

ПАРАМУШИРСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 25 МАРТА 2020 г. $M_w = 7.4$

© 2023 Д.В. Чебров¹, И.Р. Абубакиров¹, А.А. Губанова¹, В.Е. Глухов¹,
А.В. Ландер², Е.А. Матвеев¹, С.В. Митюшкина¹, В.М. Павлов¹,
В.А. Салтыков¹, С.Л. Сеньюков¹, Н.Н. Титков¹

¹Камчатский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Петропавловск-Камчатский, Россия, 683006; e-mail: danila@emsd.ru

²Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва, Россия, 117997

Поступила в редакцию 30.11.2022 г.; после доработки 04.05.2023 г.; принята в печать 26.06.2023 г.

25 марта 2020 г. за осью Курило-Камчатского глубоководного желоба в районе Северных Курильских островов произошло сильное землетрясение, имевшее моментную магнитуду $M_w = 7.4$. Землетрясение ощущалось на всех Курильских островах, Южной и Восточной Камчатке, максимальные сотрясения были зафиксированы в Северо-Курильске и достигали интенсивности 6–7 баллов. Также была зафиксирована отчетливая волна цунами. В статье данное землетрясение и его тектоническая позиция обсуждаются в контексте сейсмичности Курило-Камчатской дуги, описываются действия дежурной смены при обработке землетрясений, дано детальное описание макросейсмических проявлений. Также показаны результаты анализа пиковых амплитуд колебаний грунта, механизмы и модели очага, особенности распространения цунами. Представлены косейсмические смещения по данным станций GNSS-наблюдений и проведено сравнение с модельными данными. Обсуждаются особенности и стадии развития афтершокового процесса, оценен размер очаговой области.

Ключевые слова: Камчатка, землетрясение, сейсмичность, афтершоки, механизм очага, цунами.

ВВЕДЕНИЕ

25 марта 2020 г. в 2:49 UTC (14:49 по местному времени) произошло сильное землетрясение ($M_w = 7.4$), эпицентр которого расположен на северо-западе Тихого океана в пределах Курило-Камчатского глубоководного желоба (рис. 1) в непосредственной близости от южной границы зоны ответственности Камчатского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (КФ ФИЦ ЕГС РАН) (Маловичко и др., 2022). Разрушений и пострадавших в результате этого события не было, однако оно ощущалось с интенсивностью 6–7 баллов в ближайшем населенном пункте г. Северо-Курильске (Курильские о-ва, о. Парамушир) приблизительно в 220 км от эпицентра и до 4–5 баллов в г. Петропавловске-Камчатском примерно в 430 км от эпицентра. Землетрясение в научной литературе известно под названием «Парамушир-

ское» (Прытков, Василенко, 2021; Ye et al., 2021) и в настоящей работе имеет аббревиатуру «ПЗ». За главным толчком ПЗ последовала серия афтершоков с магнитудами $M_L \leq 5.9$, наиболее интенсивная фаза которой, по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН, продолжалась около 3 месяцев. Магнитуда землетрясения значительно превысила порог цунамигенности.

В работе представлены параметры ПЗ и его афтершоков, сведения о косейсмических и постсейсмических эффектах и приведены результаты анализа полученных данных.

ОПЕРАТИВНЫЕ ДЕЙСТВИЯ ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ПАРАМУШИРСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В КФ ФИЦ ЕГС РАН

Оперативная обработка землетрясения началась по срабатыванию сигнализации превышения уровня сейсмического сигнала на станции Северо-Курильск (50.67° с.ш., 156.12° в.д.),

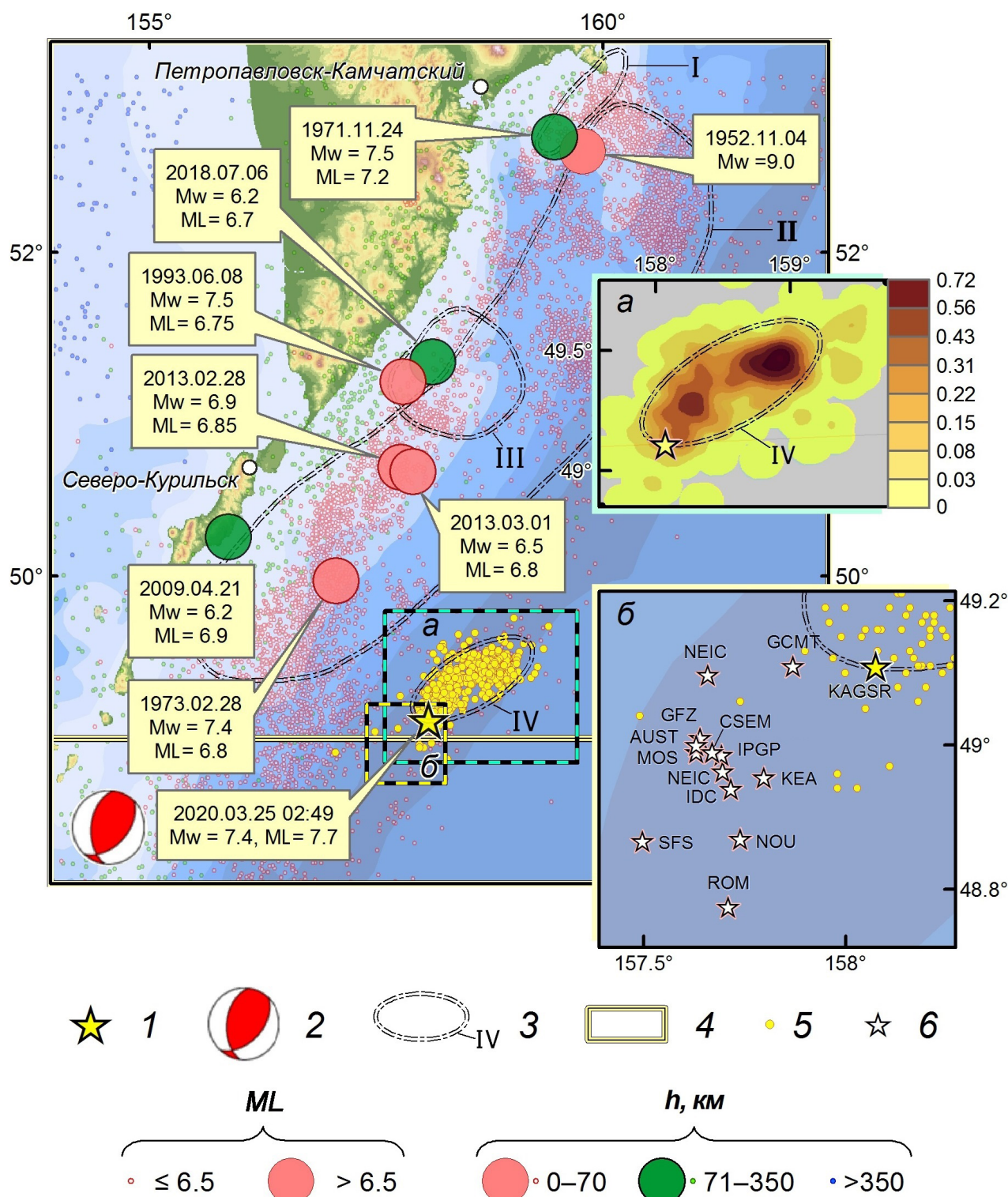


Рис. 1. Карта расположения эпицентра, афтершоков и очаговой области Парамуширского землетрясения по отношению к сейсмичности района за инструментальный период. 1 — эпицентр ПЗ; 2 — стереограмма механизма очага ПЗ в равноплощадной проекции нижней полусферы; 3 — границы очаговых областей ПЗ и сильнейших землетрясений района (Гусев, 2006), (I — 24.11.1971 $M_w = 7.5$; II — 4.11.1952 $M_w = 9.0$; III — 08.06.1993 $M_w = 7.5$; IV — ПЗ, 25.03.2020 $M_w = 7.4$); 4 — граница зоны ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН; 5 — эпицентры афтершоков ПЗ; 6 — эпицентры по данным мировых агентств; На врезках: а — карта сглаженной плотности пространственного распределения эпицентров афтершоков (без учета магнитуды). Шкала плотности распределения дана в единицах числа событий в день на 100 км²; б — эпицентры по данным международных сейсмических агентств (табл. 1); ML — локальная магнитуда землетрясения, размер кружка соответствует величине землетрясения; h — глубина землетрясения, разные цвета соответствуют разным глубинам.

Fig. 1. Map of source area, epicenter estimations and aftershocks of the March 25, 2020, $M_W = 7.4$ Paramushir earthquake and regional seismicity. 1 — Paramushir Earthquake epicenter; 2 — lower-hemisphere, equal-area stereographic projections of focal mechanism; 3 — source areas of strongest earthquakes (Gusev, 2006) and Paramushir Earthquake, (I — 24.11.1971 $M_W = 7.5$; II — 4.11.1952 $M_W = 9.0$; III — 08.06.1993 $M_W = 7.5$; IV — NKE, 25.03.2020 $M_W = 7.4$); 4 — KB GS RAS response area; 5 — Paramushir Earthquake aftershocks; 6 — Paramushir Earthquake epicenter estimated by different world seismic agencies. Inset a shows a map of smoothed epicenter distribution density (magnitude independent), scale dimension is number of events per day per 100 km². Inset b shows Paramushir Earthquake epicenter estimated by different world seismic agencies, denoted in tabl. 1); ML — local magnitudes, circle size corresponds to magnitude estimation; h — color legend of earthquake depths.

о сильном землетрясении был оповещен Центр цунами Камчатского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (УГМС). Оценка магнитуды по поверхностным волнам $M_S(20R)$ составила 7.2 (Чубарова, Гусев, 2017), что потребовало объявления тревоги цунами согласно регламентам Службы предупреждения о цунами с оповещением ГУ МЧС, подразделений Росгидромета, Правительства Камчатского края и др. По решению Центра цунами Сахалинского УГМС в Северо-Курильске была проведена эвакуация населения в безопасные районы.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПЗ ПО ДАННЫМ МИРОВЫХ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ АГЕНСТВ

Землетрясение произошло под глубоководным Курило-Камчатским желобом, по оценке КФ ФИЦ ЕГС РАН, на глубине 47.6 км. В данном районе фиксируется преимущественно более поверхностная сейсмичность. Гипоцентры, рассчитанные по данным большей части мировых сейсмических агентств (рис. 1б, табл. 1) лежат в диапазоне ~30–60 км, что подтверждает эту оценку. Эпицентр и очаг ПЗ располагается вне зоны субдукции, внутри Тихоокеанской литосферной плиты, в области внешнего океанического вала (в данном районе называемый валом Зенкевича) (рис. 2).

Большинство определений моментной магнитуды ПЗ (табл. 1) лежит в пределах $M_W = 7.4–7.6$.

ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ ПЗ

Возникновение ПЗ связано с процессом субдукции Тихоокеанской литосферной плиты под Охотскую плиту (рис. 2). Однако ПЗ не является непосредственно субдукционным землетрясением. Перед погружением в зону субдукции под воздействием надвигающегося аллохтона океаническая плита изгибается, образуя параллельные зоне глубоководный желоб и прилегающий к нему, в данном случае с юго-востока, вал Зенкевича. Изгиб плиты порождает собственное поле напряжений и соответствующую полосу сейсмичности, протянувшуюся вдоль вала

Зенкевича. Большинство землетрясений этой полосы являются мелкофокусными, и для них характерны сбросовые механизмы с плоскостями разрыва близкими к простиранию желоба и вала Зенкевича (Лобковский, 1988). Это соответствует растяжению верхней части изгибающейся океанической плиты.

Однако, согласно данным каталога GCMТ, в полосе сейсмичности вала Зенкевича в более глубоких горизонтах (на глубинах ~35–60 км) преобладают землетрясения с противоположным — взбросовым типом подвижки. Это говорит о смене под валом Зенкевича с ростом глубины условий растяжения на сжатие, что соответствует теории изгиба литосферной плиты Лобковского (Лобковский, 1988).

ПЗ относится к событиям со взбросовым типом подвижки. Его пространственный очаг располагается на глубине 20–70 км (основной диапазон глубин афтершоков по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН), а в механизме субгоризонтальная ось сжатия направлена приблизительно на северо-запад поперек простирания Курило-Камчатского желоба и параллельного ему вала Зенкевича (рис. 2, табл. 2). Инструментальный эпицентр ПЗ находится в глубоководном желобе юго-восточнее фронта зоны субдукции. Таким образом, ПЗ является внутритипным событием. Его очаг располагается в Тихоокеанской плите, в области, где она изогнута перед погружением в зону субдукции. Смена с глубиной условий растяжения литосферной плиты на сжатие наблюдалась и в пределах афтершокового процесса ПЗ.

За период инструментальных наблюдений с начала XX в. в рассматриваемом регионе произошло около 200 землетрясений (рис. 2) для которых хотя бы одна из объявленных магнитуд достигала или превышала 7.0 (по данным USGS¹, ISC, и каталога ISC-GEM (Di Giacomo et al., 2018; Storchak et al., 2013; 2015)). Из них в Курило-Камчатской дуге зафиксировано ~75 землетрясений, сравнимых или превосходящих ПЗ (в зависимости от типа используемой магнитуды). По нашему мнению, 11 событий (включая ПЗ) произошли в районе вала Зенкевича (события первой половины

¹ The United States Geological Survey. URL: <https://www.usgs.gov>

Таблица 1. Сводка координат гипоцентра и магнитуды ПЗ по данным мировых сейсмологических агентств
Table 1. World seismic agencies estimations of hypocenter and magnitude of Paramushir Earthquake

№	Агентство	Время, ч:мин:с	Гипоцентр			Энергетический класс или магнитуда /Кол-во станций
			φ° , с.ш.	λ° , в.д.	h , км	
1	KAGSR	02:49:19.69	49.1097	158.0753	47.6	$K_s = 16.8/24$, $M_l = 7.7/24$, $M_c = 7.5/25$, $M_w = 7.4$
2	GSRAS	02:49:21.90	49.99	157.63	61.0	$MS = 7.5/27$, $mb = 7.2/28$ $MB = 7.1$
3	NEIC	02:49:21.16	48.9638	157.6955	57.8	$M_w = 7.5$, $mb = 7.1/320$, $M_{ww} = 7.5/239$, $M_{wb} = 7.4/293$
4	IDC	02:49:20.02	48.9388	157.7166	49.7	$MS = 7.3/79$, $mb = 5.9/46$, $ML = 5.8/7$, $mbtmp = 6.3/53$
5	IPGP	02:49:21.00	48.9860	157.6930	45.0	$M_w = 7.5$
6	GFZ	02:49:15.90	49.0100	157.6400	10.0	$mb = 7.4/32$
7	AUST	02:49:17.22	49.0000	157.6300	14.0	$M = 7.5$, $M_w = 7.5$
8	ROM	02:49:18.54	48.7758	157.7090	19.5	$M_w = 7.6$, $M_{wpd} = 7.6/168$
9	SFS	02:49:32.53	48.8668	157.4976	157.7	$mb = 6.6/34$, $mB = 7.4/34$, $ML = 7.4/34$, $M_{wMwp} = 7.3/30$, $M_{wp} = 7.0/30$
10	CSEM	02:49:15.60	48.9900	157.6700		$M_w = 7.6$
11	NOU	02:49:17.80	48.8700	157.7400	27.0	$ML = 7.6/153$
12	KEA	02:49:17.96	48.9552	157.7983	33.0	$mB = 7.7/3$
13	NEIC (центроид)	02:49:21.40	49.0975	157.6587	60.5	$M_w = 7.46$
14	GCMT (центроид)	02:49:31.20	49.1100	157.8700	52.6	$M_w = 7.5/174$

Примечание. Информация об основных параметрах землетрясения для агентств NEIC (<https://www.usgs.gov/staff-profiles/national-earthquake-information-center-neic>), IDC (<http://www.ctbto.org>), IPGP (<http://www.ipgp.fr>), GFZ (<http://www.gfz-potsdam.de>), AUST (<http://www.ga.gov.au>), ROM (<http://www.ingv.it/>), SFS (<http://www.isc.ac.uk/cgi-bin/agency-get?agency=SFS>), CSEM (<http://www.emsc-csem.org>), NOU (<http://www.ird.nc>), KEA (<http://www.isc.ac.uk/cgi-bin/agency-get?agency=KEA>), GCMT (<http://www.globalcmt.org>) взята на сайте международного агентства ISC (<http://www.isc.ac.uk>).

Note. Information about the main earthquake parameters for the agencies NEIC, IDC, IPGP, GFZ, AUST, ROM, SFS, CSEM, NOU, KEA, GCMT was obtained from the website of the international agency ISC.

XX века могут обладать недостаточной точностью определения гипоцентров).

ПЗ является вторым по магнитуде событием, инструментально зарегистрированным в Курило-Камчатской дуге в районе вала Зенкевича. Сильнейшее из таких землетрясений — Симуширское 13 января 2007 г., $M_w = 8.1$ возникло в верхней части изгиба океанической плиты (глубина центраида 12 км), в отличие от ПЗ в условиях растяжения перпендикулярного простираию Курило-Камчатской дуги. Через два года в пределах эпицентральной области афтершоков этого события, но на большей глубине 45 км, 15 января 2009 г. произошло землетрясение с $M_w = 7.4$ и механизмом сходным с ПЗ, по-видимому, подтверждающим, что в нижних горизонтах литосферной плиты одновременно существуют условия субгоризонтального сжатия поперек дуги. Скалярный сейсмический момент землетрясения 15 января 2009 г. по данным GCMT несколько меньше, чем скалярный сейсмический момент ПЗ, что ставит его на третье место среди инструментально зафиксированных

сильнейших землетрясений вала Зенкевича Курило-Камчатской дуги.

Результаты комплексных исследований ПЗ, в первую очередь опираются на данные КФ ФИЦ ЕГС РАН, полученные на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>). Помимо Камчатской системы сейсмологических наблюдений (Чебров и др., 2013) в КФ ФИЦ ЕГС РАН использовались записи сейсмических станций Дальнего Востока России и мировой сети GSN (Global Seismographic Network, IRIS²), а также GNSS станции PARM (Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН) и глубоководных станций DART (NDBC³).

² Incorporated Research Institutions for Seismology.
URL: <http://www.iris.washington.edu>.

³ National Data Buoy Center, USA.
URL: <https://www.ndbc.noaa.gov/dart/dart.shtml>.

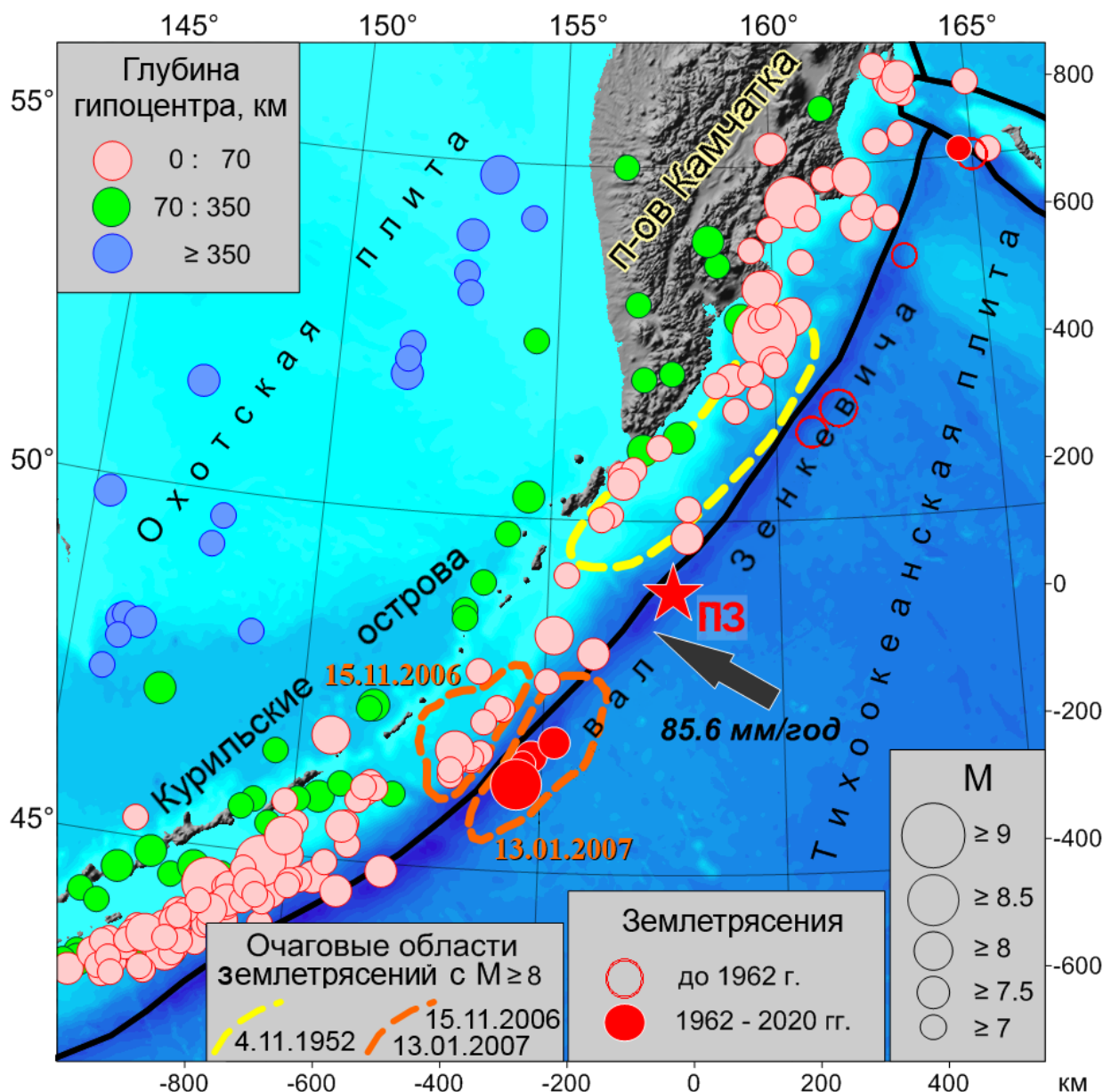


Рис. 2. Сильнейшие землетрясения Курило-Камчатской дуги с магнитудой $M \geq 7.0$. События, относящиеся к впадине Зенкевича выделены красным цветом. Красная звезда — эпицентр ПЗ. Черные линии — границы литосферных плит. Черная стрелка — направление и скорость движения Тихоокеанской плиты относительно Охотской в районе ПЗ.

