

УДК 551.242.1 (550.34)

СОВРЕМЕННЫЙ СЕЙСМИЧЕСКИЙ ДЕФИЦИТ В КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ЗОНЕ СУБДУКЦИИ

© 2020 г. Член-корреспондент РАН Б. В. Левин^{1,2}, А. С. Прытков^{1,*},
Н. Ф. Василенко¹, Д. И. Фролов³

Поступило 12.10.2019 г.

После доработки 28.01.2020 г.

Принято к публикации 02.02.2020 г.

На основе анализа сейсмичности за период 1900–2018 гг. выполнена оценка сейсмического потенциала Курило-Камчатской зоны субдукции, уточнена геометрия межплитового сцепления Североамериканской и Тихоокеанской литосферных плит и скорость их сейсмического поддвига. Для выявления областей современного сейсмического дефицита в зоне субдукции предложен подход, основанный на кумулятивном смещении межплитовых землетрясений с $M_w \geq 7.0$. В совокупности с другими методами такой подход способствует более точной оценке сейсмической опасности региона.

Ключевые слова: межплитовое сцепление, сейсмический дефицит, Курило-Камчатская зона субдукции

DOI: 10.31857/S2686739720040106

Курило-Камчатская зона субдукции протяженностью около 2200 км является одним из наиболее сейсмоактивных регионов северо-восточной Евразии, где скорость поддвига Тихоокеанской плиты под Североамериканскую достигает 8 см/год. Сильнейшие межплитовые землетрясения возникают на ограниченном сцепленном участке контакта литосферных плит до глубины ~60 км. С 1900 г. в Курило-Камчатской зоне субдукции произошло 13 землетрясений с моментной магнитудой $M_w \geq 8.0$, десять из которых относятся к межплитовым событиям [1].

Тектонические деформации в результате взаимодействия плит отражают различные фазы сейсмического цикла [2], изучение закономерностей которого является одним из ключевых направлений в понимании механизмов подготовки землетрясений. Поиск мест возможных землетрясений связан с оценкой сейсмического потенциала различных участков зоны субдукции, зависящего от величины сцепления взаимодействующих плит, а также с выявлением “брешей” (областей сейсмического затишья) — сегментов, накопивших зна-

чительные напряжения, но имеющие дефицит сейсмического смещения относительно поддвига литосферных плит. Обычно поиск таких мест основан на оценке площади очагов исторических землетрясений, которые выделяют по областям афтершоков. Современные исследования распределений косейсмических подвижек показывают, что такие оценки часто приводят к завышению площади очаговой зоны. Существенный прогресс в данном направлении связан с организацией в последние два десятилетия спутниковых GNSS-измерений, которые показали хорошую корреляцию между участками зоны субдукции с высоким коэффициентом сцепления и районами последующих сильных землетрясений [1]. Однако, детальные исследования возможны только при достаточно плотных GNSS-сетях и длительных периодах наблюдений, позволяющих судить о постоянстве пространственно-временной межплитовой связи.

Отношение сейсмической скорости поддвига V_{seis} к скорости субдукции V_{subd} литосферных плит определяет коэффициент сцепления $\chi = V_{\text{seis}}/V_{\text{subd}}$ [3], который является мерой сейсмической активности и показывает, какая часть накопленного напряжения высвобождается во время межплитовых событий. Значение $\chi = 1$ соответствует полному сцеплению и свидетельствует, что в зоне субдукции реализовалось все накопленное напряжение, $\chi = 0$ может означать, что смещение происходит асейсмически, либо накопленные напряжения не высвободились в данный временной интервал.

