

Парамуширское землетрясение 25 марта 2020 г. $M_w = 7.5$

© 2021 А. С. Прытков*, Н. Ф. Василенко

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

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

Резюме. 25 марта 2020 г. на севере Курильской островной дуги к юго-востоку от о. Парамушир произошло сильное землетрясение с магнитудой $M_w = 7.5$. Гипоцентр землетрясения находился под океаническим склоном глубоководного желоба в погружающейся Тихоокеанской литосферной плите. Землетрясение явилось сильнейшим с 1900 г. сейсмическим событием для внешней относительно желоба области протяженностью около 800 км. Оно оказалось самым сильным и для прилегающего к эпицентру трехсоткилометрового участка Курило-Камчатской зоны субдукции. В статье обобщены данные о землетрясении: рассмотрены его тектоническая позиция, параметры очага, особенности развития афтершокового процесса, а также косейсмическое смещение на ближайшей GNSS-станции непрерывной регистрации. Проведенный анализ не позволил однозначно выделить рабочую плоскость подвижки в очаге. Тем не менее изучение особенностей возникновения внешнего землетрясения представляет научный интерес, поскольку напряженное состояние области изгиба погружающейся Тихоокеанской литосферной плиты отражает межплитовое взаимодействие в зоне субдукции.

Ключевые слова: северные Курильские острова, Парамуширское землетрясение, афтершоки, механизм очага, косейсмические смещения

The March 25, 2020 M_w 7.5 Paramushir earthquake

Alexander S. Prytkov*, Nikolay F. Vasilenko

Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

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

Abstract. The strong earthquake with moment magnitude $M_w = 7.5$ occurred on March 25, 2020, in the North Kurils to the southeast of the Paramushir Island. The hypocenter of the earthquake was located under the oceanic rise of deep-sea trench in the subducting Pacific lithospheric plate. This earthquake has been the strongest seismic event since 1900 for an area about 800 km long of the outer rise of the trench. It also was the strongest earthquake for the 300-kilometer long area of the Kuril-Kamchatka subduction zone adjacent to the epicenter. The article summarizes the data on the Paramushir earthquake. Tectonic position of the earthquake, source parameters, features of the aftershock process development, as well as coseismic displacement of the nearest continuous GNSS station are considered. The performed analysis did not allow us to clearly determine the rupture plane in the source. Nevertheless, the study of the features of the outer-rise earthquake is a matter of scientific interest, since the stress state of the bending area of the subducting Pacific lithospheric plate reflects the interplate interaction in the subduction zone.

Keywords: North Kurils, Paramushir earthquake, aftershocks, focal mechanism, coseismic displacements

Для цитирования: 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/gtr.2021.5.2.113-120.121-127>

For citation: Prytkov A.S., Vasilenko N.F. The March 25, 2020 M_w 7.5 Paramushir earthquake. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2021, vol. 5, no. 2, pp. 113–127. (In Russ. & Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2021.5.2.113-120.121-127>

Благодарности

Авторы благодарны Д.А. Сафонову за предоставленные материалы определения тензора момента Парамуширского землетрясения.

Acknowledgements

The authors are grateful to Dmitry Safonov for the provided materials of determining of the Paramushir earthquake moment tensor.

Введение

25 марта 2020 г. в 02:49 по Гринвичскому времени на севере Курильской островной дуги в ~200 км к юго-востоку от о. Парамушир произошло землетрясение с моментной магнитудой $M_w = 7.5$ (рис. 1). По данным Сахалинского и Камчатского филиалов Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (СФ ФИЦ ЕГС РАН и КФ ФИЦ ЕГС РАН), его макросейсмический эффект в г. Северо-Курильск достигал 5–6 баллов по шкале MSK-64. В ближайших к эпицентру населенных пунктах п-ова Камчатка сотрясения ощущались с интенсивностью 4–5 баллов¹. Землетрясение вызвало цунами, визуально определенная высота волн которого на побережье о. Парамушир составила около 0.5 м [Королев, Королев, 2020]. В соответствии с географическим положением очага это сейсмическое событие в работе названо Парамуширским землетрясением. Используемый далее термин «внешний» обозначает отношение к внешнему склону тихоокеанского глубоководного желоба.

Парамуширское землетрясение 25.03.2020 г. произошло в погружающейся Тихоокеанской литосферной плите, оно относится к сильным и редким внешним сейсмическим событиям в Курило-Камчатской зоне субдукции. По данным USGS, землетрясение является сильнейшим с 1900 г. на прилегающем внешнем склоне глубоководного желоба протяженностью около 800 км, а также самым сильным для трехсоткилометрового участка Курильской дуги².

Анализ внешней сейсмичности представляет научный интерес, поскольку напряженное состояние области изгиба погружающейся Тихоокеанской литосферной плиты отражает межплитовое взаимодействие в зоне субдукции [Christensen et al., 1988]. С этой целью в работе обобщены и проанализированы данные о внешнем Парамуширском землетрясении $M_w = 7.5$.

Тектоническая позиция и параметры очага землетрясения

Взаимодействие Тихоокеанской и Североамериканской литосферных плит проявляется в особенностях пространственного рас-

пределения очагов землетрясений (рис. 1). Эпицентры большинства сейсмических событий, включая самые сильные с $M > 8$, располагаются между островной дугой и осью глубоководного желоба и относятся к области межплитового контакта литосферных плит (тип А). Напряжения в очагах таких землетрясений ориентированы преимущественно в горизонтальном направлении перпендикулярно островной дуге и по типу сейсмодислокаций квалифицируются как взбросовые и надвиговые.

Внутриплитовая сейсмичность зоны субдукции (тип В) отчетливо маркирует сейсмофокальную зону мощностью около 70 км, падающую под острова [Тараканов, Андреева, 2012]. По типу сейсмодислокаций сейсмические события здесь являются сбросами или взбросами в зависимости от того, происходят они в нижней, испытывающей растяжение, или в верхней, находящейся в состоянии сжатия части субдуцирующей Тихоокеанской плиты [Сафонов и др., 2015].

Сейсмические события, происходящие во внешней относительно желоба зоне (тип С), пространственно располагаются в приокеаническом склоне глубоководного желоба и восточнее от него. Здесь возможны сильные (в том числе цунамигенные) внутриплитовые землетрясения со сбросовым типом сейсмодислокаций [Тихонов и др., 2008]. Вероятной причиной возникновения подобных землетрясений является изгиб верхней эластичной части погружающейся плиты [Сафонов и др., 2015]. Однако в данном районе нередки случаи возникновения землетрясений с взбросовым типом подвижек в очагах, что отражает состояние сжатия преджелобной области.

С 1964 г. в Курило-Камчатской зоне субдукции зафиксировано лишь два внешних землетрясения с магнитудой $M_w > 7.0$ (рис. 1). Сильнейшим из них явилось второе сейсмическое событие 13.01.2007 г. $M_w = 8.1$ дуплета Симуширских землетрясений 2006–2007 гг., которое возникло на глубине 10 км в условиях растяжения. По типу сейсмодислокаций оно квалифицируется как сброс в результате процесса релаксации напряжений в зоне субдукции после землетрясения 15.11.2006 г.

¹ ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН». URL: <http://www.ceme.gsras.ru/new/struct> (accessed 16.01.2021).

² USGS – The United States Geological Survey. URL: <https://earthquake.usgs.gov/> (accessed 15.01.2021).

$M_w = 8.3$ [Steblov et al., 2008; Ammon et al., 2008]. В 2009 г. северо-восточнее 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 не связано с процессами контакта литосферных плит в зоне субдукции и является афтершоком Симуширского землетрясения 13.01.2007 г. $M_w = 8.1$, хотя произошло в обстановке сжатия и имело взбросовую подвижку в очаге.

Парамуширское землетрясение оперативно обработано региональными центрами и мировыми сейсмологическими агентствами (таблица; рис. 1). Расхождения в определении координат эпицентра по данным сейсмологических агентств, работающих с различны-

ми инструментальными сетями наблюдений и методиками обработки информации, незначительны. По положению гипоцентра землетрясения можно уверенно заключить, что событие произошло во внешней зоне на глубине ~55 км под океаническим склоном в погружающейся Тихоокеанской плите.

