

УДК 550.348. (571.66)

ПАРАМУШИРСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 25 МАРТА 2020 г. $ML=7.7$, $M_w=7.4$

**Д.В. Чебров¹, Е.А. Матвеев¹, И.Р. Абубакиров¹, А.В. Ландер², С.В. Митюшкина¹,
В.М. Павлов¹, А.А. Раевская¹, Е.И. Ромашева¹, В.А. Салтыков¹, С.Л. Сеньюков¹**

¹Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия, van@emsd.ru

²Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва

Аннотация. В статье представлены инструментальные и макросейсмические данные по Парамуширскому землетрясению 25 марта 2020 г., $ML=7.7$, $M_w=7.4$, обсуждаются его тектоническая позиция и особенности афтершокового процесса. Данное событие является сильнейшим инструментально зарегистрированным землетрясением с очагом, расположенным в Тихоокеанской литосферной плите в районе Северных Курильских о-вов. Механизмы очага и значения моментной магнитуды M_w Парамуширского землетрясения и его сильнейших афтершоков получены по оригинальной методике расчета тензоров сейсмического момента, разработанной в КФ ФИЦ ЕГС РАН. Парамуширское землетрясение ощущалось в 60 населенных пунктах Камчатского края и Сахалинской области, а также было замечено на островах Хоккайдо (Япония) и Адак (США). Максимальные макросейсмические проявления отмечены в г. Северо-Курильске (о-в Парамушир), $I=6-7$ баллов по шкале ШСИ-17 (ГОСТ Р 57546–2017); жертв и разрушений не было. Отмечено слабое цунами с максимальной наблюдаемой высотой волн ~ 50 см в районе г. Северо-Курильска.

Ключевые слова: Камчатка, землетрясение, афтершоки, механизм очага, макросейсмика, пиковые амплитуды.

Для цитирования: Чебров Д.В., Матвеев Е.А., Абубакиров И.Р., Ландер А.В., Митюшкина С.В., Павлов В.М., Раевская А.А., Ромашева Е.И., Салтыков В.А., Сеньюков С.Л. Парамуширское землетрясение 25 марта 2020 г. $ML=7.7$, $M_w=7.4$ // Землетрясения Северной Евразии. – 2024. – Вып. 27 (2020). – С. 289–300. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2024.27.26> EDN: RZVNFO

Введение. 25 марта 2020 г. в 2:49 UTC произошло сильное землетрясение ($ML=7.7$, $M_w=7.4$), эпицентр которого был расположен на северо-западе Тихого океана в пределах Курило-Камчатского глубоководного желоба (рис. 1) юго-восточнее фронта зоны субдукции. В работах, посвященных этому событию [1, 2, 3], оно получило название Парамуширское землетрясение (ПЗ).

ПЗ ощущалось на п-ове Камчатка, о-ве Беринга, северных и Южных Курильских о-вах, о-ве Адак (США) и на севере о-ва Хоккайдо (Япония). Максимальные сотрясения интенсивностью $I=6-7$ баллов по шкале ШСИ-17 [4] были зафиксированы в г. Северо-Курильске на о-ве Парамушир, жертв и разрушений не было. ПЗ вызвало слабую волну цунами с максимальной наблюдаемой высотой волн ~ 50 см в районе г. Северо-Курильска.

По данным USGS, ISC и каталога ISC-GEM [5–9], за период инструментальных наблюдений с начала XX в. в Курило-Камчатской дуге зафиксировано около 75 землетрясений, близких или превосходящих ПЗ по магнитуде (в зависимости от типа сравниваемой магнитуды). 11 из этих событий (включая ПЗ) произошли в районе вала Зенкевича (события первой половины XX века могут обладать недостаточной точностью определения гипоцентров) [2].

ПЗ является вторым по магнитуде событием, инструментально зарегистрированным в Курило-Камчатской дуге в районе вала Зенкевича после Симуширского землетрясения 13.01.2007 г., $M_w=8.1$, и сильнейшим событием в районе Северных Курильских о-вов с очагом, расположенным в Тихоокеанской плите. Событие 15.01.2009 г., $M_w=7.4$, реализовавшееся в пределах эпицентральной области афтершоков Симуширского землетрясения, имеет по данным каталога GCMT [10] несколько меньший скалярный момент, чем ПЗ, что ставит его на третье место среди инструментально зафиксированных сильнейших землетрясений района вала Зенкевича.

ПЗ вызвало афтершоковый процесс, наиболее интенсивный в первые три месяца, когда произошли два его сильнейших афтершока: 25 марта 2020 г. в 17:21 UTC, $ML=5.7$ и 14 июня 2020 г. в 21:23 UTC, $ML=5.9$.

Задача данной работы – представить актуализированные и дополненные данные о Парамуширском землетрясении и результаты их анализа.

Инструментальные данные. Параметры гипоцентра ПЗ по данным различных сейсмологических агентств приведены в табл. 1. Инструментальный гипоцентр землетрясения определен по 56 фазам *P*-волн и 22 фазам *S*-волн, зарегистрированных региональной сетью сейсмических станций Камчатского филиала (КФ) ФИЦ ЕГС РАН (Прил. 2).

