

УДК 550.34

Характеристики кольцевой сейсмичности на глубинах до 110 км перед сильными и сильнейшими землетрясениями в тихоокеанских зонах субдукции

© 2023 г. Ю.Ф. Копничев¹, И.Н. Соколова²

¹ИФЗ РАН, г. Москва, Россия; ²ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия

Поступила в редакцию 18.10.2023 г.

Аннотация. Рассматриваются элементы сейсмичности на глубинах до 110 км, проявляющейся перед землетрясениями с $M_w=7.0-9.0$ на западе и востоке Тихого океана. Выявлены кольцевые структуры сейсмичности в трёх диапазонах глубин: 0–33, 34–70 и 71–110 км, которые сформировались в течение нескольких десятков лет перед 38 сильными и сильнейшими землетрясениями с гипоцентрами на глубинах 10–40 и 42–110 км. Структуры формируются событиями с магнитудами, величины которых не ниже пороговых (соответственно M_{n1} , M_{n2} и M_{n3}). Проводится анализ величин разностей $M_{n1}-M_{n2}$, $M_{n2}-M_{n3}$ и $M_{n1}-M_{n3}$. Устанавливаются различия параметров $M_{n2}-M_{n3}$ и $M_{n1}-M_{n3}$ для неглубоких сильных землетрясений по отношению к глубоким, а также средних величин $M_{n1}-M_{n2}$ на западе и востоке Тихого океана. Рассматриваются причины формирования колец сейсмичности, их связь с дегидратацией пород погружающихся плит и миграцией глубинных флюидов. Оцениваются возможности прогнозирования глубин готовящихся сильных событий по характеристикам кольцевых структур. Обсуждается значение полученных данных для прогноза максимальной интенсивности сотрясений, а также оценки цунамиопасности при сильных землетрясениях.

Ключевые слова: кольцевые структуры сейсмичности, неглубокие и глубокие землетрясения, глубинные флюиды, прогноз глубин очагов землетрясений.

Для цитирования: Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Характеристики кольцевой сейсмичности на глубинах до 110 км перед сильными и сильнейшими землетрясениями в тихоокеанских зонах субдукции // Российский сейсмологический журнал. – 2023. – Т. 5, № 4. – С. 41–51. – DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2023.4.03>. – EDN: HDHWNE

Введение

За последние 15 лет установлено, что перед многими сильными и сильнейшими неглубокими землетрясениями (с глубинами гипоцентров h_0 до ~40 км) в зонах субдукции в течение нескольких десятков лет формируются кольцевые структуры сейсмичности [Копничев, Соколова, 2009а; 2009б; 2010; 2011а; 2018; 2021; 2022а; Копничев, Соколова, 2011б; 2015]. Эти структуры чётко проявляются в двух диапазонах глубин (0–33 и 34–70 км), они обычно имеют форму эллипсов и характеризуются пороговыми значениями магнитуд (M_{n1} и M_{n2}), а также длинами больших осей (L_1 и L_2). Пороговое значение M_{ni} показывает, что все события в области структуры имеют магнитуды не меньше M_{ni} , а внутри структуры – не больше $M_{ni}-0.1$. Для зон субдукции на западе и востоке Тихого океана, а также в районе Сума-

тры получены корреляционные зависимости $M_{n1}(M_w)$, $M_{n2}(M_w)$, $\lg L_1(M_w)$ и $\lg L_2(M_w)$, где M_w – магнитуды главных событий, перед которыми проявились кольцевые структуры. Информация о расположении колец сейсмичности позволяет выделять области возможной подготовки сильных и сильнейших землетрясений, а данные об их размерах и пороговых величинах магнитуд – также прогнозировать их энергию [Копничев, Соколова, 2009б; 2011а; 2018; 2021; 2022а; Копничев, Соколова, 2015]. Пример таких исследований продемонстрирован в работе [Копничев, Соколова, 2022а], в которой описан успешный прогноз места и магнитуды сильнейшего Чигникского землетрясения 29.07.2021 г. ($M_w=8.2$) в районе Юго-Западной Аляски. В то же время до сих пор мало что было известно о характеристиках возможных кольцевых структур в других диапазонах глубин, а также перед

сильными событиями с очагами, расположенными на больших глубинах (исключение составляет работа [Копничев, Соколова, 2020], в которой рассматривались такие характеристики по относительно малому объёму данных). Кроме того, не анализировались представляющие интерес данные о соотношении наибольших магнитуд событий в областях колец сейсмичности с пороговыми значениями магнитуд. В настоящей работе рассматриваются такие данные для зон субдукции на окраинах Тихого океана.

Использованные материалы и методика

В работе использованы каталоги NEIC Геологической службы США, начиная с 1973 г., когда координаты землетрясений и их магнитуды стали определяться с относительно высокой точностью, благодаря установлению большого количества сейсмостанций по всему земному шару. Анализировались данные о характеристиках сейсмичности перед 18 сильными и сильнейшими неглубокими ($M_w=7.7-9.0$, $h_0 \leq 40$ км) и 20 относительно глубокими ($M_w=7.0-8.2$, $h_0=42-110$ км) землетрясениями (табл. 1, 2).

Методика выделения кольцевых структур ранее была подробно описана в работах [Копничев, Соколова, 2013; Копничев, Соколова, 2018; 2022a]. Здесь мы лишь заметим, что в зонах субдукции, в отличие от большинства внутриконтинентальных районов, ранее выделялись структуры в двух диапазонах глубин: 0–33 и 34–70 км.

Таблица 1. Пороговые значения магнитуд для кольцевых структур, сформировавшихся перед сильными и сильнейшими неглубокими землетрясениями

Дата, дд.мм.гггг	φ , °	λ , °	M_w	h_0 , км	M_{n1}	M_{n2}	M_{n3}
04.10.1994	43.83	147.33	8.3	33	5.0	5.1	4.6
23.06.2001	-16.27	-73.64	8.4	33	5.0	5.2	4.7
17.11.2003	51.15	178.65	7.8	33	4.8	4.6	4.1
15.11.2006	46.59	153.27	8.3	10	5.2	4.7	3.9
15.08.2007	-13.39	-76.60	8.0	39	5.0	5.0	4.1
14.11.2007	-22.25	-69.89	7.7	40	4.9	4.7	4.1
29.09.2009	-15.49	-172.10	8.1	18	5.0	4.8	4.5
07.10.2009	-12.52	166.38	7.8	35	4.8	4.6	4.2
27.02.2010	-36.42	-72.90	8.8	23	5.0	5.0	4.5
11.03.2011	38.30	142.37	9.0	29	5.9	5.4	4.4
06.02.2013	-10.80	165.11	8.0	24	5.0	4.7	4.1
01.04.2014	-19.61	-70.77	8.2	25	5.0	4.8	4.4
16.09.2015	-31.57	-71.67	8.3	22	5.2	5.3	4.5
08.12.2016	-10.68	161.33	7.8	40	5.0	4.7	4.2
22.07.2020	55.07	-158.60	7.8	28	5.0	4.5	3.7
10.02.2021	-23.05	171.66	7.7	10	4.5	4.7	4.0
04.03.2021	-29.72	-177.28	8.1	29	5.1	5.0	4.4
29.07.2021	55.36	-157.89	8.2	35	5.0	4.9	3.6

