

ОХОТОМОРСКОЕ-III ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 24 мая 2013 г. с $M_{w_{\text{рег}}}=8.3$, $I_0=6$ (Охотское море)

**А.Ю. Чеброва¹, И.Р. Абубакиров¹, А.А. Гусев¹, С.Я. Дрознина¹, А.В. Ландер²,
С.В. Митюшкина¹, В.М. Павлов¹, В.А. Салтыков¹, Н.Н. Титков¹, Д.В. Чебров¹**

¹Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия, ayuch@emsd.ru
²Международный институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН,
г. Москва, Россия, land@mitp.ru

Аннотация. В статье обсуждается сильнейшее глубокое землетрясение 24 мая 2013 г. с магнитудой $M_{w_{\text{рег}}}=8.3$, которое произошло в акватории Охотского моря на глубине около 630 км. В КФ ФИЦ ЕГС РАН инструментальный гипоцентр землетрясения локализован в точке с координатами $\varphi=54.75^\circ\text{с.ш.}$, $\lambda=153.78^\circ\text{в.д.}$ и глубиной $h=630$ км по 66 фазам P -волн и 13 фазам S -волн. Получены три энергетические оценки: энергетический класс $K_S=17$ (пересчитанный в локальную магнитуду $ML=7.8$), магнитуда по кода-волнам $M_c=7.6$, моментная магнитуда $M_{w_{\text{рег}}}=8.3$. Гипоцентр Охотоморского землетрясения располагается на северном краю древнего слэба, практически у нижнего окончания его сейсмогенной области. Землетрясение вызвало значительные косейсмические смещения на большинстве пунктов GNSS-наблюдений. Оценка механизма землетрясения произведена тремя способами, которые показывают схожие результаты. В качестве действующей более предпочтительной представляется полого падающая плоскость, ориентированная в субмеридиональном направлении. Для глубокого события 24 мая 2013 г. зафиксирована серия афтершоков, глубина которых достигает максимально возможной для известных на Земле землетрясений. Однако глубокофокусных афтершоков имеет размеры 400×200 км с диапазоном глубин 450–700 км и вытянуто в южном направлении. Афтершоковый процесс носит трехфазовый характер и может рассматриваться как убывающий во времени поток сейсмических событий с тремя последовательными стадиями, имеющими разный характер затухания. Смена режимов затухания связывается с сильными афтершоками. Длительность затухающего афтершокового процесса ~ 280 сут. Для землетрясения отмечается аномальное распределение воздействия: 1) большая дальность макросейсмических проявлений – землетрясение ощущалось по всему Миру; 2) на территории Камчатки максимальные сотрясения и движения грунта наблюдались в пунктах, расположенных на восточном побережье Камчатки, а на сопоставимых по расстоянию северных и западных более низкие макросейсмические и инструментальные интенсивности. Несмотря на глобальность макросейсмического эффекта, в ближайших населенных пунктах (Камчатский край) землетрясение ощущалось с интенсивностью до 5–6 баллов и не вызвало разрушений. Для землетрясения 24 мая 2013 г. получено большое количество записей о сильных движениях грунта. По записям Камчатской сети цифровых акселерографов получены такие характеристики движения грунта, как пиковые амплитуды, спектры ускорения грунта и спектры реакции.

Ключевые слова: Охотское море, Камчатка, землетрясение, афтершоки, косейсмические подвижки, глобальная макросейсмика.

DOI: 10.35540/1818-6254.2019.22.34

Для цитирования: Чеброва А.Ю., Абубакиров И.Р., Гусев А.А., Дрознина С.Я., Ландер А.В., Митюшкина С.В., Павлов В.М., Салтыков В.А., Титков Н.Н., Чебров Д.В. Охотоморское-III землетрясение 24 мая 2013 г. с $M_{w_{\text{рег}}}=8.3$, $I_0=6$ (Охотское море) // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – С. 377–396. doi: 10.35540/1818-6254.2019.22.34

24 мая 2013 г. в $05^{\text{h}}44^{\text{m}}$ по Гринвичу в акватории Охотского моря, к западу от п-ва Камчатка на глубине $h=630$ км, произошло сильное землетрясение с магнитудой $M_{w_{\text{рег}}}=8.3$ [1] (рис. 1). Это сильнейшее землетрясение, зарегистрированное в районе Камчатки за годы детальных сейсмологических наблюдений (с 1962 г. по настоящее время), и самое сильное в мире землетрясение среди событий сопоставимой глубины. Аналогичное сильнейшее глубокое событие с $M_w=8.2$, $h=647$ км произошло в Боливии 9 июня 1994 г. [2], и оно оказалось несколько слабее, чем Охотоморское.

Этому Охотоморскому землетрясению следует приписать окончание (-III), т.к. уже были описаны ранее более слабые Охотоморское-I и Охотоморское-II землетрясения 5 июля и 24 ноября 2008 г. с $M_w=7.7$ и 7.3 , $h=610$ и 564 км соответственно [3].

По данным КФ ФИЦ ЕГС РАН эпицентр землетрясения 24 мая 2013 г. находился примерно в 370 км к северо-западу от г. Петропавловска-Камчатского. Гипоцентр зафиксирован в камчатской сейсмофокальной зоне на глубине 630 км, что соответствует предельному диапазону глубин

для сейсмических событий. Охотоморское землетрясение 24 мая 2013 г. вызвало глобальный макросейсмический эффект – сотрясения были зафиксированы по всему миру на эпицентральных расстояниях до 16 тыс. км. При этом в Камчатском крае Охотоморское землетрясение из-за большой глубины ощущалось с интенсивностью до 5–6 баллов [4].