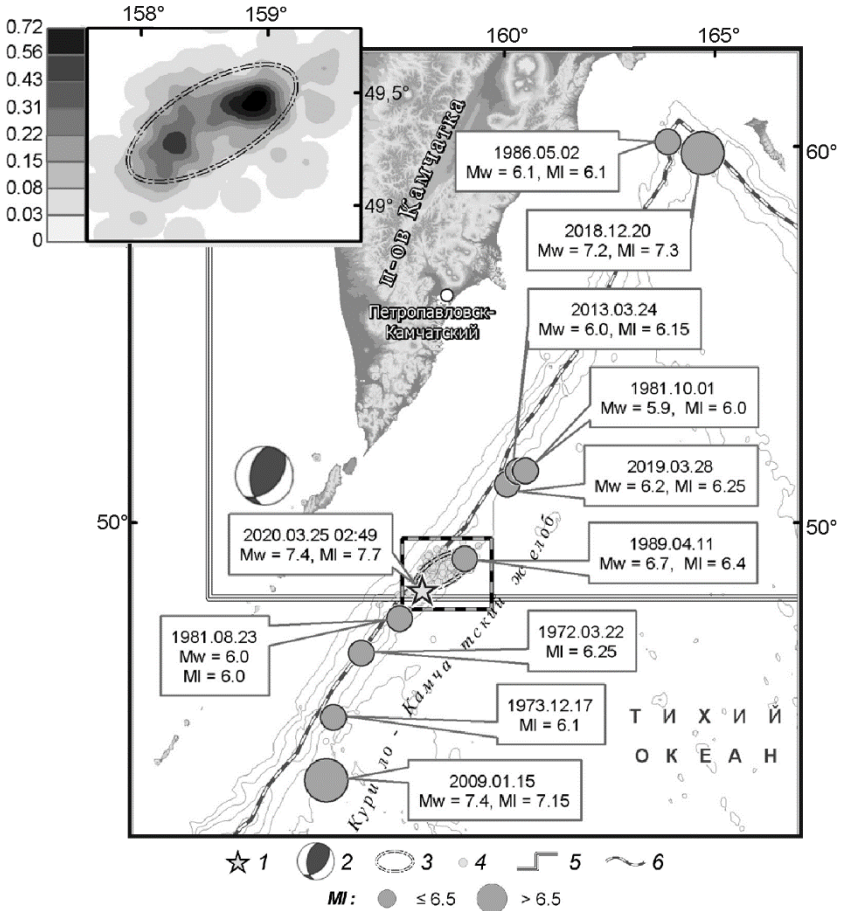


Рис. 1. Карта землетрясений зоны «Тихий океан» за период 01.01.1962–01.02.2024 г. с $ML \geq 6$, расположения эпицентра, афтершоков и очаговой области Парамуширского землетрясения
1 – эпицентр ПЗ; 2 – стереограмма механизма очага ПЗ в равноплощадной проекции нижней полусферы; 3 – граница очаговой области ПЗ; 4 – эпицентры афтершоков ПЗ; 5 – граница зоны ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН; 6 – граница зоны «Тихий океан» На врезке: карта сглаженной плотности пространственного распределения эпицентров афтершоков (без учета магнитуды). Шкала плотности распределения дана в единицах числа событий в день на 100 км^2 .

Агентство	t_0 , ч:м:с	Гипоцентр			Магнитуда/количество станций	Источ- ник
		φ° , N	λ° , E	h , км		
KAGSR	02:49:19.7	49.11	158.08	47.6	$Ks=16.8/24$, $ML=7.7/24$, $Mc=7.5/25$, $Mw=7.4/28$	[Прил. 2]
GSRAS	02:49:17.5	48.84	157.75	46.0	$MPSP=7.0$, $MPLP=7.4$, $MS=7.5/38$, $mb=7.0/64$	[11, 6]
NEIC	02:49:21.4	49.10	157.69	60.5	$mb=7.1/320$, $Mww=7.5/239$, $Mwb=7.4/293$	[6]
IDC	02:49:20.0	48.94	157.72	49.7	$MS=7.3/79$, $mb=5.9/46$, $ML=5.8/7$, $mbtmp/53=6.3$	[6]
GFZ	02:49:19.6	48.91	157.74	44.0	$M=7.6/381$, $mb=6.8/380$, $MwmB=7.7/381$, $MwMwp=7.4/369$, $Mwp=7.1/369$	[6]
GCMT	02:49:32.1	49.11	157.87	52.6	$Mw=7.5/174$	[6]
ISC	02:49:19.9	48.85	157.76	49.9	$mb=6.9/649$, $MS=7.4/220$	[6]

Примечание. KAGSR – Камчатский филиала ФИЦ ЕГС РАН; GSRAS – национальный сейсмологический центр ФИЦ ЕГС РАН; NEIC – National Earthquake Information Center; IDC – International Data Centre, СТВТО; GFZ – German Research Centre For Geosciences; GCMT – The Global CMT Project, приведены параметры центроида; ISC – International Seismological Centre.

Оценки параметров сильных движений грунта получены по записям цифровых акселерографов Дальнего Востока (Прил. 1). Значения пиковых скоростей получены путем интегрирования записей ускорений. Инструментальная интенсивность I_a рассчитана по формуле $I_a=2.5 \cdot \lg(a_{\text{пик}})+1.89$ [4], где $a_{\text{пик}}$ – пиковое ускорение (см/с^2). На 28 акселерографах было зарегистрировано ускорение грунта, превышающее 3 см/с^2 (табл. 2). Наиболее высокие значения ускорений грунта и соответствующей инструментальной интенсивности I_a наблюдались на ближайшей от эпицентра станции SKR, расположенной в г. Северо-Курильске.

Таблица 2. Пиковые значения ускорения $a_{\text{пик}}$ и скорости $v_{\text{пик}}$ грунта для станций, записавших ПЗ с амплитудой по ускорению $a_{\text{пик}} \geq 3 \text{ см/с}^2$

	Название сейсмостанции	Код*	Δ, км	г, км	a _{пик} , см/с ²			v _{пик} , см/с			I _a
					Компонента			Компонента			
					Е	Н	З	Е	Н	З	
1	Северо-Курильск	SKR	223.5	228.5	-108.5	104.4	22.6	4.798	3.588	1.987	7.0
2	Паужетка	PAU	277.3	281.4	-52.0	-54.5	-19.3	-1.564	-1.8	-0.882	6.2
3	Ходутка	KDT	300.3	304.1	-51.9	-28.6	-18.1	1.703	-1.482	-0.687	6.2
4	Русская	RUS	370.8	373.9	-14.8	15.2	9.9	0.633	-0.393	0.349	4.9
5	Карымшина	KRM	413.6	416.3	9.6	17.7	-6.7	0.852	-0.869	-0.308	5.0
6	Рыбачий	RIB	424.9	427.6	12.1	20.1	-7.6	-0.868	-1.225	-0.477	5.2
7	Вилучинск	VIL	425.7	428.4	19.9	-34.4	19.3	1.873	-2.723	-0.996	5.7
8	Школа	SCH	430.2	432.8	11.6	20.3	5.9	0.891	-1.285	0.364	5.2
9	Школа № 3	GK001	431.8	434.4	-16.6	12.9	-6.4	-1.734	-1.226	0.41	4.9
10	Интернат	GK002	433.5	436.1	18.2	-14.8	-8.1	1.036	1.297	-0.477	5.0
11	МЧС	GK005	436.2	438.8	14.4	12.2	6.7	-0.564	-0.702	0.313	4.8
12	Администрация ПК	ADM	437.2	439.8	7.2	10.8	4.4	-0.464	-0.732	0.245	4.5
13	Петропавловск	PET	437.2	439.8	4.4	-8.6	2.5	-0.416	-0.572	-0.252	4.2
14	Высотная	VST	437.6	440.2	7.5	-7.6	-4.0	-0.51	-0.537	-0.376	4.1
15	Николаевка	NIC	438.3	440.9	-18.4	11.0	-4.5	1.801	-1.107	-0.414	5.1
16	Дальний	DAL	438.8	441.4	-6.5	7.3	4.5	-0.446	-0.416	-0.358	4.0
17	Больница	GK004	438.9	441.5	-30.8	28.6	-13.9	1.281	-1.352	0.353	5.6
18	Мишенная	MSN	439.4	442.0	34.3	-52.1	-15.3	3.482	4.584	-1.246	6.2
19	Горького	PTG	440.7	443.3	-12.0	-13.0	7.1	-1.518	-0.822	-0.472	4.7
20	Звёздный	SPZ	440.9	443.5	-8.7	-7.3	-3.6	-1.038	0.676	0.391	4.2
21	Дачная	DCH	441	443.6	6.5	8.6	-4.0	0.783	-0.759	-0.293	4.2
22	Институт	IVS	441.7	444.3	-12.3	-13.6	-6.0	-1.237	0.886	0.512	4.7
23	Школа №40	GK003	442.5	445.1	13.7	13.2	6.9	1.384	1.043	0.62	4.7
24	НИГТЦ	NI	443.5	446.1	-7.8	-14.0	-8.2	-1.325	1.736	-0.704	4.8
25	Аэрологическая станция	AER	443.6	446.2	-12.6	13.2	-6.8	-1.667	-0.881	0.677	4.7
26	Налычево	NLC	460.6	463.1	6.2	10.9	3.9	0.25	-0.514	0.098	4.5
27	Шипунский	SPN	464.7	467.1	-7.3	-6.7	4.7	-0.491	0.498	0.244	4.0
28	Жупаново	GPN	568.8	570.8	-6.7	-7.7	-3.1	0.545	-0.593	-0.31	4.1

Примечание. Δ – эпицентральное расстояние, r – гипоцентральное расстояние.

