

УДК 550.34

Кольцевые структуры сейсмичности, сформировавшиеся в районе Аляски: оправдавшийся прогноз места и магнитуды Симеоновского землетрясения 22 июля 2020 г. ($M_w=7.8$)

© 2021 г. Ю.Ф. Копничев¹, И.Н. Соколова²

¹ИФЗ РАН, г. Москва, Россия; ²ИГИ НЯЦ РК, г. Курчатов, Казахстан

Поступила в редакцию 23.03.2021 г.

Аннотация. Рассматриваются некоторые характеристики сейсмичности, связанные с Симеоновским землетрясением 22.07.2020 г. ($M_w=7.8$) в области Шумагинской сейсмической брешы, расположенной в районе Южной Аляски. За восемь лет до этого события авторами здесь была выделена кольцевая структура сейсмичности, по характеристикам которой был сделан вывод о подготовке сильного землетрясения с $M_w\sim 8$, аналогично многим событиям в зонах субдукции. Используются данные о пороговой магнитуде и размерах кольцевой структуры, а также полученные ранее зависимости этих параметров от магнитуд главных землетрясений для зон субдукции на востоке Тихого океана. Накопление новых сейсмических данных до 22.07.2020 г. позволило уточнить положение очага и магнитуду возможного события $M_w=7.9\pm 0.3$. Показано, что после Симеоновского землетрясения продолжилось формирование новых кольцевых структур, которые могут соответствовать подготовке более сильного события с $M_w=8.2\pm 0.2$. Обсуждаются геодинамические процессы, приводящие к формированию кольцевых структур.

Ключевые слова: Аляска, прогноз места и магнитуды, Симеоновское землетрясение, кольцевые структуры сейсмичности.

Для цитирования: 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. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.3.03>

Введение

Сейсмическая брешь в районе Юго-Западной Аляски (Shumagin gap), расположенная между очагами двух сильных землетрясений 1938 и 1946 г., давно служит объектом пристального внимания сейсмологов [Davies, 1981]. Здесь не было событий с $M\sim 8.0$ по крайней мере с начала XX в. (в течение почти 120 лет). 22 июля 2020 г. в области этой брешы произошло достаточно сильное землетрясение ($M_w=7.8$, $h=28$ км) с механизмом типа надвига, которое получило название Симеоновское (Simeonof earthquake). Отметим, что с этим событием не было связано сколько-нибудь заметное цунами. Через три месяца после землетрясения (19.10.2020 г.) в рассматриваемом районе произошло ещё одно сильное событие с $M_w=7.6$ ($h=28$ км), которое рассматривается как афтершок Симеоновского землетрясения. Данное событие имело механизм типа сдвига, оно сопровождалось небольшим

цунами. В работах [Копничев, Соколова, 2009а,б; 2010; 2011а,б; 2012; 2015; 2018; 2019; 2020] показано, что перед сильными и сильнейшими событиями в зонах субдукции обычно в течение нескольких десятков лет формируются кольцевые структуры сейсмичности, которые играют важную роль в процессах подготовки таких землетрясений. Ниже рассматриваются некоторые характеристики сейсмичности, проявившейся в указанном районе в связи с землетрясением 22.07.2020 г. и его сильнейшим афтершоком.

Краткая геолого-геофизическая характеристика района исследований

В рассматриваемом районе происходит субдукция Тихоокеанской плиты под Североамериканскую со средней скоростью ~ 5 см/год. Афтершоковая зона Симеоновского землетрясения расположена между очагами сильнейших событий 1938 и 1946 г. (величины M_w для обоих

событий равны 8.0, табл. 1, рис. 1). В Шумагинском сегменте Алеутско-Аляскинской зоны субдукции размером около 200 км, начиная с 1900 г., были зарегистрированы только три землетрясения с магнитудой не более 7.5 (1917 г. с $M_w=7.5$, 1948 г. с $M_w=7.3$ и 1991 г. с $M_w=7.0$). До 2020 г. здесь не было известно ни одного сильного события с $M_w > 8.0$.

Таблица 1. Сильные землетрясения в районе Южной Аляски

Дата, дд.мм.гггг	Координаты		h , км	M_w
	φ , °	λ , °		
31.05.1917	54.50	-160.00		7.5
04.05.1923	55.76	-156.99	25	7.1
10.11.1938	55.33	-158.37	35	8.0
01.04.1946	52.75	-163.50		8.0
14.05.1948	54.50	-161.00		7.3
04.09.1989	55.59	-156.86	6	7.1
30.05.1991	54.52	-161.71	29	7.0
22.07.2020	55.07	-158.60	28	7.8
19.10.2020	54.62	-159.64	28	7.6

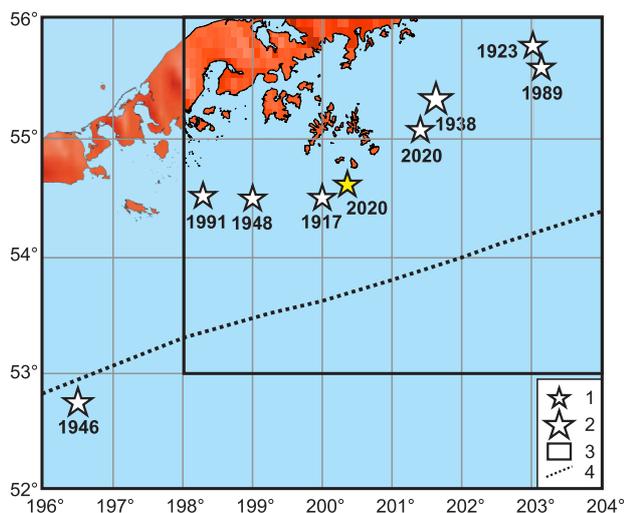


Рис. 1. Карта района исследований.

