

УДК 550.34

Кольцевые структуры сейсмичности в районе Камчатки: возможная подготовка сильного землетрясения

© 2024 г. Ю.Ф. Копничев¹, И.Н. Соколова²

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

Поступила в редакцию 02.04.2024 г.

Аннотация. Рассматриваются некоторые характеристики сейсмичности в районе п-ова Камчатка. Установлено, что перед двумя сильными землетрясениями (05.12.1997 г., $M_w=7.8$ и 20.12.2018 г., $M_w=7.3$) здесь сформировались пары кольцевых структур сейсмичности на глубинах 0–33 и 34–70 км. Кольцевые структуры, как и в других зонах субдукции, характеризуются пороговыми значениями магнитуд (соответственно M_{p1} и M_{p2}), а также длинами больших осей ($L1$ и $L2$). Особое внимание в работе уделяется области, расположенной между 52 и 54°N, литосфера которой характеризуется аномально высоким поглощением короткопериодных поперечных волн. В этой области, где не было достаточно сильных событий более 60 лет, также выделены кольца сейсмичности (кроме того, здесь проявилась ещё и структура в диапазоне глубин 71–110 км). Ранее авторами были построены корреляционные зависимости параметров M_{p1} и M_{p2} от магнитуд M_w главных землетрясений для запада Тихого океана. Используя эти зависимости, мы оценили магнитуду возможного здесь сильного события: $M_w=8.6\pm0.2$. Кроме того, на основании анализа параметров трёх кольцевых структур сделан вывод о глубине гипоцентра готовящегося сильного землетрясения. Обсуждаются причины формирования кольцевых структур сейсмичности на разных глубинах в зонах субдукции.

Ключевые слова: литосфера, кольцевые структуры сейсмичности, сильные землетрясения, глубинные флюиды.

Для цитирования: Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Кольцевые структуры сейсмичности в районе Камчатки: возможная подготовка сильного землетрясения // Российский сейсмологический журнал. — 2024. — Т. 6, № 2. — С. 42–51. — DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2024.2.03>. — EDN: NVOLSJ

Введение

В последние 10–15 лет установлено, что перед многими сильными и сильнейшими неглубокими землетрясениями ($M_w \geq 7.0$, $h < \sim 40$ км) в литосфере зон субдукции выделяются области повышенного содержания флюидов. Такие области характеризуются относительно высоким поглощением короткопериодных поперечных волн, а также формированием кольцевых структур сейсмичности [Копничев, Соколова, 2009а,б, 2011, 2015, 2021, 2023; Kopynchev, Sokolova, 2010, 2011, 2018, 2022]. Чаще всего такие структуры, имеющие форму, близкую к эллипсам, образуются в двух диапазонах глубин: 0–33 и 34–70 км. Кроме того, для многих сильнейших землетрясений, кольцевые структуры выделяются и в слое на глубинах 71–110 км [Копничев, Соколова, 2023]. Они характеризуются пороговыми значениями магнитуд (соот-

ветственно M_{p1} , M_{p2} и M_{p3}), а также длинами больших осей ($L1$, $L2$ и $L3$). Длительность формирования таких структур в подавляющем большинстве случаев не превышает 50 лет, в среднем она близка к 25–30 годам [Копничев, Соколова, 2015; Kopynchev, Sokolova, 2011, 2018]. Важно отметить, что 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 Симеоновского землетрясения 22.07.2020 г. ($M_w=7.8$), а также Чигникского землетрясения 29.07.2021 г. ($M_w=8.2$) в районе юго-западной Аляски приведены в работах [Копничев, Соколова, 2021; Kopynchev, Sokolova, 2022]. В настоящей статье с этой целью рассматриваются некоторые характеристики поля поглощения S -волн и элементы сейсмичности в районе Камчатки.

Краткая геолого-геофизическая характеристика района исследований

В районе Курило-Камчатской дуги Тихоокеанская плита погружается под Североамериканскую со скоростью $\sim 7\text{--}8\text{ см/год}$. В работе [Bürgmann et al., 2005] приведены данные о результатах анализа скоростей деформации в районах Северных Курил и Камчатки, полученные методом GPS. Из неё следует, что на самом севере Курил наблюдаются высокие скорости скольжения океанической плиты. В то же время в районе Южной Камчатки (примерно до 54.5°N) скорости скольжения резко падают — это соответствует существованию «зацепов» (asperities), на которых происходит накопление деформаций.

В районе между 44.5 и 56.5°N , начиная с 1900 г., произошло 12 сильных неглубоких землетрясений с $M_w \geq 7.3$, в том числе шесть событий с $M_w \geq 8.0$ (табл. 1, рис. 1) [Engdahl, Villasenor, 2002]. Великое Камчатское землетрясение 4 ноября 1952 г. ($M_w=9.0$) было третьим по силе сейсмическим событием XX в., практически равным по магнитуде Суматра-Андаманскому землетрясению 26.12.2004 г. и Великому землетрясению Тохoku 11.03.2011 г. Очаг этого события имел размеры около 600 км, он породил цунами, распространившуюся по всему Тихому океану. Следует также отметить сильное землетрясение 17.05.1841 г. с $M \sim 8.4$, произошедшее в районе Южной Камчатки (рис. 1). По данным работы [Fedotov et al., 2007], средний период повторяемости событий с $M \geq 7.7$ в районе Курило-Камчатской дуги составляет 140 ± 60 лет. После 1959 г. в районах Северных Курил и Камчатки событий с $M_w > 7.8$ не зарегистрировано, в то время как в районах Южных и Центральных Курил в 1963–2007 гг. произошло пять землетрясений с $M_w > 8.0$.

