

УДК 550.34

## КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ В ЗОНЕ СУБДУКЦИИ КАСКАДИЯ: ВОЗМОЖНАЯ ПОДГОТОВКА СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

© 2017 г. Ю.Ф. Копничев<sup>1</sup>, И.Н. Соколова<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Институт геофизических исследований Министерства энергетики Республики Казахстан,  
г. Алма-Ата, Казахстан

Рассматриваются некоторые характеристики сейсмичности в зоне субдукции Каскадия, расположенной на западе Северной Америки. Установлено, что перед двумя сильными землетрясениями (17.08.1991 г.,  $M_w = 7.1$  и 25.04.1992 г.,  $M_w = 7.2$ ) здесь начиная с 1964 г. сформировались неглубокие кольцевые структуры сейсмичности ( $h = 0\text{--}33$  км) с пороговыми значениями магнитуд  $M_p$  соответственно 4.4 и 4.6 и, в отличие от многих других зон субдукции, не проявились глубокие (в диапазоне глубин 34–70 км) кольцевые структуры. Вместе с тем в этой зоне в некоторых случаях формируются глубокие полосы сейсмичности. Выделены две новые кольцевые структуры с величинами  $M_p = 5.0$  и 5.2, которые начали формироваться начиная с 1973 г. Есть основания предполагать, что в областях этих структур могут готовиться сильные землетрясения. На основании корреляционных зависимостей размеров колец сейсмичности и величин  $M_p$  от магнитуд главных событий, полученных ранее для востока Тихого океана, оценены магнитуды возможных сильных землетрясений:  $M_w = 7.8$  и 7.9. Отсюда сделан вывод, что в настоящее время в зоне субдукции Каскадия не идет подготовка сильнейшего события с  $M_w \sim 9.0$ , аналогичного землетрясению 1700 г. В то же время вероятна реализация в ближайшие годы сильного землетрясения с  $M_w = 7.9 \pm 0.1$  в районе о. Ванкувер. Предполагается, что формирование мелких колец и глубоких полос сейсмичности, так же как и в других районах, связано с миграцией глубинных флюидов.

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

PACS 91.30.-f

### Введение

В последние годы установлено, что перед большинством сильных и сильнейших землетрясений в зонах субдукции формируются кольцевые структуры сейсмичности [Копничев, Соколова, 2009а, б, 2010, 2011а, б, 2012, 2013, 2015, 2016]. Как правило, такие

структуры, имеющие форму, близкую к эллипсам, образуются в диапазоне глубин 0–33 км. Они характеризуются пороговыми значениями магнитуд ( $M_p$ ), а также длинами больших осей ( $L$ ). Длительность формирования таких структур в подавляющем большинстве случаев не превышает 40 лет, а в среднем близка к 25 годам [Копничев, Соколова, 2010, 2011а, б, 2012, 2013, 2015, 2016]. В то же время на больших глубинах (34–70 км) перед сильными событиями формируются как кольцевые структуры, так и линейные полосы эпицентров [Копничев, Соколова, 2009а, б, 2010, 2011а, б, 2013, 2015, 2016]. Полученные данные могут быть использованы для определения мест и магнитуд готовящихся сильных землетрясений и, возможно, для их среднесрочного прогноза. Примеры успешного прогноза мест и магнитуд Великого землетрясения Тохоку 11.03.2011 г. ( $M_w = 9.0$ ) на северо-востоке Японии и землетрясения Икике 01.04.2014 г. ( $M_w = 8.2$ ) на севере Чили приведены в [Копничев, Соколова, 2011а, 2015]. Возможность такого прогноза особенно важна для наиболее сильных землетрясений с  $M_w \sim 9.0$ , для которых период повторяемости может составлять многие сотни лет [Goldfinger et al., 2013]. В данной статье с этой целью рассматриваются характеристики сейсмичности в зоне субдукции Каскадия, расположенной на западе Северной Америки [Satake et al., 2003; Kulkarni et al., 2013].

### Краткая геолого-геофизическая характеристика района исследований

Зона субдукции Каскадия длиной ~1100 км простирается от северной оконечности о. Ванкувер до мыса Мендосино в Северной Калифорнии (рис. 1). Она разделяет Северо-Американскую плиту и океаническую плиту Хуан-де-Фука. Океаническая литосфера Тихого океана погружается под континент со скоростью ~ 40 мм/год. Молодая океаническая плита, субдуцируемая под Северо-Американскую, считается «теплой»,

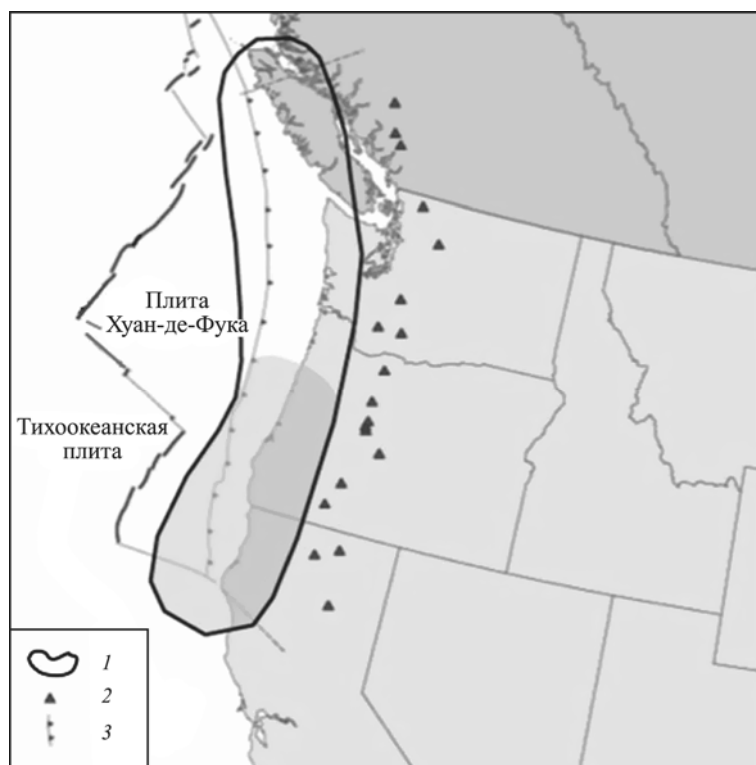


Рис. 1. Местоположение зоны субдукции Каскадия

1 – зона субдукции; 2 – вулканы; 3 – ось глубоководного желоба

поскольку разогрета гораздо сильнее, чем более древние плиты, например Тихоокеанская, погружающаяся под Северо-Восточную Японию [Abers et al., 2013].

