



THE MARCH 25, 2020 M_w 7.5 PARAMUSHIR EARTHQUAKE AND ITS IMPACT ON RECENT GEODYNAMICS OF THE ADJACENT SECTION OF THE KURIL-KAMCHATKA SUBDUCTION ZONE

A.S. Prytkov  , N.F. Vasilenko 

Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 1B Nauki St, Yuzhno-Sakhalinsk 693022, Russia

ABSTRACT. An intraplate tsunamigenic earthquake with $M_w=7.5$ occurred on March 25, 2020 southeast of the Paramushir Island (Kuril Islands) beneath the outer slope of the Kuril-Kamchatka Trench. Since 1900, this earthquake has been the largest event for an 800-km long oceanic slope and a 300-km long segment of the Kuril seismofocal zone located near the epicenter. Sub-horizontal compression stresses generated in the earthquake source region were oriented across the seismofocal zone. A type of motion is represented by reverse faulting along the both nodal planes.

The compressive stress state in which there occurred the Paramushir earthquake reflects the present-day geodynamics in the subduction zone near the hypocenter. The paper shows that the earthquake occurrence is due to a strong mechanical contact surface between the Pacific and North American lithospheric plates in the subduction zone. The analysis of coseismic displacement of the nearest Global Navigation Satellite System (GNSS) station served as confirmation of the determination of fault plane solution of the earthquake. A seismogenerating motion occurred along the plane oriented to the southwest and dipping towards the trench. For Finite fault source models, there were calculated the increments of the Coulomb stress in the subduction zone. For the main fault plane, the increment of the Coulomb stress in the interplate contact area propagates to a depth of ~ 30 km and reaches 1 bar.

Coseismic stress increment in the subduction zone at the northern flank of the Kuril island arc, which has a high seismic potential at the present stage of the tectonic cycle, increases the likelihood of the largest interplate earthquake occurrence therein.

KEYWORDS: Kuril-Kamchatka subduction zone; recent geodynamics; earthquake source; GNSS observations; coseismic displacements; dislocation model

FUNDING: The work was done as part of the state assignment for the IMGG FEB RAS (121022000085-9).

RESEARCH ARTICLE

Received: June 15, 2021

Revised: January 31, 2022

Accepted: February 14, 2022

Correspondence: Alexander S. Prytkov, a.prytkov@imgg.ru

FOR CITATION: Prytkov A.S., Vasilenko N.F., 2022. The March 25, 2020 M_w 7.5 Paramushir Earthquake and Its Impact on Recent Geodynamics of the Adjacent Section of the Kuril-Kamchatka Subduction Zone. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (3), 0641. doi: 10.5800/GT-2022-13-3-0641

ПАРАМУШИРСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 25.03.2020 г., $M_w=7.5$, И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА СОВРЕМЕННУЮ ГЕОДИНАМИКУ ПРИЛЕГАЮЩЕГО УЧАСТКА КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ЗОНЫ СУБДУКЦИИ

А.С. Прытков, Н.Ф. Василенко

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 693022, Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б, Россия

АННОТАЦИЯ. 25 марта 2020 г. юго-восточнее о. Парамушир (Северные Курильские острова) под внешним тихоокеанским склоном Курило-Камчатского глубоководного желоба произошло внутриплитовое цунамигенное землетрясение с магнитудой $M_w=7.5$. Землетрясение оказалось сильнейшим с 1900 г. сейсмическим событием для прилегающих к эпицентру океанического склона протяженностью около 800 км и трехсоткилометрового сегмента Курильской сейсмофокальной зоны. В очаге землетрясения реализовались напряжения субгоризонтального сжатия, ориентированные вкрест сейсмофокальной зоны. Тип подвижки – взброс по обоим нодальным плоскостям.

Напряженное состояние сжатия, в условиях которого произошло Парамуширское землетрясение, отражает современную геодинамическую обстановку в прилегающей к гипоцентру зоне субдукции. В работе показано, что возникновение землетрясения обусловлено высокой степенью сцепления поверхности механического контакта Тихоокеанской и Североамериканской литосферных плит в зоне субдукции. На основе анализа косейсмического смещения ближайшей Global Navigation Satellite System (GNSS) станции подтвержден выбор действующей плоскости сейсморазрыва в очаге землетрясения. Сейсмогенерирующая подвижка произошла по плоскости, ориентированной в юго-западном направлении и падающей в сторону глубоководного желоба. Для дислокационных моделей очага Finite fault рассчитаны приращения кулоновского напряжения в зоне субдукции. Для приоритетной плоскости сейсморазрыва приращение кулоновского напряжения в области межплитового контакта распространяется до глубины ~ 30 км и достигает 1 бара.

Косейсмическое приращение напряжений в зоне субдукции на северном фланге Курильской островной дуги, который на современном этапе тектонического цикла обладает высоким нереализованным сейсмическим потенциалом, в долгосрочной перспективе повышает вероятность возникновения здесь сильнейшего межплитового землетрясения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Курило-Камчатская зона субдукции; современная геодинамика; очаг землетрясения; GNSS наблюдения; косейсмическое смещение; дислокационная модель

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена в рамках государственного задания Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (тема 121022000085-9).

1. ВВЕДЕНИЕ

25 марта 2020 г. в 200 км к юго-востоку от о. Парамушир (Северные Курильские острова) под внешним океаническим склоном Курило-Камчатского глубоководного желоба на глубине ~ 60 км произошло внутриплитовое цунамигенное землетрясение с магнитудой $M_w=7.5$ (рис. 1). В соответствии с географическим положением очага сейсмическое событие названо Парамуширским землетрясением. Оно ощущалось в г. Северо-Курильске с интенсивностью 5–6 баллов по шкале MSK-64. Визуально определенная высота волн цунами на побережье острова составила около 0.5 м [Korolev Yu.P., Korolev P.Yu., 2020].

Землетрясение является довольно редким сильным внутриплитовым сейсмическим событием для океанического склона глубоководного желоба и сильнейшим с 1900 г. для прилегающего к гипоцентру трехсоткилометрового участка зоны субдукции [USGS..., 2021]. Единственное сопоставимое по силе землетрясение, $M=7.3$, произошло в этом районе в 1916 г. севернее эпицентральной области настоящего сейсмического события.

В очаге землетрясения реализовались напряжения субгоризонтального сжатия, ориентированные по направлению СЗ–ЮВ вкрест тектонических структур Курильской сейсмофокальной зоны. Тип подвижки – взброс по обоим возможным нодальным плоскостям [USGS..., 2021; Earthquakes Catalogue..., 2021]. Эпицентр главного толчка приурочен к южному краю области афтершоков, вытянутой на ~ 100 км вдоль океанического склона глубоководного желоба. Пространственное распределение афтершоков по глубине не позволило достоверно выделить действующую плоскость сейсморазрыва [Prytkov, Vasilenko, 2021; Lutikov et al., 2021]. Анализ развития сейсмического процесса выявил дефицит сильных землетрясений в афтершоковой последовательности (кумулятивная энергия афтершоков в $\sim 2 \times 10^3$ раза меньше энергии главного события) и его быстрое убывание с переходом в фоновый режим на 20-е сутки после главного толчка [Prytkov, Vasilenko, 2021].

