

УДК 550.34

КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ В РАЙОНЕ ЮЖНОЙ КАМЧАТКИ: ВОЗМОЖНАЯ ПОДГОТОВКА СИЛЬНЕЙШЕГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

© 2025 г. Ю. Ф. Копничев^{1,*}, И. Н. Соколова^{2,**}

¹Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

²ФИЦ Единая геофизическая служба РАН, г. Обнинск, Россия

*E-mail: yufk777@mail.ru

**E-mail: sokolovain@gsras.ru

Поступила в редакцию 16.10.2024 г.

После доработки 29.11.2024 г.

Принята к публикации 25.12.2024 г.

Рассматриваются некоторые характеристики сейсмичности в районе Южной Камчатки. Исследованы характеристики облака афтершоков сильного землетрясения 17.08.2024 г. ($M_w = 7.0$). Показано, что в районе Южной Камчатки сформировались кольцевые структуры сейсмичности в трех диапазонах глубин: 0–33, 34–70 и 71–110 км. Как и в других зонах субдукции, структуры характеризуются пороговыми значениями магнитуд (соответственно $M_{п1}$, $M_{п2}$ и $M_{п3}$), а также длинами больших осей (L_1 , L_2 и L_3). Эпицентры землетрясения 17.08.2024 г. и его наиболее сильных афтершоков попадают на выделенную здесь неглубокую кольцевую структуру ($M_{п1} = 5.3$), что подтверждает предположение о подготовке в районе Южной Камчатки сильного землетрясения.

Ранее были построены корреляционные зависимости параметров $M_{п1}$ и $M_{п2}$ от магнитуд M_w сильных землетрясений для запада Тихого океана (в диапазоне $M_w = 7.0–9.0$). Используя эти зависимости, мы оценили магнитуду возможного здесь сильнейшего события: $M_w = 8.6 \pm 0.2$. Обсуждаются причины формирования кольцевых структур сейсмичности на разных глубинах в зонах субдукции.

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

DOI: 10.31857/S0002333725020055, EDN: DLIRYS

ВВЕДЕНИЕ

В последние 15 лет установлено, что перед многими сильными и сильнейшими неглубокими землетрясениями ($M_w \geq 7.0$, $h \lesssim 40$ 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, 2011а; 2011б; 2015; 2018; 2021; 2022; 2023; 2024а]. Следует отметить, что подобные структуры ранее были выделены в земной коре некоторых континентальных районов [Соболев, 1993]. В работах

авторов было установлено, что такие структуры часто формируются перед сильными и сильнейшими землетрясениями в зонах субдукции. Длительность формирования указанных структур в подавляющем большинстве случаев не превышает 50 лет, в среднем она близка к 25–30 годам [Копничев, Соколова, 2011а; 2015; 2018]. Существенно, 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. ($M_w = 8.2$) по пара-

метрам кольцевых структур в районе Юго-Западной Аляски приведены в работах [Копничев, Соколова, 2021; 2022]. В настоящей статье с этой целью рассматриваются некоторые элементы сейсмичности в районе Южной Камчатки.

КРАТКАЯ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

В районе Курило-Камчатской дуги Тихоокеанская плита погружается под Североамериканскую со скоростью $\sim 7\text{--}8$ см/год. В работе [Bürgmann et al., 2005] приведены данные о результатах анализа скоростей деформации в районах Северных Курил и Камчатки, полученных методом GPS. Из нее 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 50° и 55°N , начиная с 1900 г., произошло 3 сильнейших неглубоких землетрясения с $M_w \geq 8.0$ (табл. 1, рис. 1) [Engdahl, Villasenor, 2002]. Великое Камчатское землетрясение 04.11.1952 г. ($M_w = 9.0$) было третьим по силе сейсмическим событием XX века, 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, распространившееся 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 [Федотов и др., 2007], средний период повторяемости событий с $M \geq 7.7$ в районе Курило-Камчатской дуги составляет 140 ± 60 лет. После 1959 г. в районе Южной Камчатки не зарегистрировано событий с $M_w > 7.8$, в то время как в районах Южных и Центральных Курил в 1963–2007 гг. произошло 5 землетрясений с $M_w > 8.0$.