Зона субдукции Каскадия может генерировать очень сильные землетрясения. Последнее такое событие с  $M_w \sim 9.0$  произошло в 1700 г. [Satake et al., 2003]. Землетрясение породило грандиозное цунами, которое вызвало разрушения даже в районе Японии. Согласно имеющимся палеосейсмическим данным, сильнейшие землетрясения происходили здесь по меньшей мере 7 раз за последние 3500 лет, при этом период повторяемости таких событий варьировался от 300 до 600 лет [Kulkarni et al., 2013]. Недавние исследования показали, что вероятность землетрясения с  $M_w \sim 9.0$  в ближайшие 50 лет может составлять  $\sim 17\%$  [Kulkarni et al., 2013]. Это свидетельствует о необходимости более точного прогноза мест и магнитуд готовящихся сильных сейсмических событий.

### Использованные данные и методика исследований

По аналогии с [Копничев, Соколова, 2009а, б, 2010, 2011а, б, 2012, 2013, 2015, 2016] рассмотрены характеристики сейсмичности в исследуемом районе, включающем очаговую зону сильного землетрясения или предполагаемую область подготовки такого события. Карты эпицентров землетрясений строились для двух диапазонов глубин (0–33 и 34–70 км) за период начиная с 1964 г. для очаговых зон сильных землетрясений и с 1973 г. – для областей возможной подготовки новых событий. Анализировались данные сейсмических каталогов Национального центра информации о землетрясениях Геологической службы США (National Earthquake Information Center of United States Geological Survey, NEIC USGS).

Методика выделения кольцевых структур имеет следующие особенности. Длительность периода, в течение которого исследуются характеристики сейсмичности, в большинстве случаев составляет около 40 лет, что соответствует максимальным величинам, известным в настоящее время.

Рассматриваются параметры сейсмичности в двух диапазонах глубин (0–33 и 34–70 км), в которых формируются кольцевые структуры. Отметим, что в некоторых зонах субдукции (например, в районе Мексики) на глубинах 34–70 км проявляются не кольцевые структуры, а полосы сейсмичности [Копничев, Соколова, 2016]. Для каждого диапазона отбираются события, магнитуда которых не меньше пороговой.

Проводится перебор пороговых величин магнитуд (в обоих диапазонах глубин) с целью определения оптимальных значений, при которых кольцевые структуры (или полосы сейсмичности) выделяются наиболее четко.

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

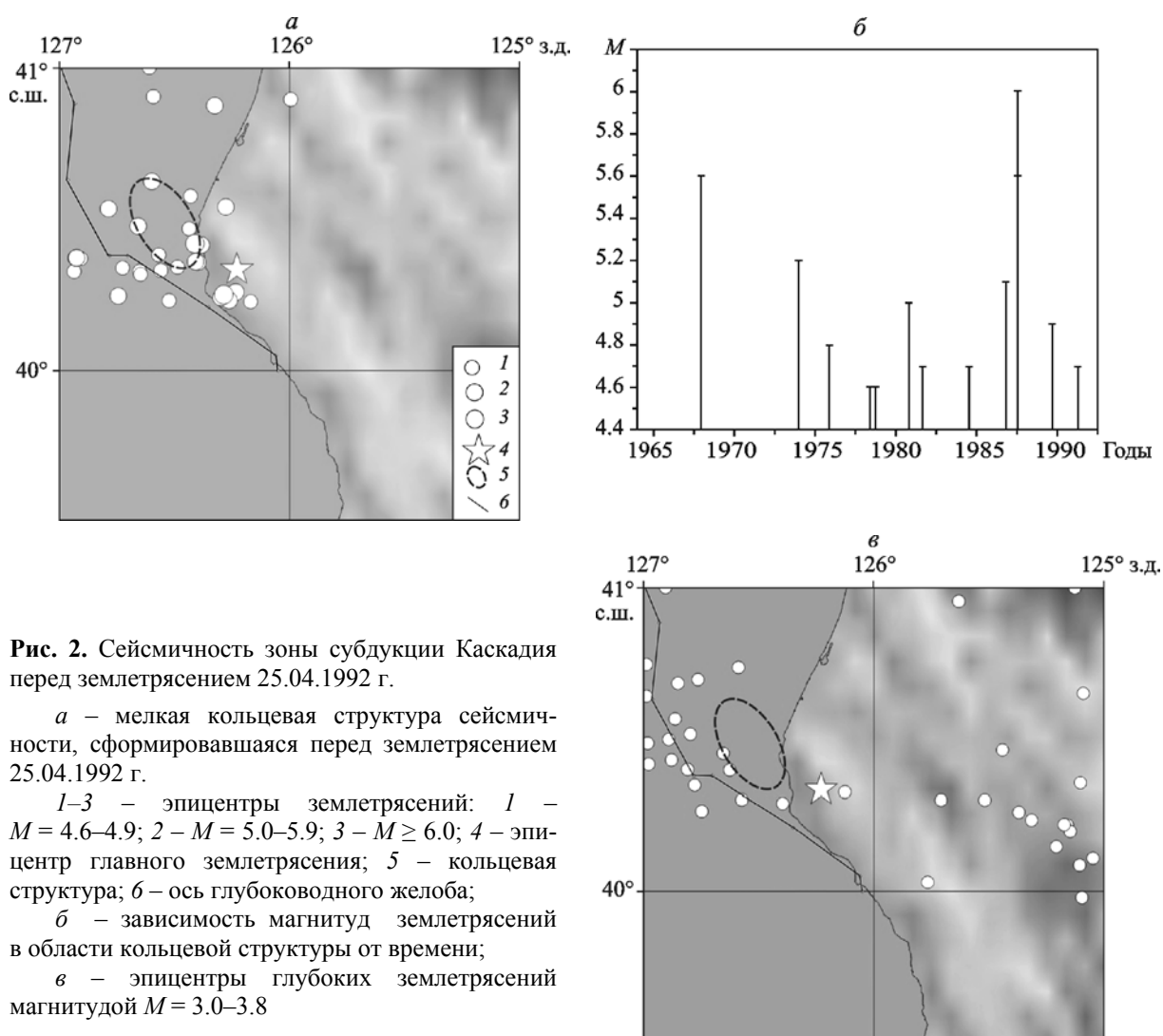
Выбираются кольцевые структуры или полосы сейсмичности с наибольшими возможными пороговыми значениями  $M_p$ . При прочих равных условиях выбирается кольцо сейсмичности с максимальной длиной большой оси эллипса (соответственно  $L$  и  $l$  для мелкого и глубокого колец).