Землетрясения, происходящие в океанической плите под внешним склоном глубоководного желоба и восточнее от него (далее по тексту – внешние землетрясения), являются индикатором напряженного состояния

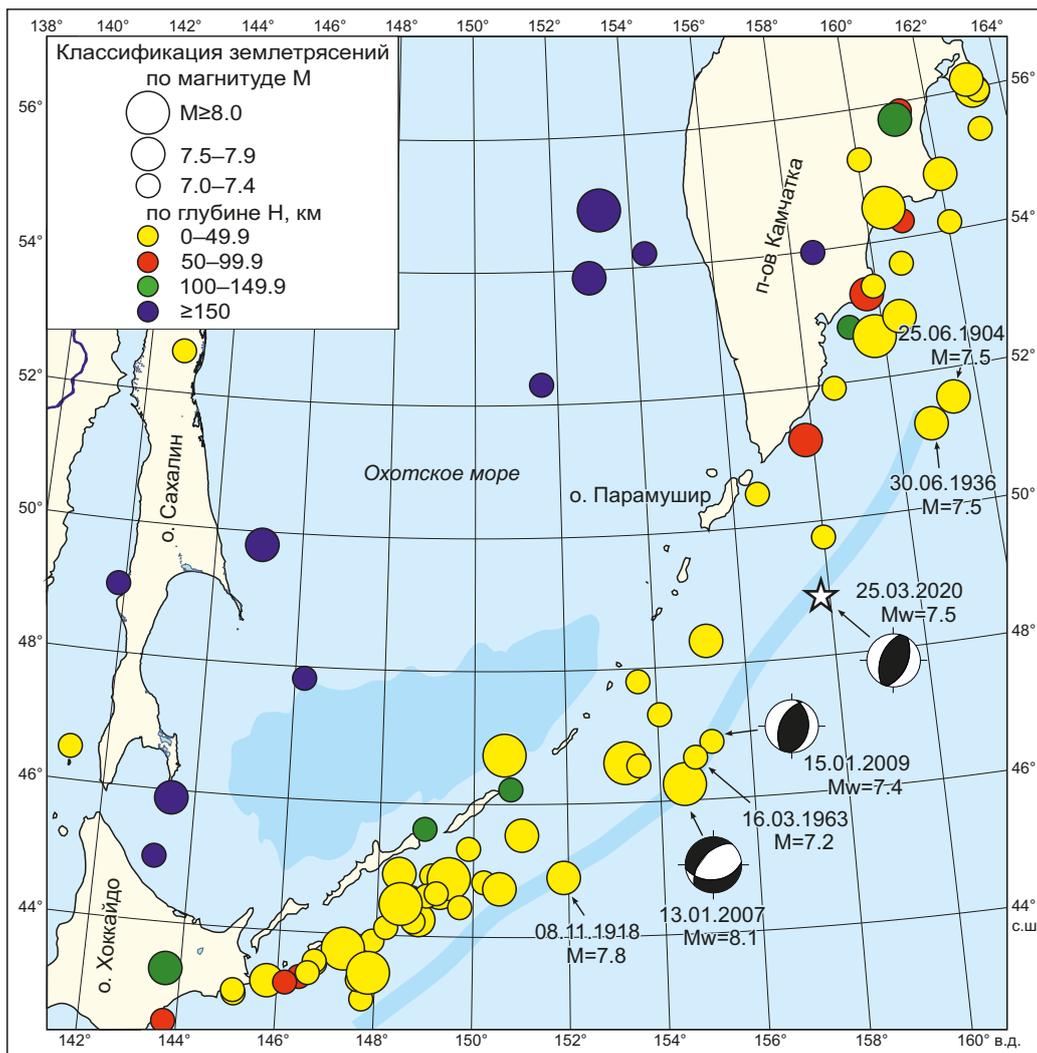


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений Курило-Камчатского региона с $M \geq 7.0$ за период 1900–2020 гг. по данным [USGS..., 2021]. Звездочкой отмечен эпицентр Парамуширского землетрясения 25.03.2020 г., $M_w = 7.5$. Показаны механизмы очагов внешних землетрясений 13.01.2007 г., $M_w = 8.1$, и 15.01.2009 г., $M_w = 7.4$.

Fig. 1. Map of the epicenters of $M \geq 7.0$ earthquakes in the Kuril-Kamchatka region for the 1900–2020 period according to [USGS..., 2021]. An asterisk marks the epicenter of the 25.03.2020 $M_w = 7.5$ Paramushir earthquake. The mechanisms of outer-rise earthquakes of 13.01.2007 $M_w = 8.1$ and 15.01.2009 $M_w = 7.4$ are shown.

в области контакта литосферных плит. Отсутствие межплитового сцепления в зоне субдукции отражается в состоянии растяжения области изгиба погружающейся океанической плиты, что проявляется в соответствующем типе сейсмодислокаций в очагах неглубоких сейсмических событий. По мере того как в результате схождения литосферных плит в сцепленных участках их контакта медленно накапливаются упругие напряжения, в области погружения океанической плиты возникают условия, создающие сжимающие напряжения (рис. 2). В разных зонах субдукции сильные внешние землетрясения, возникшие под преобладающим действием напряжений сжатия, спустя 2–19 лет сопровождались сильнейшими межплитовыми событиями [Christensen, Ruff, 1988]. Установлен факт влияния внешних землетрясений не только на время возникновения, но и на силу последующих субдукционных

событий. Моделирование контакта литосферных плит показало, что внешнее внутриплитовое землетрясение, приближая момент возникновения будущего межплитового события, может уменьшить его силу [Kato, Hirasawa, 1997].

Целью работы является исследование особенностей современной геодинамики северного фланга Курило-Камчатской зоны субдукции в связи с возникновением внешнего внутриплитового Парамуширского землетрясения $M_w = 7.5$. Для этого обобщены данные о геодинамической обстановке в зоне субдукции. На основе дислокационных моделей Finite fault для двух возможных плоскостей сейсморазрыва выполнен анализ ко-сейсмических смещений земной поверхности и обоснован выбор действующей подвижки в очаге, рассчитано изменение кулоновского напряжения в эпицентральной зоне землетрясения.

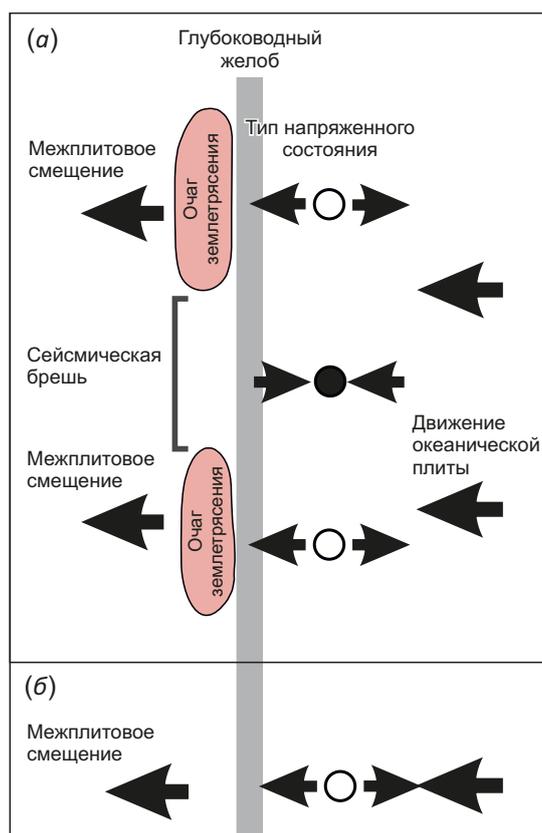


Рис. 2. Схематическая модель напряженного состояния области изгиба погружающейся океанической плиты по данным [Ammon et al., 2008].