Fig. 2. The strongest, $M \geq 7.0$, earthquakes of the Kuril-Kamchatka arc. Red circles are events on the oceanic slope of the trench. The red star is the epicenter of the Paramushir Earthquake. Black solid lines are plate boundaries, dark grey arrow is the direction of the Pacific plate motion relative to the Okhotsk plate near the North Kuril Earthquake source area, Pacific plate motion and velocity of is indicated.

ТЕНЗОР СЕЙСМИЧЕСКОГО МОМЕНТА ПЗ ПО РЕГИОНАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Тензор сейсмического момента для ПЗ и его сильнейших афтершоков определен по записям волновых форм региональных широкополосных сейсмических станций. При расчете использована методика RSMT (Regional Seismic Moment Tensor) (Абубакиров, Павлов, 2021; Павлов, 2017), позволяющая в приближении точечного источника определить, наряду с

тензором, глубину h и длительность τ процесса разрыва. Оценки очаговых параметров построены для двух тензорных моделей источника: 1) DC (Double Couple tensor) — двойной диполь без момента — симметричный тензор с нулевыми следом и определителем, 2) NT (Null Trace tensor) — произвольный симметричный тензор с нулевым следом. Очаговые параметры обеих моделей определялись непосредственной инверсией волновых форм в тензор сейсмического момента.

Таблица 2. Сводка параметров очага ПЗ
Table 2. Source parameters of Paramushir Earthquake

№	Агентство, метод	Главные оси и главные значения (в ед. 10^{20} H_m)						Механизм						M_w	M_0 10^{20} H_m	h $км$	τ с	η %				
		T			N			P			NP1		D1							NP2		D2
		E_T	azm°	pl°	E_N	azm°	pl°	E_P	azm°	Pl°	stk°	dip°	$slip^\circ$							stk°	dip°	$slip$
1	KAGSR, RSMT, DC	1.78	25	70	0	205	20	-1.78	115	0	186	48	63	44	48	117	1.78	45	8	0		
2	KAGSR, RSMT, NT	1.68	21	71	0.14	205	19	-1.82	115	1	186	47	64	42	49	115	1.75	45	10	12		
3	GCMT, NT	2.05	38	80	0.09	202	10	-2.14	292	3	193	49	77	33	43	105	2.09	53	27	7		
4	NEIC WP, NT	1.83	81	88	0.23	202	1	-2.06	292	2	201	47	88	23	43	92	1.96	61	28	18		
5	NEIC BW, NT	1.50	37	78	0.14	192	11	-1.64	283	5	183	51	76	24	41	106	1.58	61	-	13		

Примечание. DC — модель двойного диполя без момента; NT — модель симметричного тензора с нулевым следом; E_T , E_N , E_p — главные значения тензора; h — глубина эквивалентного источника; τ — длительность; η — коэффициент Лодэ-Надаи: $\eta = (2 E_N - E_T - E_p) / (E_T - E_p) * 100\%$. WP — W-фаза; BW — оценка по объемным волнам; MW — моментная магнитуда; M_0 — скалярный сейсмический момент; azm° , pl° — углы, задающие ориентацию главных осей T, N, P; stk° , dip° , $slip^\circ$ — углы, задающие ориентацию механизма. В правом столбце приведены соответствующие диаграммы тензора сейсмического момента в равноплоской проекции нижней полусферы.

Note. DC — Double Couple Moment Tensor; NT — Null Trace Moment Tensor; E_T , E_N , E_p — eigen values of tensor; h — equivalent source depth; τ — duration; η — Lode-Nadai coefficient: $\eta = (2 E_N - E_T - E_p) / (E_T - E_p) * 100\%$. WP — W-phase; BW — Body waves; MW — moment magnitude; M_0 — scalar seismic moment; azm° , pl° — the angles defining the orientation of the main axes T, N, P; stk° , dip° , $slip^\circ$ — the angles defining the orientation of the mechanism. In the right column seismic moment tensor diagram in low-hemisphere equal area projection are shown.

Для описания механизма очага в NT-моделях использованы параметры наилучшего двойного диполя (Ekstrom et al., 2012). NT-решения, полученные в КФ ФИЦ ЕГС РАН, GCMT, NEIC (USGS) (табл. 2) содержат небольшие значения коэффициента Лоде-Надаи (Юнга, 1979). Это означает, что недипольная составляющая в тензоре сейсмического момента мала, и модель DC является хорошим приближением. Механизмы очагов во всех решениях близки между собой. Моментная магнитуда M_w составляет 7.4–7.5. Глубина эквивалентного источника h находится в интервале 45–61 км, а оценки длительности процесса вспарывания τ укладываются в диапазон 8–28 с.

МАКРОСЕЙСМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ И СИЛЬНЫЕ ДВИЖЕНИЯ ГРУНТА

Макросейсмическая информация собрана для 61 населенного пункта Камчатского края и Сахалинской области⁴ (Российская Федерация); земле-

⁴ По данным Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences (www.gsras.ru).

трясение замечено на островах Хоккайдо⁵ (Япония, г. Китами) и Адак⁶ (США, г. Адак) (табл. 3). Из различных источников обработано 264 сообщения, по которым составлена карта макросейсмического проявления землетрясения (рис. 3).

Самые сильные сотрясения были зафиксированы на о. Парамушир в г. Северо-Курильске ($\Delta = 223$ км). В течение минуты все жители города ощущали сильную жесткую тряску по нарастающей. Незадолго до и во время землетрясения некоторые люди слышали подземный гул. По сообщениям респондентов, от сильной тряски в зданиях скрипели стены и перекрытия, дрожали и трескались окна, открывались и закрывались двери; устойчивые и тяжелые предметы быта раскачивались, подпрыгивали и заметно смещались; неустойчивые и легкие предметы падали. Выбежавшие на улицу люди наблюдали сотрясение кустов и деревьев, раскачивание опор ЛЭП,

⁵ По данным Centre Sismologique Euro-Méditerranéen (CSEM/EMSC) (www.emsc-csem.org).

⁶ По данным National Earthquake Information Center (earthquake.usgs.gov).

Таблица 3. Макросейсмические проявления ПЗ

Table 3. Macro seismic effect of the Paramushir Earthquake

Балл	Название пункта (эпицентральное расстояние, км)
6–7	г. Северо-Курильск (223)
6	маяк Чибуйный (228), маяк Круглый (329)
5–6	РНС Подгорная (215)
5	кордон Озерный (274), пос. Паужетка (277), пос. Озерновский (288), с. Запорожье (288), ГМС Водопадная (300), стационар Карымшина (413), г. Вилучинск (425)
4–5	ГМС м. Лопатка (220), МГеоЭС (381), пос. Рыбачий (424), пос. Термальный (426), пос. Паратунка (428), г. Петропавловск-Камчатский (437), с. Николаевка (438), пос. Пионерский (444), пос. Нагорный (447), г. Елизово (453), кордон м. Налычево (461), ГМС Семячик (568), кордон Кроноки (645)
4	маяк Петропавловский (422), пос. Вулканный (443), пос. Раздольный (463), с. Коряки (464), маяк м. Шипунский (465)
3–4	маяк Большерецкий (403), с. Апача (430), с. Усть-Большерецк (432), пос. Сокоц (450)
3	маяк Курбатова (226), пос. Октябрьский (415), с. Никольское (865), пос. Южно-Курильск (1089), пос. Лагунное (1093), пос. Горячий Пляж (1096)
2–3	маяк м. Васильева (218), с. Кавалерское (437)
2	с. Малокурильское (1038)
1–2	пос. Усть-Камчатск (847)
Ощущ.*	с. Сосновка (442), кордон Центральный (492), г. Китами (1233), г. Адак (1801)

Примечание. * — недостаточно данных для оценки по макросейсмической шкале интенсивности ГОСТ Р 57546–2017. Баллы по макросейсмической шкале интенсивности ГОСТ Р 57546–2017.

Note. * — there is not enough data to evaluate according to the macro seismic intensity scale GOST R 57546–2017. Scores on the macro seismic intensity scale GOST R 57546–2017.

отдельно стоящих труб, разрушение кирпичных труб на крышах зданий. При осмотре социально значимых объектов⁷ (детского сада, школы, больницы, дома Культуры) в совокупности в помещениях были зафиксированы: многочис-

⁷ Согласно актам визуального осмотра Комиссией по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций и обеспечению пожарной безопасности Северо-Курильского городского округа социально значимых объектов г. Северо-Курильск от 25–26 марта 2020 г.

ленные трещины на потолках и стенах; трещины и отслоения штукатурки, отделочной керамической плитки; трещины в бетонной стяжке и на участке крепления лестничного марша к основанию; механический разрыв труб отопления от места ввода в радиатор. Макросейсмическое проявление ПЗ в г. Северо-Курильске соответствует интенсивности сотрясений 6–7 баллов⁸.

⁸ По макросейсмической шкале интенсивности ГОСТ Р 57546–2017.

