufk@kndc.kz

**СОКОЛОВА Инна Николаевна** – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геофизических исследований Республики Казахстан. 050020, г. Алма-Ата, ул. Чайкиной, д. 4. Тел.: +7-7272-631330. E-mail: sokolova.inessa@mail.ru

## RING-SHAPED SEISMICITY STRUCTURES, BEING FORMED PRIOR TO LARGE EARTHQUAKES WITH DIFFERENT MECHANISMS WITHIN INTRACONTINENTAL REGIONS

Yu.F. Kopnichev<sup>1</sup>, I.N. Sokolova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Institute of Geophysical Research, NNC RK, Alma-Ata, Kazakhstan*

**Abstract.** We have been studying seismicity characteristics prior to 54 shallow large and great earthquakes with different mechanisms, which occurred within intracontinental regions. It was established, that ring-shaped seismicity structures within depth range of 0–33 km were formed prior to large interplate earthquakes. Such the structures were not revealed prior to large intraplate earthquakes. It was shown, that ring structure sizes ( $L$ ) and also threshold magnitude values ( $M_t$ ) essentially depend on the earthquake mechanism. We have obtained correlation dependencies for  $L$  and  $M_t$  values on magnitude of the major events. We suppose that a nature of ring-shaped structures is connected with deep fluid migration.

**Keywords:** attenuation, focal mechanism, ring-shaped seismicity structures, deep-seated fluids.