Тектоническая позиция, механизм и параметры очага. ПЗ не является непосредственно субдукционным землетрясением, хотя его возникновение связано с процессом субдукции Тихоокеанской литосферной плиты под Охотскую плиту. Перед погружением в зону субдукции океаническая плита изгибается, образуя параллельный зоне глубоководный желоб и прилегающий к нему, в данном случае с юго-востока, вал Зенкевича. При этом изгиб океанической плиты порождает собственное поле напряжений и соответствующую полосу сейсмичности, протянувшуюся вдоль вала Зенкевича (подробнее см. [2]).

Растяжение верхней части изгибающейся океанической плиты вызывает мелкофокусные землетрясения со сбросовыми механизмами, где плоскости разрыва близки к простиранию глубоководного желоба и вала Зенкевича [12]. В то же время, по данным каталога GCMT [10], в полосе сейсмичности вала Зенкевича в более глубоких горизонтах (на глубинах ~35–60 км) преобладают землетрясения с противоположным – взбросовым – типом подвижки. Это означает, что с ростом глубины под валом Зенкевича условия растяжения меняются на сжатие, что соответствует теории изгиба литосферной плиты Лобковского [12].

Сводка определений параметров и механизмов очага ПЗ, полученных различными сейсмологическими агентствами, представлена в табл. 3.

Очаг ПЗ расположен в Тихоокеанской плите на глубине 20–70 км (основной диапазон глубин афтершоков по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН) в области ее изгиба перед погружением в зону субдукции. Механизм очага – взброс с субгоризонтальной осью сжатия, направленной на северо-запад поперек простирания Курило-Камчатского желоба и параллельного ему вала Зенкевича. Инструментальный эпицентр ПЗ находится в глубоководном желобе юго-восточнее фронта зоны субдукции. Таким образом, ПЗ является внутриплитным событием. Смена условий растяжения на сжатие океанической плиты с ростом глубины наблюдается и в пределах афтершокового процесса ПЗ (табл. 4).

В КФ ФИЦ ЕГС РАН расчеты тензоров сейсмического момента (TCM) ПЗ и его сильнейших афтершоков были проделаны для моделей DC (Doble Couple – двойной диполь без момента) и NT (Null Trace – тензор с нулевым следом) в соответствии с методикой RSMT (Regional Seismic Moment Tensor) [13, 14].

Определялись глубина h эквивалентного точечного источника, длительность τ временной функции источника, скалярный сейсмический момент M_0 , моментная магнитуда M_w , полученная пересчетом из M_0 по формуле $M_w = 2/3(\lg(M_0[H\cdot m]) - 9.1)$ [15], и собственно параметры механизма очага. Для инверсии были использованы волновые формы широкополосных сейсмических станций Камчатки, Сахалина и сети GSN (Global Seismic Network) на Дальнем Востоке России.

NT-решения для ПЗ, полученные в КФ ФИЦ ЕГС РАН, GCMT, NEIC (USGS) (табл. 3), содержат значения коэффициента Лоде-Надаи в пределах 7–18 % [16]. Это означает, что недипольная составляющая в TCM 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 временной функции источника τ укладываются в диапазон 12–28 с.

При подготовке каталога механизмов и параметров очагов (Прил. 3) TCM для ПЗ (табл. 3) и четырех его сильнейших афтершоков (табл. 4) были переопределены и незначительно отличаются от представленных в [2].

Таблица 3. Параметры механизма очага ПЗ 25 марта 2020 г. в 02^h49^m по данным различных сейсмологических агентств

Агентство, метод	Главные оси и главные значения (в ед. $10^{20} \text{ } H_m$)									Механизм очага						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°	$slip^\circ$								
KAGSR, RSMT, DC	1.66	18	71	0	207	19	-1.66	116	3	187	45	63	43	51	115	7.4	1.66	45	12	0			
KAGSR, RSMT, NT	1.55	18	70	0.12	207	20	-1.67	116	3	186	46	62	44	51	116	7.4	1.61	45	10	11			
GCMT, NT	2.05	38	80	0.09	202	10	-2.14	292	3	193	49	77	33	43	105	7.5	2.09	53	27	7			
NEIC WP, NT	1.83	81	88	0.23	202	1	-2.06	292	2	201	47	88	23	43	92	7.5	1.96	61	28	18			
NEIC BW, NT	1.50	37	78	0.14	192	11	-1.64	283	5	183	51	76	24	41	106	7.4	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 точечного источника; τ – длительность временной функции источника; η – коэффициент Лоде-Надаи: $\eta = (2E_N - E_T - E_P) / (E_T - E_P) * 100\%$. WP – W-фаза; BW – оценка по объемным волнам; M_w – 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 равноплощадной проекции нижней полусферы.

Афтершоковый процесс. Характеристика афтершокового процесса, сопровождавшего ПЗ, была получена на основании анализа каталога землетрясений с момента возникновения главного события по 15.10.2021 г. для района с координатами $\varphi=48.0-50.0^\circ N$, $\lambda=154.7-160.0^\circ E$. При оценке представительности каталога $M^c=3.55$, рассчитанной для данной выборки при статистической значимости $\alpha=0.3$, представительный каталог афтершоков содержит ~400 событий. Результаты анализа временного хода афтершоков даны в работе [2].

По всем представительным данным ($M^C=3.55$) был построен эллипс (рис. 2), оконтуривающий зону концентрации афтершоков ПЗ. Внутри этого эллипса находятся 90 % всех афтершоков в соответствии с 2- σ рассеянием при распределении Гаусса, в том числе два наиболее сильные ($M_L>5.5$) события афтершоковой последовательности. По параметрам эллипса была получена формальная оценка размера очага ПЗ: длина (большая ось эллипса) – 110 км, ширина (меньшая ось) – 40 км.