Инструментальные данные. Параметры гипоцентра землетрясения 24 мая 2013 г. и его сильнейших афтершоков с $ML^1 \geq 6$ приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры землетрясения 24 мая 2013 г. и его сильнейших афтершоков с $ML \geq 6$

№	Дата, д мес	t_0 , ч мин с	Гипоцентр			$I_{\text{макс}}$, балл	Магнитуда/число станций	Агентство
			φ° N	λ° E	h , км			
Землетрясение 24.05.2013 г. по данным различных сейсмологических агентств								
1	24.05	05 44 47	54.75	153.78	630	6	$ML=7.8/10$, $M_c=7.6/9$ [1]; $M_{w_{\text{per}}}=8.3$ [5]	КФ ФИЦ ЕГС РАН
		05 44 49	54.82	153.39	607	–	$m_b=7.3/525$ [2]	ISC
		05 44 48	54.89	153.22	598	–	$m_b=7.5/727$, $M_{w_{\text{NEIC}}}=8.3$ [6]	NEIC (USGS)
		05 44 48	54.81	153.53	617	–	$MPSP_{\text{MOS}}=7.7/28$ [7]	ФИЦ ЕГС РАН
		05 44 47	54.61	153.77	611	–	$M_{w_{\text{GCMT}}}=8.3$ [8]	GCMT
*Сильнейшие афтершоки землетрясения 24.05.2013 г.								
2	24.05	14 56 29	52.11	151.80	642	3–4	$ML=6.8$ [1]; $M_c=5.8$ [1]; $m_b=6.7$ [6]; $M_{w_{\text{USGS}}}=6.7$ [6]; $m_b=6.8$ [7]; $MPSP_{\text{MOS}}=6.7$ [7]; $M_{w_{\text{GCMT}}}=6.7$ [8]	
3	01.10	03 38 19	52.88	153.34	608	3	$ML=6.9$ [1]; $M_c=6.1$ [1]; $m_b=6.1$ [6]; $M_{w_{\text{NEIC}}}=6.7$ [6]; $MPSP_{\text{MOS}}=6.6$ [7]; $M_{w_{\text{GCMT}}}=6.7$ [8]	

Примечание. * – параметры гипоцентров афтершоков землетрясения 24 мая 2013 г. представлены по данным каталога землетрясений Камчатки и Командорских островов [1].

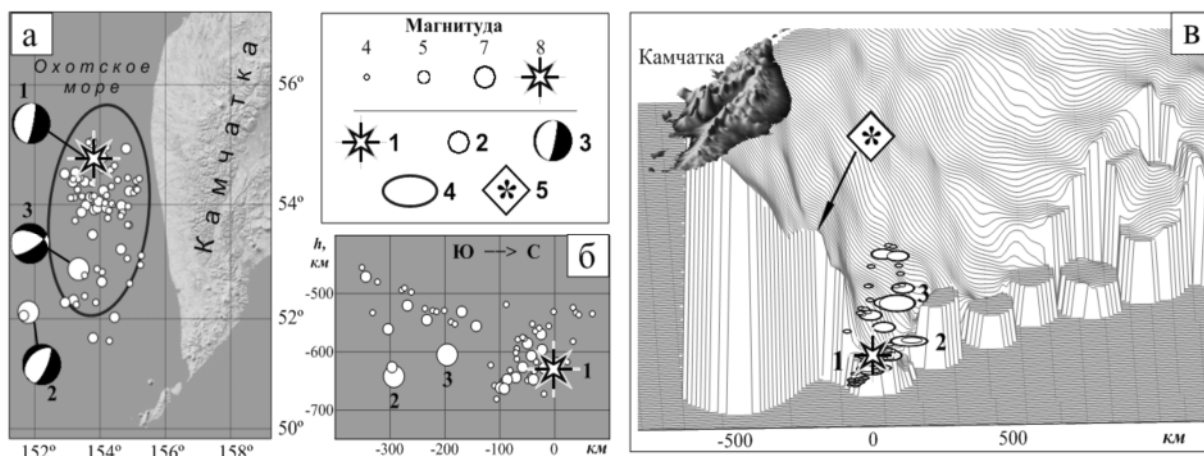


Рис. 1. Землетрясение 24 мая 2013 г. и его афтершоки с $ML \geq 4.0$, зафиксированные в течение шести месяцев после основного толчка, по данным регионального каталога землетрясений КФ ФИЦ ЕГС РАН [1]: а – эпицентры землетрясений; б – проекция гипоцентров на меридиональный вертикальный разрез, в – проекция на рельефную модель Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны, вид с севера [11] (Нумерация землетрясений соответствует табл. 1)

1 – эпицентр землетрясения 24 мая 2013 г.; 2 – афтершок; 3 – стереограмма механизма очага землетрясения по GCMT [8]; 4 – эллипс аппроксимации зоны афтершоков, построен по данным первого месяца после землетрясения и содержит 90 % афтершоков; 5 – область, в которой происходит скачок максимальной глубины землетрясения с ≈ 650 км до ≈ 350 км

Положение эпицентра Охотоморского-III землетрясения по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН имеет смещение на восток на 15–40 км, относительно данных мировых сейсмологических агентств (NEIC/USGS) [6], ФИЦ ЕГС РАН (г. Обнинск) [7], ISC [2], глубина получилась на 20–30 км больше. В действительности, локация событий, расположенных под Охотским морем,

¹ Здесь и далее $ML=(K_S-1.5)/2$ [9], где $K_S=\lg(E, Дж)$ [10]

по данным камчатской сети сейсмических станций довольно неустойчива в связи с одностронним расположением сети станций, их значительным удалением от эпицентров, а также особенностями распространения сейсмических волн по волноводу сейсмофокальной зоны. Наблюдаемое смещение камчатских эпицентров относительно мировых типично, но находится в пределах допустимого [12]. В каталоге [1] инструментальный гипоцентр землетрясения определен по 66 фазам P -волн и 13 фазам S -волн, зарегистрированных станциями региональных сетей Камчатского и Сахалинского филиалов ФИЦ ЕГС РАН и мировой сети IRIS.