Необходимо регулярно (не реже, чем раз в полгода) контролировать параметры сейсмичности, поскольку известны случаи, когда в течение 1–2 лет после проведения анализа проявлялись новые кольцевые структуры с гораздо большими величинами  $M_p$ , как это было, например, перед Великим землетрясением Тохоку 11.03.2011 г. ( $M_w = 9.0$ ) и землетрясением Икике 01.04.2014 г. [Копничев, Соколова, 2011а, 2015].

### Анализ данных

Рассмотрим сначала характеристики сейсмичности перед двумя сильными землетрясениями в зоне субдукции Каскадия, произошедшими в 1991 и 1992 годах.

**Кольцевые структуры сейсмичности, сформировавшиеся перед сильными землетрясениями.** 25.04.1992 г. в районе Северной Калифорнии произошло землетрясение с  $M_w = 7.2$ . Это событие имело механизм типа надвига, типичный для зон субдукции. На рис. 2, а показаны эпицентры неглубоких ( $h = 0–33$  км,  $M_p = 4.6$ ) землетрясений, произошедших в данном районе с 01.01.1964 г. по 24.04.1992 г. Из данных, приведенных на рис. 2, а, следует, что на границе континента сформировалась малая кольцевая структура с длиной большой оси  $L \sim 40$  км, вытянутая в север–северо-восточном



**Рис. 2.** Сейсмичность зоны субдукции Каскадия перед землетрясением 25.04.1992 г.

а – мелкая кольцевая структура сейсмичности, сформировавшаяся перед землетрясением 25.04.1992 г.

1–3 – эпицентры землетрясений: 1 –  $M = 4.6–4.9$ ; 2 –  $M = 5.0–5.9$ ; 3 –  $M \geq 6.0$ ; 4 – эпицентр главного землетрясения; 5 – кольцевая структура; б – ось глубоководного желоба;

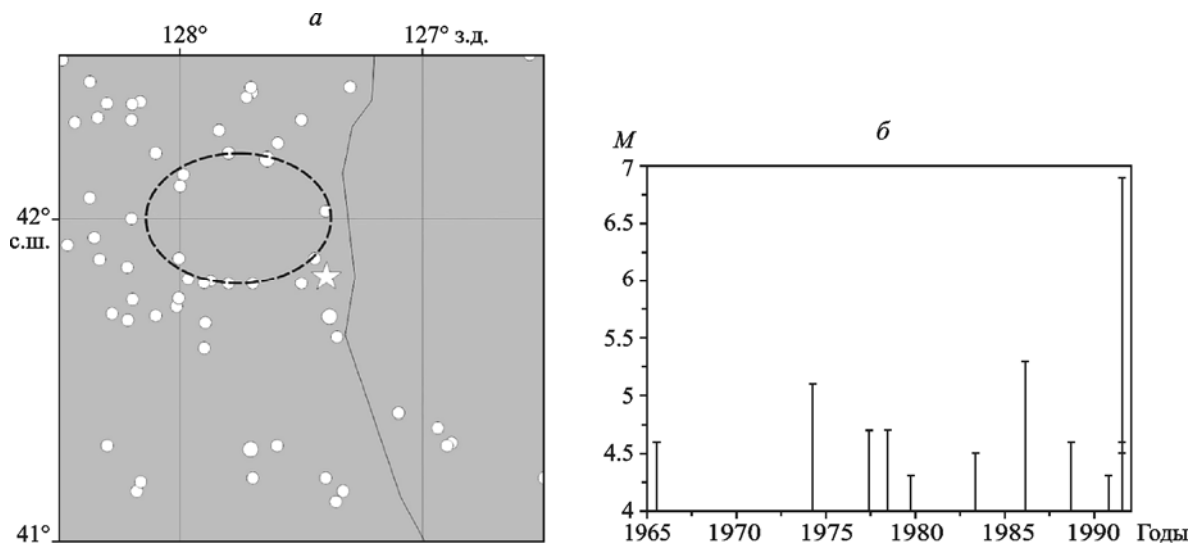
б – зависимость магнитуд землетрясений в области кольцевой структуры от времени;

в – эпицентры глубоких землетрясений магнитудой  $M = 3.0–3.8$

направлении. Эпицентр главного события находится на расстоянии около 15 км от кольца сейсмичности. Рис. 2, б иллюстрирует зависимость магнитуд землетрясений в области кольца сейсмичности от времени. Видно, что в данном случае кольцо начало формироваться с 1967 г.; наблюдается резкий рост скорости сейсмотектонической деформации (СТД) в 1986–1991 гг., когда произошли три события с  $M = 5.1–6.0$ .