Эпицентры сильных землетрясений: 1 – $M=7.0-7.8$, 2 – $M=8.0$ (табл. 1); 3 – границы района, в котором выделялись кольца сейсмичности; 4 – Аляскинский жёлоб. Залитый значок – сильнейший афтершок Симоновского землетрясения (здесь и далее)

На рис. 2 показаны афтершоковые зоны Симоновского землетрясения и его сильнейшего повторного толчка ($M \geq 4.0$). Очаговая зона землетрясения 22.07.2020 г. длиной ~250 км вытянута вдоль Аляскинского жёлоба (глубины афтершоков – от 5 до 48 км). В работе [Liu

et al., 2020] установлено, что очаг Симоновского землетрясения располагался на глубинах 15–40 км.

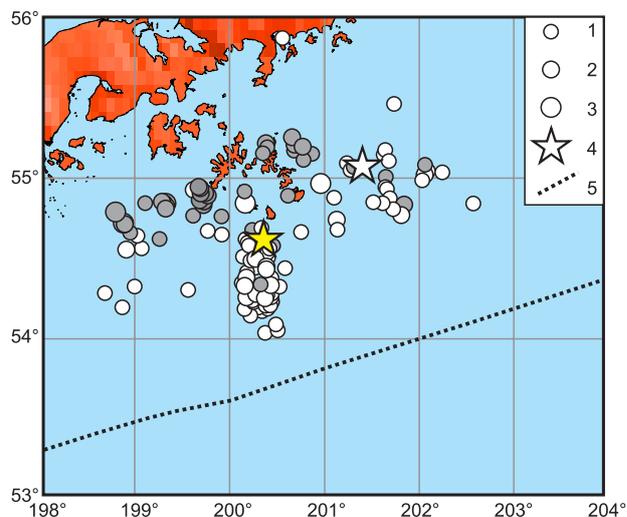


Рис. 2. Афтершоковая область Симоновского землетрясения (за три месяца, $M \geq 4.0$).

1 – $M=4.0-4.9$; 2 – 5.0–5.9; 3 – 6.0–6.9; 4 – 7.6–7.8; 5 – глубоководный жёлоб. Не залитые значки – глубины 0–33 км, залитые – $h \geq 34$ км

Зона афтершоков землетрясения 19.10.2020 г., зарегистрированных в течение трёх дней с глубинами 10–39 км, простирается в субмеридиональном направлении на 70 км, наиболее сильное событие имело магнитуду 5.9. Интересно, что подавляющее большинство относительно сильных афтершоков Симоновского землетрясения с $M \geq 5.0$ (27 из 33) располагалось на глубинах более 20 км. С учётом землетрясения 19.10.2020 г. суммарная энергия относительно глубоких афтершоков во много раз больше энергии неглубоких. При этом подавляющее большинство сильных глубоких событий зарегистрировано в западной части афтершоковой зоны.

Материалы и методика исследований

Данные. По аналогии с работами [Копничев, Соколова, 2009а,б; 2010; 2011а,б; 2012; 2015; 2018; 2019; 2020] мы рассматривали некоторые характеристики сейсмичности в исследуемом районе, включающем очаговую зону сильного землетрясения. Строились карты эпицентров землетрясений, полученные агентством NEIC, для двух диапазонов глубин (0–33 и 34–70 км) начиная с 1973 г., когда координаты событий начали определяться с относительно высокой точностью благодаря значительному увеличению количества сейсмостанций.

Методика выделения кольцевых структур состоит в следующем [Копничев, Соколова, 2018; 2020].

1. Длительность периода, в течение которого исследуются характеристики сейсмичности, составляет около 45–50 лет, что соответствует максимальным величинам, известным в настоящее время.

2. Рассматриваются параметры сейсмичности в двух диапазонах глубин: 0–33 и 34–70 км, в которых формируются кольцевые структуры. Для каждого диапазона отбираются события, магнитуды которых не меньше пороговой (соответственно $M_{п1}$ и $M_{п2}$), причём эти величины обычно на 2–3 единицы меньше, чем магнитуда главного землетрясения.

3. Производится перебор пороговых величин магнитуд $M_{п}$ (в обоих диапазонах глубин) с целью определения оптимальных значений, при которых кольцевые структуры выделяются наиболее чётко.

4. Кольцевые структуры аппроксимируются, как правило, эллипсами. Кольца сейсмичности строятся таким образом, чтобы примерно равное количество относительно слабых событий находилось по обе стороны контуров эллипсов. Мы принимаем, что кольцо сейсмичности сформировалось, если максимальная ширина полосы эпицентров, формирующих его (сумма наибольших отклонений эпицентров, расположенных соответственно внутри и вне эллипса, от его контура), не превышает $\frac{1}{4}$ длины малой оси эллипса (критерий качества кольцевой структуры).

5. Выбираются кольцевые структуры с наибольшими возможными пороговыми значениями $M_{п1}$ и $M_{п2}$. При прочих равных условиях выбирается кольцо сейсмичности с максимальной длиной большой оси эллипса (соответственно L и l для мелкого и глубокого колец).

6. Необходимо регулярно (не реже, чем раз в полгода) контролировать параметры сейсмичности, поскольку известны случаи, когда за последние 1–2 года проявлялись новые кольцевые структуры с гораздо большими величинами $M_{п}$, как это было, например, перед Великим землетрясением Тохоку 11 марта 2011 г. [Копничев, Соколова, 2011а].

Анализ данных

В работе [Копничев, Соколова, 2012] были предварительно рассмотрены характеристики кольцевой сейсмичности в районе Алеутско-Аляскинской дуги. Были выделены кольцевые структуры в тех областях, где давно не было

сильных землетрясений, в том числе и в зоне Шумагинской брешы. На рис. 3 представлены элементы неглубокой сейсмичности, проявившейся в этой зоне до 01.01.2011 года. Из рисунка видно, что на глубинах 0–33 км сформировалась кольцевая структура сейсмичности с пороговым значением магнитуды $M_{п1}=5.0$ и длиной большой оси $L\sim 310$ км. Структура вытянута вдоль Аляскинской дуги. Вместе с тем здесь не проявилось чётких кольцевых структур на глубинах 34–70 км, по крайней мере, вплоть до $M_{п2}=4.2$.