Ранее [Копничев, Соколова, 2024б] были исследованы неоднородности поля поглощения короткопериодных поперечных волн в литосфере Северных Курил и Камчатки. Использовался метод, основанный на анализе отноше-

Таблица 1. Сильнейшие землетрясения в районе Южной Камчатки (в области $50^\circ\text{--}55^\circ \text{N}$, с начала XX-го века)

Дата	$\varphi^\circ \text{N}$	$\lambda^\circ \text{E}$	h , км	M_w
03.02.1923	53.85	160.76	35	8.5
04.11.1952	52.75	159.50	—	9.0
04.05.1959	53.37	159.66	35	8.0
05.12.1997	54.80	162.00	37	7.8

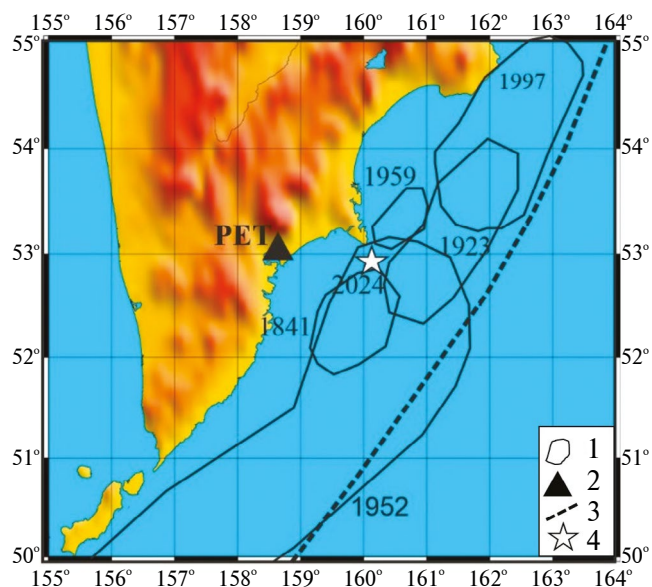


Рис. 1. Карта района исследований: 1 — очаговые зоны сильных и сильнейших землетрясений ($M_w = 7.8\text{--}9.0$); 2 — сейсмическая станция; 3 — глубоководный желоб; 4 — эпицентр Шипунского землетрясения 17.08.2024 г.

ния максимальных амплитуд в группах S_n и P_n (параметра S_n/P_n). Обработывались данные, полученные сейсмическими станциями Петропавловск (PET) и Крутоберегово (КГВ). Указанные станции расположены соответственно вблизи города Петропавловск-Камчатский (рис. 1) и около широты 56°N . Показано, что поглощение S -волн гораздо выше в районах Южной и Центральной Камчатки по сравнению с районами Центральных и Северных Курил. Установлено, что аномально высокое поглощение S -волн наблюдается в области, ограниченной координатами 52°N и 54°N . Ниже рассматриваются некоторые характеристики кольцевых структур сейсмичности в указанной области Камчатки.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе использовались каталоги NEIC Геологической службы США (за период 01.01.1973–01.10.2024 гг.) [USGS, 2024]. Мы рассматривали характеристики сейсмичности в области Южной Камчатки, ограниченной координатами 52.5° – 54° N и 159° – 162° E.

Методика выделения кольцевых структур подробно описана в работах [Копничев, Соколова, 2015; 2018]. Здесь мы только заметим, что обычно изучаются характеристики сейсмичности в двух диапазонах глубин: 0–33 и 34–70 км. Выбор величины 33 км в качестве нижней границы первого диапазона отчасти связан с тем, что нередко она приписывается коровым землетрясениям, для которых глубины гипоцентров оцениваются с довольно большой погрешностью. В то же время для более глубоких событий этот параметр может определяться точнее благодаря анализу фаз sP и pS . По нашему мнению, разделение сейсмичности на два указанных диапазона может также оправдываться довольно большой мощностью соответствующих слоев литосферы.