Таблица 2. Пороговые значения магнитуд для кольцевых структур, сформировавшихся перед сильными и сильнейшими глубокими землетрясениями

Дата, дд.мм.гггг	φ , °	λ , °	M_w	h_0 , км	M_{n1}	M_{n2}	M_{n3}
02.09.1992	11.74	-87.34	7.7	45	4.7	4.8	4.6
08.06.1993	51.22	157.83	7.5	71	4.5	4.7	4.3
30.07.1995	-23.34	-70.29	8.0	46	5.0	4.9	4.7
04.01.1998	-22.25	171.01	7.5	100	4.5	4.9	4.7
30.01.1998	-23.91	-70.21	7.1	42	4.5	4.4	4.1
06.02.1999	-12.82	166.78	7.3	90	4.3	4.3	4.3
13.01.2001	13.05	-88.66	7.7	60	5.0	4.8	4.8
09.09.2005	-4.54	153.47	7.6	90	4.5	4.8	5.0
03.05.2006	-20.19	-174.12	8.0	55	5.0	4.8	4.5
07.10.2009	-13.01	166.51	7.7	45	4.7	4.8	4.8
24.06.2011	52.05	-171.84	7.3	52	4.0	4.0	—
19.04.2014	-6.76	155.02	7.5	43	4.6	4.7	4.8
23.06.2014	51.85	178.74	7.9	109	4.5	4.8	4.8
17.12.2016	-4.51	153.52	7.9	95	5.1	4.8	5.0
08.09.2017	15.02	-93.90	8.2	47	4.7	4.4	4.4
30.11.2018	61.35	-149.96	7.0	47	4.0	4.2	4.0
15.06.2019	-30.64	-178.10	7.3	46	5.0	4.9	4.9
25.03.2020	48.96	157.70	7.5	58	4.2	4.2	4.1
21.01.2021	04.99	127.51	7.0	80	4.0	4.2	4.2
13.02.2021	37.73	141.78	7.1	44	4.4	4.3	4.2

Кольца сейсмичности, как правило, аппроксимировались эллипсами, при этом их ширина ограничивалась по отношению к длине малой оси эллипса. В настоящей статье рассматриваются также элементы сейсмичности в диапазоне 71–110 км (соответствующие параметры кольцевых структур обозначаются как M_{n3} и L_3). В работе [Копничев, Соколова, 2018] получены корреляционные зависимости различных параметров колец сейсмичности от магнитуд M_w главных событий для зон субдукции на западе и востоке Тихого океана. Было установлено, что для восточного региона (к востоку от 180°E) достаточно высокая корреляция наблюдается как для размеров кольцевых структур, так и для пороговых значений магнитуд, в то время как для западного региона — лишь для величин M_{n1} и M_{n2} . Исходя из этого, здесь проводится статистический анализ только для трёх пороговых значений магнитуд, соответствующих рассматриваемым диапазонам глубин.

Анализ данных

На рис. 1а и 2 представлены элементы сейсмичности в районе Северо-Восточной Японии, предшествующей Великому землетрясению Тохоку 11.03.2011 г. ($M_w=9.0$). Перед этим событием сформировалась мелкая кольцевая структура с относительно высоким пороговым значением магнитуды: ($M_{n1}=5.9$, $L_1 \sim 140$ км),

ориентированная в северо-восточном направлении. Более глубокая структура ($M_{п2}=5.4$, $L_2\sim 70$ км) вытянута вдоль меридиана 142°E . Наибольшие магнитуды M_{\max} событий в областях этих структур были равны соответственно 7.0 (31.10.2003 г. и 19.07.2008 г.) и 7.7 (12.06.1978 г.). Заметим, что сумма магнитуд событий в единицу времени может служить грубой оценкой скорости сеймотектонической деформации (СТД). Из рис. 1б следует, что скорость СТД в области мелкой кольцевой структуры резко выросла в 2003–2011 гг. (за этот период произошло пять событий с магнитудами 6 и выше). В диапазоне глубин 71–110 км проявилась кольцевая структура с достаточно низким пороговым значением магнитуды ($M_{п3}=4.4$), ориентированная в северо-западном направлении ($L_3\sim 65$ км, рис. 3). Существенно, что пороговые значения магнитуд в областях первой и третьей кольцевых структур различаются достаточно сильно (на 1.5). Наибольшая магнитуда события в области самого глубокого кольца сейсмичности M_{\max} равна 5.5.

В работе [Копничев, Соколова, 2020] были представлены кольцевые структуры сейсмичности, проявившиеся в трёх диапазонах глубин

перед сильным глубокофокусным землетрясением 17.12.2016 г. в районе Новой Гвинеи ($M_w=7.9$, $h_0=95$ км). На рис. 4а показаны структуры, сформировавшиеся на глубинах 34–70 и 71–110 км. Видно, что небольшие кольца сейсмичности вытянуты в субмеридиональных направлениях. В [Копничев, Соколова, 2020] показано, что на глубинах до 33 км здесь проявилось малое мелкое кольцо, также вытянутое вдоль меридиана.

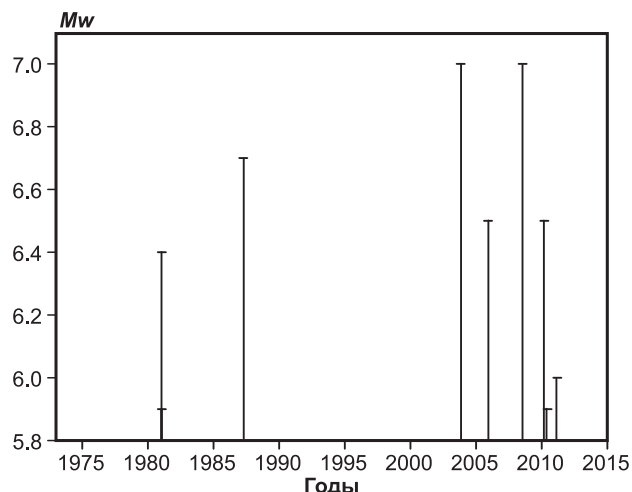


Рис. 1б. Зависимость магнитуд от времени для неглубокой кольцевой структуры

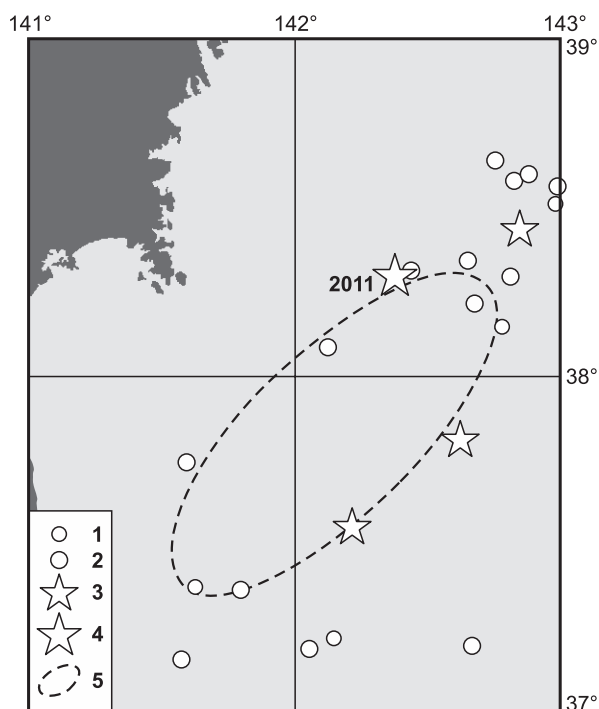


Рис. 1а. Элементы сейсмичности на глубинах 0–33 км перед Великим землетрясением Тохоку 11.03.2011 г.