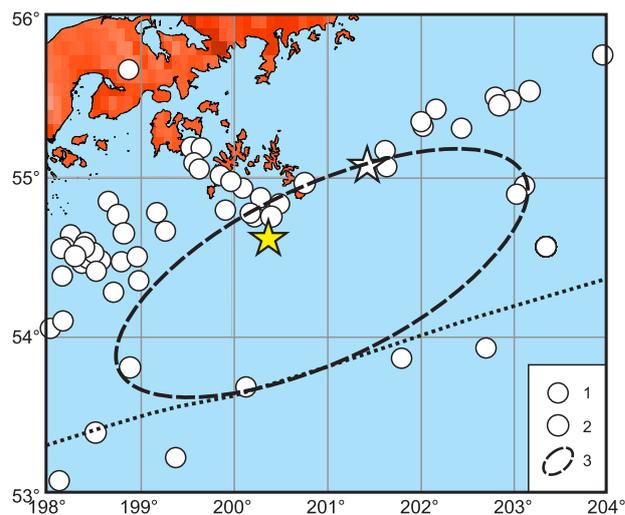


Рис. 3. Неглубокая сейсмичность до 01.01.2011 г. [Копничев, Соколова, 2012].

1 – $M=5.0-5.9$; 2 – 6.0–6.9; 3 – мелкое кольцо. Остальные обозначения – на рис. 2

На рис. 4а,б показано, как изменились характеристики сейсмичности перед Симеоновским землетрясением. В данном случае (рис. 4а) выделяется мелкое кольцо сейсмичности с тем же пороговым значением, но меньшего размера ($L\sim 250$ км), также ориентированное вдоль Аляскинской дуги. Существенно, что эпицентры главного события и сильнейшего афтершока находятся поблизости от кольцевой структуры, сформировавшейся до 22.07.2020 года. На рис. 4б показана зависимость магнитуд событий в области кольцевой структуры от времени. Видно, что структура сформировалась в 1977–2019 гг., при этом наибольшая магнитуда ($M_{\max}=6.6$) соответствует землетрясению 1985 года. Заметим, что суммарная энергия землетрясений в единицу времени может служить грубой мерой скорости сеймотектонической деформации (СТД). В рассматриваемых случаях для простоты можно использовать сумму магнитуд событий, поскольку логарифм энергии каждого землетрясения

пропорционален магнитуде. В области кольцевой структуры максимальная скорость СТД имела место в 1982–1985 гг. Начиная с 01.01.2011 г., произошло всего два события с $M \geq 5.0$, которые, однако, заметно изменили форму структуры.

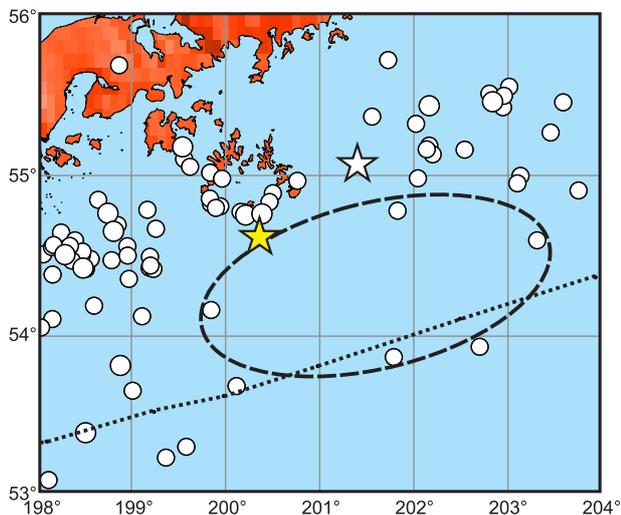


Рис. 4а. Неглубокая сейсмичность до 21.07.2020 г.
Обозначения – на рис. 3

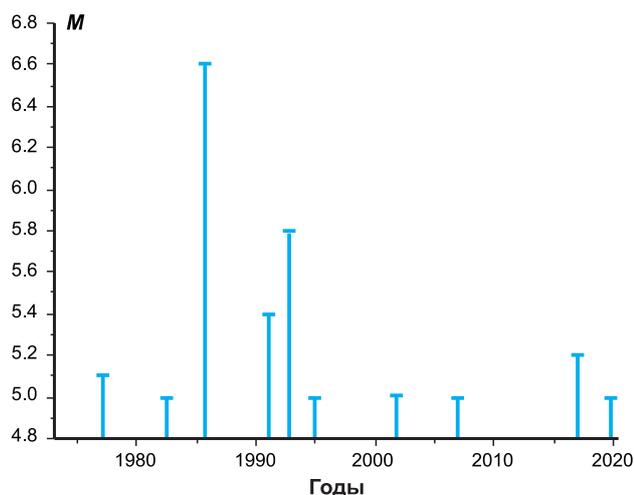


Рис. 4б. Зависимость M от времени
в области мелкого кольца

На рис. 5а представлены элементы сейсмичности в диапазоне глубин 34–70 км. Здесь выделена небольшая кольцевая структура ($l \sim 70$ км, $M_{п2} = 4.5$, $M_{max} = 6.0$), ориентированная в северо-западном направлении, которая сформировалась в 1974–2012 гг. Из рис. 5б следует, что наибольшая скорость СТД в области кольца сейсмичности наблюдалась в 1974–1984 гг. Отметим, что минимальное расстояние между мелкой и глубокой структурами составляет ~ 30 км. Эпицентр сильнейшего афтершока с $M_w = 7.6$ находится вблизи от области наибольшего сближения двух

колец сейсмичности. В то же время эпицентр главного землетрясения расположен довольно далеко от этой области (на расстоянии ~ 75 км, что, однако, в несколько раз меньше размеров мелкого кольца).