Для описываемого землетрясения в КФ ФИЦ ЕГС РАН были определены три магнитуды: 1) локальная магнитуда $ML=7.8$ – получена путем пересчета [9] из энергетического класса по S -волне, определяемого по номограмме С.А. Федотова [10]; 2) магнитуда по кода-волнам $M_c=7.6$ – оценена по девяти станциям согласно методике, изложенной в работе [13]; 3) моментная магнитуда $M_{w\text{пер}}=8.3$ – получена в результате расчета тензора сейсмического момента по методике [14]. Значение $M_{w\text{пер}}$ совпало с $M_{w\text{GCMT}}=8.3$ по данным каталога Global CMT [8], которому традиционно отдается предпочтение при оценках магнитуд сильных землетрясений. Значения локальной магнитуды и магнитуды по коде несколько ниже.

Следует отметить, что Охотоморское-III землетрясение произошло на фоне высокой сейсмической активности Камчатского региона. 24 мая станциями региональной сети одновременно регистрировались афтершоки Охотоморского землетрясения и роевая последовательность событий напротив Авачинского залива, начало которой зафиксировано 18 мая [1].

Тектоническая позиция очага Охотоморского-III землетрясения связана с неоднородностью строения погружающейся Тихоокеанской плиты. Курило-Камчатская зона субдукции разделяется по простиранию на два сегмента: Курило-Южно-Камчатский и Северо-Камчатский. Граница между ними проходит в районе Авачинского залива и далее по падению погружающейся Тихоокеанской плиты [15]. На этой границе наблюдается резкое изменение максимальной глубины землетрясений приблизительно на 300 км. Наблюдаемые сейсмофокальные зоны достигают в южном сегменте 650–700 км, а в северном только 350–400 км (рис. 2).

Геологические данные указывают на различие в возрасте возникновения современных зон субдукции на этих двух сегментах [16, 17]. Предполагается, что в процессе пододвигания Тихоокеанской плиты во временном интервале от 10 до 2 млн. лет назад к Камчатке причленилось несколько террейнов, ныне сохранившихся на ее восточном побережье как крупные полуострова. В результате на северном сегменте, где произошло столкновение с террейнами, древняя зона субдукции была блокирована, а восточнее полуостровов образовалась новая, современная. Параллельно на древнем южном сегменте субдукция продолжается без существенных изменений вплоть до настоящего времени. Молодой северный участок слэба за время своего существования еще не успел погрузиться до максимальных глубин, на которых наблюдаются землетрясения. Это объясняет существование резкого уступа в рельефе сейсмофокальной зоны, который отчетливо виден на переднем плане (под Камчаткой) на рис. 1 в [11].

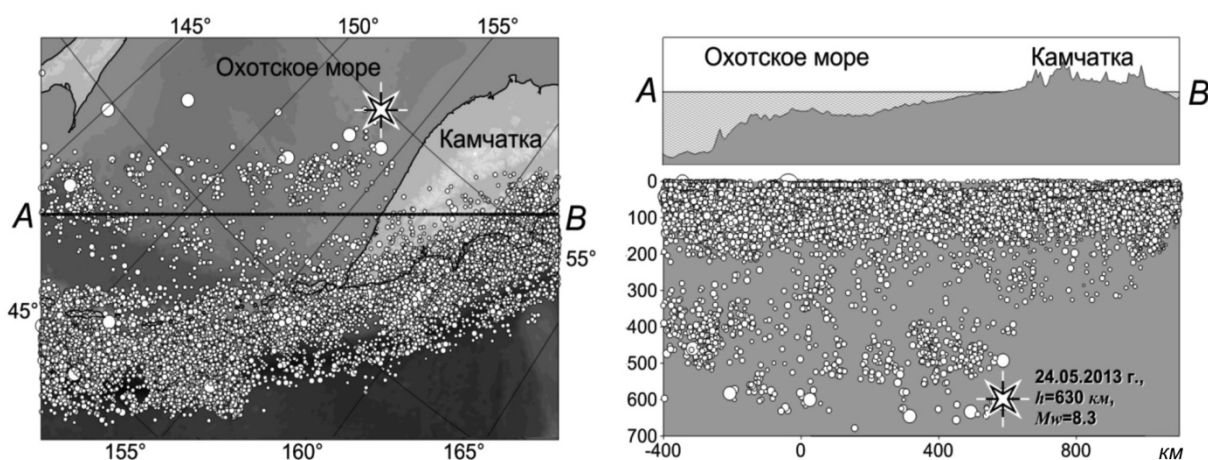


Рис. 2. Схема расположения эпицентров землетрясения 24 мая 2013 г. и событий сейсмофокальной зоны с 1962 г. по август 2013 г. по данным каталога NEIC (USGS) [6] и проекция их гипоцентров на вертикальную плоскость, проходящую через линию А–В

Согласно описанной тектонической модели, гипоцентр Охотоморского-III землетрясения располагается на северном краю древнего слэба, практически у нижнего окончания его сейсмогенной области. Дальше на север на глубине гипоцентра погружающаяся плита отсутствует. Судя по тому, что облако афтершоков протянулось лишь в южную сторону от главного гипоцентра (рис. 1), разрыв, породивший землетрясение, возник на краю погружающейся плиты и распространился внутрь нее более чем на 300 км.