Эпицентры землетрясений: 1 – $M=5.9$, 2 – $M=6.0-6.9$, 3 – $M_w=7.0-7.9$, 4 – $M_w=9.0$. 5 – кольцевая структура

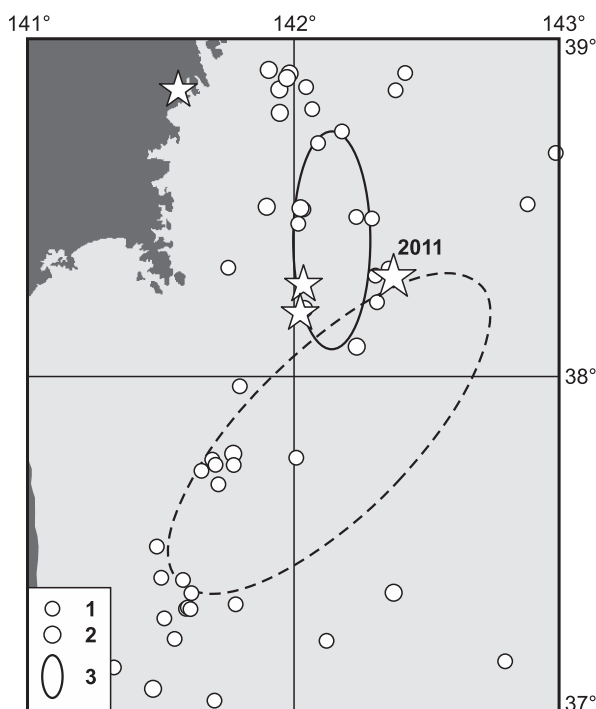


Рис. 2. Элементы сейсмичности на глубинах 34–70 км перед Великим землетрясением Тохоку 11.03.2011 г.

1 – $M=5.4-5.9$, 2 – $M=6.0-6.9$. 3 – кольцевая структура. Остальные обозначения – на рис. 1а

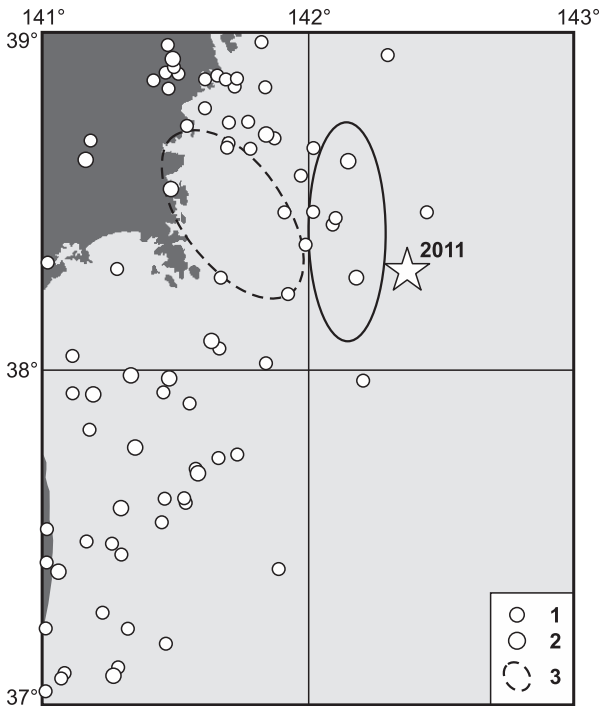


Рис. 3. Элементы сейсмичности на глубинах 71–110 км перед Великим землетрясением Тохоку 11.03.2011 г.

1 – $M=4.4-4.9$, 2 – $M=5.0-5.9$.
3 – кольцевая структура.

Остальные обозначения – на рис. 1а

В данном случае получены следующие пороговые значения магнитуд: $M_{п1}=5.1$, $M_{п2}=4.8$ и $M_{п3}=5.0$, которым соответствуют наибольшие величины $M_{макс}$: 6.4, 5.8 и 7.6. Длины больших осей достаточно малы по сравнению с данными для землетрясения Тохоку: $L_1=40$ км, $L_2=55$ км, $L_3=35$ км. Из рис. 4б следует, что на глубинах 71–110 км скорость СТД была максимальной за период 2005–2012 гг.

Отметим, что в большинстве случаев эпицентры сильных глубоких землетрясений находятся вблизи областей пересечения или касания колец сейсмичности, сформировавшихся на глубинах 0–33 и 34–70 или 34–70 и 71–110 км. Сопоставление данных, полученных для двух сильных землетрясений, показывает, что перед глубокофокусным событием 17.12.2016 г. в разных диапазонах глубин проявились кольцевые структуры с пороговыми величинами магнитуд, различающимися всего лишь на 0.3 (в отличие от колец сейсмичности, связанных с неглубоким землетрясением Тохоку).

Было проведено сопоставление пороговых величин и наибольших магнитуд событий, соответствующих кольцевым структурам. Установлено,

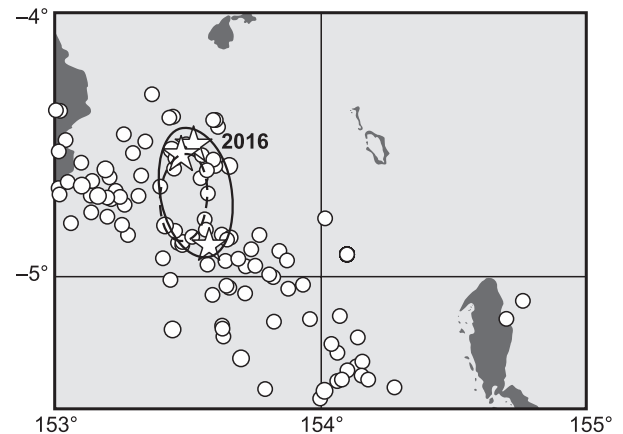


Рис. 4а. Элементы сейсмичности на глубинах 71–110 км перед сильным землетрясением 17.12.2016 г.