Решения механизма очага землетрясения достаточно схожи (таблица). Только региональные определения КФ ФИЦ ЕГС РАН [Каталог механизмов...] и ИМГиГ ДВО РАН несколько отличаются от результатов международных агентств, что может являться следствием различного количества сейсмических станций, используемых для расчетов, и их географического положения. Для всех полученных решений ось сжатия субгоризонтальна

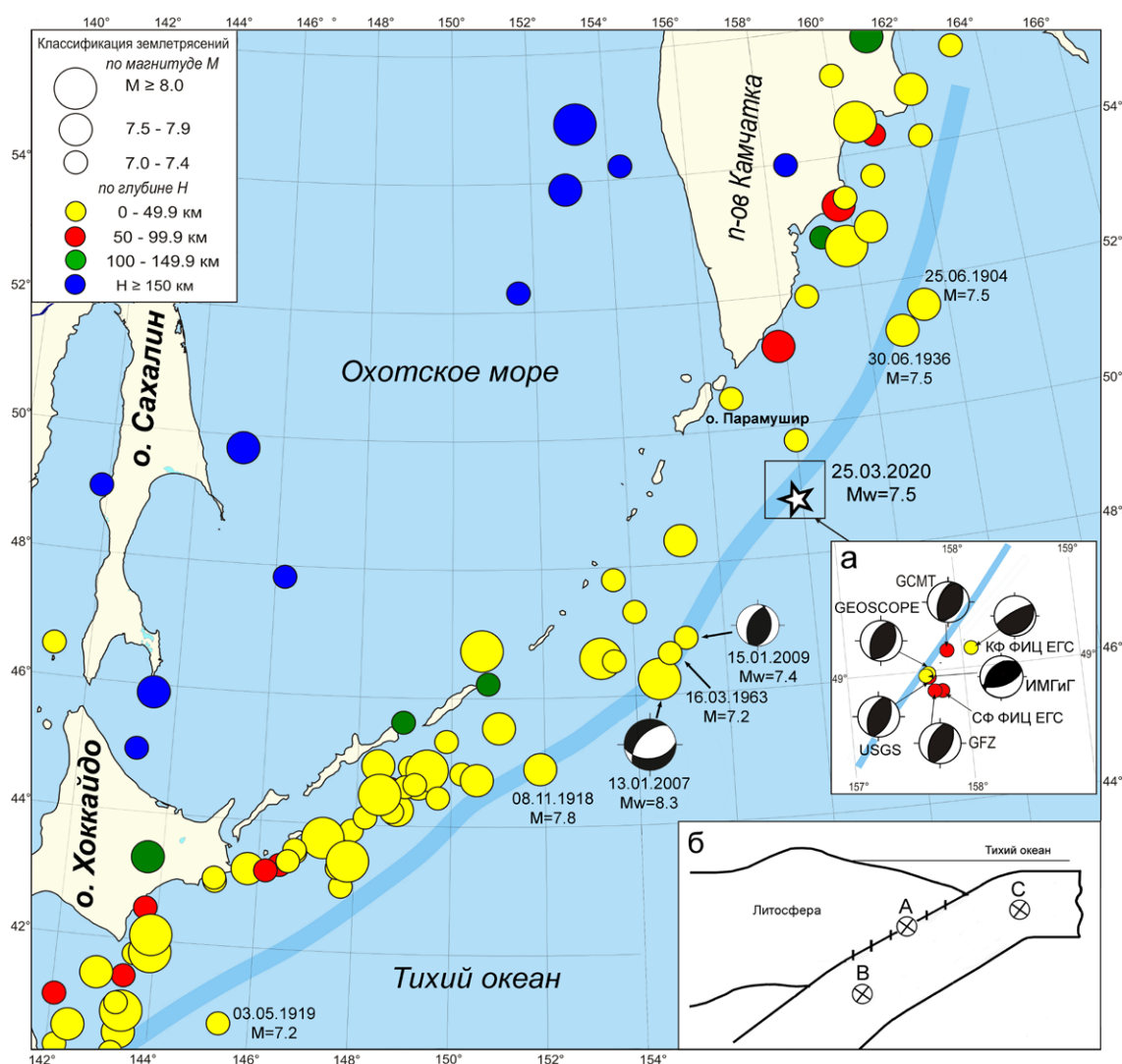


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений Курило-Камчатского региона с $M \geq 7.0$ за период 1900–2020 гг. по данным USGS (<https://earthquake.usgs.gov/>). (а) – эпицентры и механизмы очага Парамуширского землетрясения показаны по данным сейсмологических агентств (таблица); (б) – схематическая модель зоны субдукции. А, В, С – типы сейсмических событий в зоне субдукции.

и ориентирована по направлению СЗ–ЮВ, ось растяжения – субвертикальна. Тип подвижки по обеим плоскостям сейсморазрыва – чистый взброс (либо взброс с незначительной сдвиговой компонентой). Простирающие нодальные плоскости очага практически совпадают с простирающим глубоководным желобом.

Афтершоковый процесс

Афтершоковый процесс в очаговой зоне Парамуширского землетрясения проанализирован по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН [Каталог землетрясений ...]. После основного толчка с $M_L = 7.7$ в течение первых суток региональными станциями зарегистрировано более 120 сейсмических событий; за март–декабрь 2020 г. – около 400 афтершоков, 3 из которых имели магнитуду $M_L \geq 5.5$ (рис. 2).

Пространственное распределение афтершоков позволило оконтурить эпицентральному область землетрясения. По ширине она составляет около 50 км и вытянута в направлении СВ–ЮЗ вдоль глубоководного желоба на 95 км (рис. 2). Линейные размеры очаговой зоны удовлетворяют эмпирическим оценкам (85×41 км) для внутриплитовых землетрясе-

ний $M_w = 7.5$ ($M_0 \sim 2 \cdot 10^{20}$ Нм) [Blaser et al., 2010; Skarlatoudis et al., 2016]. Эпицентр главного толчка приурочен к южному краю облака афтершоков, которые локализованы в интервале глубин 15–53 км. Пространственное распределение афтершоков по глубине (поперечный разрез вкост простирающего глубоководного желоба по линии АА') не дает визуального представления о возможной рабочей плоскости падения сейсморазрыва.

Первый сильный афтершок $M_L = 5.7$ зарегистрирован 25 марта на глубине ~50 км. 7 апреля на такой же глубине произошел афтершок $M_L = 5.5$ ($M_w = 5.1$), 14 июня на глубине ~30 км – сейсмическое событие $M_L = 5.9$ ($M_w = 5.1$). Разность между магнитудами главного события и сильнейшего афтершока для M_L составляет 1.8, для M_w – 2.4. Согласно эмпирическому закону Бота эта разность должна находиться в пределах 0.6–1.7 [Bath, 1965; Shcherbakov, Turcotte, 2004]. Следовательно, ожидаемая магнитуда M_L сильнейшего афтершока должна составить 6.0–7.1, а M_w – 5.8–6.9. Такая особенность свидетельствует о наличии дефицита сильных событий в афтершоковом процессе. Временной ход и график кумулятивной энергии афтершоков

Таблица. Основные параметры Парамуширского землетрясения по данным региональных центров и международных сейсмологических агентств

Источник	Координаты эпицентра		Глубина, км	Магнитуда	Нодальные плоскости		
	φ ° N	λ ° E			Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)
ИМГиГ ДВО РАН	48.99	157.69	(32)	$M_w = 7.1$	223/69	37/56	69/105
СФ ФИЦ ЕГС РАН	48.88	157.80	72	$M_{LH} = 7.5$			
КФ ФИЦ ЕГС РАН	49.11	158.08	48	$M_L = 7.7$ $M_C = 7.5$	240/39	72/19	97/70
USGS	48.964	157.696	57.8 (61)	$M_w = 7.5$ $mb = 7.1$	201/23	47/43	88/92
GCMT	49.11	157.87	(52.6)	$M_S = 7.5$ $M_w = 7.5$	194/32	48/43	78/103
GFZ	48.89	157.74	51 (43)	$M_w = 7.4$	199/28	46/43	84/96
GEOSCOPE Observatory	48.986	157.693	(45)	$M_w = 7.5$	203/30	51/39	86/95

Примечания. В скобках дана глубина модельного центроида. M_w – моментная магнитуда, M_{LH} – локальная магнитуда по поверхностным волнам, M_L – локальная магнитуда, полученная путем пересчета из энергетического класса по номограмме С.А. Федотова, M_C – спектральная кода-магнитуда, M_S – магнитуда по поверхностным волнам, mb – магнитуда по объемным волнам. ИМГиГ ДВО РАН – Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук; СФ ФИЦ ЕГС РАН – <http://www.ceme.gsras.ru/new/struct>; КФ ФИЦ ЕГС РАН – <http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php>; USGS – <https://earthquake.usgs.gov/>; GCMT – Global Centroid Moment Tensor, <https://www.globalcmt.org/>; GFZ – Global Centroid Moment Tensor, <https://www.globalcmt.org/>; Geoscope Observatory – French Global Network of broad band seismic, <http://geoscope.ipgp.fr>.

после главного толчка до конца 2020 г. показан на рис. 3. Низкий уровень кумулятивной энергии ΣE афтершоков ($3.0 \cdot 10^{13}$ Дж), значение которой в $2.1 \cdot 10^3$ раза меньше энергии главного события ($6.3 \cdot 10^{16}$ Дж), также свидетельствует о дефиците сейсмичности.

График повторяемости афтершоков Парамуширского землетрясения приведен на рис. 4. Уровень представительности каталога по магнитуде M_L составляет ~ 3.6 . Линейный характер графика сохраняется для интервала магнитуд 3.6–4.4. Его наклон $b = 1.08 \pm 0.10$ (коэффициент корреляции $R = 0.97 \pm 0.09$) соответствует среднему для Курило-Охотского региона показателю, десятилетнее значение которого $b = 1.0$ [Сафонов и др., 2020], а также близок к среднему многолетнему значению для зоны сейсмичности «Тихий океан» Камчатского региона и прилегающих к нему областей [Левина и др., 2013]. Количество афтершоков в диапазоне 4.5–4.7 гораздо ниже, чем следовало бы ожидать исходя из распределения более слабых землетрясений.