Таблица 1. Сильные коровые землетрясения в районе Курило-Камчатской дуги (к северу от 44.5°N) с начала XX в.

Дата	φ , °N	λ , °E	h , км	M_w
31.07.1915	54.00	162.00	—	7.5
30.01.1917	56.50	163.00	—	7.7
03.02.1923	53.85	160.76	35	8.5
24.02.1923	55.94	162.62	35	7.2
04.11.1952	52.75	159.50	—	9.0
04.05.1959	53.37	159.66	35	8.0
13.10.1963	44.76	149.80	26	8.6
15.12.1971	56.02	163.17	22	7.8
05.12.1997	54.80	162.00	37	7.8
15.11.2006	46.59	153.27	10	8.3
13.11.2007	46.24	154.52	10	8.1
20.12.2018	55.10	164.70	17	7.3

Ранее в работе [Копничев, Соколова, 2024] были исследованы неоднородности поля поглощения короткопериодных поперечных волн в литосфере Северных Курил и Камчатки. Использовался метод, основанный на анализе отношения максимальных амплитуд в группах S_n и P_n (параметр S_n/P_n). Обработывались данные, полученные сейсмическими станциями PET и KGB (рис. 1, 2). Было показано, что поглощение S -волн гораздо выше в районах Южной и Центральной Камчатки по сравнению с районами Центральными и Северными Курил. Также установлено, что аномально высокое поглощение S -волн наблюдается в области, ограниченной координатами 52 и 54°N (рис. 2). Ниже рассматриваются некоторые характеристики кольцевых структур сейсмичности в районе Камчатки, включающем указанную область.

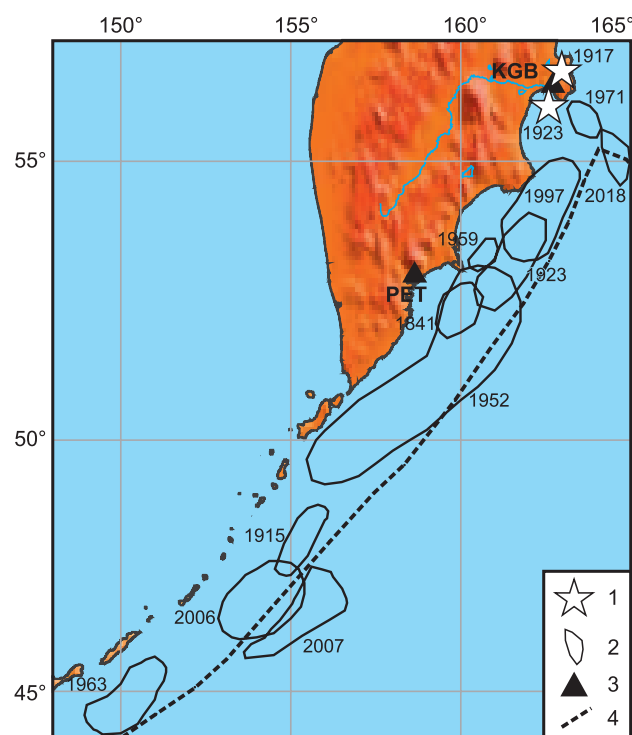


Рис. 1. Карта района исследований.

- 1 — эпицентры сильных землетрясений ($M_w=7.2\text{--}7.8$) с начала XX в.; 2 — очаговые зоны сильных и сильнейших землетрясений ($M_w=7.3\text{--}9.0$); 3 — сейсмические станции; 4 — глубоководный жёлоб

Использованные данные и методика исследований

В работе использовались каталоги NEIC Геологической службы США (за период 01.01.1973–01.03.2024 гг.) [USGS, 2024]. Были рассмотрены характеристики сейсмичности в районе

Центральной и Южной Камчатки, ограниченном координатами 52.5–56.0°N и 159.0–166.0°E.

Методика выделения кольцевых структур подробно описана в работах [Копничев, Соколова, 2015; Koprnichev, Sokolova 2018]. Следует отметить, что обычно изучаются характеристики сейсмичности в двух диапазонах глубин: 0–33 и 34–70 км. В каждом диапазоне находятся наибольшие пороговые значения магнитуд (соответственно $M_{п1}$ и $M_{п2}$), для которых выделяются кольцевые структуры. Помимо пороговых значений магнитуд, эти структуры характеризуются также длинами больших осей (соответственно $L1$ и $L2$). Кроме того, в некоторых случаях (в первую очередь для достаточно высоких значений $M_{п1}$ и $M_{п2}$) рассматриваются характеристики сейсмичности на глубинах 71–110 км [Копничев, Соколова, 2023]. В этом диапазоне кольцевые структуры характеризуются соответственно величинами $M_{п3}$ и $L3$.

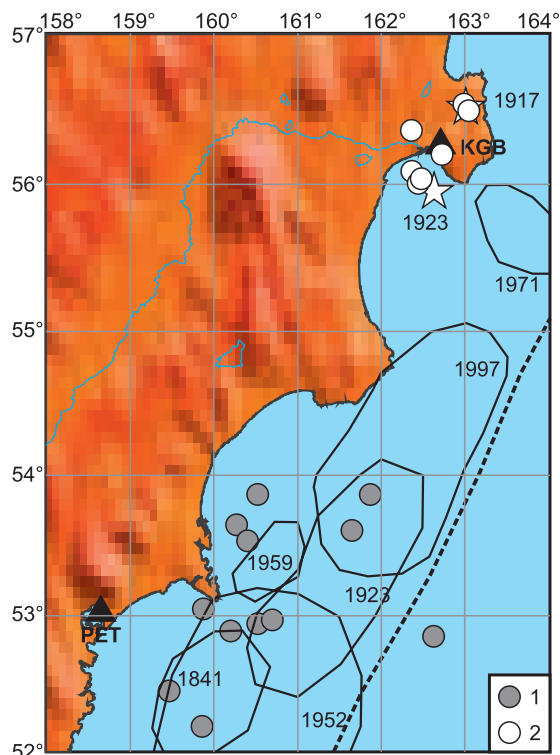


Рис. 2. Область anomalно высокого поглощения (по данным станции KGB (1)) [Копничев, Соколова, 2024].