Малый кружок – $M=5.0-5.9$. Сплошное кольцо соответствует глубинам 34–70 км. Остальные обозначения – на рис. 2 и 3

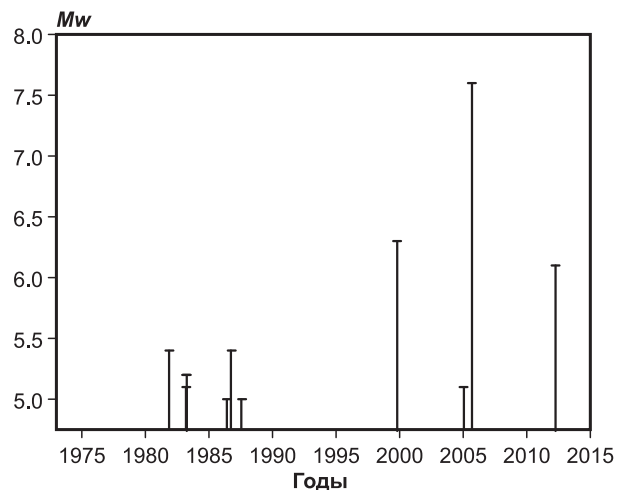


Рис. 4б. Зависимость магнитуд от времени для кольцевой структуры на глубинах 71–110 км

что наблюдается большой разброс значений величин $M_{макс} - M_{пi}$ ($i=1,2,3$) как перед мелкими, так и перед глубокими сильными землетрясениями. В табл. 3 представлены средние значения и стандартные отклонения величин $M_{макс} - M_{пi}$ для кольцевых структур, сформированных перед сильными неглубокими землетрясениями. Видно, что средние значения варьируются в диапазоне 1.4–1.6 и 1.1–1.4, а стандартные отклонения – 0.4–0.5 и 0.3–0.6 соответственно для запада и востока Тихого океана.

В табл. 3 приведены также аналогичные величины для глубоких землетрясений. В данном случае средние значения составляют 1.3–1.5 и 1.0–1.1, а стандартные отклонения – 0.3–0.5 и 0.3–0.4 соответственно для западной и восточной окраин Тихого океана. Следует заметить,

что средние значения указанных параметров, особенно перед глубокими землетрясениями, заметно выше для колец сейсмичности, сформировавшихся в западной части тихоокеанского региона.

Как показано в работах [Kopnichev, Sokolova, 2009a; 2009b; 2018], пороговые значения магнитуд существенно зависят от энергии главных событий, перед которыми сформировались кольцевые структуры. Для того, чтобы исключить влияние этого эффекта, мы провели анализ разностей $M_{n1}-M_{n2}$, $M_{n2}-M_{n3}$ и $M_{n1}-M_{n3}$ (табл. 4). Из рис. 5а,б следует, что для западных зон субдукции средние значения $M_{n1}-M_{n2}$ на 0.32 выше для мелких событий, а для восточных они близки к нулю в обоих случаях. Отметим, что для запада

указанная величина для глубоких землетрясений выходит за границу интервала $\pm\sigma$.

Рис. 6а,б показывают, что средние значения $M_{n2}-M_{n3}$ для запада Тихого океана на 0.60, а для востока – на 0.55 выше для неглубоких землетрясений. При этом для восточного региона эта величина для глубокофокусных событий выходит за пределы 1-сигмового, а для западного региона – даже 3-сигмового интервала, соответствующего неглубоким землетрясениям. Из рис. 7а,б видно, что средние значения $M_{n1}-M_{n3}$ для мелких и глубоких событий также различаются весьма значительно: особенно на западе (на 0.92) и на 0.53 на востоке, при этом данные для глубоких землетрясений выходят за границы интервала 2σ на западе и σ – на востоке.

Таблица 3. Средние величины $M_{maxi}-M_{ni}$ для кольцевых структур на западе и востоке Тихого океана

Глубины гипоцентров, км	Регион Тихого океана	$M_{max1}-M_{n1}$	$M_{max2}-M_{n2}$	$M_{max3}-M_{n3}$
10–40	Запад	1.6±0.5	1.4±0.4	1.4±0.5
	Восток	1.4±0.6	1.2±0.6	1.1±0.3
42–110	Запад	1.3±0.3	1.5±0.5	1.4±0.4
	Восток	1.0±0.4	1.1±0.4	1.0±0.3

Таблица 4. Средние величины разностей пороговых магнитуд для неглубоких и глубоких землетрясений на западе и востоке Тихого океана

Глубины гипоцентров, км	Регион Тихого океана	$M_{n1}-M_{n2}$	$M_{n2}-M_{n3}$	$M_{n1}-M_{n3}$
10–40	Запад	0.21±0.16	0.63±0.13	0.84±0.24
	Восток	0.10±0.10	0.67±0.16	0.77±0.19
42–110	Запад	-0.11±0.10	0.03±0.11	-0.08±0.11
	Восток	0.08±0.10	0.12±0.10	0.24±0.11

Примечание: указаны доверительные интервалы на уровне 0.9.

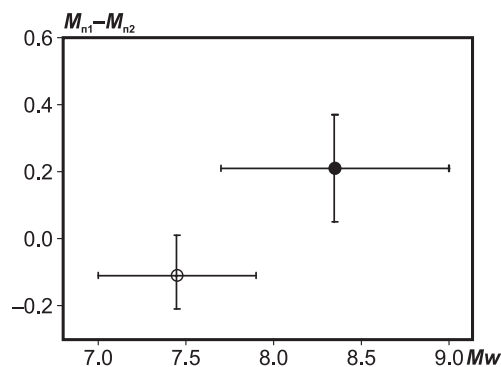


Рис. 5а. Средние значения параметра $M_{n1}-M_{n2}$ для зон субдукции на западе Тихого океана.

Залитый значок – неглубокие, не залитый – глубокие землетрясения.

Показаны доверительные интервалы на уровне 0.9 и диапазоны магнитуд M_w (здесь и ниже)

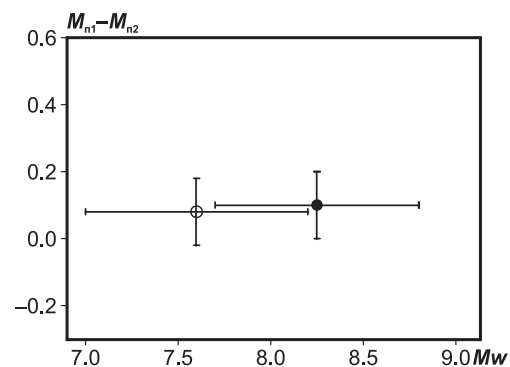


Рис. 5б. Средние значения параметра $M_{n1}-M_{n2}$ для зон субдукции на востоке Тихого океана

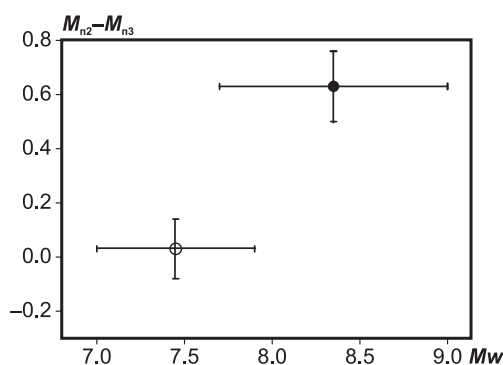


Рис. 6а. Средние значения параметра $M_{n2}-M_{n3}$ для зон субдукции на западе Тихого океана