Убывание числа землетрясений со временем после главного толчка дает представление о характере развития сейсмического процесса. Согласно эмпирическому закону Омори [Omori, 1894] в течение первых 2 недель афтершоковый процесс (рис. 5) развивался в соответствии с показателем $p = -1.28 \pm 0.18$, что соответствует среднемировому значению затухания во времени сейсмической активности в очагах землетрясений. Небольшая активизация в 4–5-е сут-

ки сменилась снижением сейсмической активности на 7-й день. Спад сейсмичности отображен на кумулятивном графике числа землетрясений (рис. 6), где убывающая во времени по гиперболическому закону афтершоковая последовательность переходит в новый режим. На 20-е сутки (15.04.2020 г.) после основного толчка этот режим приблизился к линейному, что может свидетельствовать

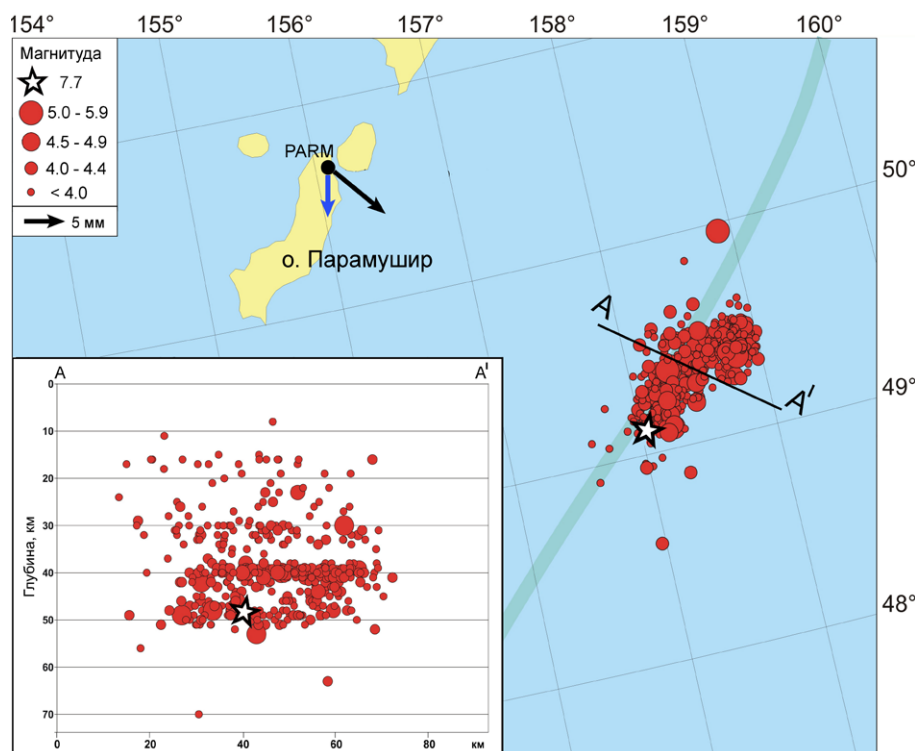


Рис. 2. Карта афтершоков Парамуширского землетрясения по данным каталога КФ ФИЦ ЕГС РАН [Каталог землетрясений...]. Горизонтальное косейсмическое смещение GNSS-станции PARM показано черной стрелкой, вертикальное – синей. На врезке показан поперечный разрез области афтершоков по линии AA'. Главный толчок обозначен звездочкой.

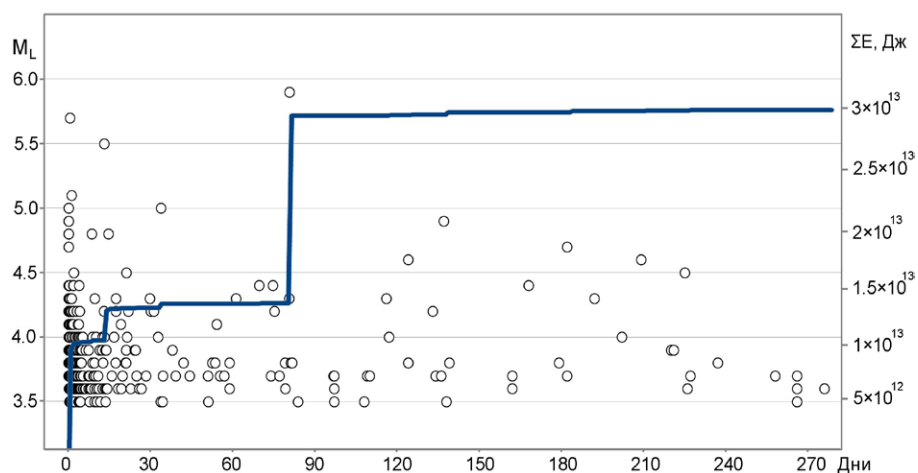


Рис. 3. Временной ход и график кумулятивной энергии афтершокового процесса за период 25.03.2020 – 31.12.2020.

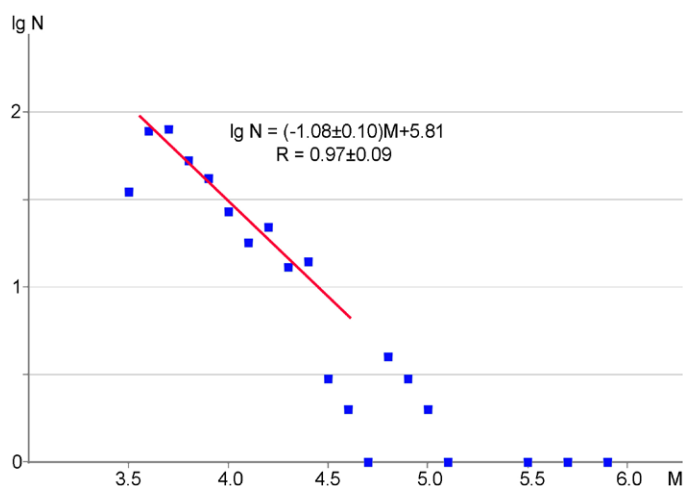


Рис. 4. График повторяемости афтершоков Парамуширского землетрясения. За начало отсчета взято время основного события. Аппроксимация линейной части графика представлена сплошной прямой.

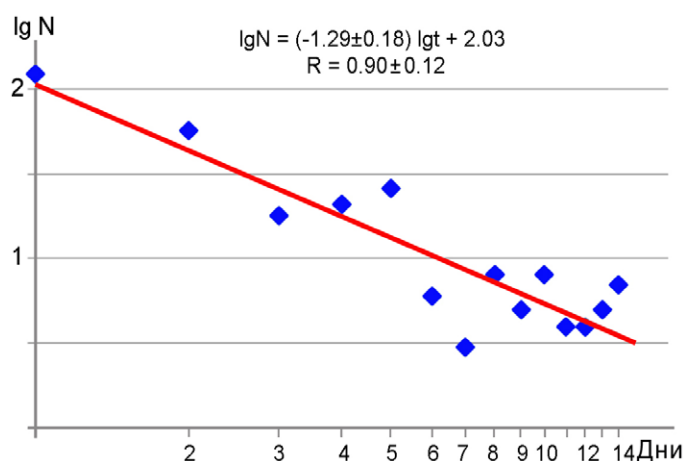


Рис. 5. График затухания афтершокового процесса в течение 2 недель после Парамуширского землетрясения.

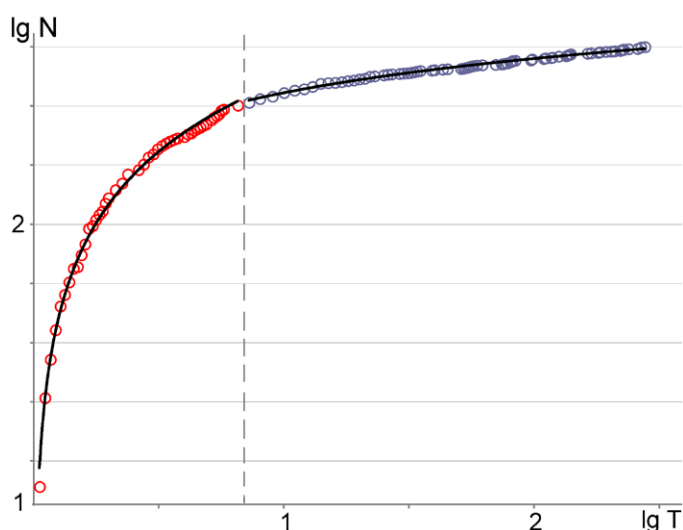


Рис. 6. Кумулятивный график числа афтершоков Парамуширского землетрясения. Вертикальная пунктирная линия показывает время изменения афтершокового режима.

о переходе сейсмического процесса в стадию фона. Примечательно, что афтершоки 7.04.2020 г. $M_L = 5.5$ и 14.06.2020 г. $M_L = 5.9$ не вызвали дополнительной активизации затухающего во времени процесса.

Косейсмическое смещение GNSS-станции PARM

Косейсмические смещения земной поверхности служат основой для построения дислокационных моделей, которые позволяют однозначно определить рабочую плоскость сейсморазрыва в результате сильного землетрясения. Ближайшая региональная GNSS (Global Navigation Satellite System) станция непрерывной регистрации PARM расположена в г. Северо-Курильск на расстоянии 220 км к северо-востоку от эпицентра Парамуширского землетрясения. Регистрация данных на станции осуществляется 24-часовыми суточными сессиями с 30-секундной дискретностью. Обработка данных выполняется с использованием программного обеспечения Bernese 5.2 [Dach et al., 2015]. При этом используются финальные орбиты спутников, представленные IGS (International GNSS Service), параметры ориентации вращения Земли IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service), таблицы фазовых центров антенн, параметров Солнца и Луны и другие материалы, рекомендованные Международной GNSS-службой.