- 1 – область относительно высокого поглощения,
2 – область относительно низкого поглощения
(по данным станции PET).

Остальные условные обозначения см. на рис. 1

Анализ данных

На рис. 3а показаны элементы неглубокой ($h=0–33$ км) сейсмичности, проявившейся

в районе, ограниченном координатами 54–56°N, 161.5–163°E. Здесь в период с 1973 по 1991 г. перед сильным землетрясением 05.12.1997 г. ($M_w=7.8$, $h=37$ км) на глубинах до 33 км сформировалась небольшая кольцевая структура, вытянутая в северо-западном направлении ($M_{п1}=5.3$, $L1\sim 70$ км). На рис. 3б представлена зависимость магнитуд событий в области кольцевой структуры от времени. Наибольшая магнитуда ($M=6.0$) соответствует событию, произошедшему в 1976 году. Следует также отметить, что наблюдается резкий рост суммарной энергии событий в 1987–1991 гг.

Рис. 3в иллюстрирует характеристики относительно глубокофокусной сейсмичности ($h=34–70$ км) в рассматриваемом районе. В данном случае проявилась более крупная, узкая кольцевая структура ($M_{п2}=4.6$, $L2\sim 110$ км), вытянутая в субмеридиональном направлении. Структура сформировалась в 1975–1995 гг., наибольшая магнитуда в ней ($M=5.9$) соответствует землетрясению 1985 года. Кольца сейсмичности пересекаются между 162.0 и 162.3°E, при этом эпицентр сильного события 05.12.1997 г. находится вблизи от западной области пересечения структур. Отметим, что в указанном районе не сформировалось кольцевых структур в диапазоне глубин 71–110 км (по крайней мере, для величин $M_{п3}\geq 4.0$).

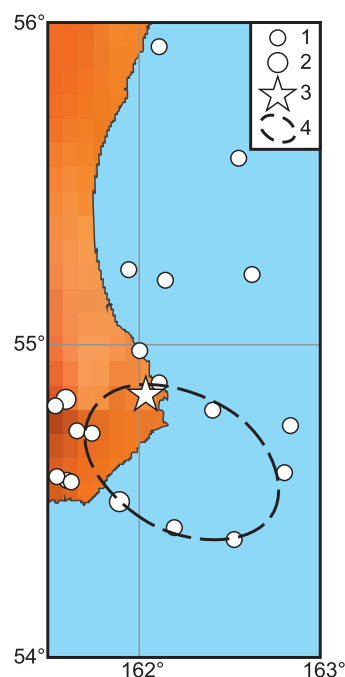


Рис. 3а. Элементы сейсмичности на глубинах до 33 км, проявившейся перед сильным землетрясением 05.12.1997 г.

- Магнитуды событий: 1 – $M=5.3–5.9$, 2 – $M=6.0–6.9$.
3 – эпицентр землетрясения 05.12.1997 г.
с $M_w=7.8$; 4 – кольцевая структура на глубинах 0–33 км (здесь и далее)

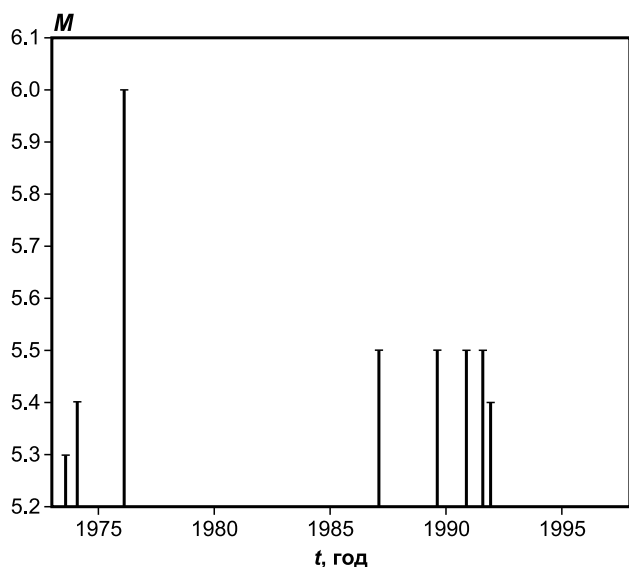


Рис. 36. Зависимость магнитуд землетрясений от времени в области кольцевой структуры на рис. 3а

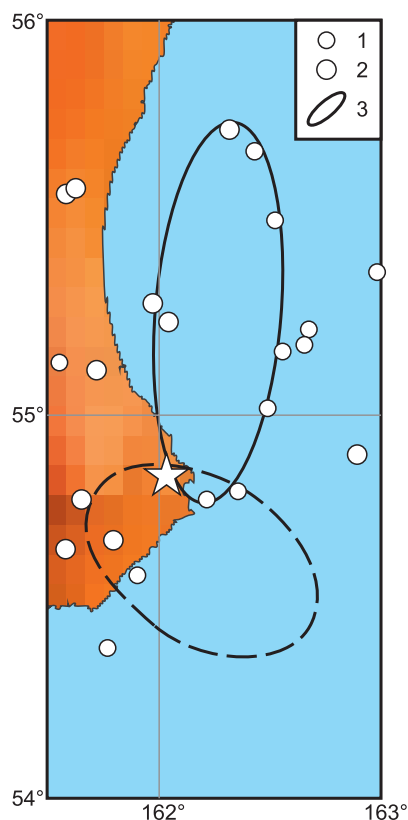


Рис. 3в. Элементы сейсмичности на глубинах 34–70 км, проявившейся перед сильным землетрясением 05.12.1997 г.