В каждом диапазоне находятся наибольшие пороговые значения магнитуд (соответственно $M_{п1}$ и $M_{п2}$), для которых выделяются кольцевые структуры. Помимо пороговых значений магнитуд, 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 глубин кольцевые структуры характеризуются соответственно параметрами $M_{п3}$ и $L3$.

Отметим, что для неглубоких событий величины $M_{п1}$ всегда на 2–3 единицы меньше величин M_w соответствующих сильных землетрясений. В случае, когда на основании анализа сейсмичности могут быть выделены две кольцевые структуры с одинаковыми значениями $M_{п1}$ или $M_{п2}$, выбирается кольцо с большей величиной L или с большим количеством точек, по которым оно прослеживается.

АНАЛИЗ ДАННЫХ

Рассмотрим некоторые характеристики сейсмичности в области, расположенной к востоку

и северо-востоку от г. Петропавловск-Камчатский (между 52.5° и 54.0° N), где не было достаточно сильных землетрясений после 1959 г. Мы разобьем эти данные на две группы по времени: до довольно сильного Шипунского землетрясения 17.08.2024 г. ($M_w = 7.0$, $h = 29$ км) и начиная с этой даты. На рис. 2 показаны элементы сейсмичности в диапазоне глубин 0–33 км, проявившиеся в первой группе. Видно, что здесь образовалась крупная кольцевая структура ($M_{п1} = 5.3$, $L1 \sim 140$ км), ориентированная в направлении на северо–северо-восток. Структура сформировалась в 1973–2020 гг., наибольшая магнитуда ($M = 6.0$) соответствует землетрясению 1973 г. Из рис. 3 следует, что наблюдается значительное увеличение суммарной сейсмической энергии в 1973–1990 гг. и 2016–2020 гг.

На рис. 4 представлены данные о сейсмичности в диапазоне глубин 34–70 км (в первой группе событий). В данном случае в 1980–2023 гг. образовалась небольшая кольцевая структура ($M_{п2} = 5.2$, $L2 \sim 45$ км), вытянутая в северо-восточном направлении. Наибольшая магнитуда ($M = 5.5$) соответствует землетрясению 2010 г. На востоке кольцо сейсмичности на широте $\sim 53.3^{\circ}$ N почти соприкасается с кольцом, сформировавшимся в диапазоне глубин 0–33 км.

На рис. 5 показаны элементы сейсмичности в рассматриваемом районе, проявившиеся

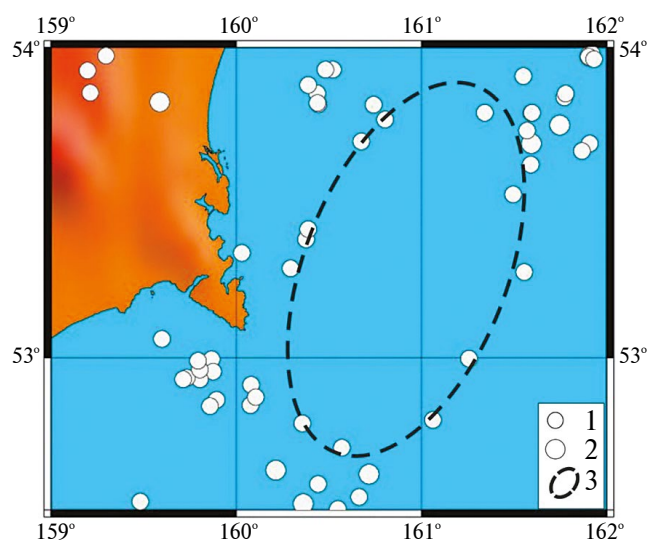


Рис. 2. Элементы сейсмичности на глубинах 0–33 км в области между 52.5° и 54° N (в первой группе событий). Магнитуды событий: 1 — $M = 5.3$ – 5.9 ; 2 — $M = 6.0$ – 6.9 ; 3 — кольцевая структура.