Для выявления косейсмических смещений построен график суточной повторяемости измерений на станции PARM, охватывающий 10 суток до и после Парамуширского землетрясения (рис. 7). В качестве опорных (фиксированных) в обработку включены удаленные станции IGS-сети MAG0 (г. Магадан), PETS (г. Петропавловск-Камчатский) и YSSK (г. Южно-Сахалинск). Априорная точность суточных решений, основанная на точности орбитографии спутников, возможных ошибках ионосферной и тропосферной задержек прохождения сигнала, составляет 4–6 мм для горизонтальных компонент и 12–13 для вертикальной.

Деятельность активного вулкана Эбеко (эксплозивное извержение с 2016 г. [Дегтерев, Чибисова, 2020]), находящегося в 7 км от станции PARM, оказывает влияние на результаты GNSS-измерений. Поэтому

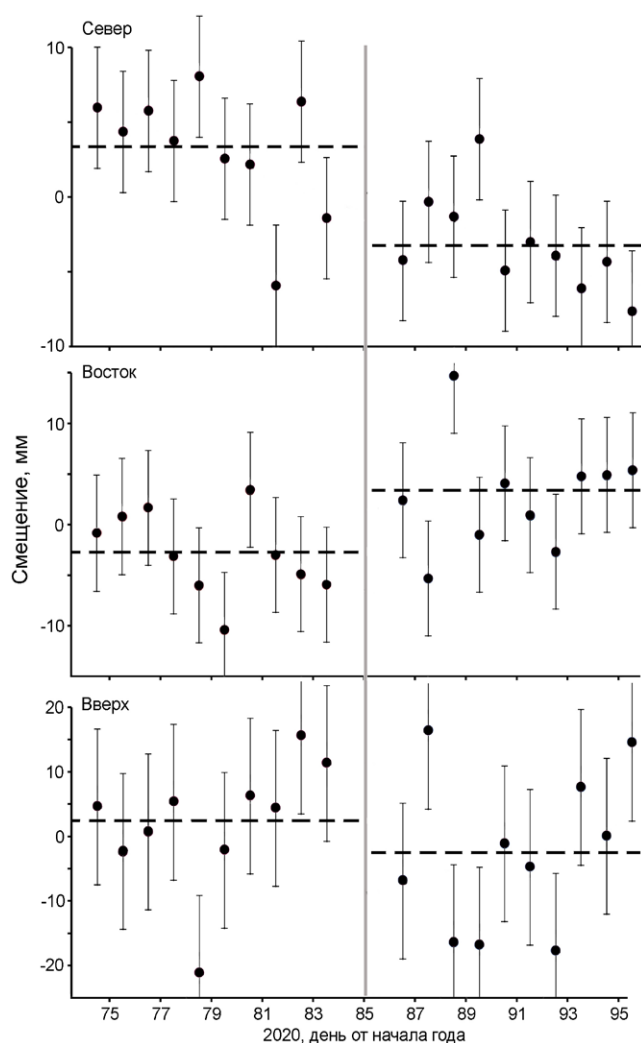


Рис. 7. Временные серии координат GNSS-станции PARM (г. Северо-Курильск) с 14 марта по 4 апреля 2020 г. по Гринвичскому времени. Априорная оценка точности суточных решений показана вертикальными линиями вверх–вниз от каждой точки. Серой вертикальной линией обозначена дата главного толчка Парамуширского землетрясения.

косейсмическое смещение на станции было определено как разность средних за 10 суток координат до и после землетрясения. По компонентам оно составило: 6.4 мм на юг, 5.6 мм на восток и 4.8 мм опускание.

Оценки косейсмических смещений на основе дислокационных моделей [Окада, 1985] с параметрами механизмов очага по данным различных сейсмологических центров (таблица), показывают, что однозначно выделить рабочую плоскость сейсморазрыва Парамуширского землетрясения не представляется возможным. Модели для обеих нодальных плоскостей северо-западного и юго-восточного падения очага дают схожие величины косейсмических смещений на станции PARM.

Заключение

Парамуширское землетрясение 25.03.2020 г. $M_w = 7.5$, произошедшее в погружающейся Тихоокеанской литосферной плите на глубине около 55 км, является весьма редким внешним сейсмическим событием. Несмотря на довольно высокий уровень сейсмической активности северного фланга Курильской зоны субдукции, землетрясение является сильнейшим с 1900 г. сейсмическим событием для внешней относительно желоба области протяженностью около 800 км. Оно оказалось самым сильным и для прилегающего к эпицентру трехсоткилометрового участка зоны субдукции. Единственное сопоставимое по силе сейсмическое событие $M = 7.3$ произошло в этом районе в 1916 г. севернее эпицентральной области настоящего землетрясения.

Очаговая зона землетрясения 95×50 км вытянута вдоль внешнего склона глубоководного желоба. Эпицентр главного толчка приурочен к южному краю облака афтершоков, которые локализованы в интервале глубин 15–53 км. Анализ развития сейсмического процесса выявил дефицит сильных событий в афтершоковой последовательности (кумулятивная энергия афтершоков в $\sim 2 \cdot 10^3$ раза меньше энергии главного события) и быстрое его спадание с переходом в фоновый режим на 20-е сутки после главного толчка.

Решения механизма очага землетрясения по данным различных сейсмологических центров схожи. В очаге реализовались напряжения субгоризонтального сжатия, ориентированные по направлению СЗ–ЮВ. Тип подвижки – взброс по обеим возможным плоскостям сейсморазрыва с их простиранием вкост тектонических структур Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны. Анализ пространственного распределения афтершоков и косейсмических смещений не позволил однозначно выделить рабочую плоскость подвижки в очаге.

Внешняя внутриплитовая сейсмичность, имея пространственно-временную связь с крупными межплитовыми землетрясениями, может являться дополнительным индикатором напряженного состояния области контакта литосферных плит. Анализ современной геодинамической обстановки северного участка Курильской зоны субдукции и оценка влияния на нее Парамуширского землетрясения $M_w = 7.5$ является задачей дальнейших исследований.

Список литературы

1. Дегтерев А.В., Чибисова М.В. **2020**. Активизация вулкана Эбеко в мае–июле 2020 г. (о. Парамушир, Северные Курилы). *Геосистемы переходных зон*, 4(4): 500–505. <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.4.500-505>
2. *Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов (1962 г. – наст. вр.)*. URL: <http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php> (accessed 16.01.2021).
3. *Каталог механизмов очагов землетрясений Камчатки и Командорских островов*. URL: <http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/mechanism.php> (accessed 16.01.2021).
4. Королев Ю.П., Королев П.Ю. **2020**. Моделирование процесса оперативного прогнозирования Онекотанского цунами 25.03.2020. *Геосистемы переходных зон*, 4(2): 259–265. <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.2.259-265>
5. Левина В.И., Ландер А.В., Митюшкина С.В., Чеброва А.Ю. **2013**. Сейсмичность Камчатского региона 1962–2011 гг. *Вулканология и сейсмология*, 1: 41–64.
6. Сафонов Д.А., Коновалов А.В., Злобин Т.К. **2015**. Урупская серия землетрясений 2012–2013 гг. *Вулканология и сейсмология*, 6: 60–70. <https://doi.org/10.7868/S0203030615060073>
7. Сафонов Д.А., Костылев Д.В., Фокина Т.А., Коваленко Н.С. **2020**. Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2019 году. *Геосистемы переходных зон*, 4(2): 146–159. <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.2.146-159>
8. Тараканов Р.З., Андреева М.Ю. **2012**. Роль сейсмофокальной зоны в формировании и развитии структур Курило-Охотского региона. *Тихоокеанская геология*, 31(6): 87–96.
9. Тихонов И.Н., Василенко Н.Ф., Золотухин Д.Е., Ивельская Т.Н., Поплавский А.А., Прытков А.С., Спирин А.И. **2008**. Симуширские землетрясения и цунами 15 ноября 2006 года и 13 января 2007 года. *Тихоокеанская геология*, 27(1): 3–16.
10. Ammon C.J., Kanamori H., Lay T. **2008**. A great earthquake doublet and seismic stress transfer cycle in the central Kuril islands. *Nature*, 451(7178): 561–565. <https://doi.org/10.1038/nature06521>
11. Bath M. **1965**. Lateral inhomogeneities of the upper mantle. *Tectonophysics*, 2(6): 483–514. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(65\)90003-x](https://doi.org/10.1016/0040-1951(65)90003-x)
12. Blaser L., Kruger F., Ohmberger M., Scherbaum F. **2010**. Scaling relations of earthquake source parameter estimates with special focus on subduction environment. *Bull. of the Seismological Society of America*, 100(6): 2914–2926. <http://dx.doi.org/10.1785/0120100111>
13. Christensen D.H., Ruff L.J. **1988**. Seismic coupling and outer rise earthquakes. *J. of Geophysical Research*, 93(B11): 13421–13444. <https://doi.org/10.1029/jb093ib11p13421>
14. Dach R., Lutz S., Walser P., Fridez P. (eds) **2015**. *Bernese GNSS Software Version 5.2*. Bern: University of Bern, Bern Open Publ., 862 p. doi:10.7892/boris.72297
15. Okada Y. **1985**. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. of the Seismological Society of America*, 75(4): 1135–1154.
16. Omori F. **1894**. On the aftershocks of earthquakes. *J. of the College of Science, Imperial University of Tokyo*, 7: 111–200.
17. Shcherbakov R., Turcotte D.L. **2004**. A modified form of bath's law. *Bull. of the Seismological Society of America*, 94(5): 1968–1975. <https://doi.org/10.1785/012003162>
18. Skarlatoudis A.A., Somerville P.G., Thio H.K. **2016**. Source-scaling relations of interface subduction earthquakes for strong ground motion and tsunami simulation. *Bull. of the Seismological Society of America*, 106(4): 1652–1662. <http://dx.doi.org/10.1785/0120150320>
19. Steblov G.M., Kogan M.G., Levin B.V., Vasilenko N.F., Pрытков A.S., Frolov D.I. **2008**. Spatially linked asperities of the 2006–2007 great Kuril earthquakes revealed by GPS. *Geophysical Research Letters*, 35(22): L22306. <http://dx.doi.org/10.1029/2008GL035572>
20. 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(B11): 116728. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020>