Данные сети GNSS наблюдений. Косейсмические подвижки от землетрясения 24 мая 2013 г. зарегистрированы на большинстве пунктов постоянных GNSS (Global Navigation Satellite Systems) наблюдений сетей КФ ФИЦ ЕГС РАН и институтов Дальневосточного отделения РАН (рис. 3). В табл. 2 приведены их координаты и косейсмические подвижки, найденные по разности в момент землетрясения ординат концов прямых линейной регрессии 14-суточных серий наблюдений до и после события. Постобработка наблюдений осуществлялась пакетом GAMIT/GLOBK в режиме «BASELINE» [18, 19]. Координаты станций определялись в условной отчетной основе, заданной по 207 опорным пунктам глобальной сети IGS (International GNSS Service).

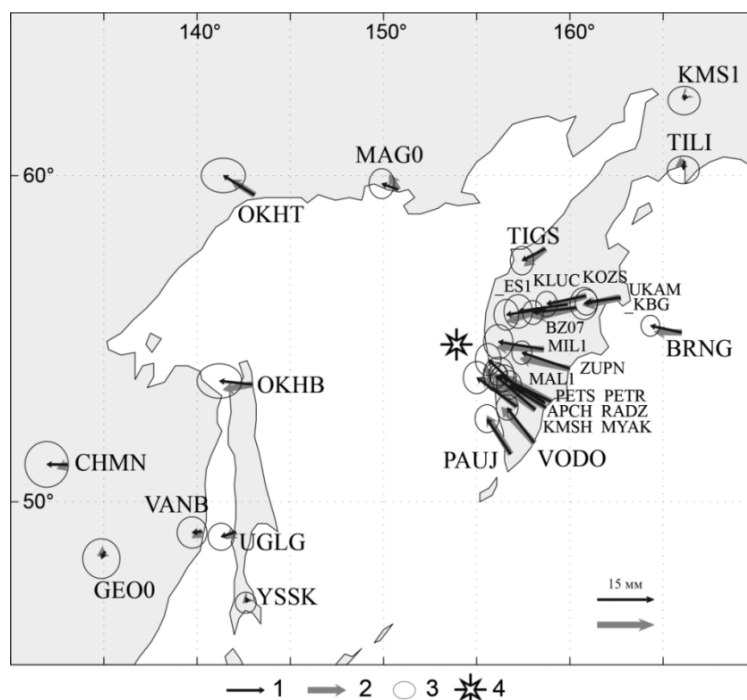


Рис. 3. Горизонтальные косейсмические смещения на дальневосточных пунктах сети GNSS наблюдений во время землетрясения 24 мая 2013 г. с $M_{w_{\text{пер}}}=8.3$ (величины и направления подвижек показаны с эллипсами среднеквадратических отклонений)

1 – наблюдаемый скачок смещений (вектор, касательный к земному шару, в соответствии с табл. 2); 2 – расчетный скачок; 3 – эллипс ошибок; 4 – эпицентр землетрясения 24 мая 2013 г. $M_{w_{\text{пер}}}=8.3$.

Таблица 2. Координаты станций GNSS, косейсмические смещения от Охотоморского-III землетрясения 24 мая 2013 г. и их ошибки

Код	φ°, N	λ°, E	$H, м$	$U_N, мм$	$U_E, мм$	$U_Z, мм$	$\sigma_N, мм$	$\sigma_E, мм$	$\sigma_Z, мм$
APCH	52.93	157.13	141.7	7.7	-10.6	-18.5	4.3	3.6	14.6
BRNG	55.19	165.98	28.5	1.8	-8.3	-1.8	2.8	2.5	8.6
BZ07	55.95	160.34	1497.3	-1.3	-11.6	-11.6	3.2	2.8	8.6
CHMN	51.14	133.04	499.5	0.1	-5.5	0.2	6.1	5.8	19.2
GEO0	48.47	135.05	98.9	-1.9	-0.9	1.0	5.3	5.0	15.6
KLUC	56.32	160.86	66.8	-2.2	-10.5	-8.8	3.4	2.9	9.2
KMS1	62.47	166.21	55.0	-1.4	-0.4	3.1	3.8	4.3	10.8
KMSH	52.83	158.13	128.4	9.1	-10.6	-18.0	3.5	3.1	12.2
KOZS	56.06	159.87	67.6	-1.9	-13.2	-19.3	4.5	3.8	15.5

Код	φ°, N	λ°, E	H, m	$U_N, мм$	$U_E, мм$	$U_Z, мм$	$\sigma_N, мм$	$\sigma_E, мм$	$\sigma_Z, мм$
MAG0	59.58	150.77	361.8	1.6	-4.3	-0.1	4.0	3.4	9.5
MAL1	53.33	157.54	295.4	9.0	-9.6	-21.2	4.3	3.4	16.3
MIL1	54.68	158.58	191.1	2.0	-12.1	-22.2	4.6	3.9	15.9
MYAK	52.89	158.71	145.9	6.0	-9.8	-18.7	3.8	3.3	12.0
OKNB	53.60	142.95	47.4	0.9	-8.7	6.9	4.6	6.0	13.2
OKHT	59.41	143.07	29.9	5.2	-8.3	-3.3	4.6	5.9	12.8
PAUJ	51.47	156.82	131.3	9.4	-6.3	-19.5	3.7	3.2	10.4
PETR	53.07	158.61	210.8	7.2	-12.1	-17.9	4.7	4.1	13.0
PETS	53.02	158.65	102.0	7.6	-12.4	-15.9	2.9	2.5	9.5
RADZ	53.07	158.99	41.4	6.2	-12.7	-17.9	3.6	3.4	9.6
TIGS	57.76	158.67	145.7	-3.2	-6.2	-10.3	3.8	3.1	21.5
TILI	60.45	166.15	34.7	-2.3	-0.3	3.6	3.7	4.3	9.5
UGLG	49.08	142.06	49.8	-1.3	-3.9	0.7	3.6	3.5	10.5
UKAM	56.26	162.59	32.4	-1.6	-9.2	-9.0	4.3	3.7	12.1
VANB	49.09	140.25	113.5	-0.3	-2.6	5.7	4.2	4.0	11.3
VODO	51.81	158.08	49.7	9.4	-7.2	-14.4	3.4	2.9	12.6
YSSK	47.03	142.72	91.3	-1.1	-0.5	2.0	2.8	2.8	8.3
ZUPN	54.08	159.99	48.8	4.3	-12.8	-15.6	3.1	2.7	8.4
_ES1	55.93	158.70	518.5	-1.7	-10.5	-14.4	4.1	3.3	14.3
_KBG	56.26	162.71	32.4	-1.2	-9.1	-5.0	3.4	3.0	9.1