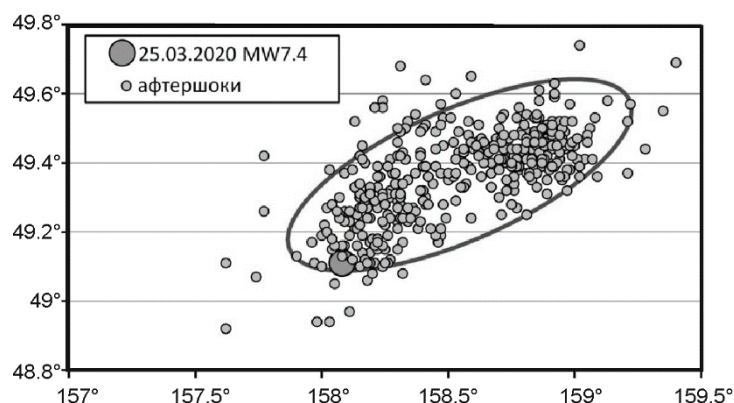


Рис. 2. Положение ПЗ и его афтершоков, а также расчетная эллиптическая площадь очага. Представлены афтершоки представительного уровня магнитуды – $M_L \geq 3.55$. Эллипс включает в себя 90 % всех афтершоков

Облако афтершоков ПЗ в целом вытянуто в направлении, близком к простиранию Курило-Камчатского желоба (рис. 1). В то же время, максимальная пространственная концентрация эпицентров (рис. 2) наблюдается в двух локальных областях различного простирания, центры которых отстоят друг от друга на 40–50 км. Одна из них находится ближе к эпицентру главного толчка, который располагается у юго-западного окончания облака, вторая – у его противоположного, северо-восточного, края; обе области проявляются с самого начала афтершокового процесса. Поскольку в зарегистрированной последовательности афтершоков, начинающейся через 5 минут после главного события, отсутствуют сильные землетрясения, которые могли бы породить данные области, такие особенности очага сформировались либо в процессе развития главного разрыва, либо в первые несколько минут после него.

По результатам трехмерного анализа областей концентрации афтершоков были выделены два пространственных кластера, один из которых приблизительно соответствует плоскости, падающей на юго-восток (табл. 4, NP2 в механизмах №№ 1 и 2), и охватывает большую часть очага, а второй состоит из афтершоков меньшей глубины и ограничивает очаг с северо-востока.

Затухание афтершокового процесса ПЗ с 25 марта 2020 г. по 13 июня 2020 г. (рис. 3) происходило в соответствии с законом Омори [17] с изменением значения показателя p от 1.12 (в начале) до 1.24 (в конце) и практически соответствовало интервалу между двумя наиболее сильными афтершоками: 25 марта 2020 г. в 17:21 UTC, $M_L=5.7$ и 14 июня 2020 г. в 21:23 UTC, $M_L=5.9$. В работе [2] последующий временной ход афтершоков был аппроксимирован экспонентой (рис. 4). Исходя из экспоненциального параметра, в [2] предполагаемая продолжительность афтершокового процесса была оценена $\tau=370$ сут. ≈ 1 год; $3\tau=3$ года (рис. 4).

Таблица 4. Параметры очагов сильнейших афтершоков ПЗ (обозначения аналогичны табл. 3)

№	Дата (г-м-д) и время (ч:м:с), <i>ML</i>	Агент- ство, метод	Главные оси и главные значения (в ед. $10^{16} H\cdot m$)									Механизм очага						<i>M_w</i>	<i>M₀</i> 10^{16} <i>H·m</i>	<i>h</i> <i>км</i>	τ с	η %	
			<i>T</i>			<i>N</i>			<i>P</i>			<i>NP1</i>		<i>DI</i>	<i>NP2</i>		<i>D2</i>						
			<i>E_T</i>	<i>azm</i> °	<i>pl</i> °	<i>E_N</i>	<i>azm</i> °	<i>pl</i> °	<i>E_P</i>	<i>azm</i> °	<i>pl</i> °	<i>stk</i> °	<i>dip</i> °	<i>slip</i> °	<i>stk</i> °	<i>dip</i> °	<i>slip</i> °						
1	2020 03 25 17:21:45 <i>ML</i> =5.7	KAGSR, RSMT, DC	3.25	120	32	0	216	10	-3.25	321	56	178	16	-129	38	77	-80	4.94	3.25	5	2	0	
2		KAGSR, RSMT, NT	2.64	127	30	0.23	226	16	-2.87	340	57	178	21	-140	50	77	-74	4.89	2.76	5	2	13	
3	2020 03 26 05:22:11 <i>ML</i> =5.1	KAGSR, RSMT, DC	4.47	48	50	0	220	40	-4.47	313	4	192	60	43	77	54	142	4.37	0.45	40	0	0	

№	Дата (г-м-д) и время (ч:м:с), ML	Агент- ство, метод	Главные оси и главные значения (в ед. $10^{16} H\cdot M$)									Механизм очага						M_w	M_0 10^{16} $H\cdot M$	h км	τ с	η %		
			T			N			P			$NP1$		DI		$NP2$								$D2$
			E_T	azm°	pl°	E_N	azm°	pl°	E_P	azm°	pl°	stk°	dip°	$slip^\circ$	stk°	dip°	$slip^\circ$							
4		KAGSR, RSMT, NT	4.42	43	59	0.71	216	31	-5.13	308	3	192	055	051	067	050	132	4.39	0.48	40	0	22		
5	2020 04 07 06:27:21 ML=5.5	KAGSR, RSMT, DC	3.33	314	73	0	211	4	-3.33	120	17	204	28	82	33	62	94	4.95	3.33	45	2	0		
6		KAGSR, RSMT, NT	3	321	68	0.4	213	7	-3.4	121	20	199	25	74	37	66	97	4.94	3.2	45	2	19		
7	2020 06 14 21:23:22 ML=5.9	KAGSR, RSMT, DC	4.76	178	33	0	2	57	-4.76	269	2	318	66	23	218	69	154	5.05	4.76	40	0	0		
8		KAGSR, RSMT, NT	6.03	172	42	2.67	2	47	-8.7	267	5	319	58	29	212	66	144	5.18	7.36	45	0	54		

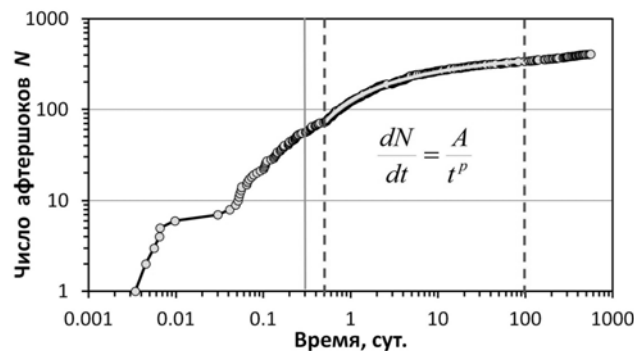
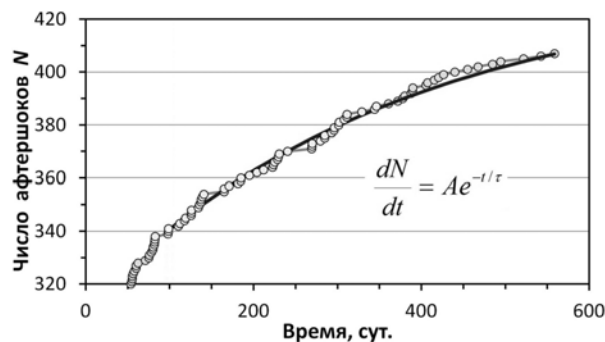


Рис. 3. Кумулятивный график числа афтершоков

Время отсчитывается от времени в очаге ПЗ. Сплошной черной 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.