The March 25, 2020 M_w 7.5 Paramushir earthquake

Alexander S. Prytkov*, Nikolay F. Vasilenko

Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

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

Abstract. The strong earthquake with moment magnitude $M_w = 7.5$ occurred on March 25, 2020, in the North Kurils to the southeast of the Paramushir Island. The hypocenter of the earthquake was located under the oceanic rise of deep-sea trench in the subducting Pacific lithospheric plate. This earthquake has been the strongest seismic event since 1900 for an area about 800 km long of the outer rise of the trench. It also was the strongest earthquake for the 300-kilometer long area of the Kuril-Kamchatka subduction zone adjacent to the epicenter. The article summarizes the data on the Paramushir earthquake. Tectonic position of the earthquake, source parameters, features of the aftershock process development, as well as coseismic displacement of the nearest continuous GNSS station are considered. The performed analysis did not allow us to clearly determine the rupture plane in the source. Nevertheless, the study of the features of the outer-rise earthquake is a matter of scientific interest, since the stress state of the bending area of the subducting Pacific lithospheric plate reflects the interplate interaction in the subduction zone.

Keywords: North Kurils, Paramushir earthquake, aftershocks, focal mechanism, coseismic displacements

For citation: Prytkov A.S., Vasilenko N.F. The March 25, 2020 M_w 7.5 Paramushir earthquake. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2021, vol. 5, no. 2, pp. 113–127. (In Russ. & Engl.).
<https://doi.org/10.30730/gtr.2021.5.2.113-120.121-127>

Acknowledgements

The authors are grateful to Dmitry Safonov for the provided materials of determining of the Paramushir earthquake moment tensor.

Introduction

On March 25, 2020, at 02:49 GMT in the north of the Kuril island arc, about 200 km south-east of the Paramushir Island an earthquake with a moment magnitude $M_w = 7.5$ occurred (Fig. 1). According to the data of the Sakhalin and Kamchatka branches of the Federal Research Center “Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences” (SB FRC GS RAS and KB FRC GS RAS), its macroseismic effect in Severo-Kurilsk reached 5–6 points on the MSK-64 scale. In the settlements of the Kamchatka Peninsula closest to the epicenter, tremors were felt with an intensity of 4–5 points. The earthquake caused a tsunami, the visually determined wave height of which on the Paramushir Island coast was about 0.5 m [Korolev, Korolev, 2020]. In accordance with the geographic location of the source, this seismic event is called the Paramushir earthquake in this work. The used below term “outer” refers to the outer rise of the Pacific Ocean Trench.

The March 25, 2020 Paramushir earthquake occurred in the subducting Pacific lithospheric

plate. It refers to strong and rare outer seismic events in the Kuril-Kamchatka subduction zone. According to the USGS data, this earthquake is the strongest since 1900 on the adjacent outer rise of a deep-sea trench about 800 km long, and also the strongest for the 300-kilometer area of the Kuril arc.

The analysis of outer seismicity is of scientific interest, since the stress state of the bending area of the subducting Pacific lithospheric plate reflects interplate interaction in the subduction zone [Christensen et al., 1988]. For this purpose, the work generalizes and analyzes data on the M_w 7.5 outer-rise Paramushir earthquake.

Tectonic position and source parameters of the earthquake

The interaction of the Pacific and North American lithospheric plates is reflected in the features of the spatial distribution of earthquake sources (Fig. 1). The epicenters of most seismic events, including the strongest ones with $M > 8$, are located between the island arc and the axis of the deep-sea

¹ FRC GS RAS – URL: <http://www.ceme.gsras.ru/new/struct> (accessed 16.01.2021).

² USGS – The United States Geological Survey. URL: <https://earthquake.usgs.gov/> (accessed 15.01.2021).

Translation of the article published in the present issue of the Journal: Прытков А.С., Василенко Н.Ф. Парамуширское землетрясение 25 марта 2020 г. $M_w = 7.5$. Translation by G.S. Kachesova.

trench and belong to the region of interplate contact of lithospheric plates (type A). The stresses in the sources of such earthquakes are principally oriented in the horizontal direction perpendicular to the island arc and are classified as overthrust and thrust faults according to the type of seismic dislocations.

The intraplate seismicity of the subduction zone (type B) clearly marks a seismic focal zone about 70 km thick, which falls under the islands [Tarakanov, Andreeva, 2012]. By the type of seismic dislocations, seismic events are normal faults or thrust faults depending on if they occur in the lower part of the subducting Pacific plate under tension, or in the upper, compressed part [Safonov et al., 2015].

Seismic events occurring in the zone external to the trench (type C) are spatially located in the

oceanic rise of the deep-sea trench and eastward of it. Strong (including tsunamigenic) intraplate earthquakes with the seismic dislocations of normal fault type are possible here [Tikhonov et al., 2008]. The likely cause of such earthquakes is the bending of the upper elastic part of the subducting plate [Safonov et al., 2015]. However, there are frequent cases of occurrence in this area of earthquakes with thrust faults in the sources, which reflects the state of compression of the fore-trench area.

Since 1964, only two outer-rise earthquakes with magnitudes $M_w > 7.0$ have been recorded in the Kuril-Kamchatka subduction zone (Fig. 1). The strongest of them was the second seismic event on January 13, 2007, with $M_w = 8.1$ of Simushir earthquake doublet of 2006–2007, which occurred at a depth of 10 km under extension settings.