На рис. 2, в представлены данные об относительно глубокофокусной сейсмичности. В данном случае не выделено никаких кольцевых структур, однако проявились две линейные полосы эпицентров слабых землетрясений, близкие к мелкому кольцу. Первая полоса ( $M = 3.0–3.7$ ) длиной ~40 км вытянута в северо-западном направлении; на юго-востоке она касается кольцевой структуры. Вторая полоса ( $M = 3.2–3.8$ ) длиной ~55 км ориентирована в субширотном направлении, она практически касается южного края кольца сейсмичности. Эпицентр главного землетрясения находится на расстоянии ~15 км от области наибольшего сближения мелкого кольца и глубокой полосы сейсмичности.

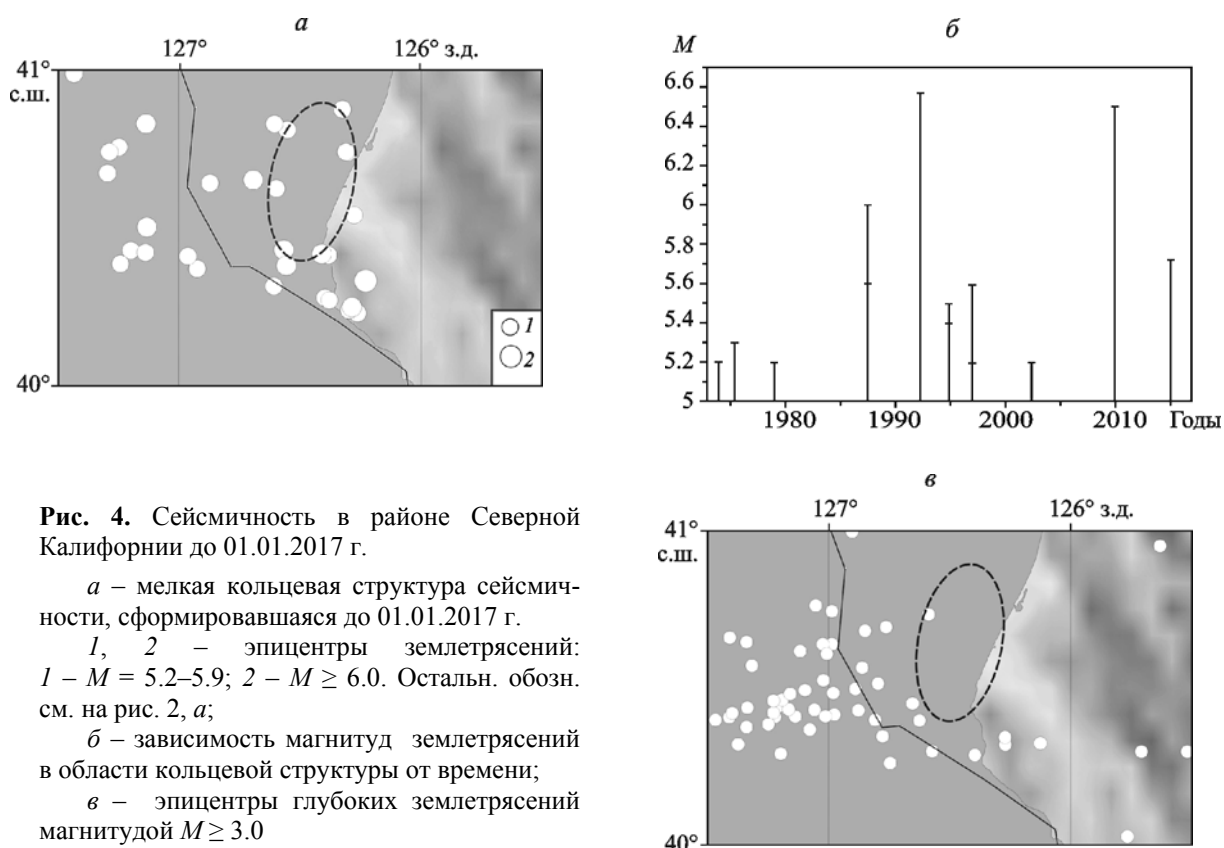
Рис. 3, а иллюстрирует характеристики сейсмичности перед землетрясением 17.08.1991 г. ( $M_w = 7.1$ ), произошедшим на северной границе Калифорнии. Механизм этого события – почти чистый сдвиг. Здесь в 1974–1991 гг. в океанической коре к западу от глубоководного желоба сформировалось кольцо сейсмичности ( $M_n = 4.4$ ,  $L \sim 60$  км), вытянутое в субширотном направлении. Наибольшие скорости СТД в области кольцевой структуры наблюдались в 1990–1991 гг., самое сильное событие имело магнитуду 6.9 (см. рис. 3, б). Следует отметить, что в данном случае не зарегистрировано глубоких землетрясений с  $M \geq 3.0$ .



**Рис. 3.** Мелкая кольцевая структура сейсмичности, сформировавшаяся в зоне субдукции Каскадия перед землетрясением 17.08.1991 г. (а) и зависимость магнитуд землетрясений в области кольцевой структуры от времени (б)

Малые кружки – эпицентры землетрясений магнитудой  $M = 4.4–4.9$ . Остальн. обозн. см. на рис. 2, а

**Кольцевые структуры, сформировавшиеся до 01.01.2017 г.** На рис. 4, а представлены данные о сейсмичности в районе Северной Калифорнии, ограниченном координатами  $40^{\circ}–41^{\circ}$  с.ш.,  $127^{\circ}–125^{\circ}$  з.д. Здесь в 1973–2010 гг. на глубинах 0–33 км сформировалась кольцевая структура ( $M_n = 5.2$ ,  $L \sim 55$  км), вытянутая вдоль побережья в субмеридиональном направлении. Наибольшая магнитуда в области кольца сейсмичности соответствует событию 1992 г. ( $M_{\max} = 6.6$ ). На рис. 4, б показана зависимость магнитуд землетрясений от времени в области кольцевой структуры. Видно, что наибольшие скорости СТД наблюдались в 1986–1994 и 2010–2015 гг.