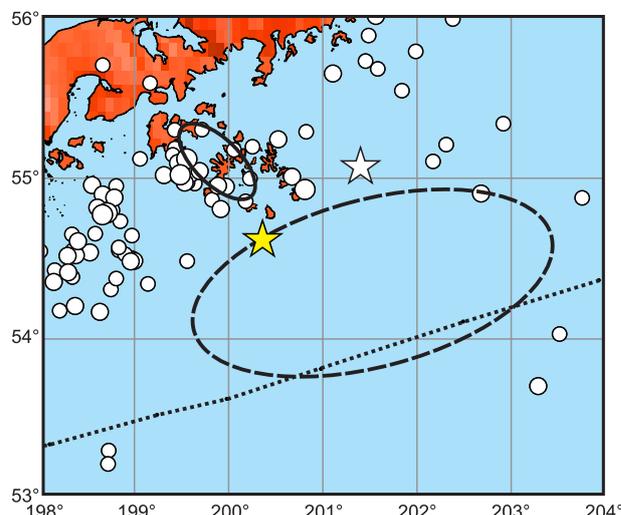


Рис. 5а. Глубокая сейсмичность до 21.07.2020 г.

Малые кружки – $M = 4.5-4.9$, сплошной эллипс – глубокое кольцо сейсмичности. Остальные обозначения – на рис. 3

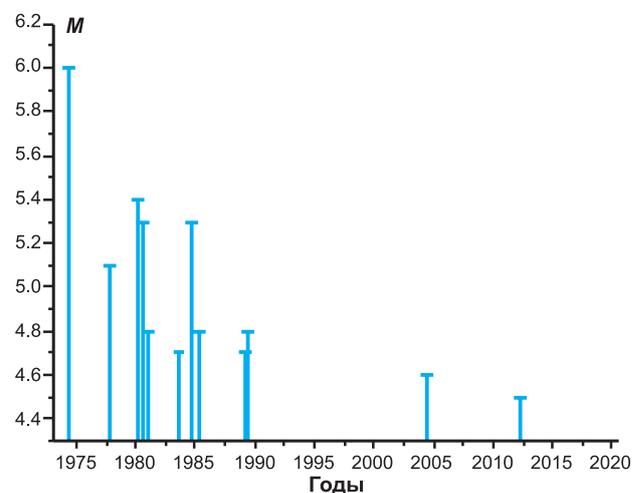


Рис. 5б. Зависимость M от времени
в области глубокого кольца

На рис. 6 показаны характеристики неглубокой сейсмичности, проявившейся до и после Симеоновского землетрясения (до 21.10.2020 г.). В данном случае афтершоки с $M = 5.0-5.7$ на глубинах 10–28 км продолжили формировать новое кольцо сейсмичности ($M_{п1} = 5.0$) с меньшей длиной большой оси, чем на рис. 4а ($L \sim 210$ км).

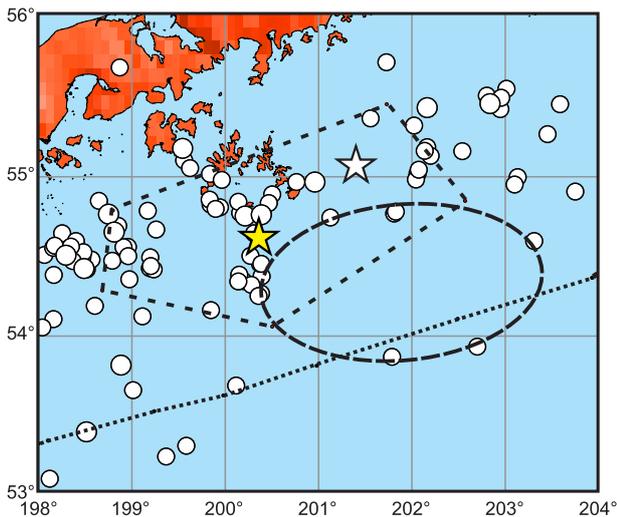


Рис. 6. Неглубокая сейсмичность до 21.10.2020 г.

Показаны границы облака афтершоков.
Остальные обозначения – на рис. 3

Рис. 7 иллюстрирует особенности глубокой сейсмичности за тот же интервал времени. В данном случае благодаря существенному вкладу афтершоков чётко проявилась довольно крупная кольцевая структура со значительно большими параметрами M_{n2} (4.9) и l (110 км), расположенная на восточном краю очаговой зоны. Важно отметить, что новые мелкое и глубокое кольца практически касаются друг друга на расстоянии около 30 км от эпицентра сильного землетрясения.

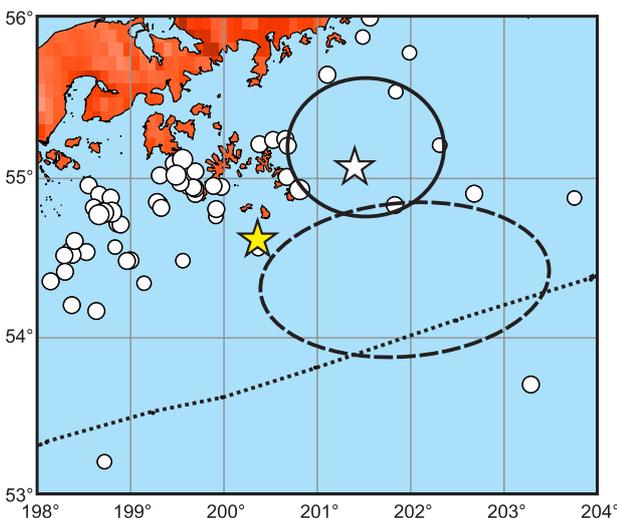


Рис. 7. Глубокая сейсмичность до 21.10.2020 г.

Малые кружки – $M=4.9$.
Остальные обозначения – на рис. 5а

Оценки магнитуды Симеоновского землетрясения по параметрам кольцевых структур. Ранее [Копничев, Соколова, 2012] была получена оценка

магнитуды возможного сильного землетрясения в зоне Шумагинской брешы, базировавшаяся на данных, полученных до 01.01.2011 года. Оценка была основана на корреляционных зависимостях параметров неглубоких структур от магнитуды главных событий, полученных по небольшому количеству данных для Алеутско-Аляскинской дуги: $M_w=8.4\pm 0.1$. Позднее [Копничев, Соколова, 2018] получены более надёжные корреляционные зависимости (включая данные для параметров l и M_{n2}) для всей восточной части Тихого океана, к которой относится и зона Шумагинской брешы:

$$M_{n1} = -0.23 + 0.63 M_w, r = 0.88, \quad (1)$$

$$\lg L(\text{км}) = -1.22 + 0.44 M_w, r = 0.86, \quad (2)$$

$$M_{n2} = -0.80 + 0.69 M_w, r = 0.86, \quad (3)$$

$$\lg l(\text{км}) = -1.16 + 0.40 M_w, r = 0.88, \quad (4)$$

здесь r – коэффициент корреляции.