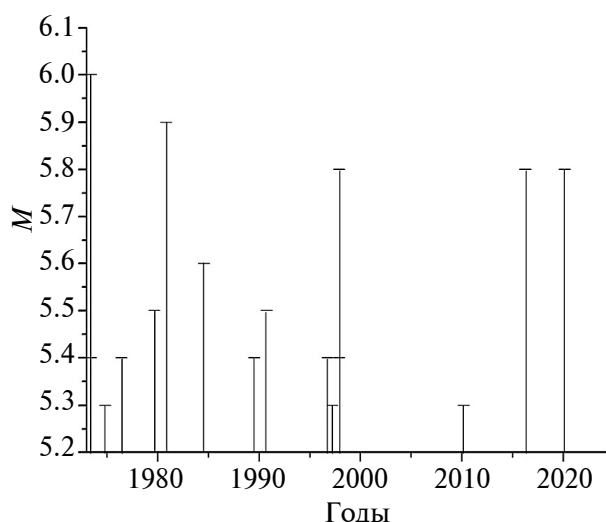


Рис. 3. Зависимость магнитуд землетрясений от времени в области кольцевой структуры на рис. 2.

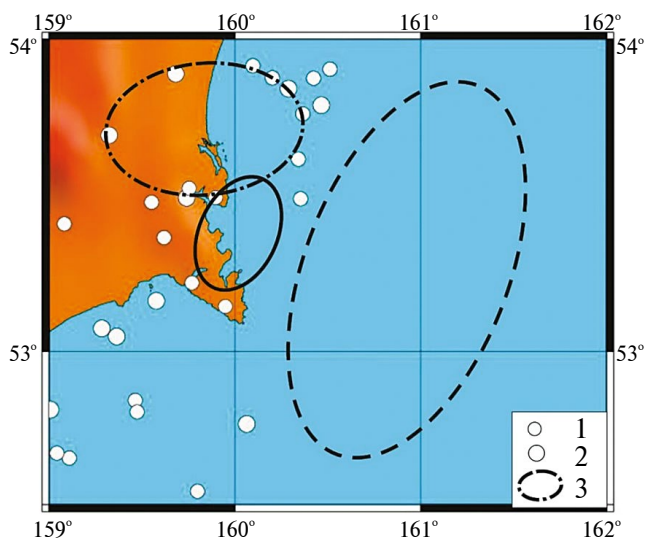


Рис. 5. Элементы сейсмичности на глубинах 71–110 км в области между 52.5° и 54° N. Магнитуды событий: 1 — $M = 4.6–4.9$; 2 — $M = 5.0–5.9$; 3 — кольцевая структура на глубинах 71–110 км. Остальные обозначения — на рис. 2 и рис. 4.

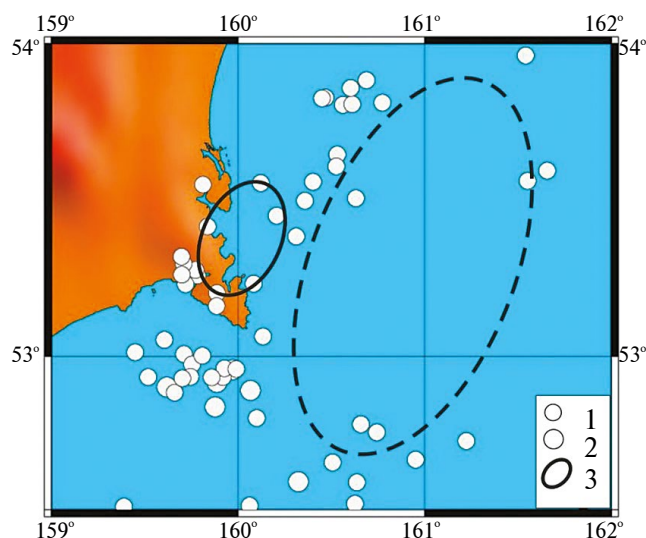


Рис. 4. Элементы сейсмичности на глубинах 34–70 км в области между 52.5° и 54° N. Магнитуды событий: 1 — $M = 5.2–5.9$; 2 — $M = 6.0–6.9$; 3 — глубокая кольцевая структура. Остальные обозначения — на рис. 2.