**Рис. 4.** Сейсмичность в районе Северной Калифорнии до 01.01.2017 г.

*a* – мелкая кольцевая структура сейсмичности, сформировавшаяся до 01.01.2017 г.

*1*, *2* – эпицентры землетрясений: *1* –  $M = 5.2-5.9$ ; *2* –  $M \geq 6.0$ . Остальн. обозн. см. на рис. 2, *a*;

*б* – зависимость магнитуд землетрясений в области кольцевой структуры от времени;

*в* – эпицентры глубоких землетрясений магнитудой  $M \geq 3.0$

Из данных, представленных на рис. 4, *в*, следует, что в данном районе для  $M \geq 3.0$  сформировались три линейные полосы сейсмичности, близкие к мелкому кольцу. Одна из полос, вытянутая в субширотном направлении, проходит на расстоянии менее 10 км от южной границы кольцевой структуры. Еще две полосы проявились к западу от кольца сейсмичности, одна почти касается его границы, а другая – пересекает ее.

На рис. 5, *a* представлены данные о сейсмичности в районе о. Ванкувер. Здесь в 1973–2015 гг. образовалась крупная кольцевая структура с пороговым значением  $M_{п} = 5.0$ . Структура с длиной большой оси  $L \sim 110$  км вытянута в направлении восток–северо-восток. Наибольшая магнитуда  $M_{\max}$  в области кольца сейсмичности составляет 6.5 (для землетрясения 2014 г.). Из данных, приведенных на рис. 5, *б*, видно, что в области кольцевой структуры имел место резкий рост скорости СТД в 2004–2015 гг., когда произошло четыре события с  $M = 6.1-6.5$ .

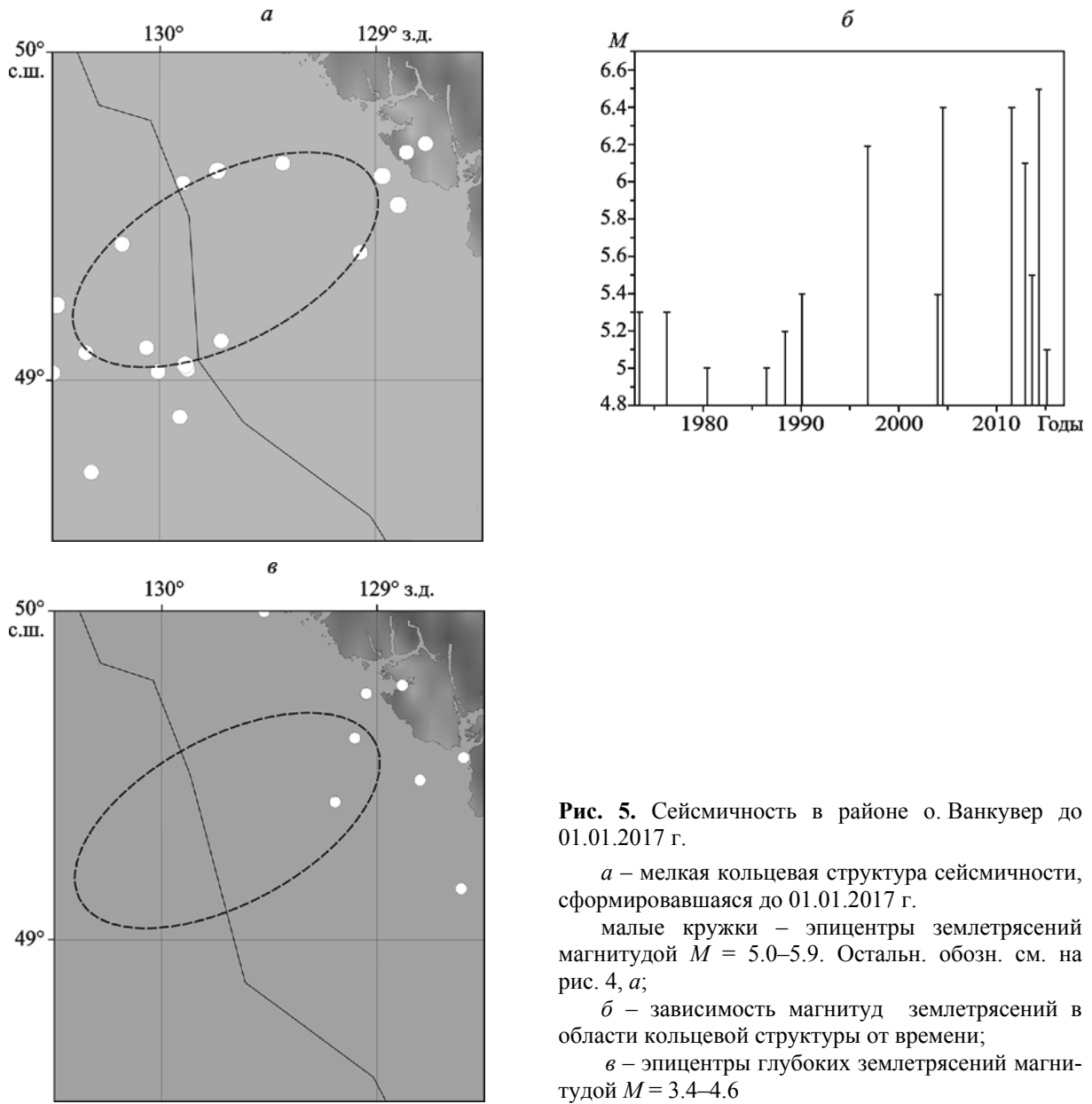
В данном районе в 1987–2012 гг. проявилась V-образная полоса сейсмичности на глубинах более 33 км ( $M = 3.4-4.6$ ,  $h = 34-40$  км, см. рис. 5, *в*). Из приведенных выше данных следует, что в зоне субдукции Каскадия начиная с 1973 г. не сформировалось ни одной глубокой кольцевой структуры, близкой к выделенным мелким кольцам.