Из рис. 8(а-г) следует, что по данным, полученным перед Симеоновским землетрясением, параметры M_{n1} и L заметно завышены относительно средних для востока Тихого океана (что приводит к завышению прогнозной величины M_w), а параметр l , наоборот, занижен. В то же время величина M_{n2} почти попадает на корреляционную зависимость. Все значения находятся в пределах доверительных интервалов средних. По формулам (1)–(4) с учётом новых данных, появившихся после 01.01.2011 г., мы оценили прогнозные величины M_w для Симеоновского землетрясения (табл. 2). В среднем ожидаемая величина M_w для рассматриваемого события составляет 7.9 ± 0.3 .

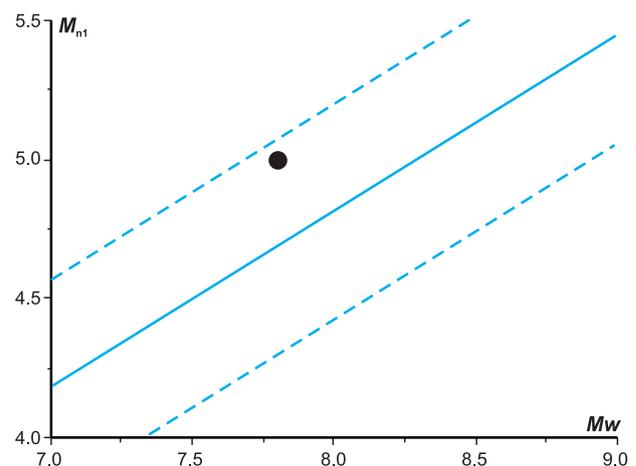


Рис. 8а. Величина M_{n1} для Симеоновского землетрясения относительно средней зависимости для востока Тихого океана.

Показаны доверительные интервалы средних значений на уровне 0.7 (здесь и далее)

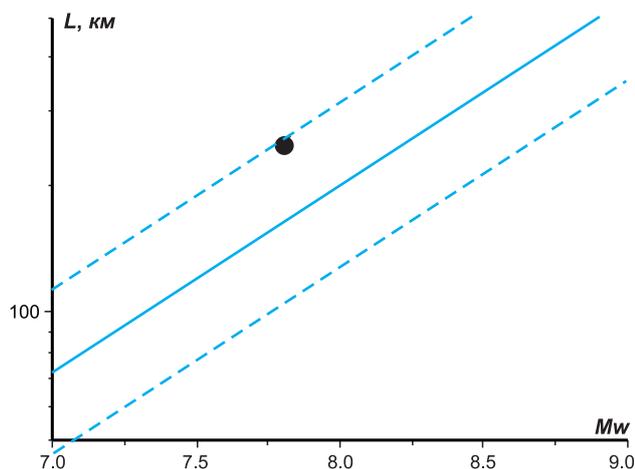


Рис. 86. Величина L для Симоновского землетрясения относительно средней зависимости для востока Тихого океана

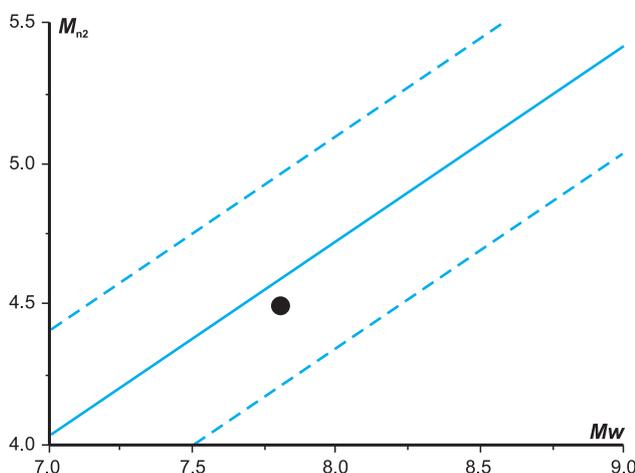


Рис. 8в. Величина M_{n2} для Симоновского землетрясения относительно средней зависимости для востока Тихого океана

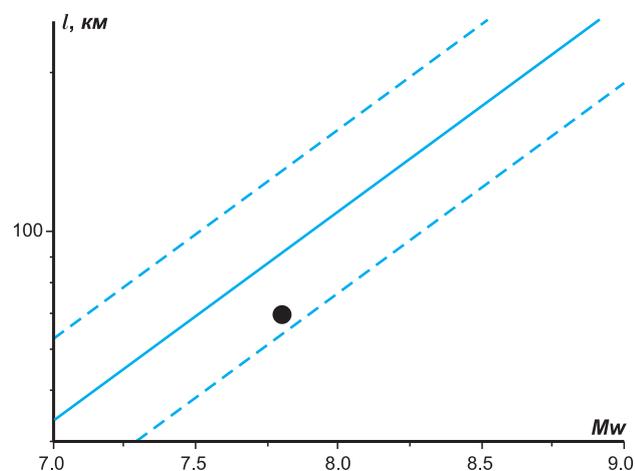


Рис. 8г. Величина l для Симоновского землетрясения относительно средней зависимости для востока Тихого океана

Новые данные по афтершокам позволяют оценить прогнозные величины M_w , которые могут соответствовать ожидаемому сильному землетрясению (судя по формирующимся кольцевым структурам, возможно, готовящемуся в рассматриваемой зоне после 22.07.2020 г., табл. 2). В данном случае существенно выросли оба параметра глубокого кольца, и в среднем прогнозируемая магнитуда заметно увеличилась одновременно с уменьшением разброса данных: $M_w=8.2\pm 0.2$.