(а) – сцепленное состояние поверхности механического контакта литосферных плит в зоне субдукции; (б) – свободное состояние межплитового контакта. Черный круг показывает напряженное состояние сжатия, белый – растяжения.

Fig. 2. Schematic model of the state of stress of the bending area of the sinking oceanic plate after [Ammon et al., 2008].

(а) – a coupled mechanical contact surface of lithospheric plates in the subduction zone; (б) – an interplate contact in its free state. The black circle shows the compressive stress state, and the white circle shows the tension.

2. ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА СЕВЕРНОГО УЧАСТКА КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ЗОНЫ СУБДУКЦИИ

Курило-Камчатская зона субдукции является одним из наиболее сейсмоактивных районов Северо-Восточной Евразии. Взаимодействие Тихоокеанской и Североамериканской литосферных плит, скорость схождения которых достигает 8 см/год [Kogan, Steblov, 2008], проявляется в особенностях пространственного распределения очагов землетрясений. Эпицентры подавляющего большинства сейсмических событий, включая самые сильные с $M > 8$, располагаются между островной дугой и осью глубоководного желоба (см. рис. 1).

Внешние сейсмические события происходят в приокеаническом склоне Курило-Камчатского глубоководного желоба и восточнее от него. Здесь возможны сильные (в том числе цунамигенные) землетрясения со сбросовым типом сейсмодислокаций, вероятной причиной возникновения которых является изгиб верхней части погружающейся плиты [Safonov et al., 2015]. Однако во внешней области нередко случаи возникновения сейсмических событий со взбросовой подвижкой в очаге [Ammon et al., 2008].

Несмотря на довольно высокий уровень сейсмической активности северного участка Курило-Камчатской зоны субдукции [Earthquakes Catalogue..., 2021], Парамуширское землетрясение 2020 г. является сильнейшим с 1900 г. сейсмическим внутриплитовым событием для прилегающего к гипоцентру океанического склона глубоководного желоба протяженностью около 800 км (см. рис. 1) [USGS..., 2021]. С 1964 г. в Курило-Камчатской зоне субдукции зафиксировано лишь два внешних землетрясения с магнитудой $M_w > 7.0$. Сильнейшим из них является второе сейсмическое событие, 13.01.2007 г., $M_w = 8.1$, дуплета Симуширских землетрясений 2006–2007 гг. Оно возникло на глубине 10 км в условиях растяжения, по типу сейсмодислокаций классифицируется как сброс, произошедший в результате процесса релаксации напряжений после землетрясения 15.11.2006 г., $M_w = 8.3$ [Steblov et al., 2008]. В 2009 г. северо-восточнее эпицентральной зоны Симуширских землетрясений на глубине 45 км в условиях сжатия произошло землетрясение с $M_w = 7.4$. Анализ, проведенный в работе [Ye et al., 2021], показал, что это событие является афтершоком внешнего Симуширского землетрясения 13.01.2007 г., $M_w = 8.1$, и

не относится к межплитовому взаимодействию в зоне субдукции.

Моделирование процессов накопления упругих напряжений в контактной зоне Тихоокеанской и Североамериканской литосферных плит на основе инверсии межсейсмических скоростей GNSS станций геодинамической сети выявило существенное расширение области современного межплитового контакта в окрестностях о. Парамушир и в южной части п-ова Камчатка [Prytkov et al., 2017]. Максимальная глубина контакта

литосферных плит достигает 44 км, ее ширина по падению составляет 75–126 км. При этом коэффициент межплитового сцепления здесь достигает одного из самых высоких значений в Курило-Камчатской зоне субдукции и сохраняется неизменным на протяжении последних лет [Steblov et al., 2018; Vladimirova et al., 2020].

Анализ кумулятивного сейсмического смещения на основе инверсии сейсмологических решений для межплитовых землетрясений за период 1900–2018 гг. показал наличие дефицита сейсмического смещения на

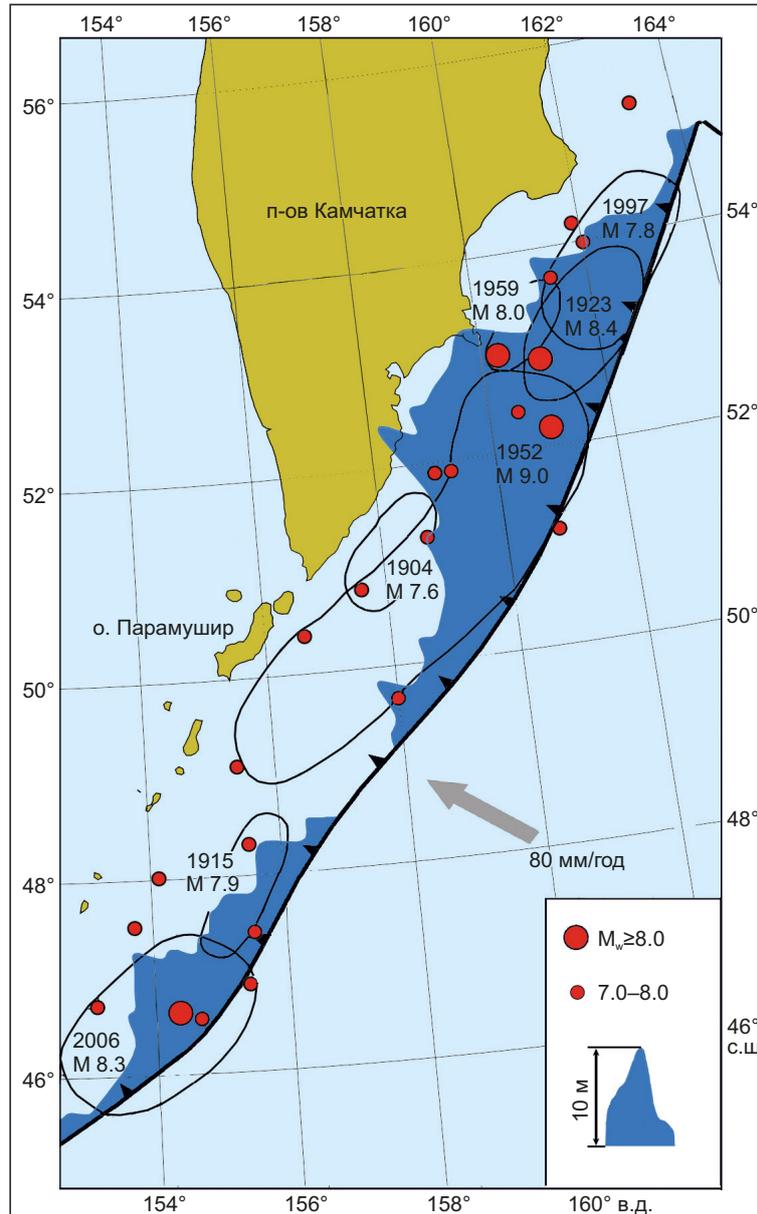


Рис. 3. Кумулятивное сейсмическое смещение для межплитовых землетрясений с $M_w \geq 7.0$ севера Курило-Камчатской зоны субдукции за период 1900–2018 гг. [Levin et al., 2020].