Рис. 4. Кумулятивный график числа афтершоков N

Время отсчитывается от времени в очаге ПЗ. Сплошной линией показана экстраполяция в соответствии с экспоненциальным законом.

Для четырех сильнейших афтершоков ПЗ с магнитудами $ML > 5$ по методике [13, 14] определены тензоры сейсмического момента двух типов – двойного диполя (DC) и тензора с нулевым следом (NT), а также оценки глубины эквивалентного точечного источника и продолжительности очагового процесса (табл. 4). Мелкофокусный афтершок 25 марта 2020 г. в 17:21 UTC, $ML=5.7$ (№ 1–2 в табл. 4, глубина 5 км) имеет сбросовый механизм, в отличие от механизма главного толчка и остальных, более глубоких, афтершоков, что подтверждает смену условий растяжения на сжатие в океанической плите в окрестности очага ПЗ с ростом глубины.

Макросейсмические данные по ПЗ собраны для 60 населенных пунктов Камчатского края и Сахалинской области (Российской федерации), включая кордоны, маяки и гидрометеорологические станции (ГМС). Имеются сведения об ощутимости события в гг. Китами (на о. Хоккайдо, Япония) и Адак (на о. Адак, США). Сбор данных проводился через телефонный опрос постоянных респондентов, сотрудников администраций поселений и круглосуточных дежурных

служб; поступала информация и через электронную почту и социальные сети; 198 жителей полуострова использовали интернет-опросник [18], размещенный на официальном сайте (<http://www.emsd.ru/Isopool/poll.php>) КФ ФИЦ ЕГС РАН. Всего из различных источников обработано 264 сообщения, по которым составлена карта макросейсмического проявления землетрясения (рис. 5). Землетрясение ощущалось с интенсивностью I от 1–2 до 6–7 баллов по шкале ШСИ-17 в 47 населенных пунктах на расстояниях от эпицентра $\Delta=215$ –1801 км (табл. 5, Прил. 5).

Таблица 5. Сводка оценок макросейсмической интенсивности Парамуширского землетрясения

№	Название пункта	Координаты		Δ, км	№	Название пункта	Координаты		Δ, км
		φ°с.ш.	λ°в.д.				φ°с.ш.	λ°в.д.	
6–7 баллов					31	Апача	52.919	157.0454	430
1	Северо-Курильск	50.67	156.12	223	32	Усть-Большерецк	52.825	156.28	432
6 баллов					33	Сокоч	53.1506	157.6936	450
2	Чибуйный (маяк)	50.76639	156.20139	228	3 балла				
3	Круглый (маяк)	52.0685	158.3227	329	34	Курбатова (маяк)	50.8651	156.4811	226
5–6 баллов					35	Октябрьский	52.6623	156.2431	415
4	Подгорная (РНС)	50.1757	155.5849	215	36	Никольское	55.1963	166.002	865
5 баллов					37	Южно-Курильск ¹	44.037	145.853	1089
5	Озёрный (кордон)	51.4819	157.0376	274	38	Лагунное ¹	44.056	145.781	1093
6	Паужетка	51.468	156.8129	277	39	Горячий Пляж ¹	43.999	145.795	1096
7	Озерновский	51.49649	156.50441	288	2–3 балла				
8	Запорожье	51.503	156.523	288	40	Васильева (маяк)	50.00278	155.39222	218
9	Водопадная (ГМС)	51.80912	158.07804	300	41	Кавалерское	52.928	156.574	437
6 баллов					2 балла				
10	Карымшина (стационар)	52.8269	158.1322	413	42	Малокурильское ²	43.87	146.834	1038
11	Вилочинск	52.93	158.404	425	1–2 балла				
4–5 баллов					43	Усть-Камчатск	56.2371	162.5361	847
12	Лопатка (маяк)	50.87239	156.66629	220	Ощущалось				
13	МГеоЭС	52.53847	158.20192	381	44	Сосновка	53.08	158.3	442
14	Рыбачий	52.9169	158.5225	424	45	Центральный (кордон)	53.50987	158.75984	492
15	Термальный	52.9369	158.2295	426	46	Китами ²	43.8	143.9	1233
16	Паратунка	52.96	158.252	428	47	Адак ³	51.83	176.71 з.д.	1801
17	Петропавловск-Камчатский	53.02	158.65	437	Не ощущалось				
18	Николаевка	53.0461	158.337	438	48	Малки	53.332	157.473	471
19	Пионерский	53.09	158.55	444	49	Пушино	54.177	158.007	563
20	Нагорный	53.1197	158.5184	447	50	Устьевое	54.1602	155.8428	582
21	Елизово	53.1832	158.3825	453	51	Шаромы	54.398	158.211	588
22	Налычево (кордон)	53.17351	159.34848	461	52	Соболево	54.2983	155.9433	595
23	Семячик (ГМС)	54.08182	159.98584	568	53	Мильково	54.7	158.63	623
24	Кроноки (кордон)	54.5914	161.16225	645	54	Тасжый	55.274	159.375	691
4 балла					55	Лазо	55.5392	159.7616	724
25	Маяк Петропавловский	52.88776	158.70967	422	56	Атласово	55.606	159.639	730
26	Вулканный	53.094	158.348	443	57	Эссо	55.9276	158.7003	759
27	Раздольный	53.268	158.288	463	58	Козыревск	56.0487	159.87	781
28	Коряки	53.283	158.205	464	59	Ключи	56.318	160.836	823
29	Шипунский (маяк)	53.11	160.01	465	60	Крутоберегово	56.25548	162.70796	853
3–4 балла					61	Африка (маяк)	56.18346	163.35641	863
30	Маяк Большерецкий	52.5624	156.3085	403	62	Озерной (ГМС)	57.71916	163.30201	1017

Примечание. м. – мыс; РНС – радионавигационная станция; 1 – <http://mseism.gsras.ru/eqInfo/RequestsHandler?cmd=toinfmsglang=ru&imid=124>; 2 – <https://www.emsc-sem.org/Earthquake/Testimonies/comments.php?id=841592>; 3 – <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us70008fi4>.