Примечание. H – превышение над референц-эллипсоидом WGS84. U_N, U_E, U_Z – скачки смещений компонент SN, EW, Z, соответственно; $\sigma_N, \sigma_E, \sigma_Z$ – ошибки измерения (среднеквадратические отклонения).

Механизм очага Охотоморского-III землетрясения 24 мая 2013 г. был получен в КФ ФИЦ ЕГС РАН с использованием трех типов исходных данных: 1 – знаки первых вступлений P -волн (№ 1 в табл. 3); 2 – статические смещения: косейсмические скачки на пунктах GNSS (№ 2 в табл. 3); 3 – региональные широкополосные волновые формы (№ 3 в табл. 3). Расчет по статическим смещениям и волновым формам проводился независимо путем инверсии каждого типа данных в тензор сейсмического момента. Результаты, полученные КФ ФИЦ ЕГС РАН, сравниваются с механизмом, полученным в каталоге GCMT (№ 4 в табл. 3).

Таблица 3. Параметры механизмов очагов Охотоморского-III землетрясения 24 мая 2013 г. по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН и Global CMT

№	Агентство	$t_0, ч мин с$	$h, км$	$M_0, 10^{21} Н·м$	M_w	$\tau, с$	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости						Источник	Стереодиаграмма
							T		N		P		$NP1$			$NP2$				
							PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	$SLIP$	STK	DP	$SLIP$		
1	KRSC	05 44 47	630				9	156	2	66	81	325	65	54	-92	248	36	-87	[20]	
2	GNSS		611	4.17	8.3		38	118	5	23	52	286	240	9	-53	24	83	-95	[21]	
3	KRSC		640	4.08	8.3	32	37	105	1	196	53	287	188	8	-98	16	82	-89	[5, 21]	
4	GCMT	05 45 08	611	3.95	8.3	71	34	102	1	192	56	283	189	11	-93	12	79	-89	[8]	

При получении механизма очага Охотоморского-III землетрясения 2013 г. по знакам первых вступлений P -волн в качестве исходных данных использовались знаки на 56 региональных станциях КФ ФИЦ ЕГС РАН и на 288 станциях мировых сетей, расчет производился по программе FA [22, 23]. На 57 станциях зарегистрированы волны сжатия (знаки плюс), на 287 станциях – разрежения (знаки минус). Станции расположены в интервале эпицентральных расстояний 3–79° и обеспечивают полный азимутальный охват.

При оценке механизма по статическим смещениям [21] использовались данные с сетей постоянных GNSS-наблюдений КФ ФИЦ ЕГС РАН, а также сетей институтов Дальневосточного отделения РАН [24]. Поскольку землетрясение вызвало подвижки на большинстве дальневосточных пунктов, была выполнена привязка пунктов наблюдений к опорным пунктам глобальной

сети IGS (International GNSS Service). Расчет функций влияния для решения задачи в статическом случае проводился для слоистого шара на основе оригинального алгоритма В.М. Павлова [25].

При расчете механизма методом инверсии волновых форм [14] использовались широкополосные записи на региональных сейсмических станциях в диапазоне расстояний 8–25° [21]. К обработке привлекались материалы регистрации четырех сейсмических сетей: глобальной сейсмической сети GSN; японской сети F-net; региональной сети Аляски (Alaska Regional Network) и Китайской национальной сейсмической сети (China National Seismic Network). Кроме того, использовались записи опорных станций Службы предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России и Центра предупреждения о цунами Западного побережья США и Аляски (West Coast & Alaska Tsunami Warning Center). Для инверсии при расчете тензора сейсмического момента привлекались записи станций с низкочастотным изломом передаточной функции по скорости на частотах не более 8.33 мГц (период не менее 120 с). Это позволяет восстановить длиннопериодные истинные смещения грунта с высоким отношением сигнал/шум. Функции влияния рассчитывались в слоистом полупространстве с использованием методики, описанной в работе [26].

В GCMT при расчетах используются широкополосные сейсмограммы при эпицентральных расстояниях от ~30° до ~90°. В данном случае использовались объемные волны (с периодами >50 с) и поверхностные мантийные волны (с периодами >200 с). В расчетах используется сферическая модель Земли.

Метод инверсии волновых форм считается наиболее точным при получении механизмов очагов землетрясения. Механизмы очагов землетрясений № 3 и № 4 из табл. 3, полученные таким образом в КФ ФИЦ ЕГС РАН и GCMT, хорошо согласуются между собой.

Оценки механизмов землетрясения 24 мая 2013 г. в 05^h44^m с $M_{w,per}=8.3$ и его афтершоков (рис. 1), произведенные различными методами (табл. 3), показывают схожие решения, одно из которых соответствует полого падающей плоскости, ориентированной в субмеридиональном направлении.