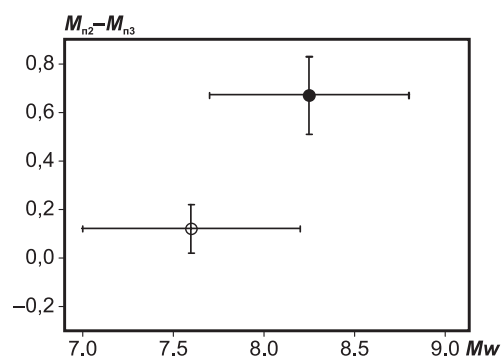


Рис. 6б. Средние значения параметра $M_{n2}-M_{n3}$ для зон субдукции на востоке Тихого океана

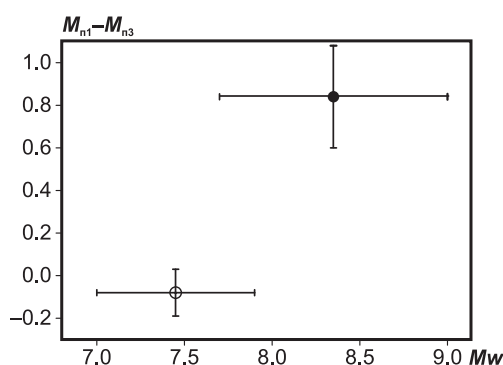


Рис. 7а. Средние значения параметра $M_{n1}-M_{n3}$ для зон субдукции на западе Тихого океана

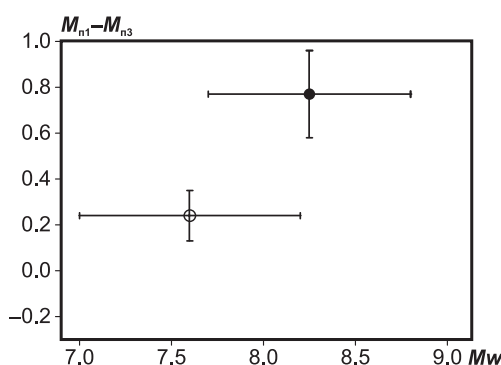


Рис. 7б. Средние значения параметра $M_{n1}-M_{n3}$ для зон субдукции на востоке Тихого океана

Обсуждение

Предыдущие исследования показали, что на периферии Тихого океана перед большинством сильных и сильнейших неглубоких землетрясений проявляются кольцевые структуры сейсмичности в двух диапазонах глубин: 0–33 и 34–70 км [Копничев, Соколова, 2011а; 2018; 2022а; Копничев, Соколова, 2011б; 2015; 2020]. Приведённые выше данные говорят о том, что перед многими достаточно сильными событиями (с $Mw \geq 7.0$), в том числе и относительно глубокофокусными, здесь выделяются также кольца сейсмичности на глубинах 71–110 км.

Ранее было установлено, что в реализации сильных землетрясений в зонах субдукции важную роль играют глубинные флюиды [Husen, Kissling, 2001; Yamazaki, Seno, 2003; Jung et al., 2004; Ogawa, Heki, 2007; Копничев, Соколова, 2010; 2018; Копничев et al., 2009]. В связи с этим наиболее естественное (если не единственное) объяснение природы кольцевых структур также связано с миграцией флюидов. При этом на глубинах более 33 км сейсмичность, скорее всего, обусловлена дегидратацией материала погружающихся океанических плит, при которой происходит охрупчивание пород и выделяется свободная

вода, служащая одним из главных компонентов флюидов [Yamazaki, Seno, 2003; Jung et al., 2004].

По нашим данным, эпицентры сильных неглубоких и глубоких землетрясений в зонах субдукции обычно находятся вблизи областей пересечения или наибольшего сближения кольцевых структур в диапазонах глубин 0–33 и 34–70 км, а также 34–70 и 70–110 км [Копничев, Соколова, 2009а; 2009б; 2018; Копничев, Соколова, 2015], см. также рис. 1а и 2. В указанных работах был сделан вывод, что данный эффект связан с наибольшей мощностью двухфазного слоя, в котором имеет место относительно высокое содержание флюидов. В случае, когда в этом слое формируется связанная сеть из пор и трещин, заполненных флюидом, на его кровле наблюдается концентрация напряжений, при этом величина избыточных напряжений пропорциональна мощности слоя [Каракин, Лобковский, 1983; Gold, Soter, 1984/1985]. Этот эффект может служить триггером, инициирующим подвижку при сильном землетрясении. При этом сами землетрясения обеспечивают дальнейший подъём глубинных флюидов [Husen, Kissling, 2001; Yamazaki, Seno, 2003; Копничев, Соколова, 2005; 2013; Копничев, Соколова, 2003; 2010; 2018; Ogawa, Heki, 2007; Копничев et al., 2009].

В работах [Копничев, Соколова, 2013; Kopnichev, Sokolova, 2018] предложена гипотеза о том, что энергия землетрясения пропорциональна потенциальной энергии, высвобождающейся при подъёме связанных с ним флюидов. В пользу этой гипотезы свидетельствуют, в частности, данные о характеристиках кольцевых структур в зонах субдукции на западе и востоке Тихого океана [Kopnichev, Sokolova, 2018; 2022a], а также для внутриконтинентальных землетрясений с разными механизмами очагов [Копничев, Соколова, 2013]. Принятие гипотезы приводит к выводу об относительно высоком содержании флюидов в областях кольцевых структур, где наибольшая магнитуда событий в среднем по меньшей мере на 1.1–1.7 выше, чем внутри колец. Учитывая соотношение между магнитудой и энергией землетрясений ($\lg E \sim 1.5 \cdot M$), находим, что наибольшая энергия событий в областях кольцевых структур на 1.5–2.5 порядка выше, чем внутри структур. Относительно высокая энергия событий, формирующих кольцевую структуру, облегчает подъём флюидов по структуре (а не внутри структуры), а также подготовку сильного землетрясения.

Исходя из пониженных значений величин $M_{n2} - M_{n3}$ и $M_{n1} - M_{n3}$ для глубоких землетрясений, можно заключить, что перед такими событиями на глубинах ~34–110 км имеет место относительно высокое содержание флюидов. Отсюда следует важный вывод: очаги сильных и сильнейших землетрясений располагаются на таких глубинах, где они стимулируют наиболее эффективный подъём флюидов. Формирование кольцевых структур в трёх диапазонах глубин перед сильными мелкими и глубокими событиями также облегчает миграцию флюидов. Всё это предоставляет дополнительные свидетельства процессов самоорганизации геологических систем, в конечном счёте обеспечивающих уменьшение потенциальной энергии Земли [Летников, 1992].