Обсуждение

В работе [Davies et al., 1981] было установлено, что средний период повторяемости сильных землетрясений в зоне Шумагинской брешки составляет ~ 50 – 90 лет. Поскольку здесь не было событий с $M \sim > 8.0$ более 100 лет, большинством исследователей предполагалось, что в этой зоне происходит медленное скользящее погружающейся Тихоокеанской плиты вместо накопления напряжений [Davies et al., 1981; Fournier, Freymueller, 2007; Nadin, 2020]. В то же время наши данные о кольцевой сейсмичности [Копничев, Соколова, 2012] ещё восемь лет назад позволили прогнозировать здесь подготовку достаточно сильного землетрясения.

Полученные данные свидетельствуют о том, что перед Симоновским землетрясением сформировались кольцевые структуры сейсмичности в двух диапазонах глубин, как и перед многими другими сильными и сильнейшими событиями в различных зонах субдукции [Копничев, Соколова, 2009а,б; 2010; 2011а,б; 2012; 2015; 2018; 2019; 2020]. Существенно, что в большинстве случаев эпицентры сильных землетрясений находятся вблизи границ мелких колец сейсмичности. Ранее было показано, что появление кольцевых структур связано с миграцией глубинных флюидов, играющих очень важную роль в процессах подготовки сильных землетрясений [Копничев, Соколова, 2010; 2011б; 2018; Husen, Kissling, 2001]. Дело в том, что на кровле двухфазного слоя с соединяющимися порами и трещинами, заполненными флюидом, имеет место концентрация напряжений, причём величина избыточного напряжения пропорциональна мощности слоя [Каракин, Лобковский, 1982; Gold, Soter, 1984/1985]. Этот эффект может служить триггером, приводящим к подвижке при сильном землетрясении.

Согласно методике выделения кольцевых структур, описанной выше, необходимо регулярно контролировать характеристики

Таблица 2. Оценки величин M_w по параметрам кольцевых структур

Интервал времени	M_{n1}	$M_w(M_{n1})$	L , км	$M_w(L)$	M_{n2}	$M_w(M_{n2})$	l , км	$M_w(l)$	M_w
До 01.01.2011 г.	5.0	8.3	310	8.5	—	—	—	—	8.4±0.1
До 22.07.2020 г.	5.0	8.3	250	8.2	4.5	7.7	70	7.5	7.9±0.3
До 21.10.2020 г.	5.0	8.3	210	8.0	4.9	8.3	110	8.0	8.2±0.2

сейсмичности, поскольку со временем могут существенно изменяться как пороговые значения магнитуд, так и размеры колец сейсмичности. Такой эффект был установлен ранее перед Великим землетрясением Тохоку 11.03.2011 г. в Северо-Восточной Японии, а также сильным землетрясением Икике 01.04.2014 г. ($M_w=8.2$) в районе Чили [Копничев, Соколова, 2011а; 2015]. Выше показано, что в зоне Шумагинской брешы после 2011 г. заметно изменилась мелкая кольцевая структура, а также проявилась глубокая структура. Важно отметить, что, несмотря на изменение размеров мелкого кольца сейсмичности, эпицентр Симеоновского землетрясения находится вблизи от его границы. Кроме того, использование четырёх параметров кольцевых структур позволило оценить магнитуду готовившегося сильного события, которая оказалась близкой к реальной величине для данного землетрясения. Таким образом, полученные новые данные обеспечили возможность существенного уточнения прогноза энергии ожидавшегося землетрясения.

Для большинства рассмотренных ранее сильных землетрясений эпицентры главных событий находились вблизи областей наибольшего сближения или пересечения мелких и глубоких колец [Копничев, Соколова, 2009а,б; 2010; 2011а,б; 2012; 2015; 2018; 2019; 2020]. В перечисленных работах отмечено, что данный эффект, скорее всего, связан с тем, что в таких областях имеет место максимальная толщина двухфазного слоя с заметной долей флюидов, формирующих связную сеть, на кровле которого достигается концентрация напряжений. В рассматриваемом случае эпицентр Симеоновского землетрясения находится довольно далеко от указанной области. Возможно, это связано с соединением флюидных сетей через нижнюю кору, которая в сейсмоактивных районах характеризуется наибольшим содержанием жидкой фазы [Ваньян, Хайндман, 1996]. Данный эффект также может приводить к концентрации напряжений в области гипоцентра готовящегося сильного землетрясения [Каракин, Лобковский, 1982]. Вместе с тем новые кольцевые структуры, проявившиеся после сильного земле-

трясения, касаются друг друга, аналогично тому, как это наблюдалось перед значительным количеством сильных событий в различных зонах субдукции [Копничев, Соколова, 2009а,б; 2010; 2011а,б; 2012; 2015; 2018; 2019; 2020].

В то же время перед некоторыми событиями на востоке Тихого океана не выделены глубокие кольцевые структуры [Копничев, Соколова, 2018]. В указанной работе отмечено, что это, скорее всего, связано с субдукцией в таких районах самых молодых литосферных плит, характеризующихся пониженным содержанием гидратированных пород, при дегидратации которых выделяется вода, служащая одним из главных компонентов глубинных флюидов [Yamasaki, Seno, 2003]. Отметим, что дегидратация, стимулирующая подъём глубинных флюидов, служит отражением процессов самоорганизации геологических систем [Летников, 1992], в конечном счёте ведущих к уменьшению потенциальной энергии Земли.