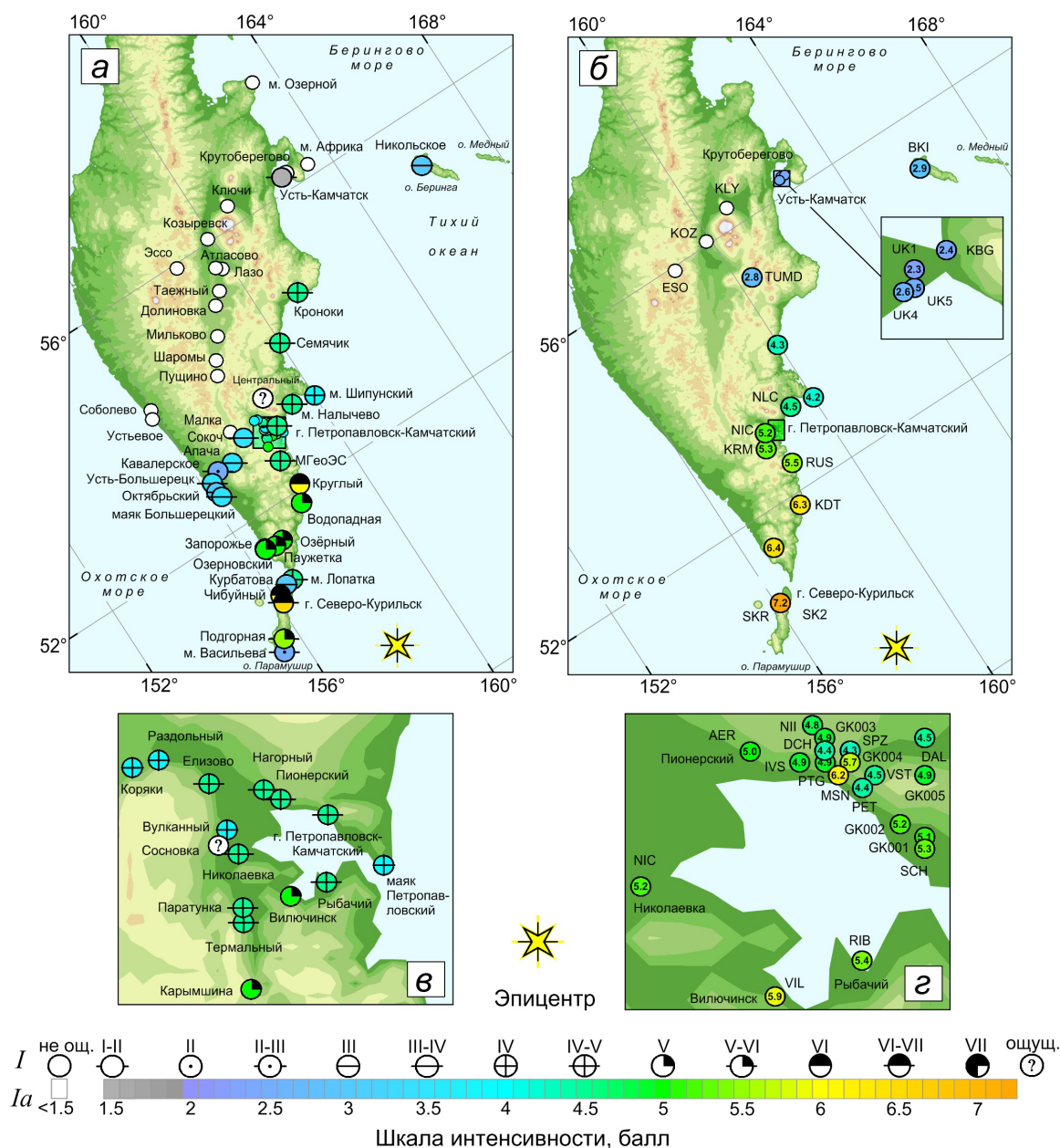


Рис. 3. Карта макросейсмического проявления (а, в) и распределения инструментальной интенсивности (б, г) ПЗ на полуострове Камчатка и о-вах Парамушир и Шумшу: *I* — макросейсмическая интенсивность; *Ia* — инструментальная интенсивность, рассчитанная из значений максимальных амплитуд пикового ускорения на горизонтальных каналах акселерометров.

Fig. 3. Map of seismic intensity (а, в) and instrumental intensity (б, г) distribution from the 25, March 2020 earthquake in the territory of the Kamchatka Peninsula and Paramushir and Shumshu Islands: *I* — macroseismic intensity; *Ia* — intensity, calculated from the peak ground acceleration on the horizontal channels of accelerometers.

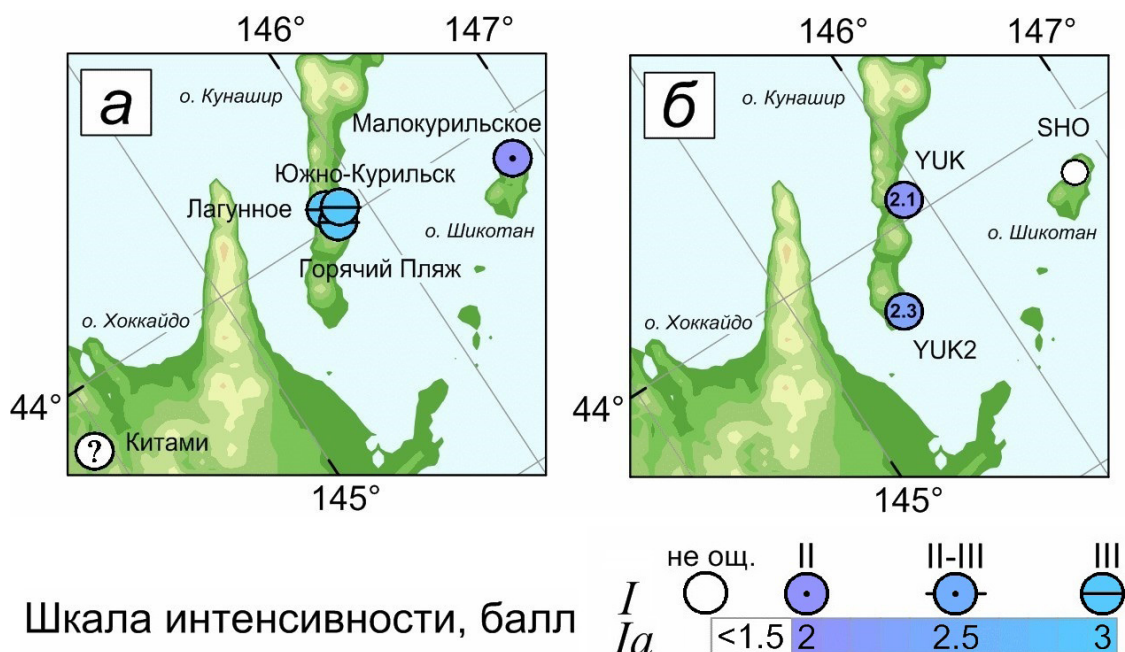


Рис. 4. Карта макросейсмического проявления (а) и распределения инструментальной интенсивности (б) землетрясения ПЗ на островах: Кунашир, Шикотан и Хоккайдо (Япония): I — макросейсмическая интенсивность; I_a — инструментальная интенсивность, рассчитанная из значений максимальных амплитуд пикового ускорения на горизонтальных каналах акселерометров.

Fig. 4. Map of seismic intensity (а) and instrumental intensity (б) distribution from the 25, March 2020 earthquake in the territory of the Kunashir, Shikotan and Hokkaido Islands: I — macroseismic intensity; I_a — intensity, calculated from the peak ground acceleration on the horizontal channels of accelerometers.

В Камчатском крае землетрясение ощущалось с интенсивностью от 2 до 6 баллов в 36 населенных пунктах, расположенных на западном и восточном побережье полуострова и на о. Беринга (Командорские о-ва) ($\Delta = 220$ –865 км). В населенных пунктах центральной Камчатки ($\Delta = 471$ –823 км), по сообщению респондентов, землетрясение не ощущалось. В ближайших к эпицентру поселках полуострова, на юге Паужетка ($\Delta = 277$ км) и на западном побережье Озерновский ($\Delta = 288$ км) и Запорожье ($\Delta = 288$ км), наблюдалась интенсивность сотрясений 5 баллов (рис. 3а). В других селениях западного побережья ($\Delta = 403$ –437 км) сотрясения не превышали 3–4 баллов. Более выражен макросейсмический эффект ПЗ на восточном побережье (рис. 3а, рис. 3б), там же зафиксирована и максимальная интенсивность сотрясений на Камчатке — 6 баллов на маяке Круглый ($\Delta = 329$ км), 5 баллов — на гидрометеостанции (ГМС) Водопадная ($\Delta = 300$ км) и Карымшина ($\Delta = 413$ км), сотрясения 4–5 баллов зафиксирована на расстояниях $\Delta = 381$ –645 км. В г. Петропавловске-Камчатском ($\Delta = 437$ км) — в разных районах города событие ощущалось с интенсивностью от 4 до 5 баллов.

В целом распределение интенсивности сотрясений в населенных пунктах Камчатского края и Северо-Курильского района Сахалинской области характерно для субдукционных

землетрясений вблизи восточного побережья Камчатки (Митюшкина и др., 2010)

Макросейсмическое проявление ПЗ зафиксировано на расстояниях более 1000 км от эпицентра: с интенсивностью сотрясений три балла на о. Кунашир в поселках Южно-Курильск ($\Delta = 1089$ км), Лагунное ($\Delta = 1093$ км) и Горячий Пляж ($\Delta = 1096$ км) (рис. 4); два балла на о. Шикотан в с. Малокурильское ($\Delta = 1038$ км); ощущалось на о. Хоккайдо в г. Китами ($\Delta = 1233$ км) и о. Адак в одноименном г. Адак (51.875°с.ш. 176.638°з.д., $\Delta = 1801$ км).

Оценки параметров сильных движений грунта получены по записям сети цифровых сейсмических станций Дальнего Востока (табл. 4) с помощью программного пакета (Гусева и др., 1989). Скорости движения грунта получены путем интегрирования записей ускорений. Инструментальная интенсивность I_a рассчитана по формуле $I_a = 2.5 \cdot \lg(a_{\text{пик}}) + 1.89$ (ГОСТ Р 57546–2017), где $a_{\text{пик}}$ — пиковое ускорение (см/с²) на горизонтальных каналах. На 37 акселерографах было зарегистрировано ускорение грунта превышающее 0.5 см/с². Сильные движения грунта с пиковым ускорением, превышающим 2 см/с² были зафиксированы 30-ю акселерографами (табл. 4).