Самые сильные сотрясения $I=6$ –7 баллов были зафиксированы на о. Парамушир в г. Северо-Курильске ($\Delta=223$ км). Со слов респондентов, около минуты жители города ощущали очень сильную жесткую тряску по нарастающей. Перед и во время землетрясения некоторые люди слышали подземный гул. Большинство жителей города, находившихся на нижних этажах зданий, в сильном испуге выбежали на улицу, продолжая там ощущать тряску, от которой сотрясались кусты и деревья, раскачивались опоры ЛЭП и отдельно стоящие трубы. Оставшиеся в помещениях люди встали в безопасное место. Здания сотрясались в целом, стены и перекрытия скрипели; дрожали и трескались окна, открывались и закрывались двери; устойчивые и тяжелые предметы, включая мебель, тряслись и заметно смещались (однако большинство предметов после землетрясения осталось на своих местах); неустойчивые и легкие предметы падали.

В помещениях центральной районной больницы (ЦРБ, шлакоблочное здание) и полиции (деревянное здание) произошел механический разрыв труб отопления от места ввода в радиатор отопления. В деревянных многоквартирных зданиях появились свежие трещины в оштукатуренных стенах, откололись небольшие куски штукатурки, зафиксирован случай отхождения кафеля с цементом от деревянной стены. На крышах 15 зданий с печным отоплением зафиксировано повреждение 60 кирпичных дымовых труб: трещины в кладке, выпадение частей кладки и полное падение (на момент землетрясения здания имели высокий процент износа).

Комиссией по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций и обеспечению пожарной безопасности Северо-Курильского городского округа 25 и 26 марта 2020 г. проводился визуальный осмотр социально значимых объектов города с целью принятия решения об их дальнейшей безопасной эксплуатации: зданий детского сада «Северянка», центральной районной больницы (ЦРБ), средней образовательной школы (СОШ) и Дома культуры (ДК). В СОШ и ДК в совокупности были зафиксированы в помещениях многочисленные трещины на потолках и стенах (в несущих и внутренних перегородках); трещины и отслоения штукатурки, отделочной керамической плитки; в месте примыкания тамбура аварийного выхода к основному зданию ДК по всему периметру разрывы. Комиссией был сделан вывод о необходимости проведения инженерно-сейсмического обследования этих зданий специализированной организацией. Для зданий детского сада и ЦРБ установлено отсутствие препятствий для их дальнейшей безопасной эксплуатации.

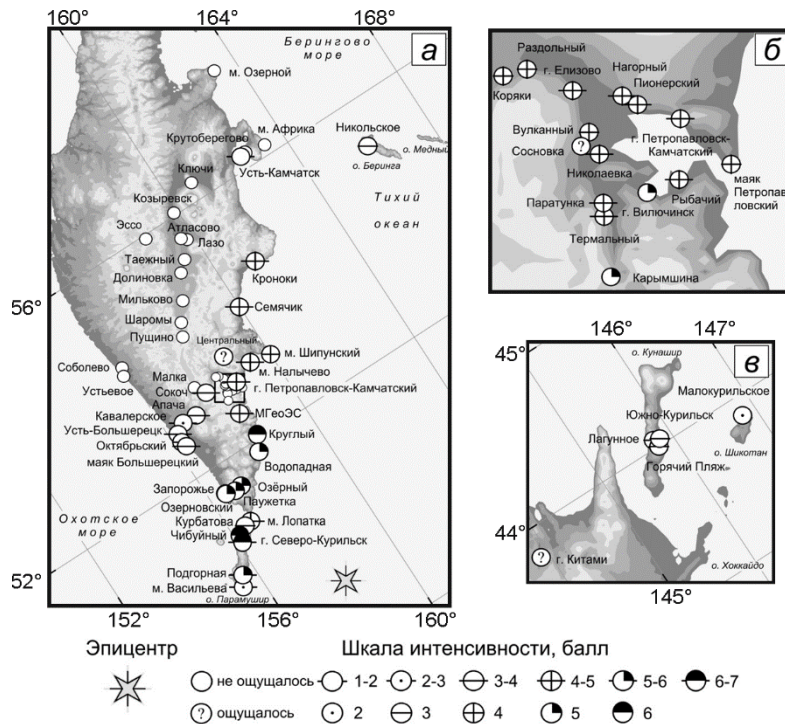


Рис. 5. Карта макросейсмического проявления ПЗ (а); детальнее: населенные пункты вблизи г. Петропавловска-Камчатского (б) и пункты на островах Кунашир и Шикотан (в)

В Камчатском крае землетрясение ощущалось с интенсивностью I от 2 до 6 баллов в 36 населенных пунктах, расположенных на западном и восточном побережье полуострова и на о. Беринга (с. Никольское) ($\Delta=220-865$ км). В населенных пунктах центральной Камчатки ($\Delta=471-823$ км), по сообщениям респондентов, землетрясение не ощущалось. В ближайших к эпицентру поселках полуострова, на юге – в пос. Паужетка ($\Delta=277$ км) и на западном побережье – в пгт Озерновский ($\Delta=288$ км) и с. Запорожье ($\Delta=288$ км) наблюдалась интенсивность сотрясений $I=5$ баллов (рис. 5 а). В других селениях западного побережья ($\Delta=403-437$ км) сотрясения не превышали 3–4 баллов. Более выражен макросейсмический эффект землетрясения на восточном побережье (рис. 3 а, б), там же зафиксирована и максимальная интенсивность сотрясений на Камчатке – $I=6$ баллов на маяке Круглый ($\Delta=329$ км); $I=5$ баллов – на ГМС «Водопадная» ($\Delta=300$ км), стационаре Карымшина ($\Delta=413$ км) и в г. Вилучинске ($\Delta=425$ км); сотрясения $I=4-5$ баллов зафиксированы 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 [19].

Макросейсмическое проявление ПЗ зафиксировано на расстояниях более 1000 км от эпицентра: с интенсивностью сотрясений $I=3$ балла на о. Кунашир в поселках Южно-Курильск ($\Delta=1089$ км), Лагунное ($\Delta=1093$ км) и Горячий Пляж ($\Delta=1096$ км) (рис. 4); $I=2$ 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 ($\Delta=1801$ км).

Эффект цунами. ПЗ вызвало слабое цунами, не представлявшее опасности для населения. В г. Северо-Курильске в интервале времени, согласованном с расчетным временем прихода цунами, визуально наблюдались серии волн высотой до 50 см. На ГМС «Водопадная», расположенной в южной части восточного побережья Камчатки (51.8°N , 158.1°E), были отмечены колебания уровня моря до 25 см [20]. На трех ближайших к эпицентру ПЗ станциях DART («Kamchatka Peninsula», «Attu», «Northern Tokyo», эпицентральных расстояниях ~400–1000 км) были зарегистрированы колебания водной поверхности размахом от 2 до 6 см [2].