Как показано выше, перед сильными глубокими событиями наибольший контраст между западом и востоком Тихого океана наблюдается для средних величин $M_{n1} - M_{n3}$ (0.32, рис. 7а,б). Кроме того, средние величины параметров $M_{\max} - M_{n1}$ заметно выше для западной части тихоокеанского кольца. Учитывая эти результаты, можно сделать вывод о большей доле флюидов в верхах мантии западных зон субдукции. Это согласуется с данными о характеристиках поля поглощения короткопериодных S -волн в зонах субдукции в районах Северо-Восточной и Юго-Западной Японии, Юго-Западной Аляски и Южной Америки [Копничев, Соколова, 2011б;

Kopnichev, Sokolova, 2019; 2021; 2022б]. В пользу такого заключения свидетельствуют также данные о размерах кольцевых структур [Kopnichev, Sokolova, 2018; 2022a] и особенностях афтершоковых процессов [Tajima, Kanamori, 1985; Singh, Suarez, 1988] на западе и востоке Тихого океана. В свою очередь, большая доля флюидов в верхах мантии обусловлена значительно большим возрастом субдуцируемой океанической коры на западе, которому соответствует повышенное содержание гидратированных пород [Müller et al., 2008; Abers et al., 2013].

Следует подчеркнуть, что различия между рассматриваемыми параметрами кольцевых структур для неглубоких и глубоких землетрясений наиболее ярко проявляются при использовании пороговой величины M_{n3} (из табл. 4 следует, что значения $M_{n1} - M_{n2}$ сравнительно слабо различаются для разных глубин очагов сильных землетрясений и для двух регионов на периферии Тихого океана).

Практическое значение полученных данных заключается в возможности прогноза глубин очагов готовящихся сильных землетрясений. Резкое завышение параметра $M_{n2} - M_{n3}$ и особенно $M_{n1} - M_{n3}$ (для запада) говорит о высокой вероятности подготовки сильного неглубокого события. Отметим, что само выделение кольцевой структуры на глубинах 71–110 км уже свидетельствует о достаточно высокой энергии возможно готовящегося неглубокого землетрясения. Дело в том, что в этом случае пороговое значение $M_{n3} \sim 4.0$ отвечает средним значениям M_{n1} и M_{n2} около 4.8 и 4.6 соответственно (табл. 4), что, в свою очередь, коррелируется со средними величинами $M_w \sim 7.8 - 8.0$ [Kopnichev, Sokolova, 2018]. Прогноз глубин очагов весьма важен, поскольку из работы [Новый каталог..., 1977] следует, что для $h_0 \sim 20$ и 100 км различие наибольшей интенсивности сотрясений на поверхности может достигать 3 баллов (при прочих равных условиях).

Отметим, что использование пороговых значений магнитуд (и в меньшей степени размеров) для мелких кольцевых структур позволяет прогнозировать магнитуды главных событий, в том числе для сильнейших землетрясений. По данным В.К. Гусякова (устное сообщение), это имеет существенное значение, в частности, для прогноза цунами. Эффективность такого подхода была продемонстрирована на примерах Суматра-Андаманского землетрясения 26.12.2004 г. ($M_w = 9.1$) и Великого землетрясения Тохоку 11.03.2011 г., сопровождавшихся грандиозными цунами [Kopnichev, Sokolova, 2009б; 2018]. Использование данных о прогнозируемой

глубине очага, основанных на параметрах кольцевых структур, позволяет получить дополнительную информацию для оценки цунамиопасности возможного сильного землетрясения.

Ранее было установлено, что нередко наблюдается резкий рост скорости СТД в области мелкой кольцевой структуры за 10–15 лет до неглубоких сильных землетрясений [Копничев, Соколова, 2011б; 2015; Копничев, Соколова, 2011а; 2018; 2021; 2022а] (это видно и из рис. 16). Рис. 46 показывает, что аналогичный эффект наблюдался в области глубокой структуры перед сильным глубокофокусным событием. Не исключено, что дальнейшие исследования могут позволить использовать временные вариации скорости СТД в областях кольцевых структур в целях среднесрочного прогноза сильных землетрясений.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (в рамках государственного задания ИФЗ РАН по теме FMWU-2022-0003 и государственного задания ФИЦ ЕГС РАН № 075-01271-23).

Литература

- Каракин А.В., Лобковский Л.И. Гидродинамика и структура двухфазной астеносферы // Доклады Академии наук СССР. – 1983. – Т. 268, № 2. – С. 324–329.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Кольцевая сейсмичность в разных диапазонах глубин перед сильными и сильнейшими землетрясениями в зонах субдукции Тихого океана // Вестник НЯЦ РК. – 2020. – Вып. 3. – С. 135–141.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Кольцевые структуры сейсмичности в районе Северного Чили и успешный прогноз места и землетрясения Икике 01.04.2014 г. ($M_w=8.2$) // Вестник НЯЦ РК. – 2015. – Вып. 4. – С. 153–159.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Кольцевые структуры сейсмичности, формирующиеся в континентальных районах перед сильными землетрясениями с различными механизмами очагов // Геофизические исследования. – 2013. – Т. 14, № 1. – С. 5–15. – EDN: RAGHLD
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. 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 региона // Геофизические исследования. – 2011б. – Т. 12, № 3. – С. 22–32. – EDN: OGYNPR
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Подъём мантийных флюидов в районах очагов сильных землетрясений и крупных разломных зон: Геохимические свидетельства // Вестник НЯЦ РК. – 2005. – Вып. 2. – С. 147–155.
- Летников Ф.А. Синергетика геологических систем. – Новосибирск: Наука, 1992. – 229 с. – EDN: YYUFUL
- Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времён до 1975 г. / Под ред. Н.В. Кондорской, Н.В. Шебалина. – М.: Наука, 1977. – 536 с.
- Abers G., Nakajima J., van Keken P., Kita S., Hacker B. Thermal-petrological controls on the location of earthquakes within subducting plates // Earth and Planetary Science Letters. – 2013. – V. 369–370. – P. 178–187. – DOI: 10.1016/j.epsl.2013.03.022
- Gold T., Soter S. Fluid ascent through the solid lithosphere and its relation to earthquakes // Pure and Applied Geophysics. – 1984/1985. – V. 122. – P. 492–530. – DOI: 10.1007/BF00874614
- Husen S., Kissling E. Postseismic fluid flow after the large subduction earthquake of Antofagasta, Chile // Geology. – 2001. – V. 29, N 9. – P. 847–850. – DOI: 10.1130/0091-7613(2001)029<0847:PFFATL>2.0.CO;2
- Jung H., Green H., Dobrzhinetskaya L. Intermediate-depth earthquake faulting by dehydration embrittlement with negative volume change // Nature. – 2004. – V. 428. – P. 545–549. – DOI: 10.1038/nature02412
- Kopnichev Y.F., Sokolova I.N. Annular seismicity structures and the March 11, 2011, earthquake ($M_w=9.0$) in Northeast Japan // Doklady Earth Sciences. – 2011a. – V. 440, N 2. – P. 246–249. – DOI: 10.1134/S1028334X11090194
- Kopnichev Y.F., Sokolova I.N. Heterogeneities of the short-period S-wave attenuation field in the lithosphere of SouthWestern Japan // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. – 2021. – V. 57. – P. 1414–1421. – DOI: 10.1134/S0001433821110049
- Kopnichev Y.F., Sokolova I.N. Ring seismicity in different depth ranges before large and great earthquakes in subduction zones // Doklady Earth Sciences. – 2009a. – V. 425, N 4. – P. 539–542. – DOI: 10.1134/S1028334X09030222
- Kopnichev Y.F., Sokolova I.N. Ring-shaped seismicity structures forming before large earthquakes and the great earthquakes in the Western and Eastern Pacific // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. – 2018. – V. 54. – P. 848–858. – DOI: 10.1134/S0001433818080054
- Kopnichev Y.F., Sokolova I.N. Ring-shaped seismicity structures in the region of Southwestern Alaska: A Justified forecast of the location and magnitude of the Chignik earthquake of July 29, 2021 ($M_w=8.2$) // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. – 2022a. – V. 58. – P. 713–723. – DOI: 10.1134/S0001433822070052
- Kopnichev Yu.F., Gordienko D.D., Sokolova I.N. Space-time variations of the shear wave attenuation field in the upper mantle of seismic and low seismicity areas // Journal of Volcanology and Seismology. – 2009. – V. 3,