Магнитуды событий: 1 – $M=4.6–4.9$, 2 – $M=5.0–5.9$.
3 – кольцевая структура на глубинах 34–70 км (здесь и далее).
Остальные обозначения – на рис. 3а

На рис. 4а показаны элементы неглубокой сейсмичности в районе, расположенном на стыке Курило-Камчатской и Алеутской дуг,

который ограничен координатами $55–56^{\circ}\text{N}$, $163–166^{\circ}\text{E}$. Здесь перед сильным землетрясением 20.12.2018 г. ($M_w=7.3$, $h=17$ км) чётко проявилось довольно большое кольцо сейсмичности ($M_{п1}=5.0$, $L_1 \sim 130$ км), вытянутое в восток–северо-восточном направлении. Структура образовалась в 1978–2016 гг. (рис. 4б), самые сильные события произошли здесь соответственно в 1986 ($M=6.8$) и 2003 г. ($M=6.7$). Следует отметить, что зависимость $M(t)$ имеет U-образную форму, наибольшее выделение сейсмической энергии наблюдалось в 1978–1986 и 2003–2016 гг.

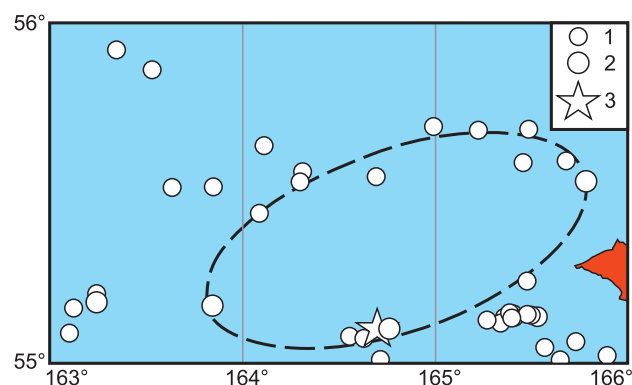


Рис. 4а. Элементы сейсмичности на глубинах до 33 км, проявившейся перед сильным землетрясением 20.12.2018 г.

Магнитуды событий: 1 – $M=5.0–5.9$, 2 – $M=6.0–6.9$. 3 – эпицентр землетрясения 20.12.2018 г. с $M_w=7.3$. Остальные обозначения – на рис. 3а

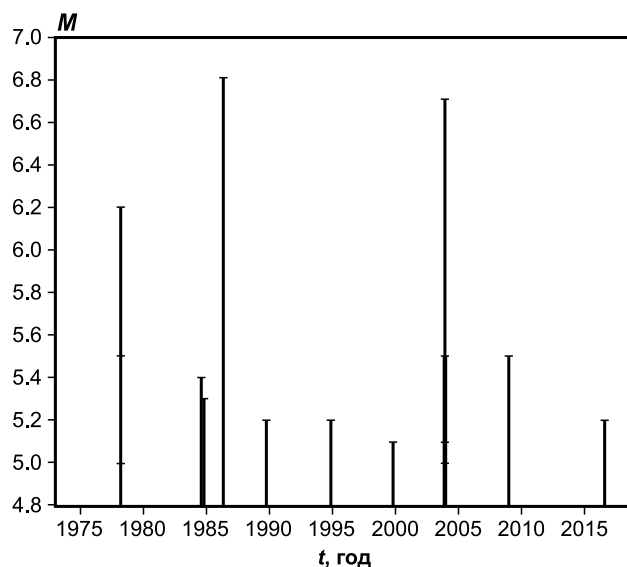


Рис. 4б. Зависимость магнитуд землетрясений от времени в области кольцевой структуры на рис. 4а

Рис. 4в иллюстрирует характеристики сейсмичности для вышеуказанного района на глубинах 34–70 км. На рисунке выделяется более короткая ($M_{п2}=4.8$, $L_2 \sim 110$ км) кольцевая

структура, ориентированная в запад–северо-западном направлении. Структура сформировалась в 1978–2016 гг., наибольшая магнитуда соответствует землетрясениям 1982 и 1984 гг. ($M=6.3$). Отметим, что мелкое и глубокое кольца сейсмичности практически касаются друг друга на юге около 55°N . При этом эпицентр сильного землетрясения находится вблизи области касания кольцевых структур. В данном случае снова не удалось выявить кольцевых структур сейсмичности на глубинах 71–110 км (для $M_{п3} \geq 4.0$).

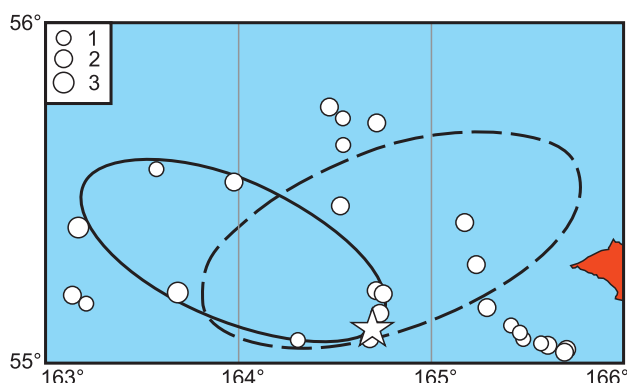


Рис. 4в. Элементы сейсмичности на глубинах 34–70 км, проявившейся перед сильным землетрясением 20.12.2018 г.