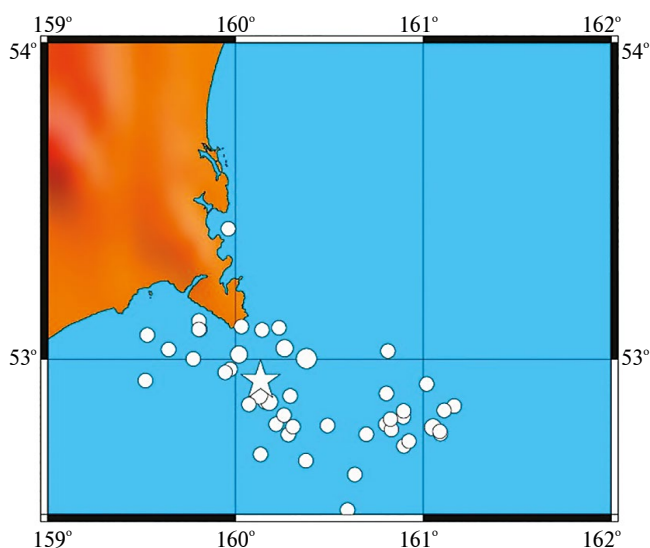


Рис. 6. Облако афтершоков Шипунского землетрясения 17.08.2024 до 01.10.2024 гг. ($M \geq 4.1$). Звездочка — эпицентр этого события.

в диапазоне глубин 71–110 км (в первой группе событий). В данном случае образовалась кольцевая структура с $M_{п3} = 4.6$ и $L_3 \sim 70$ км, вытянутая в субширотном направлении.

На рис. 6 представлено облако афтершоков Шипунского землетрясения размером ~ 110 км, простирающееся в запад–северо-западном направлении. Использована информация о параметрах афтершоков из каталога NEIC Геологической службы США [USGS, 2024]. Глубины собы-

тий варьируются в диапазоне 14–72 км (рис. 7). Большинство афтершоков ($\sim 59\%$) расположено на глубинах 20–40 км, вместе с тем значительное количество ($\sim 37\%$) — в диапазоне 40–72 км. Важно отметить, что эпицентры этого события и его сильнейших афтершоков ($M = 5.3–6.0$) попадают на неглубокую кольцевую структуру, сформировавшуюся до 17.08.2024 г. (рис. 8). Здесь мы учитываем особенности разрабо-

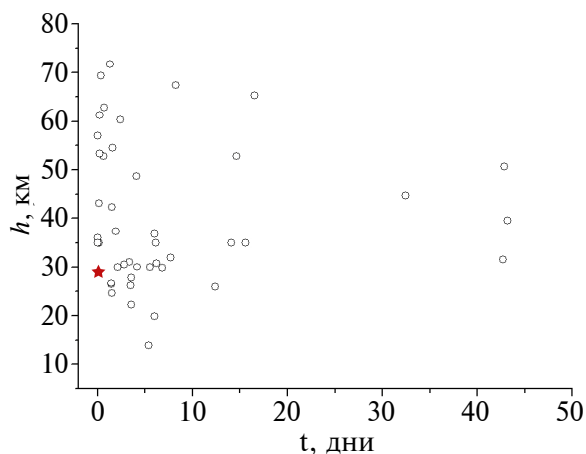


Рис. 7. Глубины афтершоков Шипунского землетрясения с $M \geq 4.1$ во времени (с 17.08 по 30.09 2024 г.). Звездочка — главное событие.