Масштаб сейсмического смещения показан на врезке. Контуры очагов межплитовых землетрясений с $M_w \geq 7.7$ приведены по данным [Fedotov, Solomatin, 2019]. Стрелкой показана скорость схождения литосферных плит.

Fig. 3. Cumulative seismic displacement of the interplate $M_w \geq 7.0$ earthquakes in the northern section of the Kuril-Kamchatka subduction zone for the 1900–2018 period [Levin et al., 2020].

The scale of the seismic displacement is shown on the inset. The contours of the sources of interplate earthquakes with $M_w \geq 7.7$ are drawn after [Fedotov, Solomatin, 2019]. The arrow shows the convergence rate of the lithospheric plates.

северном фланге островной дуги от о. Онекотан до южной части п-ова Камчатка [Levin et al., 2020]. При скорости схождения литосферных плит 8 см/год его максимальная величина составляет 8.8 м (рис. 3).

3. КОСЕЙСМИЧЕСКИЕ СМЕЩЕНИЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Ближайшая региональная GNSS станция непрерывной регистрации PARM, расположенная в г. Северо-Курильске, удалена от эпицентра Парамуширского землетрясения на 220 км. Регистрация на станции осуществляется 24-часовыми суточными сессиями с 30-секундной дискретностью. Обработка данных выполнена с использованием программного обеспечения Bernese

5.2 [Dach et al., 2015]. Для вычисления косейсмического смещения станции в результате землетрясения построен график суточной повторяемости измерений, охватывающий период с 14 марта по 4 апреля 2020 г. (рис. 4). Из обработки исключены два дня наблюдений: дата сейсмического события и предшествующие землетрясению сутки. В качестве опорных (фиксированных) в обработку были включены удаленные станции IGS сети: MAG0 (г. Магадан), PETS (г. Петропавловск-Камчатский) и YSSK (г. Южно-Сахалинск).

В 7 км от станции PARM расположен вулкан Эбеко, эксплозивное извержение которого продолжается с 2016 г. [Degterev, Chibisova, 2020]. Его пепловые выбросы оказывают существенное влияние на точность

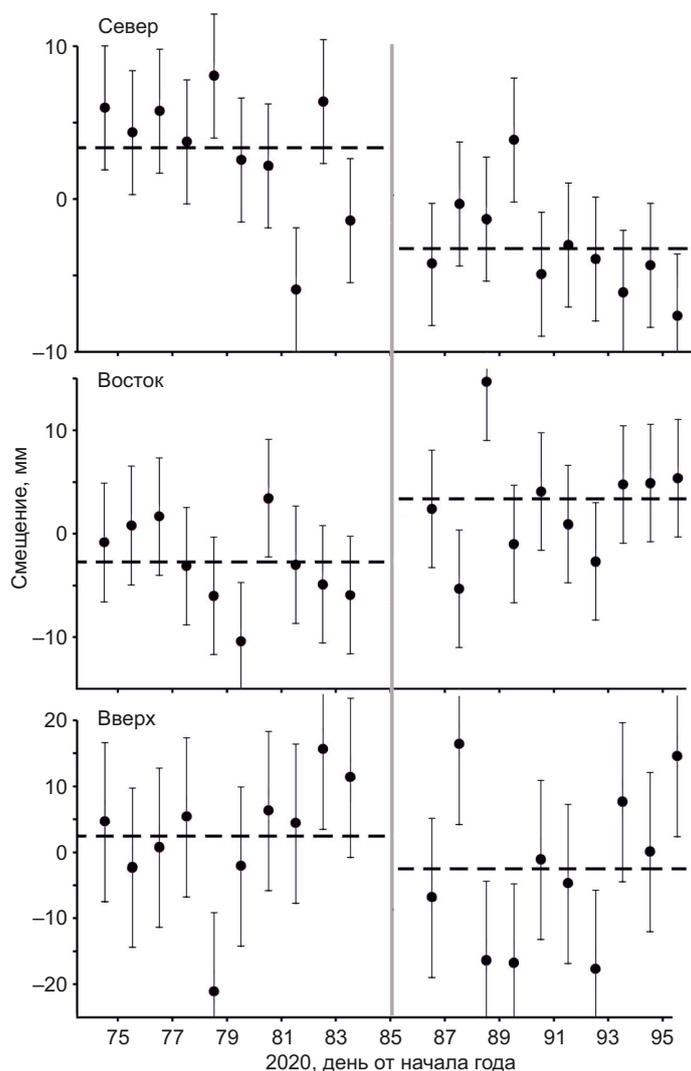


Рис. 4. Временные ряды координат GNSS станции PARM (г. Северо-Курильск) с 14 марта по 4 апреля 2020 г. по гринвичскому времени.

Априорная оценка точности суточных решений показана вертикальными линиями вверх – вниз от каждой точки. Серой вертикальной линией обозначена дата Парамуширского землетрясения. Пунктирная линия – среднее значение координат за десять суток до и после землетрясения.

Fig. 4. GNSS coordinate time series of the PARM station (the town of Severo-Kurilsk) from March 14 to April 4, 2020 GMT.

Apriori estimation of the daily observations accuracy is shown by vertical lines drawn upward and downward from each point. The gray vertical line indicates the date of the main shock of the Paramushir earthquake. The dotted line is the average value of the coordinates for 10 days before and after the earthquake.

Таблица 1. Основные параметры механизма очага Парамуширского землетрясения [USGS..., 2021]
Table 1. Main parameters of the Paramushir earthquake focal mechanism [USGS..., 2021]

Координаты эпицентра		Глубина, км	Магнитуда	Нодальные плоскости механизма очага					
Широта, °	Долгота, °			NP1		NP2		Прости- рание, °	Падение, °
48.964 (49.0)	157.696 (157.7)	57.8 (57)	$M_w=7.5$ ($M_w=7.4$)	202	47	88	23		

Примечание. В скобках приведены параметры очага Finite fault.
 Note. The following bracket depicts the source parameters of Finite fault model.