Разными методами было показано, что подъём глубинных флюидов в сейсмоактивных районах происходит главным образом в результате сильных землетрясений [Husen, Kissling, 2001, Копничев, Соколова, 2003; 2005; 2009; Ogawa, Heki, 2007]. В работах [Копничев, Соколова, 2013; 2018] была выдвинута гипотеза, что энергия сильного неглубокого землетрясения пропорциональна потенциальной энергии, высвобождающейся при подъёме флюидов. В пользу этой гипотезы свидетельствуют данные о характеристиках кольцевых структур, формирующихся перед сильными землетрясениями с разными механизмами очагов во внутриконтинентальных районах [Копничев, Соколова, 2013], а также в зонах субдукции на западе и востоке Тихого океана [Копничев, Соколова, 2018]. Данная гипотеза подтверждается также результатами сопоставления характеристик сейсмичности и поля поглощения короткопериодных S -волн [Копничев, Соколова, 2010; 2019; 2009]. Принятие гипотезы приводит к выводу об относительно высоком содержании флюидов на границах кольцевых структур, где наибольшая магнитуда событий в среднем на 1.2–1.6 выше (что соответствует различиям

по энергии примерно на два порядка), чем внутри колец [Копничев, Соколова, 2020]. Статистический анализ характеристик сейсмичности позволяет сделать вывод, что вертикальная миграция флюидов продолжается и в результате реализации последовательности афтершоков [Копничев, Соколова, 2018; Singh, Suarez, 1988].

Значительно более высокая величина L в зоне Шумагинской брешы для кольцевой структуры, сформировавшейся перед Симеоновским землетрясением, и наоборот, более низкое значение параметра l , чем в среднем для восточной части Тихого океана, могут соответствовать относительно пониженному содержанию флюидов на глубинах 0–33 км и повышенному – на глубинах 34–70 км [Копничев, Соколова, 2018]. Это коррелируется с преобладанием глубоких афтершоков и во много раз большей их суммарной энергией по отношению к мелким в очаговой зоне Симеоновского землетрясения (можно полагать, что для высвобождения флюидов с глубин более 33 км требуется больше сейсмической энергии).

Дефицит неглубоких афтершоков, связанных с Симеоновским землетрясением, а также тот факт, что достаточно сильное событие не генерировало цунами, позволяют сделать вывод, что разрыв в очаге не вышел на поверхность. Это требует ответа на вопрос: продолжается ли накопление напряжений в верхней части очаговой зоны, или же здесь имеет место медленное скольжение погружающейся плиты [Nadin, 2020].

Наши данные о продолжающих формироваться после 22.07.2020 г. кольцевых структурах дают основания предполагать, что после Симеоновского землетрясения здесь действительно может готовиться новое, судя по параметрам структур, несколько более сильное событие. Для более уверенного ответа на сформулированный в работе [Nadin, 2020] вопрос необходимо продолжить анализ не только сейсмических, но и других геофизических и геохимических данных, которые, возможно, позволят осуществить среднесрочный прогноз готовящегося землетрясения.

Примечание. Уже после того, как статья была принята к публикации, 29.07.2021 г. в районе Аляски произошло сильнейшее Чигникское землетрясение (*Chignik earthquake*, 55.36°N, 157.89°W, $h=35$ км, $M_w=8.2$). По нашим данным, параметры кольцевых структур, представленных на рис. 6 и 7, перед этим событием не изменились. Эпицентр Чигникского землетрясения, близкий к эпицентру очага землетрясения 1938 г. ($M_w=8.0$), находится на глубокой кольцевой структуре, а гипоцентр попадает практически на её кровлю. Важно также отметить, что магнитуда

нового сильного события соответствует оценке, приведённой в табл. 2. Отсюда следует, что прогноз места и магнитуды Чигникского землетрясения, основанный на характеристиках новых кольцевых структур, также оправдался.

Заключение

Рассмотрены некоторые характеристики сейсмичности, связанные с Симеоновским землетрясением 22.07.2020 г., которое произошло в области Шумагинской сейсмической брешы, расположенной в районе Южной Аляски. За восемь лет до этого события авторами здесь была выделена неглубокая кольцевая структура сейсмичности ($h=0-33$ км), по характеристикам которой был сделан вывод о подготовке сильного землетрясения с $M_w \sim 8$, аналогично многим событиям в зонах субдукции. Эпицентр Симеоновского землетрясения находится вблизи границы кольцевой структуры. Для оценки магнитуды прогнозируемого землетрясения использованы данные о пороговой магнитуде и размерах кольцевой структуры, а также полученные ранее корреляционные зависимости этих параметров от магнитуд главных землетрясений для зон субдукции на востоке Тихого океана. Накопление новых сейсмических данных до 22.07.2020 г. позволило уточнить положение очага и магнитуду возможного события $M_w=7.9 \pm 0.3$. Установлено, что после Симеоновского землетрясения продолжилось формирование новых кольцевых структур, в том числе относительно глубокой ($h=34-70$ км), которые могут соответствовать подготовке более сильного события с $M_w=8.2 \pm 0.2$. Полученные в работе, а также ранее данные свидетельствуют о том, что формирование кольцевых структур связано с миграцией глубинных флюидов.

Литература

- Ваньян Л.Л., Хайндман Р.Д. О природе электропроводности консолидированной коры // Физика Земли. – 1996. – № 4. – С. 5–11.
- Каракин А.В., Лобковский Л.И. Гидродинамика и структура двухфазной астеносферы // Доклады АН 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.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Кольцевая сейсмичность в разных диапазонах глубин перед сильными