**Оценки магнитуд возможных сильных землетрясений.** В работе [Копничев, Соколова, 2013] получены корреляционные зависимости размеров мелких кольцевых структур, а также пороговых значений магнитуды от энергии главных землетрясений для зон субдукции на востоке Тихого океана (от Аляски до Южной Америки) (рис. 6):

$$\lg L \text{ (км)} = -1.33 + 0.45 M_w, \quad r = 0.88, \quad p < 0.0001, \quad (1)$$

$$M_{п} = -0.44 + 0.66 M_w, \quad r = 0.89, \quad p < 0.0001, \quad (2)$$

где  $r$  – коэффициент корреляции;  $p$  – уровень статистической значимости.



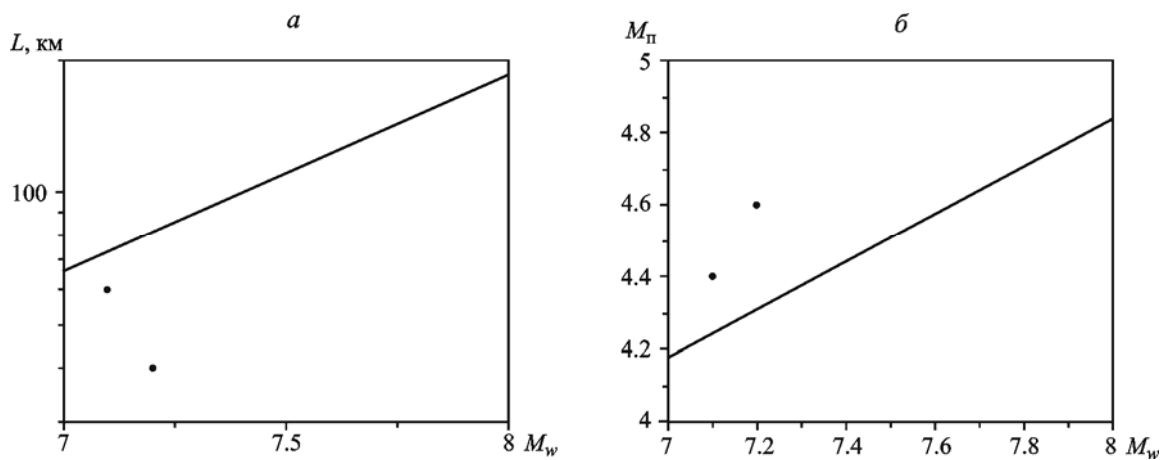
**Рис. 5.** Сейсмичность в районе о. Ванкувер до 01.01.2017 г.

*а* – мелкая кольцевая структура сейсмичности, сформировавшаяся до 01.01.2017 г.

малые кружки – эпицентры землетрясений магнитудой  $M = 5.0-5.9$ . Остальн. обозн. см. на рис. 4, *а*;

*б* – зависимость магнитуд землетрясений в области кольцевой структуры от времени;

*в* – эпицентры глубоких землетрясений магнитудой  $M = 3.4-4.6$



**Рис. 6.** Зависимости  $L(M_w)$  (*а*) и  $M_p(M_w)$  (*б*) для востока Тихого океана

Точки – данные для зоны субдукции Каскадия

Мы использовали эти зависимости для оценки магнитуд сильных землетрясений, которые могут готовиться в областях кольцевых структур, представленных на рис. 4, 5. Из приведенных на рис. 6 данных следует, что величины  $M_{\Pi}$  для зоны субдукции Каскадия заметно завышены относительно зависимости (2), а величины  $L$ , наоборот, занижены относительно зависимости (1). Мы предположили, что наклоны графиков  $\lg L(M_w)$  и  $M_{\Pi}(M_w)$  для рассматриваемого нами района соответствуют зависимостям (1) и (2), а уровни графиков смещены относительно них на величины  $C1 = \text{const}$  и  $C2 = \text{const}$ :

$$\lg L \text{ (км)} = -1.33 + C1 + 0.45 M_w, \quad (3)$$

$$M_{\Pi} = -0.44 + C2 + 0.66 M_w. \quad (4)$$

Используя полученные данные, были определены указанные величины:  $C1 = -0.20 \pm 0.11$ ,  $C2 = 0.22 \pm 0.07$ .

Оценки величин  $M_w$  по параметрам кольцевых структур

Район	$L$ , км	$M_{\Pi}$	$M_w$
40°–41° с.ш.	60	5.2	7.8±0.5
48.5°–50° с.ш.	110	5.0	7.9±0.1

С помощью формул (3) и (4) получены оценки магнитуд сильных землетрясений, подготовка которых может идти в сформировавшихся до 01.01.2017 г. областях кольцевых структур (таблица). Из приведенных в таблице данных следует, что средние значения магнитуд возможных сильных землетрясений в зоне Каскадия близки к 8 (конечно, эти оценки следует рассматривать только в качестве первого приближения). Для кольцевой структуры в районе Северной Калифорнии наблюдается несоответствие между оценками  $M_w$  по  $L$  и  $M_{\Pi}$  (слишком малое кольцо для данной пороговой магнитуды).