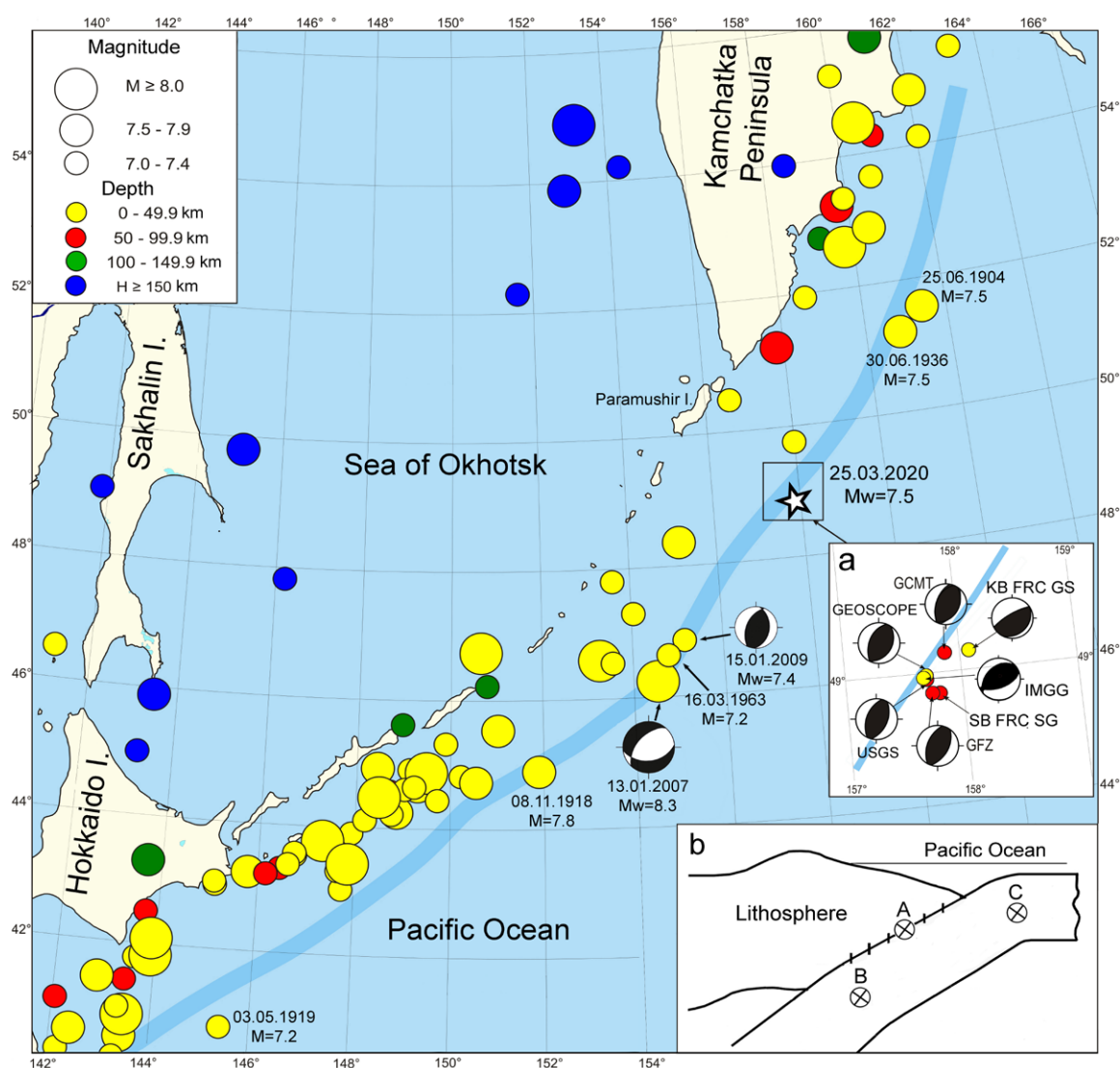


Figure 1. Map of earthquake epicenters of the Kuril-Kamchatka region with $M \geq 7.0$ for the period of 1900–2020 according to USGS (<https://earthquake.usgs.gov/>). (a) – the epicenters and focal mechanisms of the Paramushir earthquake according to the seismological agencies (Table); (b) – schematic model of the subduction zone. A, B, C – types of seismic events in the subduction zone.

In terms of seismic dislocations, it qualifies as a normal fault resulting from the stress relaxation process in the subduction zone after the November 15, 2006 M_w 8.3 earthquake [Steblov et al., 2008; Ammon et al., 2008]. In 2009, an earthquake with $M_w = 7.4$ occurred northeast of the Simushir earthquakes at a depth of 45 km under compressional settings. The analysis carried out in [Ye et al., 2021] showed this event not to be associated with the processes of contact of lithospheric plates in the subduction zone and be an aftershock of the January 13, 2007 M_w 8.1 Simushir earthquake, although it occurred in a compressional settings and had a thrust movement in the source.

The Paramushir earthquake was promptly processed by the regional centers and world seismological agencies (Table; Fig. 1). Discrepancies in the setting of epicenter coordinates using the data of seismological agencies working with various instrumental observation networks and information processing techniques are insignificant. From the position of the earthquake hypocenter, we can confidently conclude that this event took place in the outer zone at a depth of ~ 55 km under the oceanic rise in the subducting Pacific plate.

Earthquake focal mechanism solutions are quite similar (table). Only the regional determinations by the KB FRC GS RAS [Catalogue of earthquake...] and the IMGG FEB RAS differ somewhat from the results of international agencies, which

can arise from different number of seismic stations used for calculations and their geographic location. The compression axis is subhorizontal and oriented in the NW–SE direction, and the extension one is subvertical, for all the solutions obtained. The type of displacement along the both planes of the seismic rupture is a pure thrust fault (or a thrust fault with an insignificant shift component). The strike of the nodal planes of the source practically coincides with the strike of the deep-sea trench.

Aftershock process

The aftershock process in the source zone of the Paramushir earthquake is analyzed according to the data of the KB FRC GS RAS [Earthquakes catalogue...]. After the main shock with $M_L = 7.7$ the regional stations recorded more than 120 seismic events during the first day; for March – December 2020 about 400 aftershocks were recorded, 3 of which had a magnitude $M_L \geq 5.5$ (Fig. 2).

The aftershocks spatial distribution made it possible to delineate the epicentral area of the earthquake. It is about 50 km wide and extends in the NE–SW direction along the deep-sea trench for 95 km (Fig. 2). The linear dimensions of the source zone satisfy empirical estimators (85×41 km) for intraplate $M_w = 7.5$ earthquakes ($M_0 \sim 2 \cdot 10^{20}$ Nm) [Blaser et al., 2010; Skarlatoudis et al., 2016]. The main shock epicenter is confined to the southern edge of the aftershock

Table. The main parameters of the Paramushir earthquake according to the data of regional centers and international seismological agencies

Source	Coordinates of the epicenter		Depth, km	Magnitude	Nodal planes		
	° N	° E			Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)
IMGG FEB RAS	48.99	157.69	(32)	$M_w = 7.1$	223/69	37/56	69/105
SB FRC GS RAS	48.88	157.80	72	$M_{LH} = 7.5$			
KB FRC GS RAS	49.11	158.08	48	$M_L = 7.7$ $M_C = 7.5$	240/39	72/19	97/70
USGS	48.964	157.696	57.8 (61)	$M_w = 7.5$ $mb = 7.1$	201/23	47/43	88/92
GCMT	49.11	157.87	(52.6)	$M_s = 7.5$ $M_w = 7.5$	194/32	48/43	78/103
GFZ	48.89	157.74	51 (43)	$M_w = 7.4$	199/28	46/43	84/96
GEOSCOPE Observatory	48.986	157.693	(45)	$M_w = 7.5$	203/30	51/39	86/95

Note. The depth of model centroid is given in parenthesis. M_w – moment magnitude, M_{LH} – local surface wave magnitude, M_L – local magnitude obtained through recalculating from the energy class using the nomogram by S.A. Fedotov, M_C – spectral coda magnitude, M_s – surface wave magnitude, mb – body wave magnitude. IMGG FEB RAS – The Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; SB FRC UGS RAS – <http://www.ceme.gsras.ru/new/struct>; KB FRC GS RAS – <http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php>; USGS – <https://earthquake.usgs.gov/>; GCMT – Global Centroid Moment Tensor, <https://www.globalcmt.org/>; GFZ – Global Centroid Moment Tensor, <https://www.globalcmt.org/>; Geoscope Observatory – French Global Network of broad band seismic, <http://geoscope.ipgp.fr>.

cloud, which are localized in the depth interval of 15–53 km. The aftershocks spatial distribution over the depth (cross section across the strike of the deep-sea trench along the AA' line) does not give a visual representation of the possible working plane of the seismic rupture dip.

The first strong aftershock with $M_L = 5.7$ was recorded on March 25 at a depth of ~50 km. An aftershock with $M_L = 5.5$ ($M_W = 5.1$) occurred on April 7, at the same depth, and a seismic event with $M_L = 5.9$ ($M_W = 5.1$) occurred on June 14, at a depth of ~30 km. The difference between the

magnitudes of the main event and the strongest aftershock for M_L is 1.8, and for M_W – 2.4. According to Bath's empirical law, this difference should be within the range of 0.6–1.7 [Bath, 1965; Shcherbakov, Turcotte, 2004]. Consequently, the expected magnitude M_L of the strongest aftershock should be 6.0–7.1, and M_W – 5.8–6.9. This feature indicates the presence of strong events deficiency in the aftershock process. The time dependence and graph of the aftershock cumulative energy after the main shock until the end of 2020 are shown in Fig. 3. The low level of the aftershock cumulative

energy ΣE ($3.0 \cdot 10^{13}$ J), the value of which is $2.1 \cdot 10^3$ times less than the energy of the main event ($6.3 \cdot 10^{16}$ J), also indicates a seismicity deficiency.

The aftershocks recurrence graph of the Paramushir earthquake is shown in Fig. 4. The representativeness degree of the catalogue by magnitude M_L is ~ 3.6. The linear character of the graph remains for the range of magnitudes 3.6–4.4. Its slope $b = 1.08 \pm 0.10$ (correlation coefficient $R = 0.97 \pm 0.09$) corresponds to the average for the Kuril-Okhotsk region, the ten-year value of which $b = 1.0$ [Safonov et al., 2020], and is also close to the long-term average for the “Pacific Ocean” seismicity zone of the Kamchatka region and adjacent regions [Levina et al., 2013]. The aftershocks number within the range of 4.5–4.7 is much lower than one would expect based on the distribution of weaker earthquakes.