Афтершоки. Афтершоковая последовательность после главного толчка была выделена из каталога [1] оконным методом. Пространственная область определена по 60 афтершокам первого месяца с координатами в диапазоне 51.6°–55.1°N и 151.6°–155.3°E и с магнитудой $ML > 4.1$. Глубина землетрясений выборки $h > 400$ км. Анализ афтершоков проведен с использованием региональной оценки локальной магнитуды $ML = (K_S - 1.5)/2$ [9], где $K_S = \lg(E, Дж)$ – энергетический класс С.А. Федотова [10], E – выделившаяся сейсмическая энергия.

На рис. 1 облако эпицентров околонуно эллипсом рассеяния, содержащим 90 % событий, что позволяет формально оценить размер очага землетрясения 24 мая 2013 г. по афтершокам: длина $L_1 \sim 400$ км, ширина $L_2 \sim 200$ км. Азимут большей оси эллипса $Az \sim 6^\circ$.

Для анализа временных особенностей афтершокового процесса рассмотрена эллиптическая область большего размера: длина $L_1 \sim 680$ км, ширина $L_2 \sim 340$ км. Азимут большей оси эллипса $Az \sim 6^\circ$, координаты центра эллипса: $\varphi = 53.86^\circ N$, $\lambda = 153.96^\circ E$. Соответствующая выборка землетрясений за 5 лет (24 мая 2013 г. – 24 мая 2018 г.) включила ~200 землетрясений в диапазоне магнитуд $ML = 3.4$ – 6.9 с глубиной $h > 325$ км. Все дальнейшие оценки получены для этой выборки. Представительность $ML_{min} = 4.1$ соответствует выборке в целом (рис. 4). Но учитывая, что в течение некоторого, априори не определенного, времени после сильного землетрясения представительность каталога афтершоков по техническим причинам ухудшается, оценка представительности ML_{min} по кумулятивному графику повторяемости может оказаться некорректной. Вариации значений ML_{min} были рассчитаны с использованием подходов, изложенных в [27, 28]. На рис. 5 представлен временной ход ML_{min} . Характерное ухудшение представительности каталога непосредственно после основного события наблюдалось в течение ~80 мин (0.057 сут), а в последующее время представительность была не хуже величины $ML_{min} = 4.0$. Эта величина и была использована в качестве нижнего порога магнитуды для используемой выборки.

Рис. 6 дает представление о произошедших землетрясениях и выделившейся энергии в течение первых девяти месяцев после главного толчка. Выделившаяся при афтершоковом процессе сейсмическая энергия $\Sigma E = 2.6 \cdot 10^{15}$ Дж на 99 % была обеспечена двумя афтершоками – 24 мая в 14^h56^m с $M_{w,GCMT} = 6.7$ и 1 октября в 03^h38^m с $M_{w,GCMT} = 6.7$, что составило относительно энергии главного толчка только 2.5 %.

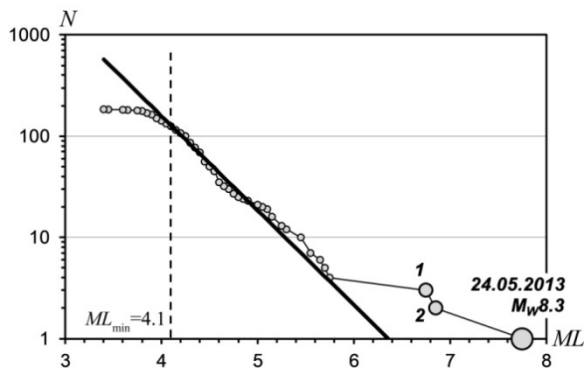


Рис. 4. Кумулятивный график Гутенберга-Рихтера для афтершоковой последовательности землетрясения 24 мая 2013 г. $M_{w\text{per}}=8.3$

Аппроксимация линейной части графика представлена сплошной прямой. Пунктирная линия отмечает оценку представительности каталога $ML_{\text{min}}=4.1$ с уровнем статистической значимости $\alpha=0.3$. Цифрами отмечены наиболее сильные землетрясения: 1 – 24 мая, $14^{\text{h}}56^{\text{m}}$, $M_{w\text{GCMT}}=6.7$; 2 – 1 октября, $3^{\text{h}}38^{\text{m}}$, $M_{w\text{GCMT}}=6.7$.

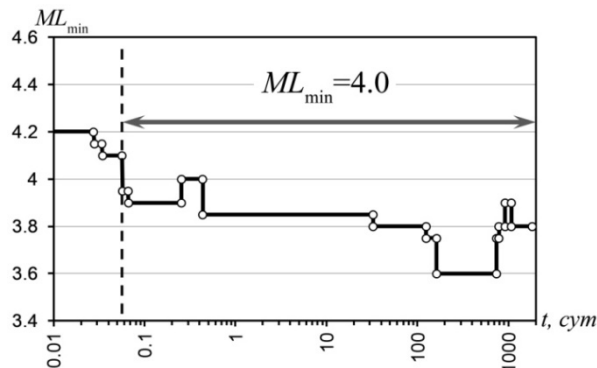


Рис. 5. Временной ход представительности каталога афтершоков ML_{min}

За начало отсчета взято время t_0 землетрясения 24 мая 2013 г. $M_{w\text{per}}=8.3$. Значения получены в скользящем окне, содержащем 25 событий представительной магнитуды. Статистическая значимость оценки составляет $\alpha=0.3$. Пунктиром отмечено время, начиная с которого представительность каталога не хуже $ML_{\text{min}}=4.0$.

Невязки определения координат афтершоков составляют для эпицентров $\sim 57 \pm 17$ км, для глубины $\sim 29 \pm 9$ км (погрешность соответствует среднеквадратичному отклонению), что делает анализ пространственного распределения афтершоков неперспективным.