### Обсуждение результатов

Полученные в ходе проведенного исследования данные свидетельствуют о том, что в зоне субдукции Каскадия перед сильными землетрясениями формируются неглубокие кольцевые структуры сейсмичности. Однако в отличие от многих других зон субдукции здесь проявляются не глубокие (в диапазоне 34–70 км) кольцевые структуры, а линейные полосы эпицентров. Как отмечалось в [Копничев, Соколова, 2010, 2011а, б, 2013, 2015, 2016], формирование колец сейсмичности есть отражение процессов самоорганизации геологических систем [Летников, 1992], обеспечивающих подъем глубинных флюидов и в конечном счете ведущих к уменьшению потенциальной энергии Земли. Отличие зоны субдукции Каскадия от других связано с тем, что здесь погружается под континент очень молодая океаническая плита (возраст ~6–9 млн лет в области о. Ванкувер [Abers et al., 2013]). Предполагается, что в теплой плите Хуан-де-Фука гидратирована только океаническая кора [Abers et al., 2013]. В связи с этим при дегидратации материала субдуцируемой плиты выделяется сравнительно малый объем воды, главным образом на небольших глубинах, а в диапазоне 34–70 км, видимо, содержание флюидов слишком мало для формирования кольцевых структур. Отметим, что линейные полосы сейсмичности (вместо колец) на глубинах 34–70 км формируются также в районе Южной Мексики, где под континент погружается другая теплая плита – Кокос [Abers et al., 2013].

Выше показано, что перед двумя сильными землетрясениями в зоне субдукции сформировались неглубокие кольца сейсмичности. Учитывая эти данные, можно предполагать подготовку сильных сейсмических событий в двух других областях зоны суб-



дукции Каскадия, где нами выделены кольцевые структуры. Из приведенных в таблице данных следует, что в областях кольцевых структур могут произойти события с  $M_w \sim 7.8-7.9$ . Таким образом, сейсмические данные свидетельствуют о том, что в зоне субдукции в настоящее время не формируются кольцевые структуры, которые могут соответствовать готовящемуся гигантскому землетрясению с  $M_w \sim 9.0$  (аналогичному событию 1700 г.).

Нашими исследованиями установлено, что очень крупные кольцевые структуры с высокими значениями  $M_p$  четко проявились перед недавними сильнейшими землетрясениями: Суматра-Андаманским 2004 г. ( $M_w = 9.0$ ), Мауле 2010 г. ( $M_w = 8.8$ ) и Тохоку 2011 г. ( $M_w = 9.0$ ) [Копничев, Соколова, 2010, 2011а, 2013], а также перед Великим Аляскинским землетрясением 1964 г. ( $M_w = 9.2$ ) [Копничев, Соколова, 2012]. Отметим, что своевременное использование информации о кольцевой сейсмичности, вероятно, позволяет прогнозировать возможную реализацию подобных суперсобытий в некоторых зонах субдукции, где их никто не ожидает [Goldfinger et al., 2013]. Вместе с тем необходимо учитывать, что кольца сейсмичности могут перестраиваться в структуры с более высокими величинами  $L$  и  $M_p$  достаточно быстро – в течение 1–2 лет, как это было, например, перед землетрясениями Тохоку 2011 г. и Икике 2014 г. [Копничев, Соколова, 2011а, 2015]. В связи с этим необходимо регулярно (не реже, чем раз в полгода) перепределять характеристики кольцевых структур в целях уточнения мест и магнитуд готовящихся сильных землетрясений. Кроме того, такая информация может быть полезной для среднесрочного прогноза времени таких событий.

В работах [Копничев, Соколова, 2009а, б, 2010, 2011а, б, 2013, 2015, 2016] установлено, что эпицентры многих сильных и сильнейших землетрясений располагаются вблизи областей пересечения или наибольшего сближения мелких колец и глубоких колец или полос сейсмичности. Исходя из этого, можно предполагать, что эпицентры сильных землетрясений, возможно, готовящихся на севере и юге зоны субдукции Каскадия, также будут располагаться вблизи таких областей (см. рис. 4, 5).

В работах [Копничев, Соколова, 2010, 2011а, б, 2013, 2015, 2016] показано, что перед многими сильными и сильнейшими землетрясениями наблюдается резкий рост скорости СТД в областях кольцевых структур непосредственно в последнее десятилетие перед этими событиями (см. также рис. 2, б; 3, б). Подобный эффект наблюдается и в районе о. Ванкувер (см. рис. 5, б). Учитывая этот эффект, можно предполагать, что в этом районе сильное землетрясение в ближайшие годы наиболее вероятно.

### Заключение

В работе рассмотрены некоторые характеристики сейсмичности в зоне субдукции Каскадия, расположенной на западе Северной Америки. Показано, что перед двумя сильными землетрясениями (17.08.1991 г.,  $M_w = 7.1$  и 25.04.1992 г.,  $M_w = 7.2$ ) здесь начиная с 1964 г. сформировались неглубокие кольцевые структуры сейсмичности ( $h = 0-33$  км) с пороговыми значениями магнитуд  $M_p$  соответственно 4.4 и 4.6. В то же время в этом регионе в отличие от многих других зон субдукции не проявились глубокие (в диапазоне глубин 34–70 км) кольцевые структуры. Вместе с тем в этой зоне в некоторых случаях проявляются глубокие полосы сейсмичности с низкими величинами  $M_p$ . На юге и севере рассматриваемой зоны выделены две новые кольцевые структуры с величинами  $M_p = 5.2$  и  $5.0$  соответственно, которые начали формироваться после 1973 г. По аналогии с другими зонами субдукции можно предполагать, что в областях этих структур готовятся сильные землетрясения.