Наиболее высокие значения ускорений грунта и соответствующей инструментальной

Таблица 4. Пиковые значения ускорения и скорости грунта для станций, записавших ПЗ с амплитудой по ускорению $a_{\text{пик}} \geq 2 \text{ см/с}^2$ **Table 4.** Peak ground accelerations and velocities for seismic stations that recorded the Paramushir Earthquake with peak ground acceleration $a_{\text{пик}} \geq 2 \text{ см/с}^2$

	Название сейсмостанции	Код*	Δ, км	г, км	α _{пик} , см/с ²			v _{пик} , см/с ²			I _a
					Компонента			Компонента			
					Е	Н	З	Е	Н	З	
1	Северо-Курильск	SKR	225.2	229.8	-126.54	116.9	50.6	5.165	-4.475	-1.642	7.2
2	Паужетка	PAU	277.2	280.9	-59.43	-65.4	-21.65	-2.15	-1.83	0.804	6.4
3	Ходутка	KDT	298.5	302	-59	48.2	25.52	-2.022	-1.962	-0.953	6.3
4	Русская	RUS	368.6	371.4	26.75	-27.58	15.78	0.694	0.713	0.618	5.5
5	Карымшина	KRM	411.7	414.2	15.79	23.3	10.68	-0.885	-0.945	-0.463	5.3
6	Рыбачий	RIB	422.6	425	13.58	24.96	-9.92	-1.159	-1.404	0.541	5.4
7	Вилучинск	VIL	423.6	426	27.14	-41.78	20.61	-2.054	-3.098	1.185	5.9
8	Школа	SCH	427.8	430.2	14.25	23.92	7.9	1.056	-1.531	0.408	5.3
9	Школа № 3	GK001	429.4	431.8	-19.45	17.82	-7.7	-1.792	-1.568	-0.436	5.1
10	Интернат	GK002	431.1	433.5	20.9	-18.17	-9.8	1.136	1.424	-0.59	5.2
11	МЧС	GK005	433.8	436.2	14.9	16.59	-10.88	-1.034	-0.896	0.493	4.9
12	Администрация ПК	ADM	434.8	437.2	10.07	16.07	6.89	-0.703	-0.886	-0.335	4.9
13	Петропавловск	PET	434.9	437.3	7.18	-9.83	3.23	-0.555	-0.676	-0.281	4.4
14	Высотная	VST	435.2	437.6	11.04	-11.27	-6.31	-0.571	-0.655	0.409	4.5
15	Николаевка	NIC	436.1	438.5	-21.6	15.04	-5.36	2.046	-1.463	0.446	5.2
16	Дальний	DAL	436.4	438.8	-10.75	10.94	8.23	-0.609	-0.629	-0.448	4.5
17	Больница	GK004	436.5	438.9	-31.33	34.49	14.64	-1.569	-1.513	0.492	5.7
18	Мишенная	MSN	437.1	439.5	44.01	-55.03	-21.46	3.349	3.793	-1.414	6.2
19	Горького	PTG	438.4	440.8	-16.12	-14.83	11.84	1.396	-1.053	-0.573	4.9
20	Звёздный	SPZ	438.5	440.9	9.44	9.2	-5.47	1.237	-0.666	0.427	4.3
21	Дачная	DCH	438.6	441	-10.06	10.31	5.49	0.894	-0.847	0.382	4.4
22	Институт	IVS	439.4	441.8	15.32	-15.92	-7.32	1.223	-0.963	-0.562	4.9
23	Школа №40	GK003	440.1	442.4	15.67	15.57	10.41	1.425	-1.198	-0.685	4.9
24	НИГТЦ	NII	441.1	443.4	-8.95	-13.96	-8.15	1.36	1.736	-0.704	4.8
25	Аэрологическая станция	AER	441.3	443.6	14.34	18.25	-8.55	1.533	0.963	0.637	5
26	Налычево	NLC	457.6	459.9	6.55	11.12	4.41	0.348	-0.558	-0.125	4.5
27	Шипунский	SPN	461.3	463.5	-8.33	-8.19	4.93	0.578	0.625	0.312	4.2
28	Жупаново	GPN	565.5	567.3	8.18	-9.3	-4.27	-0.591	-0.639	-0.262	4.3
29	Тумрок источники	TUMD	692.9	694.4	-2.23	-1.92	-1.05	-0.228	0.199	0.111	2.8
30	Беринг	BKI	859.7	860.9	-1.68	2.43	1.38	-0.082	-0.152	-0.081	2.9

Примечание. * — региональный код станции (расположение станций показано на рис. 2б); Δ — эпицентральное расстояние; г — гипоцентральное расстояние; $a_{\text{пик}}$ — максимальная амплитуда пикового ускорения на каналах НН; $v_{\text{пик}}$ — максимальная амплитуда пиковой скорости на восстановленных записях; Z, N, E — направления канала (Вертикальный, Север-Юг, Восток-Запад).

Note. * — regional station code (stations location is shown in the fig. 2б); Δ — epicentral distance; г — hypocentral distance; $a_{\text{пик}}$ — peak ground acceleration on HN channels; $v_{\text{пик}}$ — peak ground velocity on recovered records; Z, N, E — orientation code (Vertical, North-South, East-West).

интенсивности I_a наблюдались на ближайшей от эпицентра сейсмической станции Северо-Курильск расположенной в г. Северо-Курильске.

АФТЕРШОКОВЫЙ ПРОЦЕСС

Для анализа сейсмичности использованы каталоги землетрясений по состоянию на 15.10.2021, что, как будет показано ниже, вполне достаточно для характеристики афтершокового процесса сопровождавшего ПЗ.

В целом облако афтершоков вытянуто в направлении близком к простиранию Курило-Камчатского желоба (рис. 1). Однако, на карте (рис. 1а) показано, что максимальная пространственная концентрация эпицентров достигается в двух локальных областях, центры которых разнесены на 40–50 км, и каждая из которых имеет собственное простирание. Первая область располагается ближе к эпицентру главного толчка, который находится у юго-западного окончания облака, вторая у противоположного северо-восточного его края. В зафиксированной последовательности афтершоков, начинающейся через 5 минут после главного толчка, отсутствуют сильные события, которые могли бы породить данные области концентрации эпицентров, причем они проявляются с самого начала процесса. Поэтому формирование этих особенностей очага произошло либо в процессе развития главного разрыва, либо в первые несколько минут после него.

Трехмерный анализ областей концентрации афтершоков позволил выделить два пространственных кластера. Первый охватывает большую часть очага и приблизительно соответствует плоскости, падающей на юго-восток (табл. 5, NP2 в механизмах № 1 и № 2). Второй кластер ограничивает очаг с северо-востока и состоит из афтершоков меньшей глубины.

Каталоги землетрясений с момента ПЗ 25 марта 2020 г. по октябрь 2021 года дают оценку представительности $M_c = 3.55$ в целом для района

с координатами $\varphi = 48.0\text{--}50.0^\circ\text{N}$, $\lambda = 157.4\text{--}160.0^\circ\text{E}$ при статистической значимости $\alpha = 0.3$ (рис. 5). В этом случае представительный каталог афтершоков содержит ~400 землетрясений. При анализе временного хода представительности получено, что начальный участок продолжительностью 0.3 сут. (7.5 часов) после главного события имеет худшую представительность (рис. 6). Как следует из графика повторяемости афтершоков, ПЗ ($M_w = 7.4$, $ML = 7.65$) превышает по магнитуде сильнейший афтершок 14.06.2020 $M_w = 5.0$ ($ML = 5.85$) на $\Delta M_w = 2.4$ ($\Delta ML = 1.8$), что не противоречит динамическому закону Бота (Баранов, Шебалин, 2018)

Эллипс, оконтуривающий зону концентрации афтершоков, рассчитывался по всем представительным данным ($M_c = 3.55$) (рис. 7). Он включал 90% всех афтершоков, что соответствует 2- σ рассеянию при распределении Гаусса. Причем все наиболее сильные землетрясения ($ML \geq 5.5$) афтершоковой последовательности находятся внутри этого эллипса. Параметры эллипса позволяют формально оценить размер очага землетрясения 25.03.2020 $M_w = 7.4$: длина (большая ось эллипса) — 110 км, ширина (меньшая ось) — 40 км.

В целом афтершоковый процесс шел с затуханием. Участок с 25.03.2020 15:00 ($t = 0.5$ сут.) по 13.06.2020 2:00 ($t = 80$ сут.) (между пунктирами на рис. 8) соответствует закону Омори (Omori, 1984) с показателем, меняющимся от $p = 1.12$ (в начале) до $p = 1.24$ (в конце). Отмечается, что этот интервал соответствует интервалу между двумя самыми сильными афтершоками: 25.03.2020 17:21 ($t = 0.6$ сут.) $ML = 5.7$ и 14.06.2020 21:23 ($t = 82$ сут.) $ML = 5.8$. Последующий временной ход афтершоков может быть аппроксимирован экспонентой (рис. 9). Оценка интенсивности потока землетрясений в очаговой зоне ПЗ в конце рассматриваемого временного интервала дает

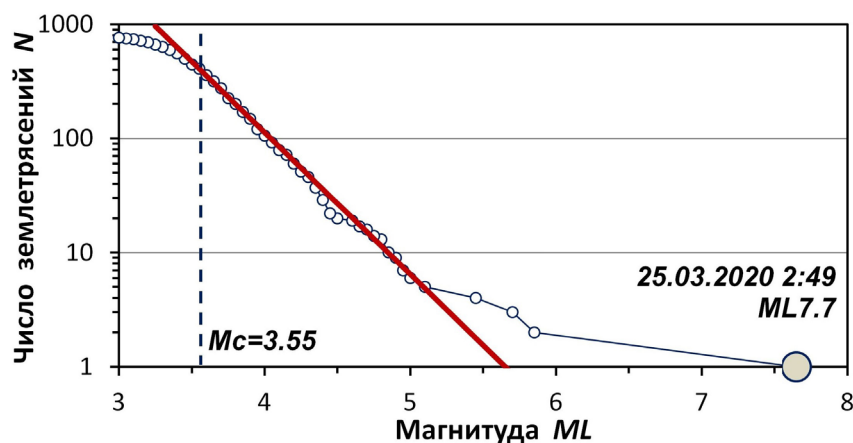


Рис. 5. Кумулятивный график повторяемости афтершоков ПЗ. Сплошной красной линией показана экспоненциальная аппроксимация линейного участка соответствующего закону Гутенберга-Рихтера. Вертикальная штриховая линия отмечает уровень представительности каталога $M_c = 3.55$.

Fig. 5. Cumulative magnitude frequency law for aftershocks of 25, March 2020 earthquake. The red solid line shows the exponential approximation of a linear section corresponding to the Gutenberg-Richter law. Vertical dashed line shows representativeness level of catalogue, $M_c = 3.55$.

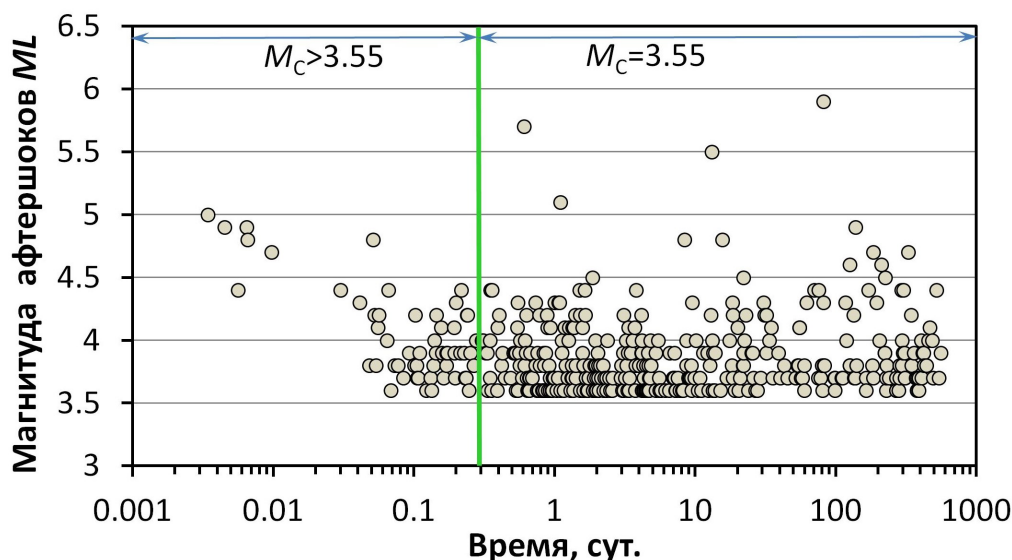


Рис. 6. Афтершоки ПЗ в координатах «магнитуда-время». Начальный участок (до вертикальной линии слева) имеет представительность хуже $M_c = 3.55$.