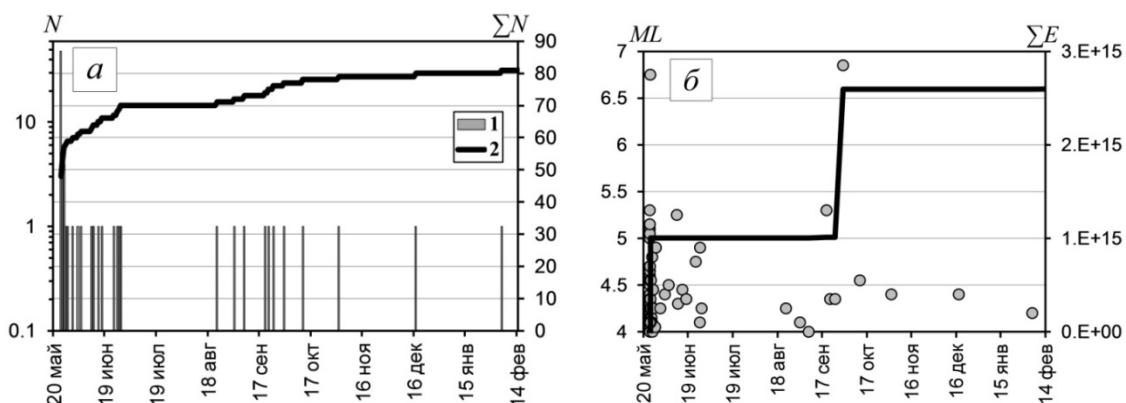


Рис. 6. Временной ход афтершоков Охотоморского-III землетрясения с $ML \geq 4.0$ за 9 месяцев (24 мая 2013 г. – 14 февраля 2014 г.) а – число афтершоков в сутки N и кумулятивный график числа афтершоков ΣN ; б – кумулятивный график сейсмической энергии (сплошная линия), выделившейся при афтершоках с показанной магнитудой (кружки)

1 – ежесуточное число землетрясений; 2 – кумулятивное число землетрясений.

На рис. 7 а представлен временной ход афтершокового процесса в виде кумулятивного графика числа землетрясений в билогарифмическом масштабе. В целом график не противоречит обычно наблюдаемой картине: интенсивность афтершоковой последовательности убывает со временем. Более детальное рассмотрение временного хода афтершоков позволило выделить в нем несколько характерных фаз (рис. 7 б). Характер спада интенсивности афтершоков определяется кривыми соответствующего типа.

Начальный участок каталога продолжительностью 80 мин., включающий 11 землетрясений, не анализировался в связи с отмеченной выше изменчивостью его представительности.

Первая фаза. Затухающий афтершоковый процесс в соответствии со степенным законом убывания афтершоков (закон Омори) $dN/dt = A/t^p$. К первой фазе относится 37 землетрясений. $A=25$, $p=0.76$. Длительность фазы – ~ 12 ч. (24 мая 2013 г., $7^{\text{h}}-19^{\text{h}}$, время относительно главного толчка $t=1.4-13$ ч).

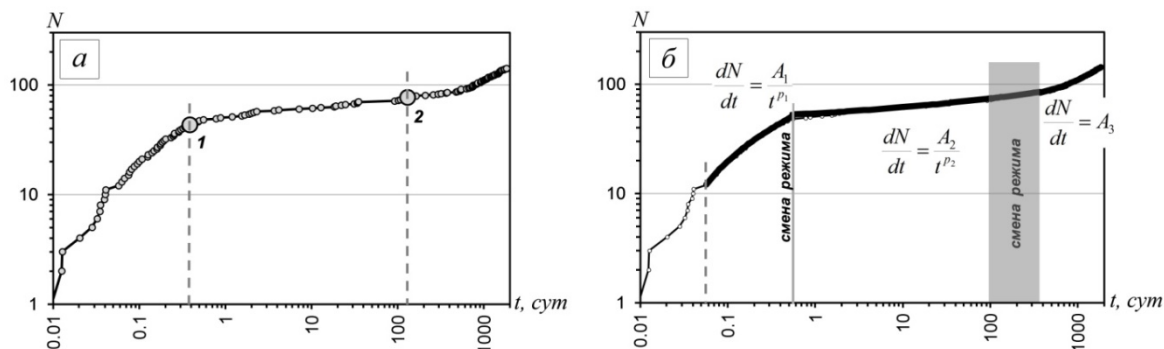


Рис. 7. Кумулятивные кривые числа афтершоков (а) и характерные фазы развития во времени афтершокового процесса (б) Охотоморского-III землетрясения с $M_{w_{пер}}=8.3$

За начало отсчета взято время t_0 основного события – 24 мая 2013 г. $5^{\text{h}}44^{\text{m}}47^{\text{s}}$. На рис. 7 а отмечены наиболее сильные землетрясения (1 – 24 мая 2013 г. в $14^{\text{h}}56^{\text{m}}$, $M_{w_{ГСМТ}}=6.7$; 2 – 1 октября 2013 г. в $03^{\text{h}}38^{\text{m}}$, $M_{w_{ГСМТ}}=6.7$). На рис. 7 б отмечены временные границы фаз и закон убывания афтершоков. Вертикальный пунктир обозначает завершение начального режима с низкой представительностью.

В целях сопоставления характеристик афтершоковых последовательностей различных сильных землетрясений необходимо привести значение интенсивности A к некоторому уровню магнитуд, не связанному с представительностью конкретной последовательности, но единому для всего каталога. Для определенности предлагается использовать $A_{M3.5}$, соответствующую магнитуде $M=3.5$. Пересчет значения A делается на основе закона Гутенберга-Рихтера с учетом величины наклона графика повторяемости b : $A_{M3.5}=A \cdot 10^{-b(3.5-M)}$, что дает $A_{M3.5}=75$ при $b=0.94$.