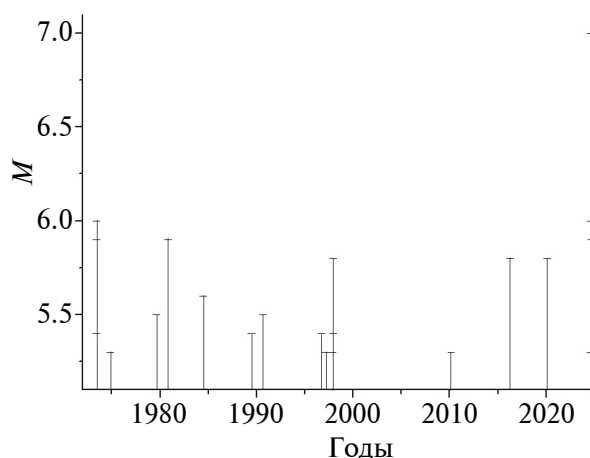


Рис. 9. Зависимость магнитуд землетрясений от времени в области кольцевой структуры на рис. 8.

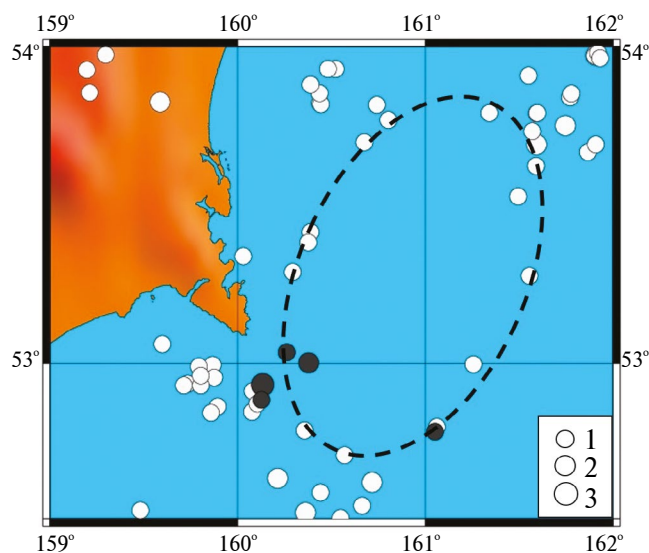


Рис. 8. Неглубокая кольцевая структура, сформировавшаяся после Шипунского землетрясения 17.08.2024 г. (с учетом первой (белые кружки) и второй групп событий (залитые кружки)). Градации M : 1 — 5.3–5.9; 2 — 6.0–6.9; 3 — 7.0.

танной ранее методики выделения кольцевых структур, согласно которой структура считается сформированной, если ее ширина не превышает $1/4$ длины малой оси соответствующего эллипса [Копничев, Соколова, 2018].

Интересно, что при учете второй группы событий кольца сейсмичности на глубинах 34–70 и 71–110 км после Шипунского землетрясения не изменились.

Рис. 9 иллюстрирует зависимость магнитуд неглубоких событий в области кольцевой

структуры с учетом Шипунского землетрясения и его сильнейших афтершоков (до 01.10.2024 г.). Наблюдается резкий рост суммарной энергии событий в 2016–2024 гг.

ОЦЕНКИ МАГНИТУДЫ, ПОЛОЖЕНИЯ ЭПИЦЕНТРА И ГЛУБИНЫ ГИПОЦЕНТРА ВОЗМОЖНОГО СИЛЬНЕЙШЕГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ПО ПАРАМЕТРАМ КОЛЬЦЕВЫХ СТРУКТУР

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

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

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

где r — коэффициент корреляции.

Из выражений (1) и (2), подставляя значения $M_{п1}$ и $M_{п2}$, находим прогнозную величину магнитуды возможного сильного землетрясения: $M_w = 8.6 \pm 0.2$. Конечно, полученную оценку следует рассматривать лишь в качестве первого приближения.