¹ Институт морской геологии и геофизики
Дальневосточного отделения Российской академии наук,
Южно-Сахалинск, Россия

² Институт океанологии им. П.П. Шишова Российской
академии наук, Москва, Россия

³ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: a.prytkov@imgg.ru

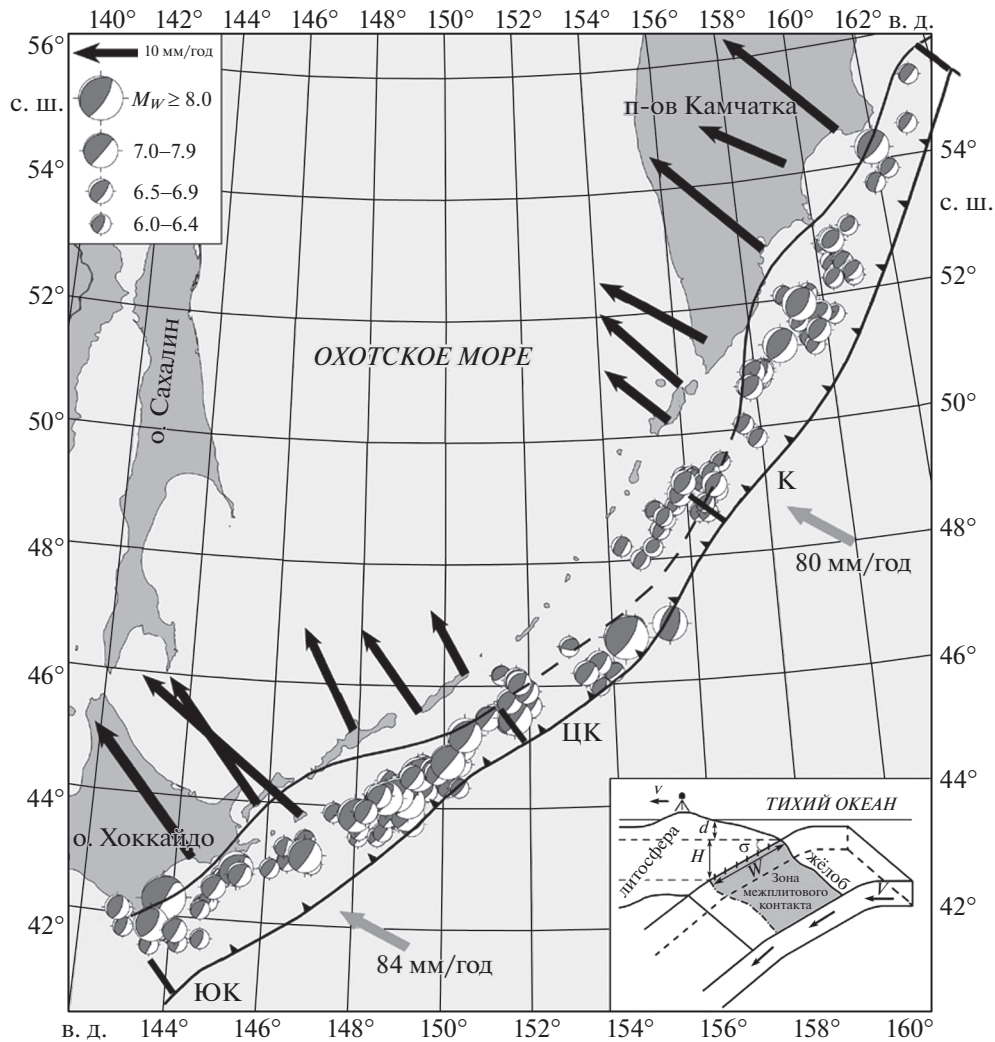


Рис. 1. Механизмы очагов межплитовых землетрясений с $M_w \geq 6.0$ Курило-Камчатской зоны субдукции за период 1976–2018 гг. по данным каталога СМТ [5]. ЮК – Южно-Курильский, ЦК – Центрально-Курильский, К – Камчатский сегменты зоны субдукции. Темными стрелками показаны межсейсмические скорости GNSS-пунктов региона за период 2006–2018 гг., светлыми – направления и скорость схождения литосферных плит. Скорости пунктов полуострова Камчатка приведены по данным [7]. Сплошной линией и пунктиром показано модельное геодезическое решение геометрии сцепления литосферных плит в виде наклонной ширины контакта. На врезке представлена параметрическая модель зоны субдукции: σ – угол субдукции, V – скорость субдукции, W – ширина механического контакта, d – глубина желоба, H – глубина контакта относительно желоба, v – межсейсмическая скорость GNSS-станции.