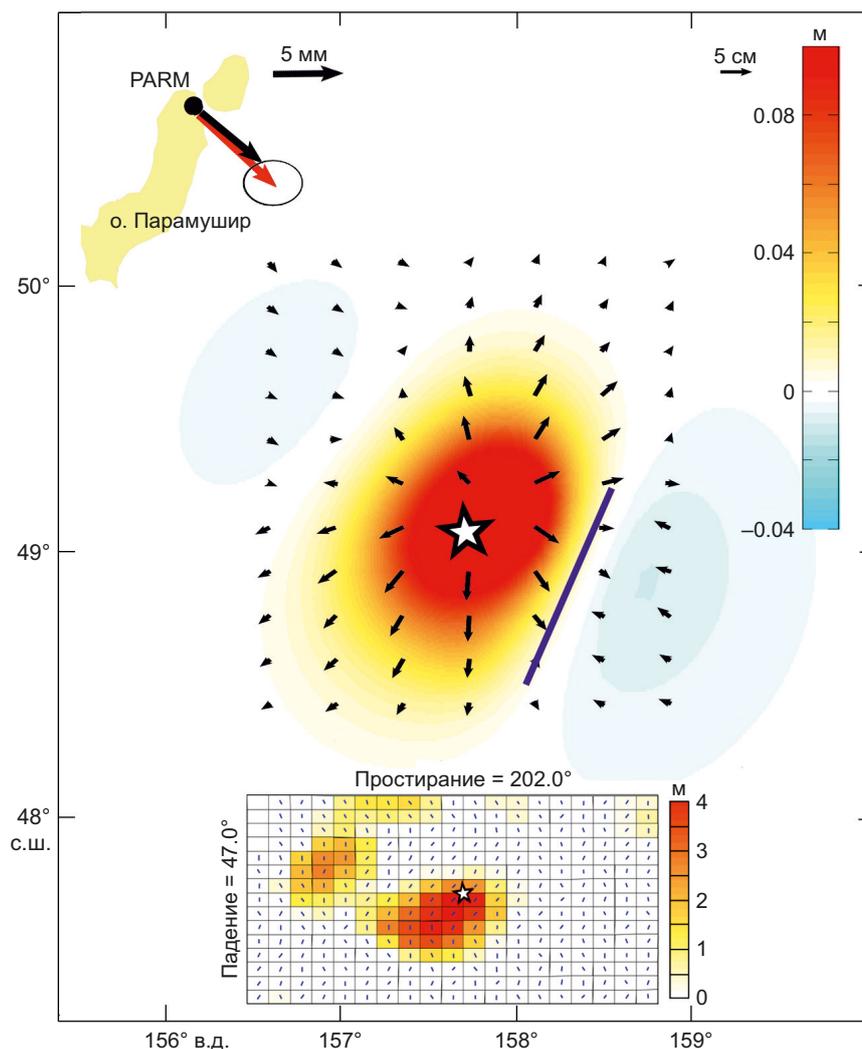


Рис. 5. Косейсмические смещения земной поверхности для плоскости NP1 Finite fault Парамуширского землетрясения. Горизонтальные смещения показаны черными стрелками (масштаб приведен в верхней части рисунка: слева – для станции PARM, справа – для эпицентральной зоны). Цветовой гаммой показаны вертикальные смещения (цветовая шкала приведена в метрах). Эпицентр землетрясения отмечен звездочкой. Синяя линия – проекция верхнего края плоскости на поверхность. Измеренное горизонтальное косейсмическое смещение станции PARM с ошибкой 1σ показано красной стрелкой. Внизу приведена дислокационная модель Finite fault по данным [USGS..., 2021]. Направление смещений в плоскости Finite fault обозначено синими стрелками.

Fig. 5. Coseismic displacements of the earth's surface for the NP1 Finite fault plane of the Paramushir earthquake. The horizontal displacements are shown by the black arrows (the scale is shown in the upper part of the figure: left – for the PARM station, right – for the epicenter zone). The vertical displacements are shown in colors (the color scale is given in meters). The epicenter of the earthquake is marked with an asterisk. The blue line is the projection of the upper edge of the Finite fault plane on the surface. Measured horizontal coseismic displacement of the PARM station with an error of 1σ is shown by red arrow. Below is the Finite fault model according to [USGS..., 2021]. The direction of displacements in the Finite fault plane is indicated by blue arrows.

GNSS измерений, поэтому косейсмическое смещение определено как разность средних значений координат за десять суток до и после землетрясения. Оценка точности компонент смещения выполнена по внутренней сходимости 10-суточных измерений. По горизонтальным компонентам смещение составило: 6.4 ± 1.7 мм на юг и 5.6 ± 2.2 мм на восток; вертикальное смещение (опускание 4.8 ± 5.1 мм) недостоверно.

Для расчета косейсмических смещений земной поверхности в эпицентральной зоне Парамуширского землетрясения использованы дислокационные модели Finite fault по данным USGS (United States Geological Survey) [USGS..., 2021], построенные инверсией объемных сейсмических волн. Основные параметры механизма очага землетрясения приведены в табл. 1. Модели Finite fault для двух возможных плоскостей сейсморазрыва, соответствующих нодальным плоскостям NP1 и NP2, состоят из 285 прямоугольных дислокаций. Общий размер площадки разрывных нарушений составляет

$\sim 100 \times 60$ км². В интервале глубин 40–70 км выделяются две области пиковых смещений величиной 1–4 м (рис. 5, 6). Сейсмический момент модельных очагов составляет $M_0 = 1.8 \times 10^{20}$ Нм, что соответствует моментной магнитуде $M_w = 7.4$.

Косейсмические смещения рассчитаны по методике [Okada, 1985]. Смещение $u_i(x_1, x_2, x_3)$ в трехмерном пространстве, вызванное дислокацией $\Delta u_j(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ вдоль поверхности Σ , в изотропной среде имеет вид:

$$u_i = \frac{1}{F} \iint_{\Sigma} \Delta u_j \left[\lambda \delta_{jk} \frac{\partial u_i^n}{\partial \xi_n} + \mu \left(\frac{\partial u_i^j}{\partial \xi_k} + \frac{\partial u_i^k}{\partial \xi_j} \right) \right] v_k d\Sigma,$$

где δ_{jk} – дельта-оператор Кронекера, λ и μ – коэффициенты Ламе, v_k – направляющий косинус нормали к элементу поверхности $d\Sigma$, u_i^j – i -я компонента смещения в точке (x_1, x_2, x_3) , соответствующего проекции на j -е направление точечной силы величины F , приложенной в точке (ξ_1, ξ_2, ξ_3) .