N 1. – P. 44–58. – DOI: 10.1134/S0742046309010059. – EDN: LLQHEP

Kopnichev Yu.F., Sokolova I.N. Characteristics of ring seismicity in different depth ranges before large and great earthquakes in the Sumatra Region // *Doklady Earth Sciences*. – 2009b. – V. 429, N 1. – P. 106–109. – DOI: 10.1134/S1028334X09080327

Kopnichev Yu.F., Sokolova I.N. Characteristics of the short-period *S*-wave attenuation field in the source zone of the strongest Tohoku earthquake of March 11, 2011 ($M_w=9.0$) // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. – 2019. – V. 55, N 8. – P. 804–815. – DOI: 10.1134/S0001433819080061

Kopnichev Yu.F., Sokolova I.N. On the correlation between seismicity characteristics and *S*-wave attenuation in the ring structures that appear before large earthquakes // *Journal of Volcanology and Seismology*. – 2010. – V. 4, N 6. – P. 396–411. – DOI: 10.1134/S0742046310060047. – EDN: OHMPQF

Kopnichev Yu.F., Sokolova I.N. Spatiotemporal variations of the *S* wave attenuation field in the source zones of large earthquakes in the Tien Shan // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. – 2003. – V. 39, N 7. – P. 568–579. – EDN: LHVEXD

Kopnichev Y.F., Sokolova I.N. Mapping heterogeneities of the short-period *S*-wave attenuation field in the lith-

osphere of Southwest Alaska // *Seismic Instruments*. – 2022b. – V. 58, N 1. – P. 99–106. – DOI: 10.3103/S0747923922070064

Müller R., Sdrolias M., Gaina C., Roest W. Age, spreading rates and spreading symmetry of the world's ocean crust // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. – 2008. – N 9. – Q04006. – DOI: 10.1029/2007GC001743

Ogawa R., Heki K. Slow postseismic recovery of geoid depression formed by the 2004 Sumatra-Andaman earthquake by mantle water diffusion // *Geophysical Research Letters*. – 2007. – V. 34. – L06313. – DOI: 10.1029/2007GL029340

Singh S.K., Suarez G. Regional variation in the number of aftershocks ($m_b \geq 5$) of large subduction-zone earthquakes ($M_w \geq 7.0$) // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1988. – V. 78, N 1. – P. 230–242. – DOI: 10.1785/BSSA0780010230

Tajima F., Kanamori H. Global survey of aftershock area expansion // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. – 1985. – V. 40. – P. 77–134. – DOI: 10.1016/0031-9201(85)90066-4

Yamazaki T., Seno T. Double seismic zone and dehydration embrittlement of the subducting slab // *Journal of Geophysical Research*. – 2003. – V. 108, N B4. – DOI: 10/1029/2002JB001918

Сведения об авторах

Копничев Юрий Фёдорович, д-р физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН), г. Москва, Россия. E-mail: yufk777@mail.ru

Соколова Инна Николаевна, д-р физ.-мат. наук, гл. науч. сотр., зав. лаб. Федерального государственного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН), г. Обнинск, Россия. E-mail: SokolovaIN@gsras.ru

Characteristics of ring-shaped seismicity at depths up to 110 km prior to large and great earthquakes in subduction zones of the Pacific

© 2023 Yu.F. Kopnichev¹, I.N. Sokolova²

¹IPE RAS, Moscow, Russia; ²GS RAS, Obninsk, Russia

Received October 18, 2023

Abstract We have been considering some seismicity characteristics at depths up to 110 km prior to 38 large and great earthquakes ($M_w=7.0-9.0$) in subduction zones of the Pacific. We revealed ring-shaped seismicity structures in three depth ranges: 0-33, 34-70 and 71-110 km. These structures are being formed during a few decades prior to large and great events with hypocenters at depths of 0-40 and 42-110 km. We call these events conditionally as shallow and deep ones correspondingly. The structures are characterized by threshold magnitude values: M_{t1} , M_{t2} and M_{t3} respectively. We analyzed differences of $M_{t1}-M_{t2}$, $M_{t2}-M_{t3}$ and $M_{t1}-M_{t3}$ values. It was established that parameters $M_{t2}-M_{t3}$ and $M_{t1}-M_{t3}$ are higher considerably for large shallow earthquakes in comparison to deep ones. Besides that, we found differences of mean $M_{t1}-M_{t2}$ values at the west and east of Pacific. We discuss the reasons of ring-shaped structures formation which most likely are connected with dehydration of the subducting plate material and deep-seated fluid migration. We estimate possibilities of depths prognosis for preparing large earthquakes using characteristics of ring-shaped seismicity structures. The data obtained are essential for shaking intensity forecast and also for tsunami danger estimate prior to large and great events in subduction zones.

Key words Shallow and deep earthquakes, ring-shaped seismicity structures, deep-seated fluids, forecast of the earthquake source depth.

For citation Kopnichev, Yu.F., & Sokolova, I.N. (2023). [Characteristics of ring-shaped seismicity at depths up to 110 km prior to large and great earthquakes in subduction zones of the Pacific]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 5(4), 41-51. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2023.4.03>. EDN: HDHWNE