The decrease in the number of earthquakes with time after the main shock gives an idea of the nature of the seismic process development. According to the Omori empirical law [Omori, 1894], the aftershock process (Fig. 5) developed during the first two weeks in accordance with the index $p = -1.28 \pm 0.18$, which corresponds to the worldwide average value of seismic activity decay with time in the

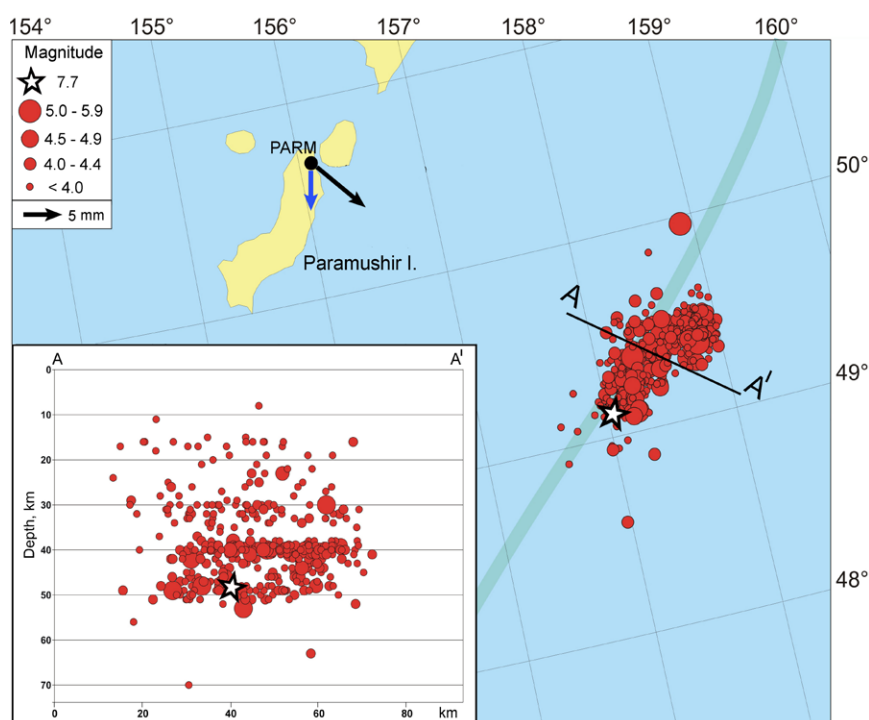


Figure 2. Map of the Paramushir earthquake aftershocks by KB FRC GS RAS [Earthquakes Catalogue...]. The horizontal coseismic displacement of the GNSS station PARM is shown with a black arrow, the vertical displacement is shown with a blue one. The inset shows a cross section of the aftershock area along the line AA'. The main shock is marked with an asterisk.

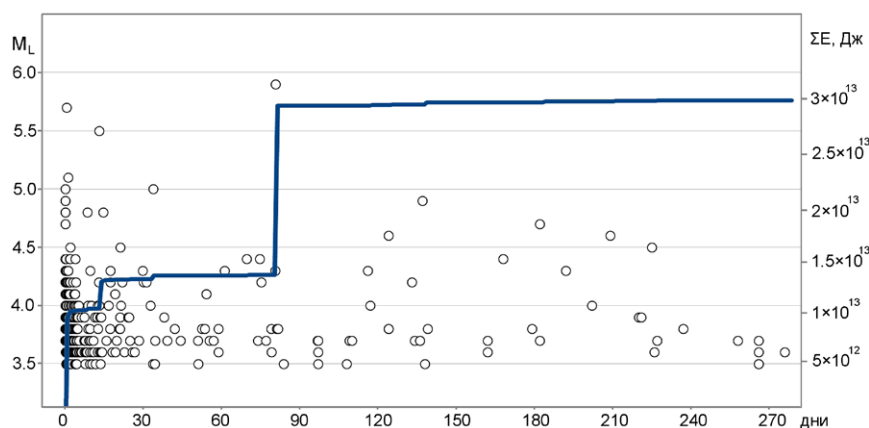


Figure 3. Time dependence and the graph of the aftershock cumulative energy of the Paramushir earthquake for the period of 25.03.2020 – 31.12.2020.

earthquakes' sources. A slight activation on the 4–5th days brought to a decrease in seismic activity on the 7th day. The seismicity decay is displayed on the cumulative graph of the earthquakes number (Fig. 6), where the aftershock sequence decreasing in time according to the hyperbolic law passes into a new mode. On the 20th day (April 15, 2020) after the main shock, this mode came close to linear one, which may indicate the transition of the seismic process to the background stage. It is noteworthy that the aftershocks of April 7, 2020, $M_L = 5.5$ and June 14, 2020, $M_L = 5.9$ did not cause any additional activation of the process decaying with time.

Coseismic displacement of the PARM GNSS-station

Coseismic displacements of the earth's surface serve as a basis for constructing dislocation models, which make it possible to uniquely determine the working plane of a seismic rupture as a result of a strong earthquake. The nearest regional GNSS (Global Navigation Satellite System) station of continuous recording PARM is located in the Severo-Kurilsk city and is 220 km northeast of the Paramushir earthquake epicenter. Data record at the station is made by 24-hour daily sessions with 30-second discreteness. Data processing is performed using the Bernese 5.2 software [Dach et al., 2015]. In this case, the final satellite orbits provided by the IGS (International GNSS Service), the parameters of the orientation of the Earth rotation IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service), tables of the antenna phase centers, the parameters of the Sun and the Moon, and other materials recommended by the International GNSS Service are used.

To identify coseismic displacements, a graph of daily repeatability of measurements at the PARM station, covering 10 days before and after the Paramushir earthquake, was built (Fig. 7). Remote stations of the IGS network MAG0 (Magadan), PETS (Petropavlovsk-Kamchatsky) and YSSK (Yuzhno-Sakhalinsk) were included in the processing as reference (fixed) stations. The a priori accuracy of daily solutions

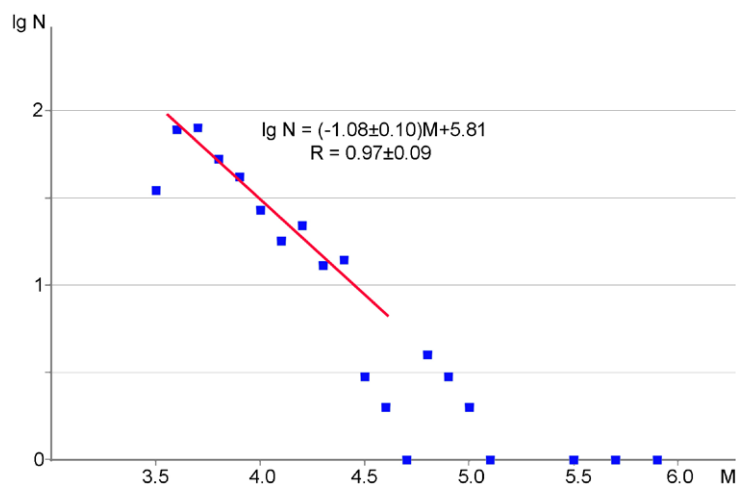


Figure 4. The aftershocks recurrence graph of the Paramushir earthquake. Origin time of the main shock is taken as the reference point. The approximation of the linear part of the graph is represented with a solid line.

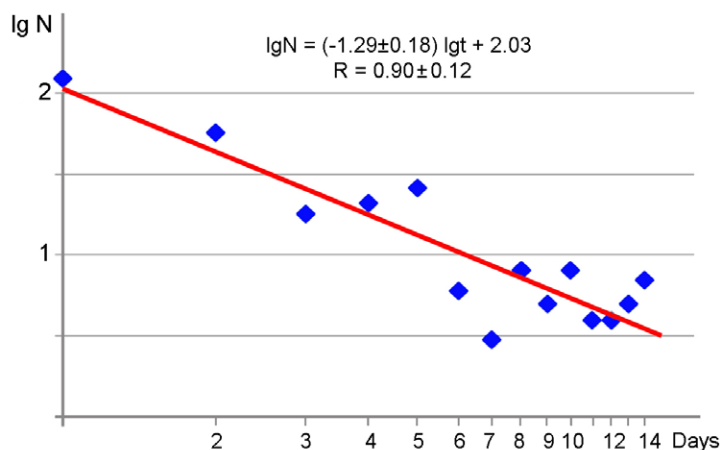


Figure 5. Graph of the aftershock process decay within two weeks after the Paramushir earthquake.

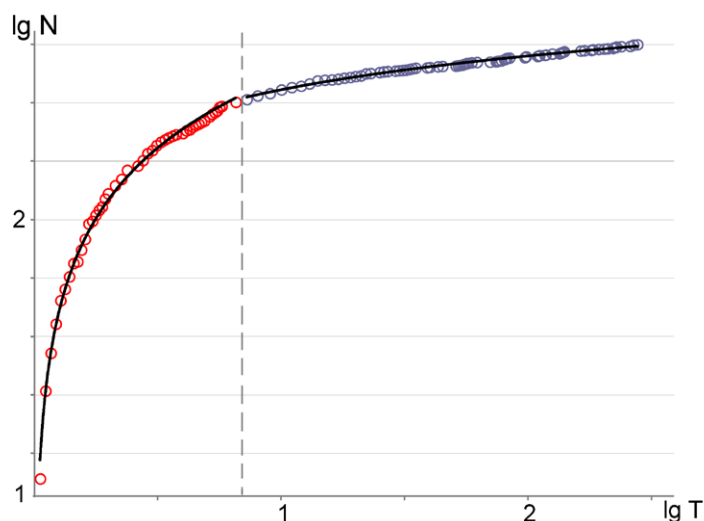


Figure 6. Cumulative graph of the aftershocks number of the Paramushir earthquake. The vertical dashed line shows the time of the change in aftershock mode.

based on the accuracy of satellite orbitography, possible errors in ionospheric and tropospheric signal propagation delays is 4–6 mm for horizontal components and 12–13 mm for vertical one.

Activity of the Ebeko active volcano (explosive eruption since 2016 [Degterev, Chibisova, 2020]), located 7 km from the PARM station, affects the results of GNSS measurements. Therefore, the coseismic displacement at the station was determined as the difference between the average coordinates for 10 days before and after the earthquake. By the components it was: 6.4 mm to the south, 5.6 mm to the east, and 4.8 mm descending.

Estimates of coseismic displacements based on dislocation models [Okada, 1985] with the parameters of the focal mechanisms according to the data of various seismological centers (ta-

ble) show that it is not possible to uniquely identify the working plane of the seismic rupture of the Paramushir earthquake. The models for both nodal planes of the northwest and southeast dip of the source provide similar values of coseismic displacements at the PARM station.