Fig. 6. «Magnitude-time» diagram for Paramushir Earthquake aftershocks. Initial part of process (to the left of the green vertical line) has magnitude of representativeness worse than $M_c = 3.55$.

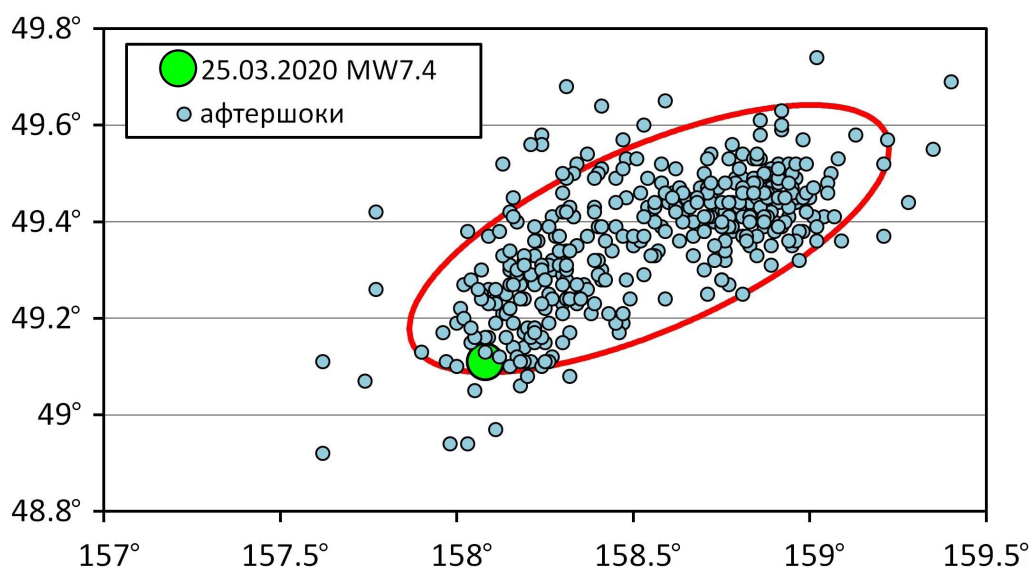


Рис. 7. Положение ПЗ и его афтершоков, а также расчетная эллиптическая площадь очага. Представлены афтершоки представительного уровня магнитуды — $ML \geq 3.55$. Эллипс включает в себя 90% всех афтершоков.

Fig. 7. Main event, its aftershocks and the estimated elliptical source area. The ellipse includes 90% of events with magnitude exceeding the magnitude of representativeness, $ML \geq 3.55$.

значение 0.07 землетрясений/сут. при используемой представительности. Это существенно ниже среднесноголетнего ($T = 18$ лет перед ПЗ) фона 0.02 землетрясений/сут. Предполагаемая продолжительность афтершокового процесса может быть оценена из экспоненциального параметра $\tau = 370$ сут. ≈ 1 год; $3\tau = 3$ года.

Для четырех сильнейших афтершоков ПЗ с магнитудами $ML > 5$ по методике (Абубакиров, Павлов, 2021; Павлов, 2017) определены тензоры сейсмического момента (а также оценки глубин

и продолжительности во времени). Для каждого землетрясения, получены два решения, соответствующие модельным тензорам типа DC и NT (табл. 5).

Мелкофокусный афтершок (табл. 5, № 1–2, глубина 5 км) отличается как от остальных, более глубоких афтершоков, так и от главного толчка ПЗ, СЗ-ЮВ направлением главной оси Т сброшенного напряжения. Это подтверждает смену условий растяжения на сжатие в литосферной плите в окрестности очага ПЗ с ростом глубины.

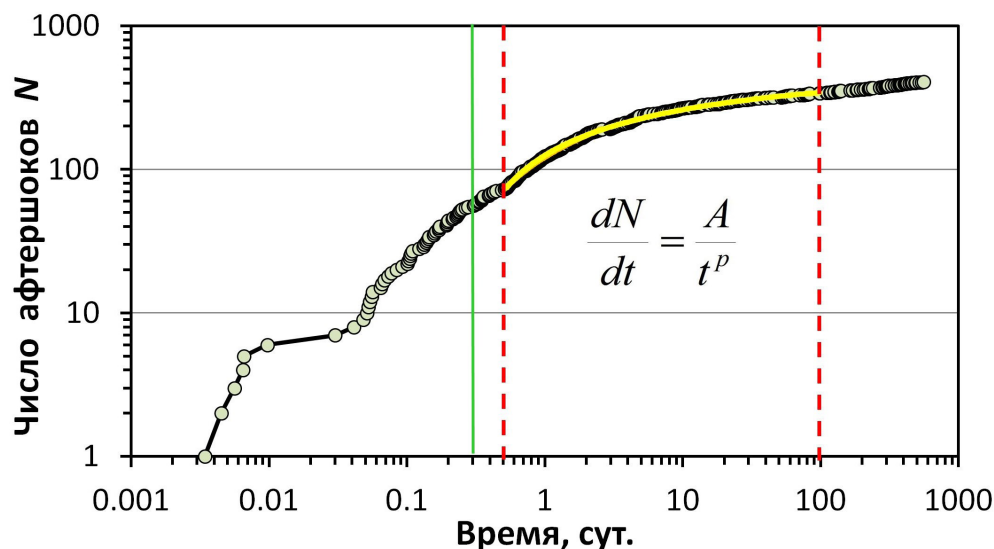


Рис. 8. Кумулятивный график числа афтершоков. Время отсчитывается от ПЗ. Сплошной желтой линией показана аппроксимация в соответствии с законом Омори. Вертикальная сплошная линия отмечает начало представительства каталога $M_c = 3.55$. Пунктиры ограничивают выделенный интервал, соответствующий закону Омори.

Fig. 8. Cumulative graph of the number of aftershocks. The time is counted from the Paramushir main shock. The solid yellow line shows the approximation according to Omori's law. The vertical solid line marks the beginning of the catalogue with magnitude representativeness level $M_c = 3.55$. Dashed lines mark interval with Omori-low aftershock process.

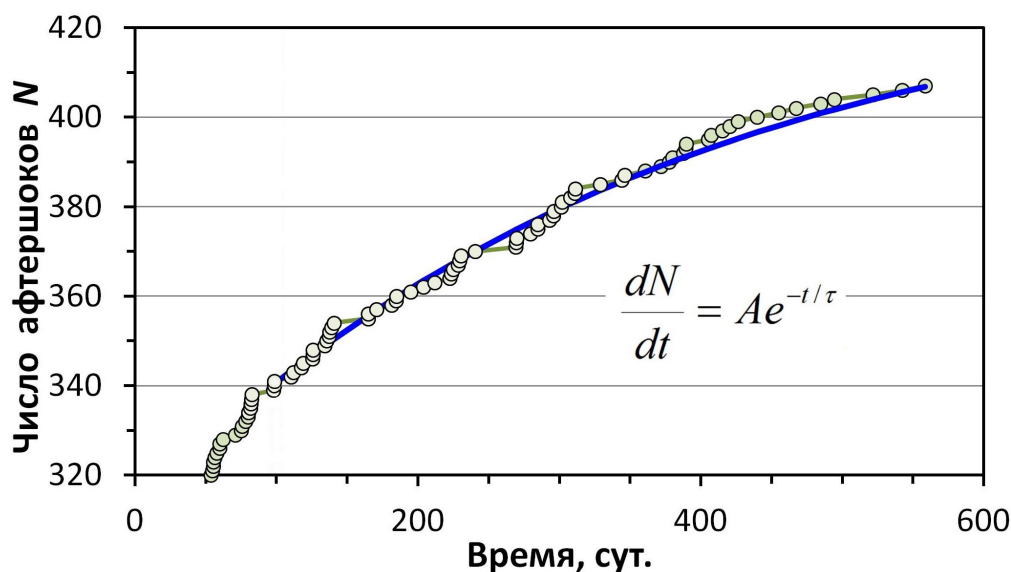


Рис. 9. Кумулятивный график числа афтершоков N . Время отсчитывается от ПЗ. Сплошной линией показана экстраполяция в соответствии с экспоненциальным законом.

Fig. 9. Cumulative graph of the number of aftershocks. The time is counted from the Paramushir main shock. The blue solid line shows extrapolation according to the exponential law.

КОСЕЙСМИЧЕСКИЕ СМЕЩЕНИЯ

Косейсмические смещения от ПЗ зарегистрированы на двух постоянных GNSS станциях: PARM и PAUJ (табл. 6). Они определялись как разность в момент события линий трендов определенных по отсчетам за 30 дней до и после события (рис. 10).

Зафиксированные горизонтальные косейсмические смещения согласуются с рассчитанными по модели протяженного дислокационного источника в однородном упругом изотропном полупространстве (Okada, 1985) (табл. 7). Для расчета использовались решения NEIC по W-фазе и решение КФ ФИЦ ЕГС РАН, полученное в представлении источника в виде двойного диполя без момента (табл. 2).