Магнитуды событий: 1 – $M=4.8–4.9$, 2 – $M=5.0–5.9$, 3 – $M=6.0–6.9$.

Остальные обозначения – на рис. 3в и 4а

Рассмотрим теперь некоторые характеристики сейсмичности в районе к востоку и северо-востоку от г. Петропавловска-Камчатского (между 52.5 и 54.0°N), где не было достаточно сильных землетрясений после 1959 г. На рис. 5а показаны элементы сейсмичности в диапазоне глубин 0–33 км. Видно, что здесь проявилась крупная кольцевая структура ($M_{п1}=5.3$, $L_1 \sim 140$ км), ориентированная в направлении на север–северо-восток. Структура сформировалась в 1973–2020 гг., наибольшая магнитуда ($M=5.9$) соответствует землетрясению 1973 г. Из рис. 5б следует, что наблюдается значительное увеличение суммарной сейсмической энергии в 1973–1990 и 2016–2020 гг.

На рис. 5в представлены элементы сейсмичности в диапазоне глубин 34–70 км. В данном случае в 1980–2023 гг. образовалась небольшая кольцевая структура ($M_{п2}=5.2$, $L_2 \sim 45$ км), вытянутая в северо-восточном направлении. Наибольшая магнитуда ($M=5.5$) соответствует землетрясению 2010 года. На востоке кольцо сейсмичности на широте $\sim 53.3^\circ\text{N}$ почти соприкасается с кольцом, сформировавшимся в диапазоне глубин 0–33 км.

В работе [Копничев, Соколова, 2023] показано, что перед достаточно сильными землетрясениями в зонах субдукции могут также выделяться кольцевые структуры на глубинах 71–110 км. Из рис. 5г следует, что в данном случае в 1981–2013 гг. четко проявилось кольцо сейсмичности, вытянутое в восток–северо-восточном направлении, с пороговым значением магнитуды $M_{п3}=4.6$ ($L_3 \sim 70$ км). Наибольшая магнитуда ($M=5.4$) здесь соответствует землетрясению 2013 г., наиболее высокие скорости выделения сейсмической энергии зарегистрированы в 1981–1984 гг. Отметим, что самое глубокое кольцо пересекается с кольцом на глубинах 34–70 км в области $\sim 53.5–53.6^\circ\text{N}$. Интересно, что расположение трёх кольцевых структур сейсмичности очень похоже на то, которое наблюдалось перед Великим землетрясением Тохоку 11.03.2011 г. ($M_w=9.0$) [Копничев, Соколова, 2023]. Вместе с тем, величина $M_{п1}$ в районе Камчатки значительно (на 0.6) ниже, чем в районе очага Тохоку.

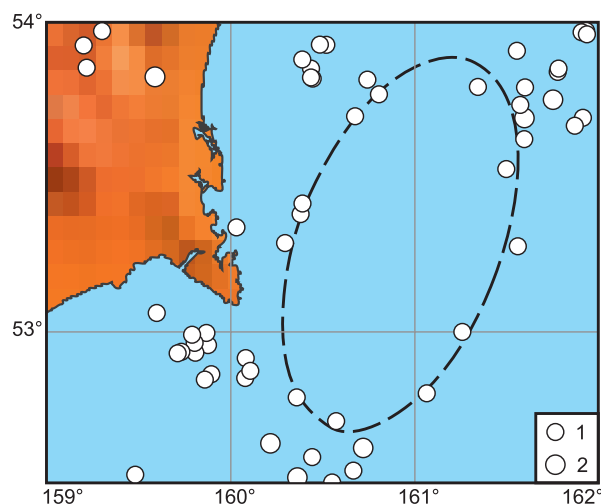


Рис. 5а. Элементы сейсмичности на глубинах 0–33 км в области между 52.5 и 54.0°N .

Магнитуды событий: 1 – $M=5.3–5.9$, 2 – $M=6.0–6.9$.

Остальные обозначения – на рис. 3а

Оценки магнитуды, положения эпицентра и глубины гипоцентра возможного сильного землетрясения по параметрам кольцевых структур

Для оценки магнитуды были использованы корреляционные зависимости пороговых значений магнитуд от энергии главных событий, полученные в работе [Копничев, Соколова, 2018] для зон субдукции на западе Тихого океана:

$$M_{п1} = -1.88 + 0.85 \cdot M_w, r = 0.89, \quad (1)$$

$$M_{п2} = -0.95 + 0.70 \cdot M_w, r = 0.94, \quad (2)$$

где r – коэффициент корреляции.

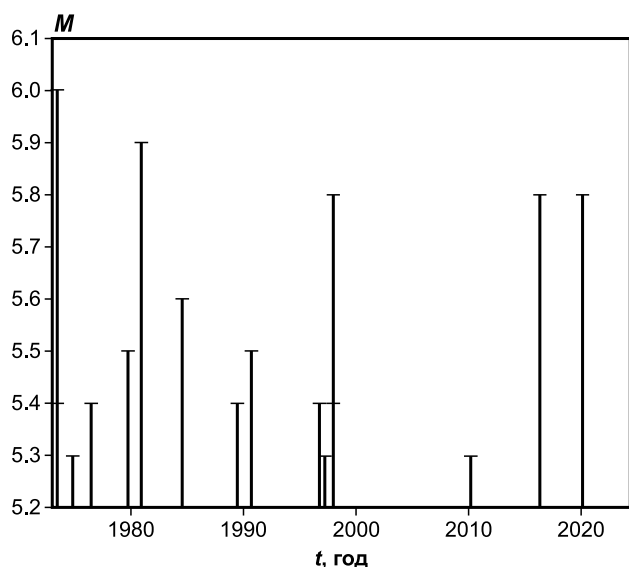


Рис. 5б. Зависимость магнитуд землетрясений от времени в области кольцевой структуры на рис. 5а