Скорость сейсмического подвига определяется отношением $V_{\text{seis}} = \sum M_0^i / \mu S T$ [4], где M_0 – скалярный сейсмический момент i -го межплитового землетрясения (Нм), μ – средний модуль сдвига среды (в исследовании принят 5×10^{10} Н/м²), S – площадь контакта плит (км²), T – период времени осреднения в годах.

Для оценки площади контакта плит Курило-Камчатская зона субдукции разделена на 3 сегмента: Южно-Курильский (ЮК), протяженностью 780 км, Центрально-Курильский 520 км (ЦК) и Камчатский (К), протяженностью 900 км (рис. 1). Глубина контакта и угол субдукции каж-

дого участка оценены по землетрясениям с $M_w \geq 6.0$ из каталога тензоров сейсмического момента СМТ [5] за период 1976–2018 гг. согласно общепринятым представлениям [1, 6]. Глубина контакта определена по 95%-ному (2σ) доверительному интервалу двойного нормального распределения землетрясений по глубине (рис. 2).

Кумулятивный скалярный сейсмический момент $\sum M_0^i$ межплитовых землетрясений с $M_w \geq 7.0$ вычислен за период 1900–2018 гг. С 1900 по 1975 гг. использовался каталог землетрясений [8], M_0 которых определен по формуле $M_w = 2/3(\lg M_0 - 16.1)$. Для периода 1976–2018 гг. ис-

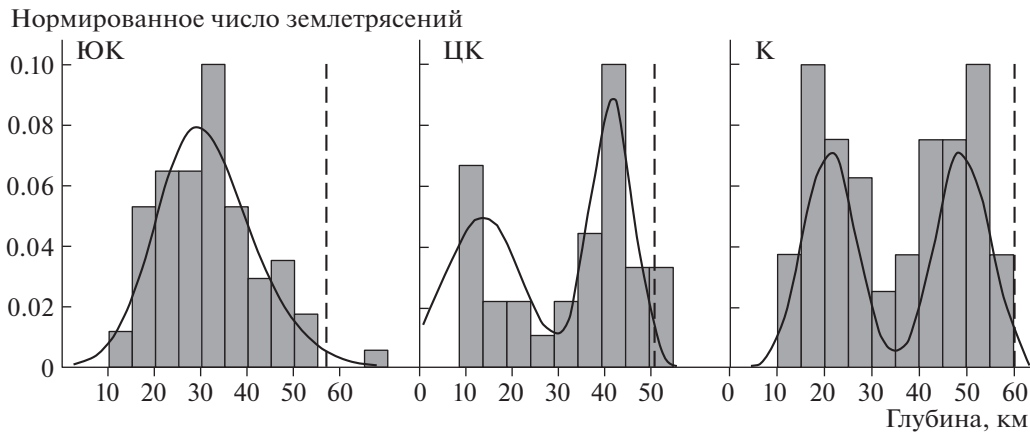


Рис. 2. Нормированное по глубине число межплитовых землетрясений с $M_w \geq 6.0$ для сегментов Курило-Камчатской зоны субдукции за период 1976–2018 гг. ЮК – Южно-Курильский, ЦК – Центральнo-Курильский, К – Камчатский сегменты зоны субдукции. Сплошной линией показано двойное нормальное распределение землетрясений, рассчитанное методом наименьших квадратов. Пунктирная линия ограничивает 95%-ный (2σ) доверительный интервал двойного нормального распределения глубины контакта плит относительно геоида.

пользовался сейсмический момент из каталога СМТ.

Параметры Курило-Камчатской зоны субдукции приведены в таблице 1. Сейсмическая площадь контакта плит S_{seis} хорошо согласуется с геодезическим решением S_{GNSS} , выполненным на основе инверсии межсейсмических GNSS-скоростей пунктов региона за период 2006–2018 гг. по методике [9] (рис. 1). Существенное различие отмечается только для сегмента ЦК, в отношении которого геодезическое решение является результатом интерполяции ввиду отсутствия данных о межсейсмических скоростях в этом районе.