Таблица 5. Параметры очага сильнейших афтершоков ПЗ (обозначения аналогичны табл. 2)
Table 5. Source parameters of the strongest aftershocks of Paramushir Earthquake (legend is the same as in Table 2)

№	Дата (г-м-д) и время (ч:м:с) землетрясения, M_L	Агентство, Метод	Главные оси и главные значения (в ед. 10^{16} Нм)										Механизм						M_0 10^{16} Нм	h км	τ с	η %	
			T			N			P				NP1	DI	NP2		D2	slip°					
			E_T	azm°	pl°	E_N	azm°	pl°	E_P	azm°	pl°	stk°	dip°	stk°	$Slip^\circ$	stk°	dip°	$slip^\circ$					
1	2020-03-25 17:21:45 $M_L = 5.7$	KAGSR, RSMT, DC	2.73	120	31	0	214	7	-2.73	316	58	187	16	-118	36	76	-83	5	4	0			
2		KAGSR, RSMT, NT	2.09	128	26	0.45	226	17	-2.54	346	59	186	24	-133	52	73	-73	5	4	29			
3	2020-03-26 05:22:11 $M_L = 5.1$	KAGSR, RSMT, DC	0.49	49	30	0	234	60	-0.49	140	2	189	68	20	91	71	157	50	0	0			
4		KAGSR, RSMT, NT	0.48	43	33	0.04	225	57	-0.52	134	1	184	66	24	83	68	154	50	0	12			
5	2020-04-07 06:27:21 $M_L = 5.5$	KAGSR, RSMT, DC	3.05	336	75	0	226	5	-3.05	135	14	218	31	80	49	59	96	40	0	0			
6		KAGSR, RSMT, NT	3.09	337	75	-0.04	226	5	-3.05	135	14	217	32	80	49	59	96	40	2	-2			
7	20200614 21:23:22 $M_L = 5.9$	KAGSR, RSMT, DC	2.40	162	31	0	23	52	-2.40	264	20	306	53	8	211	83	143	5	4	0			
8		KAGSR, RSMT, NT	4.01	172	28	2.04	343	62	-6.05	80	4	309	73	23	212	68	162	20-35	0	61			

Таблица 6. Расположение станций GNSS

Table 6. Location of GNSS stations

код	координаты	Ближайший населенный пункт	Расстояние до эпицентра ПЗ, км
PARM	50.670°с.ш., 156.115°в.д.	г. Северо-Курильск	210
PAUJ	51.468°с.ш., 156.815°в.д.	пос. Паужетка	280

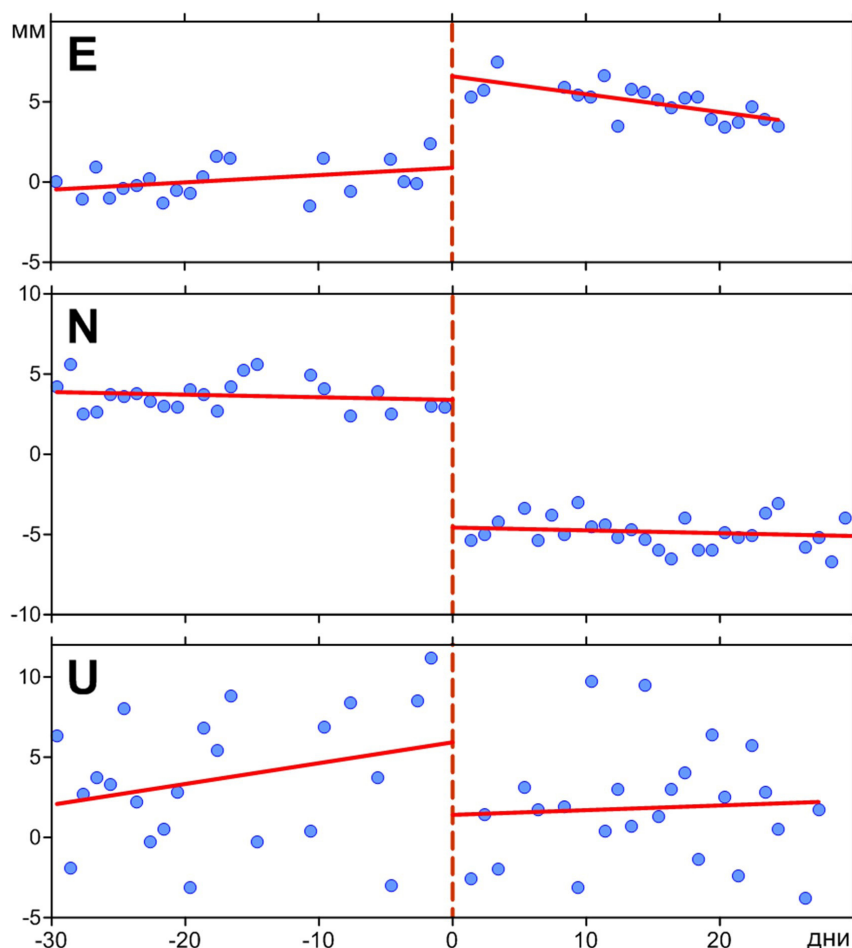


Рис. 10. Временные серии компонент (E, N, U) перемещений GNSS станции PARM. Вертикальная пунктирная линия — момент начала ПЗ. Кругами обозначены суточные значения координат. Красные линии — линейные тренды по отчетам за 30 дней до и после события, по которым рассчитаны косейсмические смещения и их ошибки.

Fig. 10. Time series of three-component (E, N, U) motions of GNSS-station PARM. The vertical dashed line shows the 25, March 2020 earthquake starting point. Circles mark daily motion values. Solid red lines are linear trends for 30 days before and after the mainshock, for which coseismic displacements and their errors are calculated.

Таблица 7. Оценки косейсмических смещений станций GNSS

Table 7. Coseismic displacements estimations on the GNSS observation points

Код станции	Косейсмические смещения, мм								
	Модельные						Наблюдаемые		
	NEIC WP, NT (№ 4, табл. 2)			KAGSR, RSMT, DC (№ 1, табл. 2)					
	E	N	U	E	N	U	E	N	U
PARM	4.3	−4.5	−1.0	5.6	-5.1	-0.6	5.7±1.3	−8.0±1.4	−4.5±5.4
PAUJ	1.4	−1.7	−0.6	1.9	-2.3	-0.5	0.9±2.9	−1.5±2.7	1.0±8.7

Примечание. U, N, E — направления канала (Вертикальный, Север-Юг, Восток-Запад).

Note. U, N, E — orientation code (Vertical, North-South, East-West).

СЛАБАЯ ВОЛНА ЦУНАМИ В ОТКРЫТОМ ОКЕАНЕ

На побережьях Камчатки и Курильских островов заметных цунами не зафиксировано. Однако, визуальные наблюдения в Северо-Курильске (История, 2020) позволили выделить серии волн высотой до 50 см, в интервал времени, согласованный с расчетным временем прихода цунами. Зафиксированы также колебания уровня моря ~25 см на станции ГМС «Водопадная» (51.81° с.ш., 158.11° в.д.).

На трех ближайших к эпицентру землетрясения станциях DART зарегистрированы волны цунами после ПЗ (рис. 11). На каждой записи проведено устранение приливной составляющей, дополнительная фильтрация не проводилась. На записях станций «21416 — Kamchatka Peninsula» и «21415 — Attu» в расчетные времена прихода волн цунами выделяются цуги колебаний водной поверхности с размахом около 6 и 3 см (рис. 11б). Данные станции располагаются на расстояниях ~400 и ~1000 км от эпицентра ПЗ соответственно. На более далекой станции «21418 — Northeast Tokyo» (эпицентральное расстояние

~1350 км) заметны лишь слабые колебания в пределах 2 см без четкого вступления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Парамуширское землетрясение с магнитудой $M_w = 7.4$ произошло в Тихом океане южнее п-ова Камчатка в 223 км от ближайшего населенного пункта г. Северо-Курильск на о. Парамушир, входящего в Северную группу Курильских островов. Землетрясение ощущалось с интенсивностью до VI–VII баллов, разрушений и пострадавших не было.

Эпицентр землетрясения находится в Курило-Камчатском желобе на склоне вала Зенкевича. ПЗ является внутриплитным событием. Его очаг располагался на глубинах 20–70 км в нижних горизонтах Тихоокеанской литосферной плиты, которая в этом районе изгибается перед погружением в Курило-Камчатскую зону субдукции. Изгибом плиты объясняются условия сжатия в ее нижних горизонтах и соответствующий им взбросовый тип механизма ПЗ. За время инструментальных наблюдений на валу Зенкевича зафиксировано только одно более

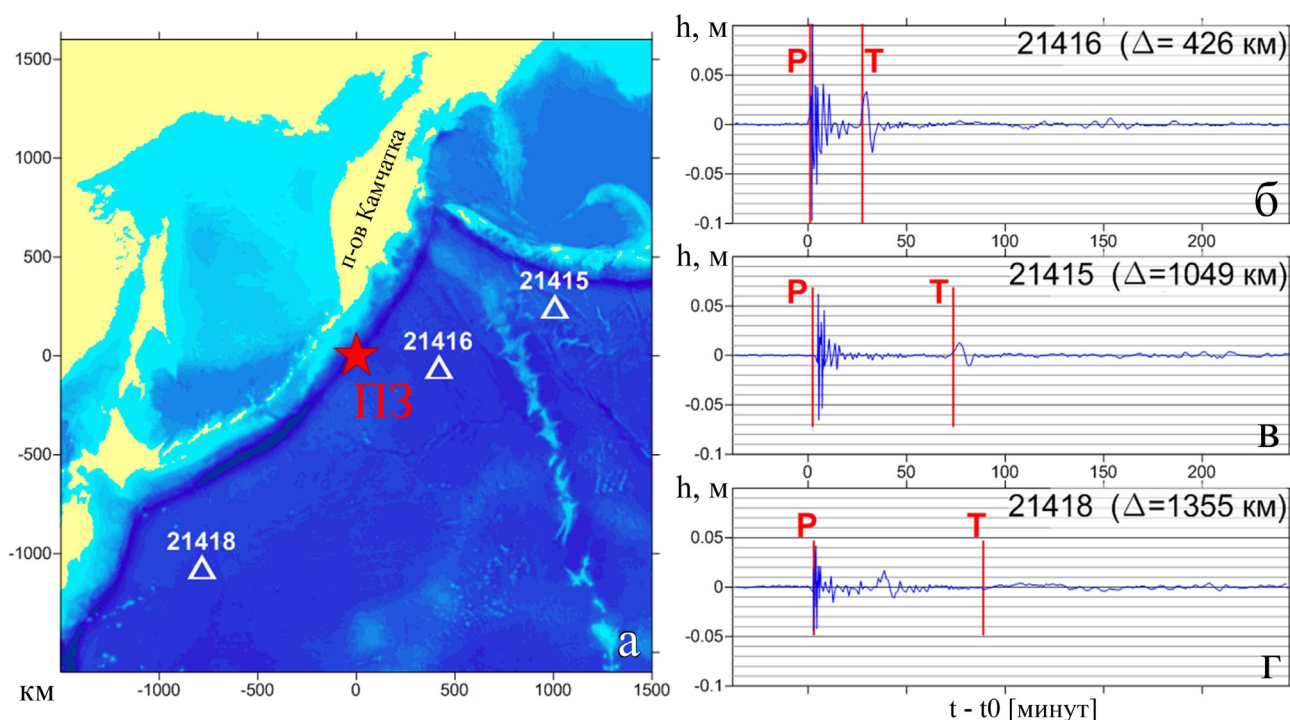


Рис. 11. Результаты инструментальной регистрации волны цунами, вызванной ПЗ: а — положение станций DART (треугольники с индексами) и эпицентр ПЗ (звезда); б, в, г — записи изменения уровня поверхности океана на станциях DART (после устранения приливной составляющей). Вертикальными красными линиями отмечены расчетные времена прихода: сейсмических волн (P) и волн цунами (T). t_0 — время возникновения ПЗ.