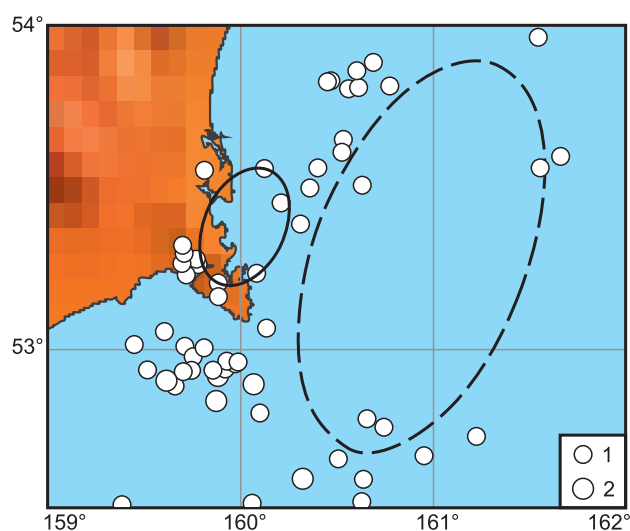


Рис. 5в. Элементы сейсмичности на глубинах 34–70 км в области между 52.5 и 54.0°N.

Магнитуды событий: 1 – $M=5.2–5.9$, 2 – $M=6.0–6.9$.
Остальные обозначения – на рис. 3а и 3в

Из выражений (1) и (2), подставляя значения $M_{п1}$ и $M_{п2}$, находим прогнозную величину магнитуды возможного сильного землетрясения: $M_w=8.6\pm0.2$. Конечно, полученную оценку следует рассматривать лишь в качестве первого приближения.

В работах [Копничев, Соколова, 2009а,б; 2015; Koprnichev, Sokolova, 2011, 2022] показано, что во многих случаях эпицентры прогнозируемых сильных землетрясений находятся вблизи областей пересечения или наибольшего сближения колец сейсмичности, формируемых на глубинах 0–33 и 34–70 км. Отсюда следует, что можно ожидать положение эпицентра землетрясения

с M_w около 8 на широтах поблизости от 53.3–53.4°N.

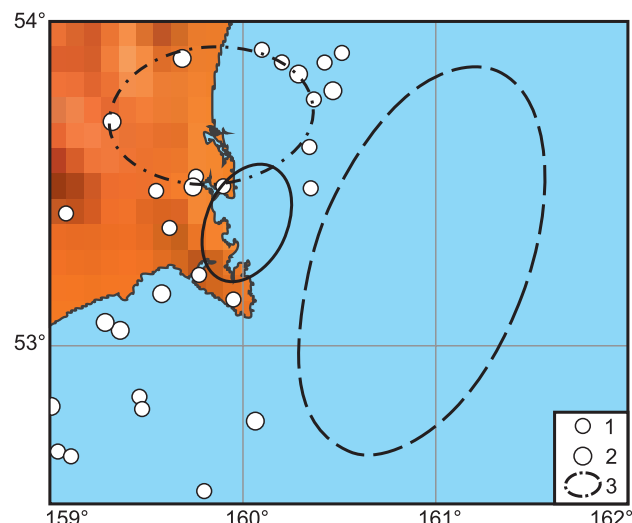


Рис. 5г. Элементы сейсмичности на глубинах 71–110 км в области между 52.5 и 54.0°N.

Магнитуды событий: 1 – $M=4.6–4.9$, 2 – $M=5.0–5.9$.
3 – кольцевая структура на глубинах 71–110 км.
Остальные обозначения – на рис. 3а и 5в

В статье [Копничев, Соколова, 2023] установлено, что пороговые значения магнитуд для колец сейсмичности существенно различаются в зависимости от глубин гипоцентров сильных землетрясений, перед которыми они формируются (при прочих равных условиях). В табл. 2 указаны области вариации величин разностей $M_{п1}-M_{п3}$ и $M_{п2}-M_{п3}$, соответствующих кольцевым структурам на западе Тихого океана для диапазонов глубин гипоцентров 10–40 и 42–110 км. Видно, что указанные величины для колец сейсмичности в районе между 52.5 и 54.0°N заведомо попадают в область, соответствующую неглубоким сильным землетрясениям.

Таблица 2. Прогнозные величины $M_{п1}-M_{п3}$ и $M_{п2}-M_{п3}$ для рассматриваемой области в районе Камчатки относительно разброса данных для запада Тихого океана

Параметр	Неглубокие события	Глубокие события	Камчатка (прогноз)
$M_{п1}-M_{п3}$	0.3–1.5	–0.3...0.5	0.7
$M_{п2}-M_{п3}$	0.3–1.0	–0.2...0.4	0.6

Обсуждение

Полученные данные свидетельствуют о том, что в районе п-ова Камчатка, так же, как и во многих других зонах субдукции, перед сильными

землетрясениями формируются кольцевые структуры сейсмичности в двух диапазонах глубин. В то же время, перед двумя сильными событиями, здесь не удалось выявить кольцевых структур на глубинах 71–110 км. Скорее всего, это связано в первую очередь с достаточно низкими величинами $M_{п3}$ (~ 4.0), для которых положение гипоцентров столь слабых событий определяется недостаточно надёжно. В этой связи заметим, что как показано в работе [Копничев, Соколова, 2023], кольца сейсмичности на глубинах 71–110 км перед неглубокими сильными землетрясениями не удалось выделить для событий с $M_w < 7.7$.