Conclusion

The March 25, 2020 M_w 7.5 Paramushir earthquake, which occurred in the subducting Pacific lithospheric plate at a depth of about 55 km, is a very rare outer seismic event. Despite the rather high level of seismic activity in the northern flank of the Kuril subduction zone, this earthquake is the strongest seismic event since 1900 for an area about 800 km long external to the trench. It appeared to be the strongest for the 300-kilometer section of the subduction zone adjacent to the epicenter. The only seismic event of comparable strength with $M = 7.3$ have occurred in this area in 1916 to the north of the epicentral area of the present earthquake.

The focal zone of the 95×50 km earthquake is extended along the outer rise of the deep-sea trench. The main shock epicenter is confined to the southern edge of the aftershock cloud, which are localized in the depth interval of 15–53 km. Analysis of the seismic process development revealed a deficit of strong events in the aftershock sequence (the cumulative energy of aftershocks is $\sim 2 \cdot 10^3$ times less than the energy of the main event) and its rapid decay with a transition to the background mode on the 20th day after the main shock.

Earthquake focal mechanism solutions according to the data of various seismological centers are quite similar. Subhorizontal compression stresses, oriented in the NW–SE direction, were realized in the source. Displacement type is a thrust fault along both possible planes of seismic rupture with their strike across the tectonic structures of the Kuril-Kamchatka seismic focal zone. Analysis of the spatial distribution of aftershocks and coseismic displacements did not make it possible to uniquely identify the working plane of the displacement in the source.

Outer intraplate seismicity, having a spatiotemporal connection with large interplate earthquakes, can be an additional indicator of the stress state of the contact area of lithospheric plates. The task of further research is the analysis of the current geodynamic setting of the northern part of the Kuril subduction zone and impact assessment of the M_w 7.5 Paramushir earthquake on it.

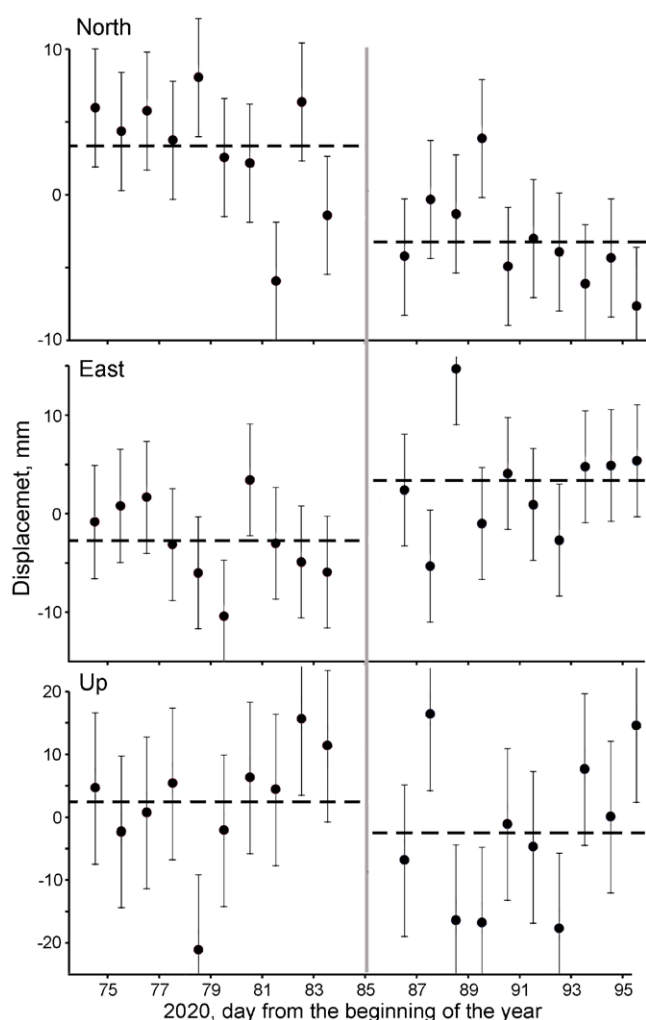


Figure 7. Coordinate time series of the PARM GNSS-station (Severo-Kurilsk city) from March 14 to April 4, 2020, GMT. A priori estimation of the daily solutions accuracy is shown with vertical lines up and down from each point. The gray vertical line indicates the date of the main shock of the Paramushir earthquake.

References

1. Ammon C.J., Kanamori H., Lay T. **2008**. A great earthquake doublet and seismic stress transfer cycle in the central Kuril Islands. *Nature*, 451(7178): 561–565. <https://doi.org/10.1038/nature06521>
2. Bath M. **1965**. Lateral inhomogeneities of the upper mantle. *Tectonophysics*, 2(6): 483–514. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(65\)90003-x](https://doi.org/10.1016/0040-1951(65)90003-x)
3. Blaser L., Kruger F., Ohmberger M., Scherbaum F. **2010**. Scaling relations of earthquake source parameter estimates with special focus on subduction environment. *Bull. of the Seismological Society of America*, 100(6): 2914–2926. <http://dx.doi.org/10.1785/0120100111>
4. *Catalogue of earthquake focal mechanisms for Kamchatka and the Commander Islands*. URL: <http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/mechanism.php> (accessed 16.01.2021).
5. Christensen D.H., Ruff L.J. **1988**. Seismic coupling and outer rise earthquakes. *J. of Geophysical Research*, 93(B11): 13421–13444. <https://doi.org/10.1029/jb093ib11p13421>
6. Dach R., Lutz S., Walser P., Fridez P. (eds) **2015**. *Bernese GNSS Software Version 5.2*. Bern: University of Bern, Bern Open Publ., 862 p. doi:10.7892/boris.72297
7. Degterev A.V., Chibisova M.V. **2020**. Activation of the Ebeko volcano in May–July, 2020 (Paramushir Island, Northern Kuril Islands). *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 4(4): 500–505. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.4.500-505>
8. *Earthquakes Catalogue for Kamchatka and the Commander Islands (1962–present)*. URL: <http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php> (accessed 16.01.2021).
9. Korolev Yu.P., Korolev P.Yu. **2020**. Simulation of the process of short-term forecasting of the 25.03.2020 Onkotan tsunami. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 4(2): 259–265. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.2.259-265>
10. Levina V.I., Lander A.V., Mityushkina S.V., Chebrova A.Y. **2013**. The seismicity of the Kamchatka region: 1962–2011. *J. of Volcanology and Seismology*, 7(1): 37–57. <https://doi.org/10.1134/S0742046313010053>
11. Safonov D.A., Konovalov A.V., Zlobin T.K. **2015**. The Urup Earthquake sequence of 2012–2013. *J. of Volcanology and Seismology*, 9(6): 402–411. <https://doi.org/10.1134/S074204631506007X>
12. Safonov D.A., Kostylev D.V., Fokina T.A., Kovalenko N.S. **2020**. Seismicity of the South Far East of Russia in 2019. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 4(2): 146–159. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.2.146-159>
13. Tarakanov R.Z., Andreeva M.Yu. **2012**. Role of seismic focal zone in the formation and development of the Kuril – the Sea of Okhotsk region structures. *Russian J. of Pacific Geology*, 31(6): 87–96. (In Russ.).
14. Tikhonov I.N., Vasilenko N.F., Zolotukhin D.E., Ivelskaya T.N., Poplavskii A.A., Prytkov A.S., Spirin A.I. **2008**. Simushir Earthquakes and Tsunami of November 15, 2006, and January 13, 2007. *Russian J. of Pacific Geology*, (2)1: 1–14.
15. Okada Y. **1985**. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. of the Seismological Society of America*, 75(4): 1135–1154.
16. Omori F. **1894**. On the aftershocks of earthquakes. *J. of the College of Science, Imperial University of Tokyo*, 7: 111–200.
17. Shcherbakov R., Turcotte D.L. **2004**. A modified form of Bath's law. *Bull. of the Seismological Society of America*, 94(5): 1968–1975. <https://pubs.geoscienceworld.org/ssa/bssa/article-abstract/94/5/1968/121045/A-Modified-Form-of-Bath-s-Law?redirectedFrom=fulltext>
18. Skarlatoudis A.A., Somerville P.G., Thio H.K. **2016**. Source-scaling relations of interface subduction earthquakes for strong ground motion and tsunami simulation. *Bull. of the Seismological Society of America*, 106(4): 1652–1662. <http://dx.doi.org/10.1785/0120150320>
19. 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): L22306. <http://dx.doi.org/10.1029/2008GL035572>
20. 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(B11): 116728. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020>

Об авторах

ПРЫТКОВ Александр Сергеевич (<https://orcid.org/0000-0003-4488-1682>), кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, a.prytkov@imgg.ru

ВАСИЛЕНКО Николай Федорович (<https://orcid.org/0000-0003-1591-9071>), кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, n.vasilenko@imgg.ru

About the Authors

PRYTKOV Alexander S. (<https://orcid.org/0000-0003-4488-1682>), Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, a.prytkov@imgg.ru

VASILENKO Nikolay F. (<https://orcid.org/0000-0003-1591-9071>), Cand. of Engineering, Leading Researcher, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, n.vasilenko@imgg.ru