Камчатский сегмент характеризуется высоким уровнем сейсмической активности, за период 1900–2018 гг. скорость сейсмического поддвига составляет 82 мм/год (табл. 1). Максимальный вклад в это значение вносит землетрясение 1952 г. с $M_w = 9.0$, расчетный сейсмический момент которого $M_0 = 380 \times 10^{20}$ Нм. Мы скорректировали это значение, приняв $M_0 = 230 \times 10^{20}$ Нм по данным работы [10]; при этом скорость сейсмического поддвига составила 56 мм/год, коэффициент

сцепления 0.71. Скорость сейсмического поддвига в сегменте ЮК достигает 46 мм/год, что соответствует коэффициенту сцепления 0.55, и свидетельствует о том, что за анализируемый интервал времени реализовалось более половины от максимально возможного накопленного напряжения. В сегменте ЦК наблюдается низкий уровень сейсмической активности. Предполагалось, что в этом районе не могут генерироваться землетрясения $M_w > 8.0$ [11]. Однако, в 2006 г. здесь произошло Симуширское землетрясение $M_w = 8.3$.

Можно полагать, что скорость крипового (асейсмического) поддвига в зоне субдукции по последовательности сильнейших землетрясений региона не превышает ~10% от общей сейсмической скорости [12]. В таком случае дефицит сейсмического момента для всего сегмента ЮК может составлять 183.7×10^{20} Нм, что соответствует землетрясению $M_w \sim 8.8$; для ЦК – 136.8×10^{20} Нм ($M_w \sim 8.7$); для сегмента К – 88.7×10^{20} Нм ($M_w \sim 8.6$).

Для выявления областей современного сейсмического дефицита в зоне субдукции использована оценка кумулятивного сейсмического смещения

Таблица 1. Параметры сегментов Курило-Камчатской зоны субдукции

Сегмент	L км	H км	σ^0	W км	S_{seis} , $\times 10^3$ км ²	S_{GNSS} , $\times 10^3$ км ²	ΣM_0 , $\times 10^{20}$ Нм	V_{seis} , мм/год	V_{subd} , мм/год	χ_{seis}
ЮК	780	49	21	137	106.9	106.7	288.7	46	83	0.55
ЦК	520	43	29	89	46.3	30.9	61.8	23	82	0.28
К	900	52	28	111	99.9	110.1	481.5 (331.4)	82 (56)	79	1.04 (0.71)

Примечание: L – длина сегмента, H – глубина контакта плит относительно желоба, σ – угол субдукции, W – ширина механического контакта, S_{seis} – сейсмическая площадь, S_{GNSS} – геодезическая площадь, ΣM_0 – кумулятивный сейсмический момент, V_{seis} – скорость сейсмического поддвига, V_{subd} – скорость субдукции, χ_{seis} – коэффициент сейсмического сцепления за период 1900–2018 гг. В скобках приведены скорректированные значения.