Эпицентры большинства неглубоких сильных землетрясений обычно находятся вблизи областей пересечения или наибольшего сближения кольцевых структур на глубинах 0–33 и 34–70 км. Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что мелкие кольца оконтуривают жёсткие блоки литосферы, а глубокие — относительно маловязкие блоки [Копничев, Соколова, 2011; Kопnichev, Sokolova, 2010]. На границах обоих типов блоков происходит подъем глубинных флюидов, о чём свидетельствует достаточно высокая сейсмичность по отношению к внутренним частям блоков. Как показано в работах [Husen, Kissling, 2001; Копничев, Соколова, 2003, 2005; Kопnichev, Sokolova, 2018; Yamazaki, Seno, 2003; Ogawa, Heki, 2007; Копничев и др., 2009], 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, причём уровень избыточных напряжений пропорционален мощности слоя [Каракин, Лобковский, 1983; Gold, Soter, 1984]. Эта концентрация напряжений и может приводить к подвижке при сильном землетрясении. В этой связи заметим, что в рассматриваемом районе все три кольцевые структуры сближаются в небольшой области, что может свидетельствовать об ещё большей толщине двухфазного слоя по сравнению со случаем пересечения двух колец сейсмичности на глубинах до 70 км. Следует заметить, что формирование кольцевых структур служит отражением процессов самоорганизации геологических систем, в конечном счёте приводящих к уменьшению потенциальной энергии Земли [Летников, 1992].

Полученные ранее данные свидетельствуют о том, что во многих случаях наблюдается резкий

рост уровня сейсмичности в областях кольцевых структур в интервалах времени до 10–15 лет перед сильными землетрясениями [Копничев Соколова, 2009б; Копничев и др., 2009; Kопnichev, Sokolova; 2011, 2022]. Аналогичный вывод может быть сделан и на основании анализа данных, приведённых на рис. 3б и 4б. Учитывая, что начало скачкообразного подъёма выделения сейсмической энергии в структуре, приведённой на рис. 5а, приходится на 2016 г., можно предполагать, что наиболее вероятное время реализации сильнейшего землетрясения в районе между 52.5–54.0°N, основанное на анализе параметров колец сейсмичности, соответствует интервалу 2026–2031 гг.

Новые данные позволяют сделать вывод, что к востоку и северо-востоку от г. Петропавловск-Камчатский может готовиться достаточно сильное сейсмическое событие с $M_w \sim 8$, гипоцентр которого должен находиться на сравнительно небольших глубинах (до 40 км). По аналогии с данными для многих землетрясений в зонах субдукции, можно ожидать, что эпицентр такого события будет располагаться вблизи области наибольшего сближения кольцевых структур на глубинах 0–33 и 34–70 км (на расстоянии ~ 140 км от самого крупного города Камчатки).

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., 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. — EDN: JVTVQX
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Кольцевая сейсмичность в разных диапазонах глубин перед сильными и сильнейшими землетрясениями в зонах субдукции // Доклады РАН. — 2009а. — Т. 425, № 4. — С. 539–542. — EDN: JXOZMV
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Кольцевые структуры сейсмичности в районе северного Чили и успешный прогноз места и магнитуды 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, сформировавшиеся в районе Аляски: оправдавшийся прогноз места и магнитуды Симеонского землетрясения 22 июля 2020 г. ($M_w=7.8$) // Российский сейсмологический журнал. — 2021. — Т. 3, № 3. — С. 50–60. — DOI: 10.35540/2686-7907.2021.3.03. — EDN: QUJNGX
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Неоднородности поля поглощения короткопериодных S-волн в районе очага

- землетрясения Мауле (Чили, 27.02.2010 г., $M_w=8.8$) и их связь с сейсмичностью и вулканизмом региона // Геофизические исследования. — 2011. — Т. 12, № 3. — С. 22–33. — EDN: OGYNPR
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Неоднородности поля поглощения короткопериодных S -волн в районах Курил и Камчатки, и их связь с сильными и сильнейшими землетрясениями // Вулканология и сейсмология. — 2024. — № 1. (В печати).
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Подъем мантийных флюидов в районах очагов сильных землетрясений и крупных разломных зон: геохимические свидетельства // Вестник НЯЦ РК. — 2005. — Вып. 2. — С. 147–155.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Пространственно-временные вариации поля поглощения S -волн в очаговых зонах сильных землетрясений Тянь-Шаня // Физика Земли. — 2003. — № 7. — С. 35–47. — EDN: ООHBВН
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Характеристики кольцевой сейсмичности в разных диапазонах глубин перед сильными и сильнейшими землетрясениями в районе Суматры // Доклады РАН. — 2009б. — Т. 429, № 1. — С. 106–109. — EDN: KYGMRP
- 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: 10.35540/2686-7907.2023.4.03. — EDN: HDHWNE
- Летников Ф.А. Синергетика геологических систем. — Новосибирск: Наука, 1992. — 229 с.
- Bürgmann R., Kogan M., Steblov M., Hilley G., Levin V., Apel E. Interseismic coupling and asperity distribution along the Kamchatka subduction zone // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. — 2005. — V. 110. — B07405. — DOI: 10.1029/2005JB003648
- Engdahl E., Villaseñor A. Global seismicity: 1990-1999 // International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Part A / Lee H.K., Kanamori H., Jennings P.C., et al. (Eds.). — Amsterdam: Academic Press, 2002. — P. 665–690.
- Fedotov S.A., Solomatin A.V., Chernyshev S.D. A long-term earthquake forecast for the Kuril-Kamchatka island arc for the period 2006-2011 and a successful forecast of the $M_S=8.2$ Middle Kuril Earthquake of November 15, 2006 // Journal of Volcanology and Seismology. — 2007. — V. 1, N 3. — С. 143–163. — DOI: 10.1134/S0742046307030013. — EDN: LKMVEL
- Gold T., Soter S. Fluid ascent through the solid lithosphere and its relation to earthquakes // Pure and Applied Geophysics. — 1984. — 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
- Kopnitshev Y.F., Sokolova I.N. Annular seismicity structures and the March 11, 2011, earthquake ($M_w=9.0$) in Northeast Japan // Doklady Earth Sciences. — 2011. — V. 440, N 1. — P. 1324–1327. — DOI: 10.1134/S1028334X11090194. — EDN: PECMHT
- Kopnitshev 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, Iss. 8. — P. 848–858. — DOI: 10.1134/S0001433818080054. — EDN: DQTVRS
- Kopnitshev 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. — 2022. — V. 58, Iss. 7. — P. 713–723. — DOI: 10.1134/S0001433822070052
- Kopnitshev 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
- 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
- USGS. Search Earthquake Catalog. Earthquakes. [Site]. — URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>. (Дата обращения 01.03.2024).
- 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 Федорович, 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