- и сильнейшими землетрясениями в зонах субдукции // Доклады Академии наук. — 2009а. — Т. 425, № 4. — С. 539–542.
- 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. — № 3. — С. 135–141.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Кольцевые структуры сейсмичности в разных диапазонах глубин перед сильными и сильнейшими землетрясениями в районах Алеут и Аляски // Вестник НЯЦ РК. — 2012. — № 1. — С. 137–146.
- 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. // Вестник НЯЦ РК. — 2015. — № 4. — С. 153–159.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Кольцевые структуры сейсмичности и землетрясение 11.03.2011 г. ($M_w=9.0$) в районе Северо-Восточной Японии // Доклады Академии наук. — 2011а. — Т. 440, № 2. — С. 246–249.
- 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.
- 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. doi: 10.21455/GPB2018.1-5
- 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. — 2011б. — Т. 12, № 3. — С. 22–32.
- 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. Подъем мантийных флюидов в районах очагов сильных землетрясений и крупных разломных зон: геохимические свидетельства // Вестник НЯЦ РК. — 2005. — № 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.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Характеристики кольцевой сейсмичности в разных диапазонах глубин перед сильными и сильнейшими землетрясениями в районе Суматры // Доклады Академии наук. — 2009б. — Т. 429, № 1. — С. 106–109.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Характеристики поля поглощения короткопериодных S -волн в очаговой зоне сильнейшего землетрясения Тохоку 11.03.2011 г. ($M_w=9.0$) // Геофизические процессы и биосфера. — 2019. — Т. 18, № 2. — С. 16–27. doi: 10.21455/GPB2019.2-2
- Летников Ф.А. Синергетика геологических систем. — Новосибирск: Наука, 1992. — 229 с.
- Davies J., Sykes L., House L., Jacob K. Shumagin seismic gap, Alaska peninsula: history of great earthquakes, tectonic setting, and evidence for high seismic potential // Journal of Geophysical Research. — 1981. — V. 86, N B5. — P. 3821–3855.
- Fournier T., Freymueller J. Transition from locked to creeping subduction in the Shumagin region, Alaska // Geophysical Research Letters. — 2007. — V. 34, L06303. doi: 10.1029/2006GL029073
- 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.
- Husen S., Kissling E. Postseismic fluid flow after the large subduction earthquake of Antofagasta, Chile // Geology. — 2001. — V. 29, N 9. — P. 847–850.
- Liu C., Lay T., Xiong X., Wen Ya. Rupture of the 2020 M_w 7.8 earthquake in the Shumagin gap inferred from seismic and geodetic observations // Geophysical Research Letters. — 2020. — V. 47, N 22. doi: 10.1029/2020GL090806
- Nadin E. Does Alaska's magnitude-7.8 Simeonof earthquake finally close a seismic gap? // Temblor. — 2020. doi:10.32858/temblor.106
- 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., 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.
- 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. Шмидта О.Ю. Российской академии наук (ИФЗ РАН), г. Москва, Россия. E-mail: yufk777@mail.ru

Соколова Инна Николаевна, д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. Филиала «Институт геофизических исследований» Национального ядерного центра Республики Казахстан (ИГИ НЯЦ РК), г. Курчатов, Республика Казахстан. E-mail: sokolova@kndc.kz

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)

© 2021 Yu.F. Kopnichev¹, I.N. Sokolova²

¹IPE RAS, Moscow, Russia; ²IGR NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

Received March 23, 2021

Abstract We have been studying some seismicity characteristics connected with Simeonof earthquake of July 22, 2020 (Mw=7.8) in the area of Shumagin seismic gap, located in the region of South Alaska. 8 years before this event, the authors picked up here ring-shaped seismicity structure. Using characteristics of this structure we made a conclusion on preparation for large earthquake (Mw~8), similarly to many events in subduction zones. We used data on threshold magnitude and size of the ring structure, and earlier obtained dependences of these parameters on magnitudes of main events for the subduction zones in the Eastern Pacific. Accumulation of new seismicity data prior to 2020/07/22 allowed us to specify the source location and magnitude of the Simeonof earthquake: Mw=7.9±0.3. It was shown that after this event new ring structures continued to form, which can correspond to preparation for larger earthquake: Mw=8.2±0.2. Geodynamical processes, which lead to formation of the ring structures, are discussing.

Keywords Alaska, prediction of place and magnitude, Simeonof earthquake, ring-shaped seismicity structures.

For citation 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: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.3.03>

References

- Karakin, A.V., & Lobkovsky, L.I. (1983). [Hydrodynamics and structure of the two-phase asthenosphere]. *Doklady AN SSSR* [Transactions (Doklady) of the USSR Academy of Sciences. Earth Science Sections], 268(2), 324-329. (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
- 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(2), 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(1), 1385-1388.
- 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
- 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. 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.).
- Kopnichev, Yu.F., & Sokolova, I.N. (2012). [Ring-shaped seismicity structures in different depth ranges prior to large and great earthquakes in the regions of Aleutians and Alaska]. *Vestnik NIaTs RK* [NNC RK Bulletin], 1, 137-146. (In Russ.).
- 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.).
- 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. (2018). Ring-shaped seismicity structures in the cascadia subduction zone: possible upcoming large earthquakes. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 54(7), 745-752. doi: 10.1134/S0001433818070046
- 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.).
- Letnikov, F.A. (1992). *Sinergetika geologicheskikh sistem* [Synergetics of geological systems]. Novosibirsk, Russia: Nauka Publ., 229 p. (In Russ.).
- Van'jan, L.L., & Hajndman, R.D. (1996). [On the nature of the electrical conductivity of the consolidated crust]. *Fizika Zemli* [Physics of the Solid Earth], 4, 5-11. (In Russ.).
- Davies, J., Sykes, L., House, L., & Jacob, K. (1981). Shumagin seismic gap, Alaska Peninsula: history of great earthquakes, tectonic setting, and evidence for high seismic potential. *Journal of Geophysical Research*, 86(B5), 3821-3855.
- Fournier, T., & Freymueller, J. (2007). Transition from locked to creeping subduction in the Shumagin region, Alaska. *Geophysical Research Letters*, 34, L06303. doi: 10.1029/2006GL029073
- Gold, T., & Soter, S. (1984/1985). Fluid ascent through the solid lithosphere and its relation to earthquakes. *Pure and Applied Geophysics*, 122, 492-530.
- Husen, S., & Kissling, E. (2001). Postseismic fluid flow after the large subduction earthquake of Antofagasta, Chile. *Geology*, 29(9), 847-850.
- Liu, C., Lay, T., Xiong, X., & Wen, Ya. (2020). Rupture of the 2020 Mw 7.8 earthquake in the Shumagin gap inferred from seismic and geodetic observations. *Geophysical Research Letters*, 47(22). doi: 10.1029/2020GL090806
- Nadin, E. (2020). Does Alaska's magnitude-7.8 Simionof earthquake finally close a seismic gap? *Temblor*. doi:10.32858/temblor.106
- 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 ($m_b \geq 5$) of large subduction-zone earthquakes ($M_w \geq 7.0$). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 78(1), 230-242.
- 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., Leading Researcher of the Branch "Institute of Geophysical Research" of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan (IGR NNC RK), Kurchatov, Republic of Kazakhstan. E-mail: sokolova@kndc.kz