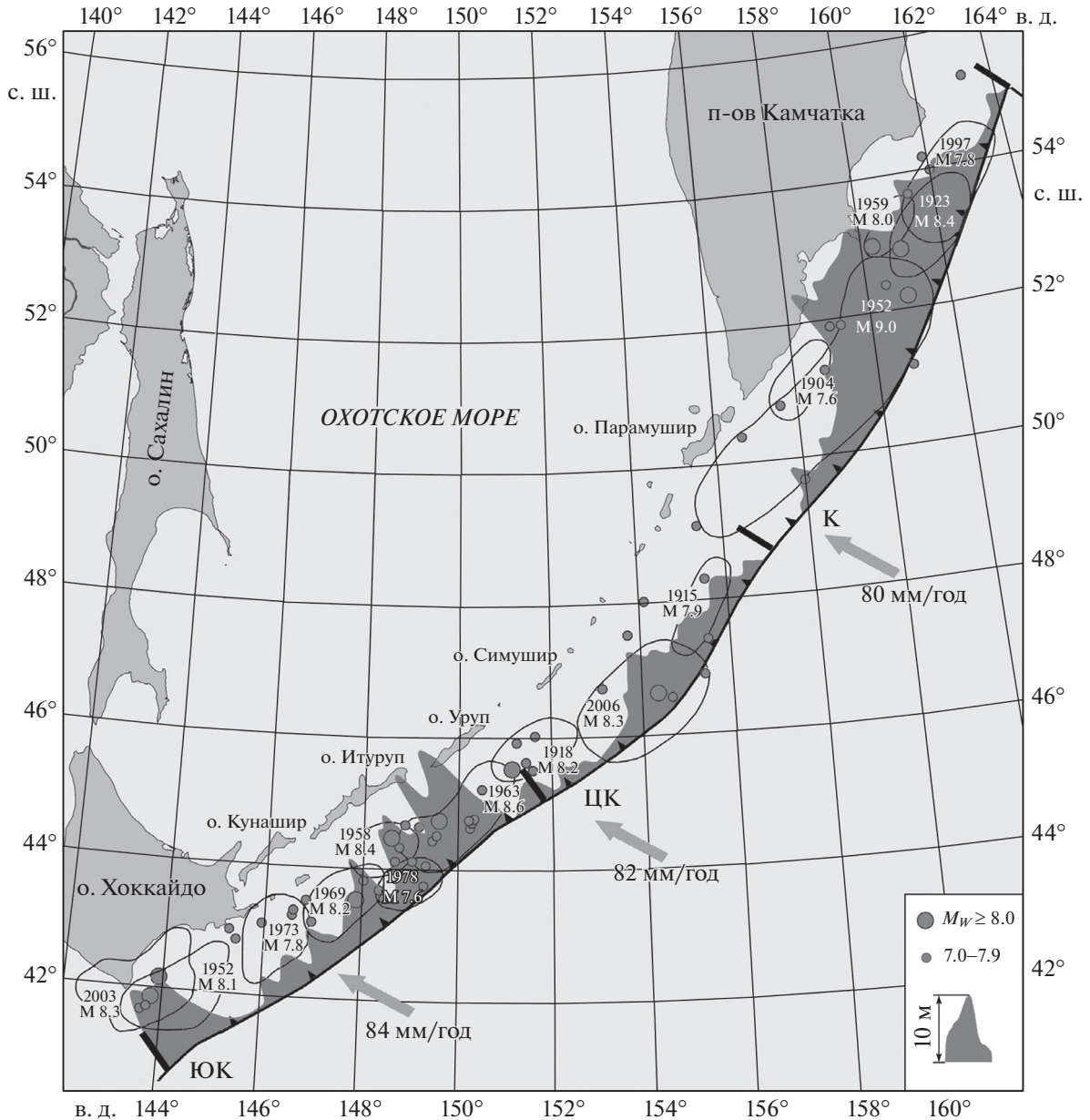


Рис. 3. Кумулятивное сейсмическое смещение межплитовых землетрясений с $M_w \geq 7.0$ за период 1900–2018 гг. в Курило-Камчатской зоне субдукции. Масштаб сейсмического смещения показан во врезке. Контуры очагов землетрясений с $M_w \geq 7.5$ приведены по данным [15].

межплитовых землетрясений. Расчет смещений выполнен на основе инверсии сейсмологических решений для подвижек в очагах таких землетрясений [13, 14]. Для индивидуального события смещение D_x по падению можно представить в виде нор-

мального распределения: $D_x = D_{\max} e^{-\frac{x^2}{0.145^2 L^2}}$, где x – расстояние от эпицентра землетрясения, D_{\max} – максимальное смещение, L – длина очага по простиранию. Коэффициент 0.145 определен эмпирически для всех 64 межплитовых событий региона с $M_w \geq 7.0$.

Кумулятивное сейсмическое смещение в Курило-Камчатской зоне субдукции в результате межплитовых землетрясений с $M_w \geq 7.0$ за период 1900–2018 гг. показано на рис. 3. В северной части о. Итуруп и центральной части п-ва Камчатка расчетное смещение составляет ~18 м, что превышает величину подвига Тихоокеанской плиты за 118 лет в 2 раза. Такие величины могут отвечать за более продолжительный период, чем принят в исследовании. В сегменте ЮК дефицит сейсмического смещения протяженностью ~300 км наблюдается от центральной части о. Хоккайдо до север-

ной части о. Кунашир. Относительно скорости субдукции литосферных плит его величина составляет от 3 до 8.8 м. В сегменте ЦК дефицит 3–8.6 м присутствует в области от о. Уруп до эпицентральной зоны Симуширского землетрясения 2006 г. В южной части Камчатского сегмента обширная область дефицита сейсмического смещения простирается на ~450 км. С 1900 г. в этом районе не зарегистрировано землетрясений с $M_w > 7.5$.