Ring-shaped seismicity structures in the region of Kamchatka: possible preparation for great earthquake

© 2024 Yu.F. Kopnichev¹, I.N. Sokolova²

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

Received April 2, 2024

Abstract We have been studying some seismicity characteristics in the region of Kamchatka region. 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 1973-2018 prior to large earthquakes (05.12.1997 г., $M_w=7.8$ and 20.12.2018, $M_w=7.3$). Ring-shaped structures are characterized by threshold magnitude values (M_{t1} and M_{t2} correspondingly) and also big axes length (L_1 and L_2). Ring-shaped structures were identified in the area to the east and northeast of Petropavlovsk-Kamchatskiy city, where no great earthquakes have occurred during more than 60 years (ring-shaped structure was identified also in the depth range of 71-110 km here). Earlier, correlation dependences of M_{t1} and M_{t2} parameters on M_w values of major earthquakes for the west of Pacific were creating. Using these dependencies, the magnitude of possible great earthquake in this area was estimated as $M_w=8.6\pm 0.2$. Besides that, a conclusion on the source depth of such event was drawing on the base of the analysis of three ring-shaped structures. The reasons for ring-shaped structures formation in different depth ranges of the subduction zones are discussing.

Keywords Lithosphere, ring-shaped seismicity structures, large earthquakes, deep-seated fluids.

For citation Kopnichev, Yu.F., & Sokolova, I.N. (2024). [Ring-shaped seismicity structures in the region of Kamchatka: possible preparation for great earthquake]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 6(2), 42-51. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2024.2.03>. EDN: NVOLSJ

References

- Bürgmann R., Kogan M., Steblov M., Hilley G., Levin V., & Apel E. (2005). Interseismic coupling and asperity distribution along the Kamchatka subduction zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110, B07405. DOI: [10.1029/2005JB003648](https://doi.org/10.1029/2005JB003648)
- Engdahl, E.R., & Villaseñor, A. (2002). Global Seismicity: 1900-1999. In: Lee, H.K., Kanamori, H., Jennings, P.C., et al. (Eds.). *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Part A* (pp. 665-690). Amsterdam, Netherlands: Academic Press.
- Fedotov, S.A., Solomatin, A.V., & Chernyshev, S.D. (2007). A long-term earthquake forecast for the Kuril-Kamchatka island arc for the period 2006-2011 and a successful forecast of the MS=8.2 Middle Kuril Earthquake of November 15, 2006. *Journal of Volcanology and Seismology*, 1(3), 143-163. DOI: [10.1134/S0742046307030013](https://doi.org/10.1134/S0742046307030013). EDN: LKMVEL
- Gold, T., & Soter, S. (1984). 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:PFFATL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<0847:PFFATL>2.0.CO;2)
- 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.).
- 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(8), 848-858. DOI: [10.1134/S0001433818080054](https://doi.org/10.1134/S0001433818080054). EDN: DQTVRS
- Kopnichev, Y.F., & Sokolova, I.N. (2022). Ring-shaped seismicity structures in the region of South-western Alaska: A Justified forecast of the location and magnitude of the Chignik earthquake of July 29, 2021 ($M_w=8.2$). *Izvestiya. Atmospheric and Ocean Physics*, 58(7), 713-723. DOI: [10.1134/S0001433822070052](https://doi.org/10.1134/S0001433822070052)
- 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*, 425A(3), 448-450. 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(8), 1385-1388. 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(1), 1324-1327. DOI: 10.1134/S1028334X11090194. EDN: PECMHT
- 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. (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. (2021). [Ring-shaped seismicity structures, being formed in the Alaska region: Justified prediction of the place and magnitude of the Simeonof earthquake of July 22, 2020 (Mw 7.8)]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 3(3), 50-60. (In Russ.). DOI: 10.35540/2686-7907.2021.3.03. EDN: QUJNGX
- 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: 10.35540/2686-7907.2023.4.03. EDN: HDHWNE
- Kopnichev, Yu.F., & Sokolova, I.N. (2024). Inhomogeneities of the absorption field of short-period S-waves in the Kuril and Kamchatka regions, and their connection with strong and strongest earthquakes. *Journal of Volcanology and Seismology*, 18 (In print).
- 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 sistem* [Synergetics of geological systems]. Novosibirsk, Russia: Nauka Publ., 229 p. (In Russ.). EDN: YYUFUL
- 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
- USGS. Search Earthquake Catalog. Earthquakes. (2019). U.S. Geological Survey National Earthquake Information Center, Federal Center Denver, Colorado. Retrieved from <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>
- Yamazaki, T., & Seno, T. (2003). Double seismic zone and dehydration embrittlement of the subducting slab. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 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