Заключение. Парамуширское землетрясение с магнитудой $M_L=7.7$, $M_w=7.4$ произошло в Тихом океане юго-восточнее п-ова Камчатка. Тектоническая позиция очага ПЗ приурочена к изгибу Тихоокеанской плиты перед погружением ее в зону субдукции в районе вала Зенкевича. Основным толчок имел взбросовый механизм и реализовался в океанической плите (внутриплитное событие) на глубине ~48 км под воздействием условий субгоризонтального сжатия, характерных для района вала Зенкевича в диапазоне глубин ~35–60 км. Механизмы наиболее сильных афтершоков ПЗ ($M_L>5$) в диапазоне глубин 5–45 км подтверждают, что с уменьшением глубины в области изгиба океанической плиты условия сжатия сменяются растяжением.

На основании анализа представительного каталога афтершоков оценены размеры очага ПЗ (~110x40 км). Облако афтершоков в целом вытянуто в направлении Курило-Камчатского желоба. Выявлены две пространственные области повышенной концентрации афтершоков, возникшие, вероятно, в момент главного толчка или в первые минуты после него. Затухание афтершокового процесса ПЗ в первые три месяца после главного события соответствовало закону Омори. Дальнейший ход афтершокового процесса был экспоненциально аппроксимирован, и его предполагаемая продолжительность, исходя из экспоненциального параметра, оценена в три года.

ПЗ ощущалось с интенсивностью I от 1–2 до 6–7 баллов по шкале ШСИ-17 в 47 населенных пунктах на расстояниях от эпицентра $\Delta=215$ –1801 км. Максимальная интенсивность сотрясений $I=6$ –7 баллов зафиксирована в г. Северо-Курильске ($\Delta=223$ км), разрушений и пострадавших не было. Макросейсмический эффект в населенных пунктах Камчатского края и Северо-Курильского района Сахалинской области подобен проявлению субдукционных землетрясений вблизи восточного побережья Камчатки.

Магнитуда ПЗ значительно превысила порог цунамигенности, но вызванное им цунами было слабым и не причинило ущерба.

Парамуширское землетрясение является вторым по магнитуде событием, инструментально зарегистрированным в Курило-Камчатской дуге в районе вала Зенкевича после Симуширского землетрясения 13.01.2007 г., $M_w=8.1$, и сильнейшим событием в районе Северных Курильских о-вов с очагом, расположенным в Тихоокеанской плите.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственных заданий № 124020900029-7 и № 075-00682-24 с использованием данных, полученных 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/>).

В подготовке электронных приложений «App11_Kamchatka_2020» принимали участие Д.В. Чебров, С.Л. Сеньюков, И.Р. Абубакиров, В.М. Павлов, С.Я. Дроздина, И.Н. Нуждина, Е.А. Матвеевко, С.В. Митюшкина, А.А. Раевская, Ю.В. Шевченко, Е.Л. Музуров, Р.А. Кутанов, Е.А. Карпенко, Н.А. Леднева, З.А. Назарова, Е.И. Ромашева, С.Л. Толокнова, Т.Ю. Кожевникова, О.В. Соболевская, С.Г. Пойгина, Г.М. Бахтиярова.

Электронное приложение App11_Kamchatka_2020 (<http://www.gsras.ru/zse/app-27.html>): 1 – Сейсмические станции сети Камчатки и Командорских островов в 2020 г.; 2 – Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов за 2020 г.; 3 – Каталог механизмов очагов землетрясений Камчатки и Командорских островов за 2020 г.; 5 – Макросейсмический эффект ощутимых землетрясений Камчатки и Командорских островов в населенных пунктах в 2020 году.

Л и т е р а т у р а

1. 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. DOI: <https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.113-120.121-127>
2. Чебров Д.В., Абубакиров И.Р., Губанова А.А., Глухов В.Е., Ландер А.В., Матвеев Е.А., Митюшкина С.В., Павлов В.М., Салтыков В.А., Сеников С.Л., Титков Н.Н. Парамуширское землетрясение 25 марта 2020 г. $M_w=7.4$ // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2023. – №2. – Вып. 58. – С. 49–66.
3. 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. – P. 116728. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116728>
4. ГОСТ Р 57546–2017. Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности. – Москва: Стандартинформ, 2017. – 27 с.
5. National Earthquake Information Center and Data Center for Seismology, Denver. (2024). [Site]. – URL: <http://earthquake.usgs.gov/regional/neic>
6. International Seismological Centre. (2024). On-line Bulletin. <https://doi.org/10.31905/D808B830>
7. 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. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-10-1877-2018>
8. Storchak D.A., Di Giacomo D., Bondár I., Engdahl E.R., Harris J., Lee W.H.K., Villaseñor A., Bormann P. Public Release of the ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900–2009) // Seismological Research Letters. – 2013. – V. 84, N 5. – P. 810–815. DOI: <https://doi.org/10.1785/0220130034>
9. Storchak D.A., Di Giacomo D., Engdahl E.R., Harris J., Bondár I., Lee W.H.K., Bormann P., Villaseñor A. The ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900–2009): Introduction // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 2015. – V. 239, N 0031–9201. – P. 48–63. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2014.06.009>
10. Global Centroid Moment Tensor (GCMT). Catalog Search. (2024). [Site]. – URL: <https://www.globalcmt.org/>
11. Сейсмологический бюллетень (сеть телесеизмических станций), 2020. (2024) // ФИЦ ЕГС РАН [сайт]. – URL: http://www.gsras.ru/ftp/Teleseismic_bulletin/2020/
12. Лобковский Л.И. Геодинамика зон спрединга, субдукции и двухъярусная тектоника плит. – М.: Наука. 1988. – 253 с.
13. 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. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002333721030017>
14. Павлов В.М. Алгоритмы расчета синтетических сейсмограмм от дипольного источника с использованием производных функций Грина // Физика Земли. – 2017. – № 4. – С. 67–75.
15. Kanamori H. The energy release in great earthquakes // Journal of Geophysical Research. – 1977. – V. 82, N 20. – P. 2981–2987.
16. Юнга С.Л. О механизме деформирования сейсмоактивного объема земной коры // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1979. – № 10. – С. 7–25.
17. Omori F. On the Aftershocks of Earthquakes // Journal of the College of Science, Imperial University of Tokyo. – 1894. – V. 7. – P. 111–120.
18. Митюшкина С.В., Токарев А.В., Раевская А.А., Чеброва А.Ю. Автоматическая обработка макросейсмической информации по камчатским землетрясениям на базе Интернет-опросника // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Третьей научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 9–15 октября 2011 г. / Отв. ред. Чебров В.Н. – Обнинск: ГС РАН, 2011. – С. 376–380.
19. Митюшкина С.В., Иванова Е.И., Чеброва А.Ю., Левина В.И. Макросейсмические проявления промежуточных и глубоких землетрясений камчатской зоны субдукции // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Второй научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 11–17 октября 2009 г. / Отв. ред. Чебров В.Н. – Обнинск: ГС РАН, 2010. – С. 141–145.
20. История одного цунами или почему опасны фейковые сообщения от якобы ученых. (2024). Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН. [сайт]. – URL: <http://imgg.ru/ru/news/284>