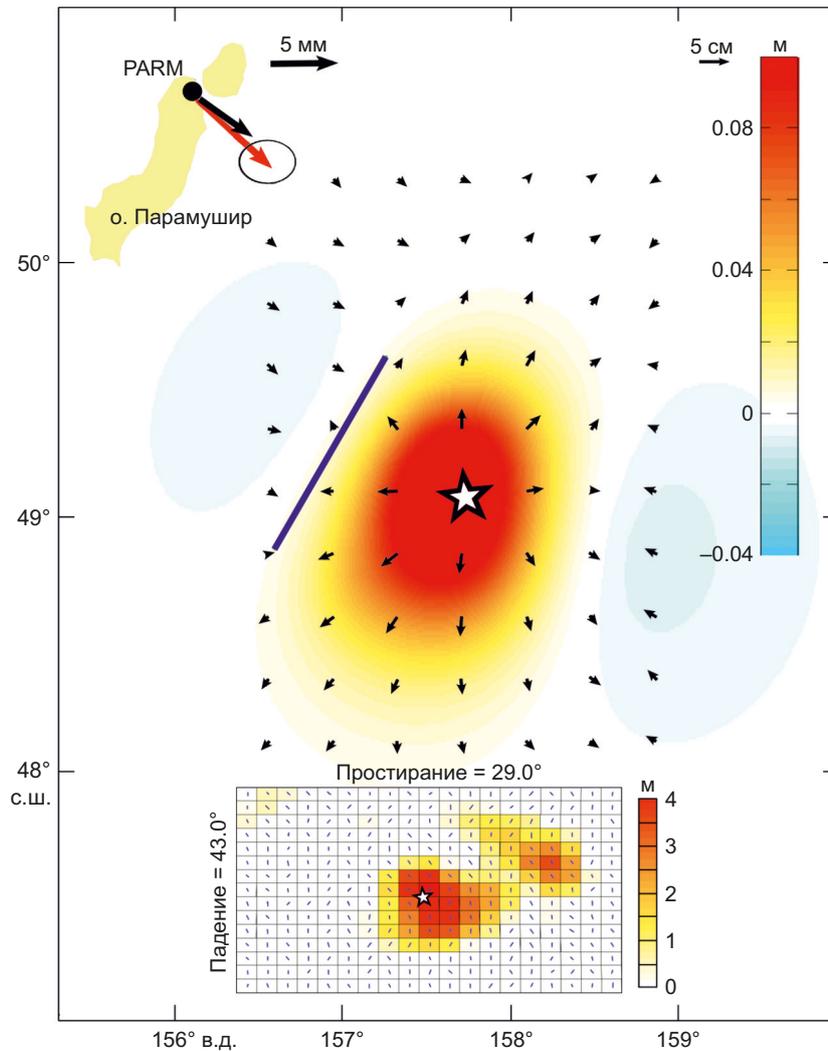


Рис. 6. Косейсмические смещения земной поверхности для плоскости NP2 Finite fault Парамуширского землетрясения. Условные обозначения см. рис. 5.

Fig. 6. Coseismic displacements of the earth's surface for the NP2 Finite fault plane of the Paramushir earthquake. For notations see Fig. 5.

Результаты расчета для двух модельных плоскостей дают схожие картины распределения горизонтальных и вертикальных косейсмических смещений (см. рис. 5; рис. 6). Вертикальные смещения в виде поднятия земной поверхности, амплитуда которых не превышает 16 см, приурочены непосредственно к очаговой зоне землетрясения, незначительные опускания наблюдаются к северо-западу и юго-востоку от нее. Амплитуда горизонтальных смещений в эпицентральной зоне достигает 5 см. В целом, характер распространения косейсмических смещений для обеих возможных плоскостей сейсморазрыва является отражением взбросового типа подвижки в очаге.

Косейсмические смещения станции PARM для модельных плоскостей Finite fault имеют близкие по величине и направлению значения (см. рис. 5; рис. 6). Горизонтальное смещение для плоскости NP1 составляет 6.6 мм, для NP2 – 5.7 мм. По направлению они практически совпадают с измеренным смещением станции.

Вертикальное косейсмическое смещение в виде опускания не превысило 1.0 мм.

4. КОСЕЙСМИЧЕСКОЕ ИЗМЕНЕНИЕ КУЛОНОВСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Кулоновская теория изменения напряжений (ΔCFS – Coulomb failure stress change) широко применяется для объяснения причин инициирования сейсмичности [Das, Scholz, 1981]. Исследования показывают, что приращение ΔCFS на величину до 1 бара оказывается достаточным для возбуждения сейсмичности в ближайших к очагу землетрясения разломных зонах, в то время как снижение на ту же величину сдерживает ее [King et al., 1994].

Изменение функции Кулона определяется как

$$\Delta CFS = \Delta \tau + \mu \Delta \sigma,$$

где $\Delta \sigma$ – нормальное, $\Delta \tau$ – касательное к плоскости разлома напряжение, μ – коэффициент трения.

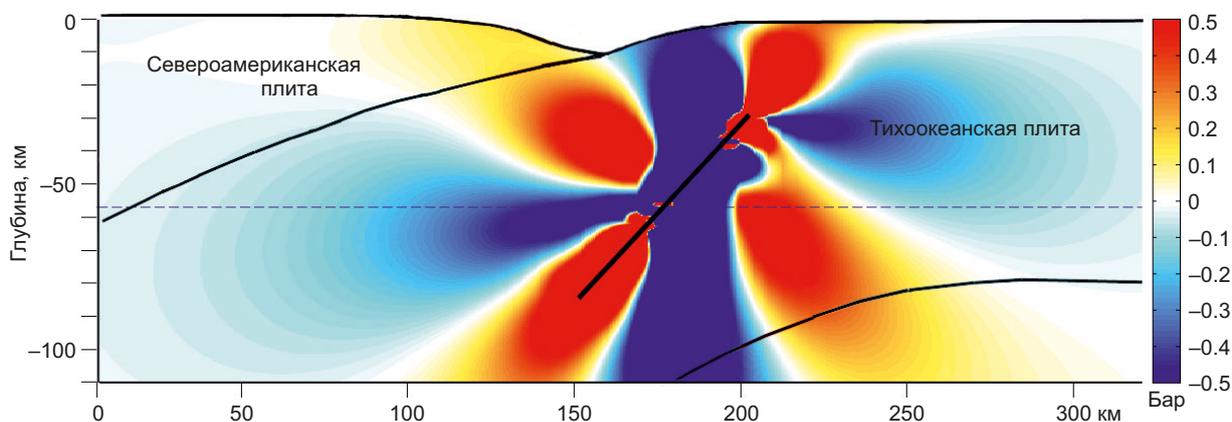


Рис. 7. Изменение кулоновского напряжения в вертикальном разрезе, перпендикулярном простиранию плоскости NP1 Finite fault Парамуширского землетрясения. Цветом показана величина ΔCFS в барах. Черная линия – модельная плоскость сейсморазрыва.

Fig. 7. The Coulomb stress change in the vertical cross-section perpendicular to the strike of the NP1 Finite fault plane of the Paramushir earthquake. The color shows the value of ΔCFS in bars. The black line is the model plane of the fault.

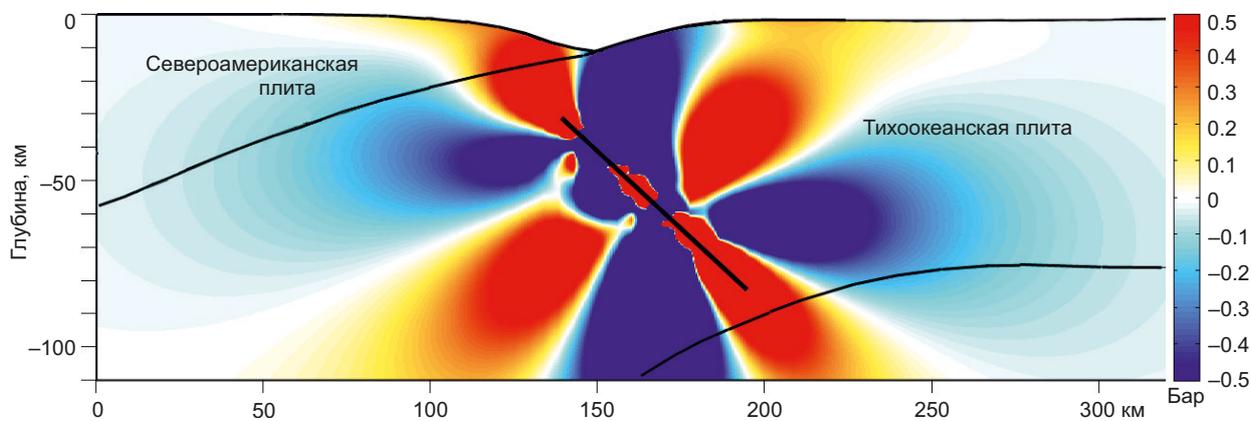


Рис. 8. Изменение кулоновского напряжения в вертикальном разрезе, перпендикулярном простиранию плоскости NP2 Finite fault Парамуширского землетрясения. Условные обозначения см. рис. 7.