На основании корреляционных зависимостей размеров колец сейсмичности и величин  $M_p$  от магнитуд главных событий, полученных ранее для востока Тихого океана,

оценены магнитуды возможных здесь сильных землетрясений:  $M_w = 7.8 \pm 0.5$  и  $7.9 \pm 0.1$ . Это позволяет сделать вывод, что в настоящее время в зоне субдукции Каскадия не готовится сильнейшее событие с  $M_w \sim 9.0$ , аналог землетрясения 1700 г. В то же время весьма вероятна реализация в ближайшие годы сильного землетрясения с  $M_w \sim 7.9$  в районе о. Ванкувер, где начиная с 2004 г. резко увеличилась скорость СТД.

Предполагается, что формирование мелких колец и глубоких полос сейсмичности в исследуемом регионе, так же как и в других сейсмоактивных районах мира, связано с миграцией глубинных флюидов. Отсутствие глубоких кольцевых структур сейсмичности в зоне субдукции Каскадия, скорее всего, связано с субдукцией молодой океанической плиты, литосфера которой характеризуется относительно низким содержанием гидратированных пород [Abers et al., 2013].

## Литература

- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Кольцевая сейсмичность в разных диапазонах глубин перед сильными и сильнейшими землетрясениями в зонах субдукции // Докл. РАН. 2009а. Т. 425, № 4. С. 539–542.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Характеристики кольцевой сейсмичности в разных диапазонах глубин перед сильными и сильнейшими землетрясениями в районе Суматры // Докл. РАН. 2009б. Т. 429, № 1. С. 106–109.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. О корреляции характеристик сейсмичности и поля поглощения  $S$ -волн в районах кольцевых структур, формирующихся перед сильными землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 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 г.,  $M_w = 8.8$ ) 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 разных диапазонах глубин перед сильными и сильнейшими землетрясениями в районах Алеут и Аляски // Вестн. НЯЦ РК. 2012. Вып. 1. С. 137–146.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Характеристики кольцевых структур сейсмичности, формирующихся перед сильными и сильнейшими землетрясениями на периферии Тихого океана // Вестн. НЯЦ РК. 2013. Вып. 2. С. 131–140.
- 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. ( $M_w = 8.2$ ) // Вестн. НЯЦ РК. 2015. Вып. 4. С. 153–159.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Кольцевые структуры сейсмичности в районе Южной Мексики: Возможная подготовка сильного землетрясения // Вестн. НЯЦ РК. 2016. Вып. 4. С. 24–29.
- Летников Ф.А. Синергетика геологических систем. Новосибирск: Наука, 1992. 229 с.
- Abers G., Nakajima J., van Keken P., Kita S., Hacker B. Thermal-petrological controls on the location of earthquakes within subducting plates // Earth Planet. Sci. Lett. 2013. V. 369–370. P. 178–187.
- Goldfinger C., Ikeda Ya., Yeats R., Ren J. Superquakes and supercycles // Seismol. Res. Lett. 2013. V. 84, N 1. P. 24–32.
- Kulkarni R., Wong I., Zachariasen J., Goldfinger C., Lawrence M. Statistical analysis of great earthquake recurrence along the Cascadia subduction zone // Bull. Seismol. Soc. Amer. 2013. V. 103, N 6. P. 3205–3221.
- Satake K., Wang K., Atwater B. Fault slip and seismic moment of the 1700 Cascadia earthquake inferred from Japanese tsunami descriptions // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, N B11. DOI 10.1029/2003JB002521.

*Сведения об авторах*

**КОПНИЧЕВ Юрий Федорович** – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7 (7272) 956-350. E-mail: yufk777@mail.ru

**KOPNICHYEV Yuri F.** – dr. of ph. & math., professor, chief research scientist, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. Moscow, Russia. Tel.: +7 (7272) 956-350. E-mail: yufk777@mail.ru

**СОКОЛОВА Инна Николаевна** – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геофизических исследований Министерства энергетики Республики Казахстан. Республика Казахстан, 050020, г. Алма-Ата, ул. Чайкиной, д. 4. Тел.: +7 (7272) 631-330. E-mail: sokolova.inessa@mail.ru

**SOKOLOVA Inna N.** – dr. of ph. & math., senior scientist, Institute of Geophysical Research, Ministry of Energy of Republic of Kazakhstan. Almaty, Kazakhstan. Tel.: +7 (7272) 631-330. E-mail: sokolova.inessa@mail.ru

## RING-SHAPED SEISMICITY STRUCTURES IN THE CASCADIA SUBDUCTION ZONE: POSSIBLE NUCLEATION OF LARGE EARTHQUAKES

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

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

<sup>2</sup> Institute of Geophysical Research, Ministry of Energy of Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan

**Abstract.** We have been considering seismicity characteristics in the Cascadia subduction zone, located in the west of the North America. It was established, that since 1964 shallow ( $h = 0\text{--}33$  km) ring-shaped seismicity structures with threshold magnitudes  $M_t$  of 4.4 and 4.6 respectively have been formed prior to two large earthquakes (17.08.1991,  $M_w = 7.1$  and 25.04.1992,  $M_w = 7.2$ ). Note that deep ring-shaped structures ( $h = 34\text{--}70$  km) were not observed here, in contrast to many other subduction zones. At the same time deep seismicity strips are formed in some cases in this zone. We have been identified two new ring-shaped structures with values  $M_t$  of 5.0 and 5.2, which began to form since 1973. It is supposed that large earthquakes can be nucleated in these areas. On the basis of correlation dependences of ring sizes and  $M_t$  values on magnitudes of major events, obtained earlier for the east of Pacific, we estimated magnitudes for possible large earthquakes:  $M_w = 7.8$  and  $7.9$ . It follows from this data that the giant earthquake with  $M_w \sim 9$ , analog of the 1700 event is not being nucleated now in the subduction zone. At the same time a realization of large earthquake ( $M_w = 7.9 \pm 0.1$ ) is most probable in the area of Vancouver island during the nearest years. It is supposed that the formation of the shallow seismicity rings and deep strips is connected with deep-seated fluid migration, similarly to other regions.

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