References

- Abers, G., Nakajima, J., van Keken, P., Kita, S., & Hacker, B. (2013). Thermal-petrological controls on the location of earthquakes within subducting plates. *Earth and Planetary Science Letters*, 369-370, 178-187. DOI: [10.1016/j.epsl.2013.03.022](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.03.022)
- Gold, T., & Soter, S. (1984/1985). Fluid ascent through the solid lithosphere and its relation to earthquakes. *Pure and Applied Geophysics*, 122, 492-530. DOI: [10.1007/BF00874614](https://doi.org/10.1007/BF00874614)
- Husen, S., & Kissling, E. (2001). Postseismic fluid flow after the large subduction earthquake of Antofagasta, Chile. *Geology*, 29(9), 847-850. DOI: [10.1130/0091-7613\(2001\)029<0847:PFATL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<0847:PFATL>2.0.CO;2)
- Jung, H., Green, H., & Dobrzhinetskaya, L. (2004). Intermediate-depth earthquake faulting by dehydration embrittlement with negative volume change. *Nature*, 428, 545-549. DOI: [10.1038/nature02412](https://doi.org/10.1038/nature02412)
- Karakin, A.V., & Lobkovsky, L.I. (1983). [Hydrodynamics and structure of the two-phase asthenosphere]. *Doklady Akademii nauk SSSR* [Transactions (Doklady) of the USSR Academy of Sciences. Earth Science Sections], 268(2), 324-329. (In Russ.).
- Kondorskaya, N.V., & Shebalin, N.V. (Eds.). (1977). *Novyj katalog sil'nyh zemletryasenij na territorii SSSR s drevnejshih vremyon do 1975 g.* [New catalogue of strong earthquakes on the territory of the USSR from ancient times to 1975]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 536 p. (In Russ.).
- Kopnichev, Y.F., & Sokolova, I.N. (2018). Ring-shaped seismicity structures forming before large earthquakes and the great earthquakes in the Western and Eastern Pacific. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 54, 848-858. DOI: [10.1134/S0001433818080054](https://doi.org/10.1134/S0001433818080054)
- Kopnichev, Y.F., & Sokolova, I.N. (2021). Heterogeneities of the short-period S-wave attenuation field in the lithosphere of southwestern Japan. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 57, 1414-1421. DOI: [10.1134/S0001433821110049](https://doi.org/10.1134/S0001433821110049)
- Kopnichev, Y.F., & Sokolova, I.N. (2022a). Ring-shaped seismicity structures in the region of Southwestern Alaska: A Justified forecast of the location and magnitude of the Chignik earthquake of July 29, 2021

- (Mw=8.2). *Izvestiya. Atmospheric and Ocean Physics*, 58, 713-723. DOI: 10.1134/S0001433822070052
- Kopnichev, Y.F., & Sokolova, I.N. (2022b). Mapping heterogeneities of the short-period S-wave attenuation field in the lithosphere of Southwest Alaska. *Seismic Instruments*, 58(1), 99-106. DOI: 10.3103/S0747923922070064
- Kopnichev, Yu.F., & Sokolova, I.N. (2003). Spatio-temporal variations of the S wave attenuation field in the source zones of large earthquakes in the Tien Shan. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 39(7), 568-579.
- Kopnichev, Yu.F., & Sokolova, I.N. (2005). [Mantle fluids ascent in the regions of strong earthquake sources and large deep fault zones: Geochemical evidences]. *Vestnik NIaTs RK [NNC RK Bulletin]*, 2, 147-155. (In Russ.).
- Kopnichev, Yu.F., & Sokolova, I.N. (2009a). Ring seismicity in different depth ranges before large and great earthquakes in subduction zones. *Doklady Earth Sciences*, 425(4), 539-542. DOI: 10.1134/S1028334X09030222
- Kopnichev, Yu.F., & Sokolova, I.N. (2009b). Characteristics of ring seismicity in different depth ranges before large and great earthquakes in the Sumatra region. *Doklady Earth Sciences*, 429(1), 106-109. DOI: 10.1134/S1028334X09080327
- Kopnichev, Yu.F., & Sokolova, I.N. (2010). On the correlation between seismicity characteristics and S-wave attenuation in the ring structures that appear before large earthquakes. *Journal of Volcanology and Seismology*, 4(6), 396-411. DOI: 10.1134/S0742046310060047. EDN: OHMPQF
- Kopnichev, Yu.F., & Sokolova, I.N. (2011a). Annular seismicity structures and the March 11, 2011, earthquake (Mw=9.0) in Northeast Japan. *Doklady Earth Sciences*, 440(2), 246-249. DOI: 10.1134/S1028334X11090194
- Kopnichev, Yu.F., & Sokolova, I.N. (2011b). [Heterogeneity of the short-period S wave attenuation in the source zone of the Maule earthquake in Chile (27.02.2010, Mw=8.8) and its relation to seismicity and volcanism of the region]. *Geofizicheskie issledovaniia [Geophysical Research]*, 12(3), 22-32. (In Russ.). EDN: OGYNPR
- Kopnichev, Yu.F., & Sokolova, I.N. (2013). [Ring-shaped seismicity structures, being formed prior to large earthquakes with different mechanisms within intracontinental regions]. *Geofizicheskie issledovaniia [Geophysical Research]*, 14(1), 5-15. (In Russ.). EDN: RAGHLD
- Kopnichev, Yu.F., & Sokolova, I.N. (2015). [Ring-shaped seismicity structures in the region of Northern Chile and successful prediction of place and magnitude of the Iquique earthquake of 01.04.2014 (Mw=8.2)]. *Vestnik NIaTs RK [NNC RK Bulletin]*, 4, 153-159. (In Russ.).
- Kopnichev, Yu.F., & Sokolova, I.N. (2019). Characteristics of the short-period S-wave attenuation field in the source zone of the strongest Tohoku earthquake of March 11, 2011 (Mw=9.0). *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 55(8), 804-815. DOI: 10.1134/S0001433819080061
- Kopnichev, Yu.F., & Sokolova, I.N. (2020). [Ring-shaped seismicity structures in different depth ranges prior to large and great earthquakes in subduction zones of the Pacific Ocean]. *Vestnik NIaTs RK [NNC RK Bulletin]*, 3, 135-141. (In Russ.).
- Kopnichev, Yu.F., Gordienko, D.D., & Sokolova, I.N. (2009). Space-time variations of the shear wave attenuation field in the upper mantle of seismic and low seismicity areas. *Journal of Volcanology and Seismology*, 3(1), 44-58. DOI: 10.1134/S0742046309010059. EDN: LLQHEP
- Letnikov, F.A. (1992). *Sinergetika geologicheskikh system [Synergetics of geological systems]*. Novosibirsk, Russia: Nauka Publ., 229 p. (In Russ.). EDN: YYUFUL
- Müller, R., Sdrolias, M., Gaina, C., & Roest, W. (2008). Age, spreading rates and spreading symmetry of the world's ocean crust. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9, Q04006. DOI: 10.1029/2007GC001743
- Ogawa, R., & Heki, K. (2007). Slow postseismic recovery of geoid depression formed by the 2004 Sumatra-Andaman earthquake by mantle water diffusion. *Geophysical Research Letters*, 34, L06313. DOI: 10.1029/2007GL029340
- Singh, S., & Suarez, G. (1988). Regional variation in the number of aftershocks (mb≥5) of large subduction-zone earthquakes (Mw≥7.0). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 78(1), 230-242. DOI: 10.1785/BSSA0780010230
- Tajima, F., & Kanamori, H. (1985). Global survey of aftershock area expansion. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 40, 77-134. DOI: 10.1016/0031-9201(85)90066-4
- Yamazaki, T., & Seno, T. (2003). Double seismic zone and dehydration embrittlement of the subducting slab. *Journal of Geophysical Research*, 108(B4). DOI: 10/1029/2002JB001918

Information about authors

Kopnichev Yuri Fedorovich, Dr., Professor, Chief Researcher of the Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences (IPE RAS), Moscow, Russia. E-mail: yufk777@mail.ru

Sokolova Inna Nikolayevna, Dr., Chief Researcher, Head of the Laboratory of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (GS RAS), Obninsk, Russia. E-mail: SokolovaIN@gsras.ru