Fig. 11. Results of instrumental registration of the tsunami wave caused by the Paramushir Earthquake: а — epicenter of the Paramushir Earthquake (red star) and the DART stations (triangles with indices); б, в, г — records of changes in the sea level at the DART stations (corrected for tidal component). Vertical red lines mark estimated arrival times of seismic waves (P) and tsunami waves (T). t_0 is the time of the mainshock.

сильное землетрясение — Второе Симуширское землетрясение 13 января 2007 г.

ПЗ не имело форшоков. Афтершоковый процесс развивался в соответствии с законом Омори первые 3 месяца. Размер очаговой области, оцененный по облаку афтершоков составил $L = 110$ км, $W = 40$ км.

Цунами, вызванное ПЗ, не представляло опасность для населения и прибрежной инфраструктуры. Однако оно отчетливо проявлялось в Северо-Курильске, на станции ГМС «Водопадная» и зафиксировано глубоководными датчиками DART.

Авторы благодарят рецензентов за замечания, которые позволили улучшить качество статьи.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания (проекты № 075-01271-23 и № 121122300164-5).

Список литературы [References]

- Абубакиров И.Р., Павлов В.М. Определение тензора момента двойного диполя для землетрясений Камчатки по волновым формам региональных сейсмических станций // Физика Земли. 2021. № 3. С. 45–62. <https://doi.org/10.31857/S0002333721030017> [Abubakirov I.R., Pavlov V.M. Determining the Double Couple Moment Tensor for Kamchatka Earthquakes from Regional Seismic Waveforms // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2021. V. 57. Iss. 3. P. 332–347. <https://doi.org/10.1134/S1069351321030010>].
- Баранов С.В., Шебалин П.Н. О прогнозировании афтершоковой активности. 3. Динамический закон Бота // Физика Земли. 2018. № 6. С. 129–136. <https://doi.org/10.1134/S0002333718060029> [Baranov S.V., Shebalin P.N. Forecasting aftershock activity: 3. Bath's dynamic law // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. 2018. V. 54. Iss. 6. P. 926–932. <https://doi.org/10.1134/S1069351318060022>].
- Гусев А.А. Сильные землетрясения Камчатки: расположение очагов в инструментальный период // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 39–42 [Gusev A.A. Large earthquakes in Kamchatka: Locations of epicentral Zones for the Instrumental Period // Journal Volcanology and Seismology. 2006. № 3. P. 39–42 (in Russian)].
- Гусева Е.М., Гусев А.А., Оскорбин Л.С. Пакет программ для цифровой обработки сейсмических записей и его опробование на примере некоторых записей сильных движений // Вулканология и сейсмология. 1989. № 5. С. 35–49 [Guseva E.M., Gusev A.A., Oskorbin L.S. A software package for earthquake data processing: experimental application to strong motion records // Volcanology and Seismology. 1991. V. 11. Iss. 5. P. 648–670].
- Дрознин Д.В., Чебров Д.В., Дрознина С.Я. и др. Автоматизированная оценка интенсивности сейсмических сотрясений по инструментальным данным в режиме квазиреального времени и ее использование в рамках службы срочных сейсмических донесений на Камчатке // Сейсмические приборы. 2017. № 3. С. 5–19. <https://doi.org/10.21455/si2017.3-1> [Droznin D.V., Chebrov D.V., Droznina S.Ya. et al. Automated Estimation of Seismic Shaking Intensity from Instrumental Data in Quasi-Real-time Mode and Its Use in the Operation of the of Seismic Early Warning Service in the Kamchatka Region // Seismic Instruments. 2018. V. 54. Iss. 3. P. 239–246. <https://doi.org/10.3103/S0747923918030088>].
- История одного цунами или почему опасны фейковые сообщения от якобы ученых / Новости // Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН. URL: <http://imgg.ru/ru/news/284>. Дата публикации: 30.03.2020 [Istoriya odnogo tsunami ili pochemu opasny feykovyye soobshcheniya ot yakoby uchenykh / Novosti // Institute of Marine Geology and Geophysics Far Eastern Branch RAS (in Russian)].
- Лобковский Л.И. Геодинамика зон спрединга, субдукции и двухъярусная тектоника плит. М.: Наука, 1988. 253 с. [Lobkovsky L.I. Geodynamics of the spreading and subduction zones and two-level plate tectonics. Moscow: Science, 1988. 253 p. (in Russian)].
- Маловичко А.А., Петрова Н.В., Габсатарова И.П. и др. Сейсмичность Северной Евразии в 2016–2017 гг. // Землетрясения Северной Евразии. 2022. Вып. 25. С. 10–34. <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2022.25.01> [Malovichko A.A., Petrova N.V., Gabsatarova I.P. et al. Seismicity of Northern Eurasia in 2016–2017 // Earthquakes in Northern Eurasia. 2022. 25. P. 10–34 (in Russian)].
- Митюшкина С.В., Иванова Е.И., Чеброва А.Ю., Левина В.И. Макросейсмические проявления промежуточных и глубоких землетрясений камчатской зоны субдукции // Труды Второй региональной научно-технической конференции. Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Петропавловск-Камчатский. 11–17 октября 2009 г. 2010. С. 141–145 [Mityushkina S.V., Ivanova Ye.I., Chebrova A.Yu., Levina V.I. Makroseysmicheskiye proyavleniya promezhutochnykh i glubokikh zemletryaseniy kamchatskoy zony subdukcii // Trudy Vtoroy regional'noy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Problemy kompleksnogo geofizicheskogo monitoringa Dal'nego Vostoka Rossii. Petropavlovsk-Kamchatskiy. 11–17 oktyabrya 2009. 2010. P. 141–145 (in Russian)].
- Павлов В.М., Абубакиров И.Р. Алгоритм расчета тензора сейсмического момента сильных землетрясений по региональным широкополосным сейсмограммам объемных волн // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 2. Вып. 20. С. 149–158 [Pavlov V.M., Abubakirov I.R. Algorithm for Calculation of Seismic Moment Tensor of Strong Earthquakes Using Regional Broadband Seismograms of Body Waves // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2012. № 2(20). P. 149–158 (in Russian)].
- Павлов В.М. Алгоритмы расчета синтетических сейсмограмм от дипольного источника с использованием производных функций Грина // Физика Земли. 2017. № 4. С. 67–75. <https://doi.org/10.7868/S0002333717030073> [Pavlov V.M. The algorithms for calculation synthetic seismograms from a dipole source using the derivatives of Green's function // Izvestiya,

- Physics of the Solid Earth. 2017. V. 53. Iss. 4. P. 556–564. <https://doi.org/10.1134/S1069351317030077>.
- 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. The March 25, 2020 $M_w = 7.5$ Paramushir earthquake // Geosystems of Transition Zones. 2021. V. 5. Iss. 2. P. 113–127 (in Russian)].
- Чебров В.Н., Дроздин Д.В., Кугаенко Ю.А. и др. Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 18–40 [Chebrov V.N., Drozdin D.V., Kugaenko Yu.A. et al. The system of detailed seismological observations in Kamchatka in 2011 // Journal of Volcanology and Seismology. 2013. V. 7. Iss. 1. P. 16–36].
- Чубарова О.С., Гусев А.А. Региональная шкала магнитуд по поверхностным волнам для землетрясений Дальнего Востока России // Физика Земли. 2017. № 1. С. 60–71. <https://doi.org/10.7868/S0002333717030073> [Chubarova O.S., Gusev A.A. A regional surface wave magnitude scale for the earthquakes of Russia's Far East // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2017. V. 53. Iss. 1. P. 58–68. <https://doi.org/10.1134/S1069351316060021>].
- Юнга С.Л. О механизме деформирования сейсмоактивного объема земной коры // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1979. № 10. С. 7–25 [Yunga S.L. O mekhanizme deformirovaniya seysmoaktivnogo obiyema zemnoy kory // Izv. AN SSSR. Fizika Zemli. 1979. № 10. P. 7–25 (in Russian)].
- Dziewonski A.M., Chou T.-A., Woodhouse J.H. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1981. V. 86. P. 2825–2852. <https://doi.org/10.1029/JB086iB04p02825>
- Di Giacomo D., Engdahl E.R., Storchak D.A. The ISC-GEM Earthquake Catalogue (1904–2014): status after the Extension Project // Earth System Science Data. 2018. V. 10. P. 1877–1899. <https://doi.org/10.5194/essd-10-1877-2018>
- Ekström G., Nettles M., Dziewonski A.M. The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13017 earthquakes // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2012. V. 200–201. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2012.04.002>
- Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bulletin of the Seismological Society of America. 1985. V. 75. Iss. 4. P. 1135–1154. <https://doi.org/10.1785/BSSA0750041135>
- Omori F. On the Aftershocks of Earthquakes // College Sci. Imperial Univ. Tokyo. 1894. V. 7. P. 111–120.
- Storchak D.A., Giacomo D.Di., Bondár I. et al. Public Release of the ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900–2009) // Seismological Research Letters. 2013. V. 84. Iss. 5. P. 810–815. <https://doi.org/10.1785/0220130034>
- Storchak D.A., Giacomo D.Di., Engdahl E.R. et al. The ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900–2009): Introduction // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2015. V. 239. Iss. 0031–9201. P. 48–63. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2014.06.009>
- Ye L., Lay T., Kanamori H. 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. 2021. V. 556. Iss. 0012–821X. 116728. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116728>.

THE PARAMUSHIR $M_w = 7.4$ EARTHQUAKE OF MARCH 25, 2020

D.V. Chebrov¹, I.R. Abubakirov¹, A.A. Gubanova¹, V.E. Glukhov¹, A.V. Lander², E.A. Matveenko¹, S.V. Mityushkina¹, V.M. Pavlov¹, V.A. Saltykov¹, S.L. Senyukov¹, N.N. Titkov¹

¹Kamchatka Branch of Geophysical Survey of RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 683006;
e-mail: danila@emsd.ru

²Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics RAS, Moscow, Russia, 117997

Received December 11, 2022; revised May 03, 2023; accepted June 26, 2023

The strong $M_w = 7.4$ earthquake occurred on March 25, 2020 in the region of Northern Kuril Islands, with its epicenter on the ocean side of the Kuril-Kamchatka deep-water trench, to the east from its axis. The earthquake was felt on all the Kuril Islands, South and East Kamchatka, the maximum shaking was recorded in Severo-Kurilsk with intensity $I = VI-VII$. Distinct tsunami wave was also registered. In the article, this earthquake and its tectonic position are discussed in the context of the seismicity of the Kuril-Kamchatka arc. The actions of duty shifts in earthquake processing are described, and a detailed description of macroseismic effects is given. The results of the analysis of peak ground motion amplitudes, focal mechanisms and models of the source, tsunami propagation features are also shown. Coseismic displacements revealed by GNSS observation data are presented and compared with model data. Peculiarities and stages of the aftershock process are discussed and the size of the source area is estimated.

Keywords: Kamchatka, earthquake, seismicity, aftershocks, source mechanism, tsunami.