Из публикаций [Копничев, Соколова, 2011а; 2015; 2022] следует, 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 положения эпицентра землетрясения с M_w более 8 на широтах поблизости от 53.5°–53.6° N.

В работе [Копничев, Соколова, 2023] показано, 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 области между 52.5° и 54° N заведомо попадают в интервалы, соответствующие 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 Камчатки, так же, как и во многих других зонах субдукции, формируются кольцевые структуры сейсмичности в трех диапазонах глубин. Эпицентры большинства неглубоких сильных землетрясений 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 жесткие блоки литосферы, а глубокие — относительно мало вязкие блоки, в которых, помимо твердой фазы, присутствует заметная доля флюидов [Копничев, Соколова, 2010; 2011б]. На границах обоих типов блоков происходит подъем глубинных флюидов, о чем свидетельствует достаточно высокая сейсмичность по отношению к внутренним частям блоков (как показано в работах [Husen, Kissling, 2001; Копничев и др., 2009; Копничев, Соко-

лова, 2018; Yamazaki, Seno, 2003; Ogawa, Heki, 2007], подъем глубинных 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. В случае, если флюиды формируют связную сеть, на кровле такого слоя наблюдается концентрация напряжений, причем уровень избыточных напряжений пропорционален мощности слоя [Каракин, Лобковский, 1982; Gold, Soter, 1984/1985]. 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 о еще большей толщине двухфазного слоя по сравнению со случаем возможного пересечения двух колец сейсмичности на глубинах до 70 км. Кроме того, значительное количество глубоких афтершоков Шипунского землетрясения (рис. 7), которые произошли за короткий отрезок времени и связаны с миграцией флюидов, также может облегчать подготовку сильнейшего события. Следует заметить, что формирование кольцевых структур и реализация глубоких афтершоков служат отражением процессов самоорганизации геологических систем, в конечном счете 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 и др., 2009; Копничев, Соколова, 2011а; 2022]. Учитывая, что начало скачкообразного подъема выделения сейсмической энергии в структуре, приведенной на рис. 8, приходится на 2016 г., можно предполагать, что наиболее вероятное время реализации сильнейшего землетрясения в области между 52.5° и 54° N, основанное на анализе параметров колец сейсмичности, соответствует интервалу 2026–2031 гг.

Полученные данные позволяют сделать вывод, что к востоку и северо-востоку от г. Петропавловск-Камчатский может готовиться достаточно сильное сейсмическое событие с $M_w > 8$, гипоцентр которого должен находиться на сравнительно небольших глубинах (до 40 км). По анало-