PARAMUSHIR EARTHQUAKE on MARCH 25, 2020 $ML=7.7$, $M_w=7.4$

**D.V. Chebrov¹, E.A. Matveenko¹, I.R. Abubakirov¹, A.V. Lander², S.V. Mityushkina¹, V.M. Pavlov¹,
A.A. Raevskaya¹, E.I. Romasheva¹, V.A. Saltykov¹, S.I. Senyukov¹**

¹*Kamchatka branch of Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, van@emsd.ru*

²*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics
of the Russian Academy of Sciences*

Abstract. The article presents instrumental and macroseismic data on the Paramushir earthquake of March 25, 2020, $ML=7.7$, $M_w=7.4$, discusses its tectonic position and features of the aftershock process. This event is the strongest instrumentally recorded earthquake with a source located in the Pacific lithospheric plate in the area of the Northern Kuril Islands. The focal mechanisms and moment magnitude values M_w of the Paramushir earthquake and its strongest aftershocks were obtained using an original method for calculating seismic moment tensors, developed at the Kamchatka branch of Geophysical Survey RAS. The Paramushir earthquake was felt in 60 settlements in the Kamchatka and the Sakhalin Regions, and was also noticed on the islands of Hokkaido (Japan) and Adak (USA). The maximum macroseismic manifestations were noted in the city of Severo-Kurilsk (Paramushir Island), $I=6-7$ points on the Seismic Intensity Scale 2017 (Russian building code GOST R 57546–2017); there were no casualties or destruction. A weak tsunami with a maximum observed wave height of ~ 50 cm was noted in the area of Severo-Kurilsk.

Keywords: Kamchatka, seismicity, catalogue, earthquake, focal mechanism, macroseismic, seismicity level.

For citation: Chebrov, D.V., Matveenko, E.A., Abubakirov, I.R., Lander, A.V., Mityushkina, S.V., Pavlov, V.M., Raevskaya, A.A., Romasheva, E.I., Saltykov, V.A., & Senyukov, S.I. (2024). [Paramushir earthquake on March 25, 2020 $ML=7.7$, $M_w=7.4$]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 27(2020), 289–300. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2024.27.26> EDN: RZVNFO

References

1. Prytkov, A.S., & Vasilenko, N.F. (2021). [The March 25, 2020 M_w 7.5 Paramushir earthquake]. *Geosistemy perekhodnykh zon* [Geosystems of Transition Zones], 5(2), 113–127. (In Russ. & Engl.). DOI: <https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.113-120>
2. Chebrov, D.V., Abubakirov, I.R., Gubanova, A.A., Glukhov, V.E., Lander, A.V., Matveenko, E.A., Mityushkina, S.V., Pavlov, V.M., Saltykov, V.A., Senyukov, S.L., & Titkov, N.N. (2023). [The Paramushir earthquake on March 25, 2020 $M_w=7.4$]. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle* [Bulletin of KRAESC. Earth sciences], 2(58), 49–66. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2023-2-58-49-66>
3. 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(0012–821X), 116728. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116728>
4. GOST R 57546-2017. (2017). [Earthquakes. Seismic Intensity Scale]. Moscow, Russia: Standardinform Publ., 27 p. (In Russ.).
5. National Earthquake Information Center and Data Center for Seismology, Denver. (2024). Retrieved from <http://earthquake.usgs.gov/regional/neic>
6. International Seismological Centre. (2024). On-line Bulletin. Retrieved from <https://doi.org/10.31905/D808B830>
7. Di Giacomo, D., Engdahl, E.R., & Storchak, D.A. (2018). The ISC-GEM Earthquake Catalogue (1904–2014): status after the Extension Project. *Earth System Science Data*, 10, 1877–1899. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-10-1877-2018>
8. Storchak, D.A., Di Giacomo, D., Bondár, I., Engdahl, E.R., Harris, J., Lee, W.H.K., Villaseñor, A., & Bormann, P. (2013). Public Release of the ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900–2009). *Seismological Research Letters*, 84(5), 810–815. DOI: <https://doi.org/10.1785/0220130034>
9. Storchak, D.A., Di Giacomo, D., Engdahl, E.R., Harris, J., Bondár, I., Lee, W.H.K., Bormann, P., & Villaseñor, A. (2015). The ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900–2009): Introduction. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 239(0031–9201), 48–63. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2014.06.009>
10. Global Centroid Moment Tensor (GCMT). (2024). Catalog Search. Retrieved from <https://www.globalcmt.org/>
11. GS RAS, Bulletin of Teleseismic Stations, 2020. (2024). Retrieved from http://www.gsras.ru/ftp/Teleseismic_bulletin/2020

12. Lobkovsky, L.I. (1988). *Geodinamika zon spreadinga, subdukcii i dvuh"yarusnaya tektonika plit* [Geodynamics of the spreading and subduction zones and two-level plate tectonics]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 253 p. (In Russ.).
13. Abubakirov, I.R., & Pavlov, V.M. (2021). Determining the Double Couple Moment Tensor for Kamchatka Earthquakes from Regional Seismic Waveforms. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 57(3), 332–347. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1069351321030010>
14. Pavlov, V.M. (2017). The algorithms for calculation synthetic seismograms from a dipole source using the derivatives of Green's function. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 53(4), 556–564. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1069351317030077>
15. Kanamori, H. (1977). The energy release in great earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 82(20), 2981–2987.
16. Yunga, S.L. (1979). *O mekhanizme deformirovaniya seismoaktivnogo ob'yema zemnoy kory* [On the mechanism of deformation of the seismically active volume of the Earth's crust]. *Fizika Zemli* [Izvestiya. Physics of the Solid Earth], 10, 7–25. (In Russ.).
17. Omori, F. (1894). On the Aftershocks of Earthquakes. *Journal of the College of Science, Imperial University of Tokyo*, 7, 111–120.
18. Mityushkina, S.V., Tokarev, A.V., Raevskaya, A.A., & Chebrova, A.Yu. (2011). [Automatic processing of macroseismic information on Kamchatka earthquakes based on an online questionnaire]. In *Trudy Tret'ej nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Problemy kompleksnogo geofizicheskogo monitoringa Dal'nego Vostoka Rossii"* [Proceedings of the 3rd Scientific and Technical Conference “Problems of complex geophysical monitoring of Far East of Russia”] (pp. 376–380). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
19. Mityushkina, S.V., Ivanova, E.I., Chebrova, A.Yu., & Levina, V.I. (2009). In *Trudy Vtoroj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Problemy kompleksnogo geofizicheskogo monitoringa Dal'nego Vostoka Rossii"* [Proceedings of the 2nd Scientific and Technical Conference “Problems of complex geophysical monitoring of Far East of Russia”] (pp. 141–145). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
20. *Istoriya odnogo tsunami ili pochemu opasny feykovyye soobshcheniya ot yakoby uchenykh* [The story of one tsunami or why fake messages from supposedly scientists are dangerous]. (2024). Institute of Marine Geology and Geophysics Far Eastern Branch RAS. Retrieved from <http://imgg.ru/ru/news/284> (In Russ.).