Fig. 8. The Coulomb stress change in the vertical cross-section perpendicular to the strike of the NP2 Finite fault plane of the Paramushir earthquake. For notations see Fig. 7.

ΔCFS в результате Парамуширского землетрясения вычислено для двух модельных плоскостей Finite fault. Расчеты выполнены с использованием программы [Toda et al., 2011] для однородного упругого полупространства с параметрами: модуль сдвига – 3×10^{10} Па, коэффициент Пуассона – 0.25, трение – 0.4. На рис. 7, 8 показано изменение кулоновского напряжения в вертикальном разрезе перпендикулярно простиранию модельных плоскостей. Области положительных и отрицательных приращений ΔCFS находятся в сопряжении. Максимальное приращение напряжений наблюдается на краях сейсморазрыва, область отрицательных значений ориентирована субвертикально.

Расчеты показывают, что в зоне контакта Североамериканской и Тихоокеанской литосферных плит, где генерируются сильнейшие межплитовые землетрясения, приращение ΔCFS охватывает участок до глубины ~ 30 км. Для плоскости NP1 изменение напряжения не превышает 1 бара, в то время как для модели NP2 его расчетное значение достигает 3 бар. В интервале глубин от 30 до 60 км наблюдается незначительное снижение ΔCFS на величину до -0.2 бара.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Парамуширское землетрясение с магнитудой $M_w = 7.5$ произошло под тихоокеанским склоном Курило-Камчатского глубоководного желоба в погружающейся литосферной плите. Оно стало сильнейшим с 1900 г. сейсмическим событием не только для океанического склона протяженностью около 800 км, но и для прилегающего к эпицентру трехсоткилометрового сегмента Курило-Камчатской зоны субдукции. В очаге землетрясения реализовались напряжения субгоризонтального сжатия, ориентированные вкрест тектонических структур сейсмофокальной зоны.

Напряженное состояние сжатия в области изгиба погружающейся океанической плиты, в условиях которого возникло землетрясение, подтверждает ранее выявленные на основе многолетних GNSS измерений особенности геодинамической обстановки на севере Курильской островной дуги. Коэффициент межплитового сцепления здесь имеет одно из самых больших значений в зоне субдукции и сохраняется неизменным на протяжении последних лет [Steblov et al., 2018; Vladimirova et al., 2020], а максимальная ширина поверхности механического контакта литосферных плит по падению превышает 100 км [Prytkov et al., 2017]. Накопленный за период 1900–2020 гг. дефицит сейсмического смещения в зоне субдукции от о. Онекотан до южной части п-ова Камчатка достигает 8.8 м [Levin et al., 2020].

Пространственное распределение афтершоков по глубине не дало явного визуального представления о возможной рабочей плоскости сейсморазрыва [Prytkov, Vasilenko, 2021]. В работе [Lutikov et al., 2021] по неярко выраженному заглуплению гипоцентров афтершоков в качестве приоритетной выбрана нодальная плоскость NP1 юго-западного простирания с падением

на северо-запад. Сопоставимые по точности дислокационные модели Finite fault также не позволили однозначно сделать выбор в пользу действующей плоскости сейсморазрыва [USGS..., 2021]. Однако в работе [Ye et al., 2021] на основании общей более точной инверсии сейсмических волн в качестве рабочей определена подвижка по плоскости NP1.

Косейсмические смещения земной поверхности, рассчитанные для двух модельных плоскостей Finite fault, достаточно схожи. Сравнение модельных и измеренных горизонтальных смещений на GNSS станции PARM показывает, что лучшее их согласование (в пределах 1σ) имеет решение для плоскости NP1 юго-западного простирания с северо-западным падением сейсморазрыва, в то время как для плоскости NP2 северо-восточного простирания с падением на юго-восток они различаются на 1.6σ .

В зоне контакта литосферных плит, где генерируются сильнейшие межплитовые сейсмические события, приращение кулоновского напряжения ΔCFS в результате землетрясения распространяется до глубины ~ 30 км. Его максимальное значение для приоритетной плоскости NP1 достигает 1 бара. Такие величины изменения кулоновского напряжения не могут являться основной триггерной причиной последующих сейсмических событий, однако способны приблизить время возникновения будущего межплитового землетрясения [Kocharyan et al., 2019].

Несмотря на дефицит сейсмического смещения на северном фланге Курильской островной дуги, в долгосрочном сейсмическом прогнозе на период 2019–2024 гг. [Fedotov, Solomatin, 2019] участок зоны субдукции в окрестности о. Парамушир имеет невысокую вероятность (2.8 %) возникновения сейсмического события с магнитудой $M \geq 7.7$, так как пространственно охвачен очаговой областью Камчатского землетрясения 04.11.1952 г. с $M_w = 9.0$. Однако современные исследования распределения косейсмических смещений показывают, что оценки очагов исторических землетрясений по областям афтершоков, как правило, приводят к завышению их размеров [Skarlatoudis et al., 2016].

Гораздо большая прогнозная вероятность, максимальная для островной дуги, установлена для двух прилегающих к о. Парамушир районов: южной части п-ова Камчатка – 19.4 % и участка юго-восточнее о. Онекотан – 9.7 %. Значительная часть сейсмогенной зоны в окрестности о. Парамушир также может оказаться в области очагов землетрясений в этих районах [Fedotov, Solomatin, 2019]. Произошедшее внешнее землетрясение с $M_w = 7.5$, несомненно, повышает вероятность возникновения в будущем сильнейшего межплитового события на севере Курильской островной дуги.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что наиболее вероятной причиной возникновения Парамуширского землетрясения 2020 г. с магнитудой $M_w = 7.5$ в условиях

преобладающих напряжений субгоризонтального сжатия в области изгиба погружающейся Тихоокеанской плиты является высокая степень механического сцепления литосферных плит в зоне субдукции.

На основе анализа косейсмического смещения ближайшей GNSS станции подтвержден выбор действующей подвижки в очаге землетрясения, которая произошла по плоскости юго-западного простирания с падением в сторону глубоководного желоба. Для приоритетной плоскости сейсморазрыва приращение кулоновского напряжения в области механического контакта литосферных плит распространяется до глубины около ~30 км и достигает 1 бара.

Косейсмическое приращение напряжений в зоне субдукции на северном фланге Курильской островной дуги, который на современном этапе тектонического цикла обладает высоким нереализованным сейсмическим потенциалом, в долгосрочной перспективе повышает вероятность возникновения здесь сильнейшего межплитового землетрясения. Взбросовая подвижка в очаге, характерная для межплитовых событий с $M_w \geq 7.7$, может оказаться цунамигенной. В связи с этим район исследований требует повышенного внимания.

7. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

8. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

The authors have no conflicts of interest to declare. The authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Ammon C.J., Kanamori H., Lay T., 2008. A Great Earthquake Doublet and Seismic Stress Transfer Cycle in the Central Kuril Islands. *Nature* 451, 561–565. <https://doi.org/10.1038/nature06521>.