гии 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. С учетом предполагаемого времени подготовки сейсмического события в этой области целесообразно проводить мониторинг различных геофизических полей и геохимических параметров глубинных флюидов с целью среднесрочного прогноза возможного сильного землетрясения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (в рамках государственного задания ИФЗ РАН по теме FMWU-2022-0003 и государственного задания ФИЦ ЕГС РАН № 075-00604-25-00).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Каракин А.В., Лобковский Л.И. Гидродинамика и структура двухфазной астеносферы // Докл. АН СССР. 1982. 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 слабосейсмических районах // Вулканология и сейсмология. 2009. № 1. С. 49–64.
- 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. 2010. № 6. С. 34–51.
- 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 землетрясения Мауле (Чили, 27.02.2010, $M_w = 8.8$) и их связь с сейсмичностью и вулканизмом // Геофизические исследования. 2011б. Т. 12. № 3. С. 22–33.
- 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, формирующиеся перед сильными и сильнейшими землетрясениями на западе и востоке Тихого океана // Геофизические процессы и биосфера. 2018. Т. 17. № 1. С. 109–124.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Кольцевые структуры сейсмичности, сформировавшиеся в районе Аляски: оправдавшийся прогноз места и магнитуды Симеоновского землетрясения 22 июля 2020 г. ($M_w = 7.8$) // Российский сейсмологический журнал. 2021. Т. 3. № 3. С. 50–60. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.3.03>
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Кольцевые структуры сейсмичности в районе Юго-Западной Аляски: оправдавшийся прогноз места и магнитуды Чигникского землетрясения 29.07.2021 г. ($M_w = 8.2$) // Геофизические процессы и биосфера. 2022. Т. 21. № 1.
- 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.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Кольцевые структуры сейсмичности в районе Камчатки: возможная подготовка сильного землетрясения // Российский сейсмологический журнал. 2024а. Т. 6. № 2. С. 42–51. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2024.2.03>. EDN: NVOLSJ
- 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. 2024б. № 1. С. 22–35. <https://doi.org/10.31857/S0203030624010034>
- Летников Ф.А. Синергетика геологических систем. Новосибирск: Наука. 1992. 229 с.
- Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука. 1993. 313 с.
- Федотов С.А., Соломатин А.В., Чернышев С.Д. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на 2006–2011 гг. и успешный прогноз Средне-Курильского землетрясения // Вулканология и сейсмология. 2007. № 3. С. 3–25.
- Bürgmann R., Kogan M., Steblov M., Hilley G., Levin V., Apel E. Interseismic coupling and asperity distribution along the Kamchatka subduction zone // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. B07405.
- Engdahl E., Villasenor A. Global seismicity: 1990–1999. In: Earthquake & engineering seismology. Part A. Academic Press. An imprint of Elsevier Science. 2002. P. 665–690.
- 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.
- Husen S., Kissling E. Postseismic fluid flow after the large subduction earthquake of Antofagasta, Chile // Geology. 2001. V. 29. № 9. P. 847–850.
- Ogawa R., Heki K. Slow postseismic recovery of geoid depression formed by the 2004 Sumatra-Andaman earthquake by mantle water diffusion // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34. L06313. <https://doi.org/10.1029/2007GL029340>
- Yamazaki T., Seno T. Double seismic zone and dehydration embrittlement of the subducting slab // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. № B4. <https://doi.org/10.1029/2002JB001918>
- USGS. Search Earthquake Catalog. Earthquakes. [Site]. — URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>. (Дата обращения 01.10.2024).

Ring-Shaped Seismicity Structures in the Region of South Kamchatka: Possible Preparation for Great Earthquake

Yu. F. Kopnichev^{a,*} and I. N. Sokolova^{b,**}

^a*Institute of the Earth Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Obninsk, Russia*

*e-mail: yufk777@mail.ru

**e-mail: sokolovain@gsras.ru

Received October 16, 2024; revised November 29, 2024; accepted December 25, 2024

Abstract — We have been studying some seismicity characteristics in the region of South Kamchatka. Aftershock characteristics for large earthquake of August 17, 2024 ($M_w = 7.0$) were investigated. It was shown that ring-shaped seismicity structures were formed in the South Kamchatka within three depth intervals: 0–33, 34–70 and 71–110 km. Similarly to the other subduction zones, the structures are characterized by threshold magnitude values (M_{t1} , M_{t2} and M_{t3} correspondingly) and also by big axes lengths ($L1$, $L2$ and $L3$). Epicenters of the large earthquake of August 17, 2024 and its strongest aftershocks lie on the shallow ring-shaped seismicity structure ($M_{t1} = 5.3$). This effect confirms an assumption on a preparation of great earthquake in the region of the South Kamchatka. Earlier correlation dependences of M_{t1} and M_{t2} parameters on M_w values of major earthquakes for the west of Pacific Ocean were created (within an interval of $M_w = 7.0$ – 9.0). Using these dependences we estimated magnitude of possible great earthquake in this area: $M_w = 8.6 \pm 0.2$. The reasons for ring-shaped structures formation in different depth ranges of the subduction zones are discussed.

Keywords: lithosphere, ring-shaped seismicity structures, large earthquakes, deep fluids