В заключение отметим, что хотя в предложенном подходе распределение сейсмических смещений по простиранию очага землетрясения является идеализированным (оно симметрично относительно эпицентра), тем не менее, выполненный анализ кумулятивного смещения в зоне субдукции позволяет достаточно уверенно выделить области современного сейсмического дефицита. В совокупности с другими методами такой подход способствует более точной оценке сейсмической опасности региона.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМГиГ ДВО РАН и частичной финансовой поддержке Программы “Приоритетные научные исследования в интересах комплексного развития ДВО РАН” (проект № 18–5–024).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bilek S.L., Lay T.* // *Geosphere*. 2018. V. 14. № 4. P. 1468–1500.
2. *Федотов С.А.* // *Сейсмическое районирование СССР*, гл. 8. М.: Наука, 1968. С. 121–150.
3. *Peterson E.T., Seno T.* // *J. Geophys. Res.* 1984. V. 89 (B12). P. 10233–10248.
4. *Brune J.* // *J. Geophys. Res.* 1968. V. 73. P. 777–784.
5. *Dziewonski A.M., Chou T.A., Woodhouse J.H.* // *J. Geophys. Res.* 1981. V. 86 (B4). P. 2825–2852.
6. *Pacheko J.F., Sykes L.R., Scholz C.H.* // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. (B8). P. 14133–14159.
7. *Левин В.Е., Бахтияров В.Ф., Тумков Н.Н. и др.* // *Физика Земли*. 2014. № 6. С. 17–36.
8. *Engdahl E.R., Villaseñor A.* *Global Seismicity: 1900–1999*, in W.H.K. Lee, H. Kanamori, P.C. Jennings, and C. Kisslinger (Eds), *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Part A, Chapter 41*, Academic Press, 2002. P. 665–690.
9. *Savage J.C., Svarc J.L., Prescott W.H.* // *Geophys. Res. Lett.* 1999. V. 26. P. 2117–2120.
10. *Okal E.A.* // *Pure Appl. Geophys.* 1992. V. 139. P. 17–57.
11. *Тараканов П.З.* // *Вулканология и сейсмология*. 1995. № 1. С. 3–16.
12. *Гордеев Е.И., Павлов В.М.* // *Физика Земли*. 2009. № 4. С. 56–66.
13. *Skarlatoudis A.A., Somerville P.G., Thio H.K.* // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2016. V. 106. № 4. P. 1652–1662.
14. *Blaser L., Kruger F., Ohmberger M., et al.* // *Bull. Seis. Soc. Am.* 2010. V. 100 (6). P. 2914–2926.
15. *Федотов С.А., Соломатин А.В.* // *Вулканология и сейсмология*. 2017. № 3. С. 3–17.

CONTEMPORARY SEISMIC DEFICIT IN THE KURIL-KAMCHATKA SUBDUCTION ZONE

Corresponding member of the RAS **B. W. Levin^{a,b}, A. S. Prytkov^{a,#}, N. F. Vasilenko^a, and D. I. Frolov^c**

^a *Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia*

^b *P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^c *Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia*

[#] *E-mail: a.prytkov@imgg.ru*

Based on the analysis of seismicity for the period 1900–2018, the seismic potential of the Kuril-Kamchatka subduction zone was assessed, the geometry of the interplate coupling of the North American and Pacific lithospheric plates and the rate of their seismic subduction was clarified. The approach based on the estimation of the cumulative displacement of interplate earthquakes $M_w \geq 7.0$ is proposed to identify the areas of contemporary seismic deficit in the subduction zone. Together with other methods, this approach contributes to a more accurate assessment of seismic hazard in the region.

Keywords: interplate coupling, seismic deficit, Kuril-Kamchatka subduction zone