Christensen D.H., Ruff L.J., 1988. Seismic Coupling and Outer Rise Earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 93 (B11), 13421–13444. <https://doi.org/10.1029/JB093iB11p13421>.

Dach R., Lutz S., Walser P., Fridez P. (Eds), 2015. Bernese GNSS Software. Version 5.2. University of Bern, Bern Open Publishing, 862 p. <https://doi.org/10.7892/boris.72297>.

Das S., Scholz C.H., 1981. Off-Fault Aftershock Clusters Caused by Shear Stress Increase? *Bulletin of the Seismological Society of America* 71 (5), 1669–1675. <https://doi.org/10.1785/BSSA0710051669>.

Degterev A.V., Chibisova M.V., 2020. Activation of the Ebeko Volcano in May – July, 2020 (Paramushir Island, Northern Kuril Islands). *Geosystems of Transition Zones* 4 (4), 500–505 (in Russian) [Дегтерев А.В., Чибисова М.В.

Активизация вулкана Эбеко в мае – июле 2020 г. (о. Парамушир, Северные Курилы) // *Геосистемы переходных зон*. 2020. Т. 4. № 4. С. 500–505]. <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.4.500-505>.

Earthquakes Catalogue for Kamchatka and the Commander Islands (1962 – Present), 2021. Seismological Data Information System KB GS RAS. Available from: <http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php> (Last Accessed January 29, 2021).

Fedotov S.A., Solomatin A.V., 2019. Long-Term Earthquake Prediction (LTEP) for the Kuril–Kamchatka Island Arc, June 2019 to May 2024; Properties of Preceding Seismicity from January 2017 to May 2019. The Development and Practical Application of the LTEP Method. *Journal of Volcanology and Seismology* 13, 349–362. <https://doi.org/10.1134/S0742046319060022>.

Kato N., Hirasawa T., 1997. A Numerical Study on Seismic Coupling along Subduction Zones Using a Laboratory-Derived Friction Law. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 102 (1–2), 51–68. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(96\)03264-5](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(96)03264-5).

King G.C., Stein R.S., Lin J., 1994. Static Stress Changes and the Triggering of Earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America* 84 (3), 935–953. DOI:10.1785/BSSA0840030935.

Kocharyan G.G., Kishkina S.B., Budkov A.M., Ivanchenko G.N., 2019. On the Genesis of the 2013 Bacht Earthquake. *Geodynamics & Tectonophysics* 10 (3), 741–759 (in Russian) [Кочарян Г.Г., Кишкина С.Б., Будков А.М., Иванченко Г.Н. О генезисе Бачатского землетрясения 2013 года // *Геодинамика и тектонофизика*. 2019. Т. 10. № 3. С. 741–759]. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0439>.

Kogan M.G., Steblov G.M., 2008. Current Global Plate Kinematics from GPS (1995–2007) with the Plate-Consistent Reference Frame. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 113 (B4). <https://doi.org/10.1029/2007JB005353>.

Korolev Yu.P., Korolev P.Yu., 2020. Simulation of the Process of Short-Term Forecasting of the 25.03.2020 Onokotan Tsunami. *Geosystems of Transition Zones* 4 (2), 259–265 (in Russian) [Королев Ю.П., Королев П.Ю. Моделирование процесса оперативного прогнозирования Онокотанского цунами 25.03.2020 // *Геосистемы переходных зон*. 2020. Т. 4. № 2. С. 259–265]. <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.2.259-265>.

Levin B.W., Prytkov A.S., Vasilenko N.F., Frolov D.I., 2020. The Contemporary Seismic Deficit in the Kuril–Kamchatka Subduction Zone. *Doklady Earth Sciences* 491, 277–281. <https://doi.org/10.1134/S1028334X20040108>.

Lutikov A.I., Dontsova G.Yu., Likhodeev D.V., Rogozhin E.A., 2021. The Strong March 25, 2020 Earthquake East of the Northern Kuril Islands. *Seismic Instruments* 57, 276–286. <https://doi.org/10.3103/S0747923921030099>.

Okada Y., 1985. Surface Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space. *Bulletin of the Seismological Society of America* 75 (4), 1135–1154. <https://doi.org/10.1785/BSSA0750041135>.

Prytkov A.S., Vasilenko N.F., 2021. The March 25, 2020 Mw 7.5 Paramushir Earthquake. *Geosystems of Transition*

Zones 5 (2), 113–127 (in Russian) [Прытков А.С., Василенко Н.Ф. Парамуширское землетрясение 25 марта 2020 г. $M_w=7.5$ // Геосистемы переходных зон. 2021. Т. 5. № 2. С. 113–127]. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.113-120.121-127>.

Prytkov A.S., Vasilenko N.F., Frolov D.I., 2017. Recent Geodynamics of the Kuril Subduction Zone. *Russian Journal of Pacific Geology* 11, 19–24. <https://doi.org/10.1134/S1819714017010067>.

Safonov D.A., Konovalov A.V., Zlobin T.K., 2015. The Urup Earthquake Sequence of 2012–2013. *Journal of Volcanology and Seismology* 9, 402–411. <https://doi.org/10.1134/S074204631506007X>.

Skarlatoudis A.A., Somerville P.G., Thio H.K., 2016. Source-Scaling Relations of Interface Subduction Earthquakes for Strong Ground Motion and Tsunami Simulation. *Bulletin of the Seismological Society of America* 106 (4), 1652–1662. <http://dx.doi.org/10.1785/0120150320>.

Steblov G.M., Kogan M.G., Levin B.V., Vasilenko N.F., Prytkov A.S., Frolov D.I., 2008. Spatially Linked Asperities of the 2006–2007 Great Kuril Earthquakes Revealed by GPS. *Geophysical Research Letters* 35 (22). <http://doi.org/10.1029/2008GL035572>.

Steblov G.M., Lobkovsky L.I., Vladimirova I.S., Baranov B.V., Sdelnikova I.A., Gabsatarov Y.V., 2018. Seismotectonic Deformations of the Kuril Island Arc during Different Phase of the Seismic Cycle: The Simushir Earthquakes. *Journal of Volcanology and Seismology* 12, 412–423. <https://doi.org/10.1134/S0742046318060076>.

Toda S., Stein R.S., Sevilgen V., Lin J., 2011. Coulomb 3.3. Graphic-Rich Deformation and Stress-Change Software for Earthquake, Tectonic, and Volcano Research and Teaching. User Guide. USGS Open-File Report 2011–1060, 63 p.

USGS Earthquake Hazards Program, 2021. Available from: <http://earthquake.usgs.gov> (Last Accessed January 29, 2021).

Vladimirova I.S., Lobkovsky L.I., Gabsatarov Y.V., Steblov G.M., Vasilenko N.F., Frolov D.I., Prytkov A.S., 2020. Patterns of the Seismic Cycle in the Kuril Island Arc from GPS Observations. *Pure and Applied Geophysics* 177, 3599–3617. <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02495-z>.

Ye L., Lay T., Kanamori H., 2021. The 25 March 2020 M_w 7.5 Paramushir, Northern Kuril Islands Earthquake and Major ($M_w \geq 7.0$) Near-Trench Intraplate Compressional Faulting. *Earth and Planetary Science Letters* 556, 116728. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116728>.