Обращает на себя внимание факт возникновения на завершении этой фазы афтершокового процесса сильнейшего афтершока 24 мая 2013 г. в $14^{\text{h}}56^{\text{m}}$ с $M_{w_{ГСМТ}}=6.7$ ($t=9.2$ ч.). Следует отметить, что это землетрясение произошло за пределами определенного выше контура очага землетрясения $M_{w_{пер}}=8.3$.

Вторая фаза имеет длительность ~ 370 сут (с 19^{h} 24 мая 2013 г. по 1 июня 2014 г., $t=13$ ч – 370 сут) и включает 37 землетрясений. Здесь афтершоковый процесс также определяется законом Омори $dN/dt = A/t^p$ с показателем $p=0.78$. Для этого участка $A=2.5$, что соответствует приведенному значению $A_{M3.5}=7.4$. По сравнению с первой фазой величина параметра A уменьшилась на порядок, причем очень быстро – соответствующий излом кумулятивного графика числа афтершоков (рис. 7) очевиден и без дополнительных расчетов. Такое резкое изменение афтершокового режима может быть связано с упомянутым выше афтершоком 24 мая 2013 г. в $14^{\text{h}}56^{\text{m}}$ с $M_{w_{ГСМТ}}=6.7$ ($t=9.2$ ч.), достаточно сильным, чтобы привести к изменению напряженного состояния среды. При этом параметр p изменился незначительно.

Третья, самая продолжительная, фаза соответствует сейсмическому процессу с постоянной скоростью потока афтершоков $dN/dt = A$, где $A=0.041$, $A_{M3.5}=0.121$. Ее начало определяется как 23 августа 2013 г. ($t \approx 90$ сут). За это время произошло ~ 70 землетрясений.

Полученное перекрытие второй и третьей фазы на участке $t=90-370$ сут интерпретируется как переходный процесс – смена типа сейсмического режима. В отличие от предыдущего случая здесь один режим сменяется другим плавно, без резких границ, что и привело к достаточно продолжительному временному интервалу. Второй сильнейший афтершок 1 октября 2013 г. в $03^{\text{h}}38^{\text{m}}$ с $M_{w_{ГСМТ}}=6.7$ ($t=130$ сут) произошел в этом интервале.

Наличие продолжительного временного интервала (третья фаза), когда поток землетрясений имеет стабильную скорость, интерпретируется как прекращение афтершокового режима и переход сейсмичности в фоновое состояние. Однако, учитывая размытую смену фаз, продолжительность афтершоковой последовательности была оценена по времени $\Delta T_{\text{афт}}=280$ сут (рис. 8), когда интенсивность афтершоков снизилась до уровня фоновой сейсмичности. Поток афтершоков за пределами определенной выше второй (соответствующей закону Омори) фазы оценивался как ее экстраполяция $N_{\text{омори}}$. Такой подход оправдан линейным характером рассогласования ΔN реального потока землетрясений N и $N_{\text{омори}}$, которое рассматривается как эффект фоновой сейсмичности с интенсивностью 0.031 землетрясений в сутки. Эта величина соответствует определенной для 2001–2011 гг. фоновой интенсивности сейсмического потока $0.035-0.057$ сут $^{-1}$.

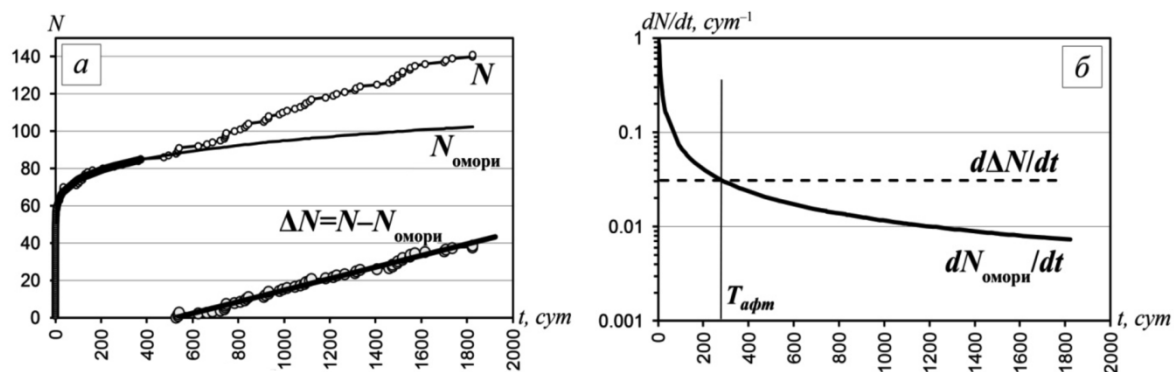


Рис. 8. Оценка продолжительности афтершоковой последовательности $\Delta T_{\text{афт}}$: а – временной ход числа афтершоков N , оценки афтершоков, соответствующих степенному убыванию $N_{\text{омори}}$, и их рассогласование ΔN , б – временной ход скорости сейсмического потока, определяемого экстраполируемой степенной зависимостью (сплошная линия), и оценка постоянного фонового уровня (пунктирная линия). Вертикальная линия отмечает длительность афтершоковой последовательности $\Delta T_{\text{афт}}$

Обобщим основные характеристики афтершокового процесса Охотоморского-III землетрясения 24 мая 2013 г. с $M_{w\text{пер}}=8.3$.

Облако глубокофокусных афтершоков имеет размеры 400×200 км с диапазоном глубин 450–700 км и вытянуто в направлении север-юг. Афтершоковый процесс носит трехфазовый характер и может рассматриваться как убывающий во времени поток сейсмических событий с тремя последовательными стадиями, имеющими разный характер затухания. Смена режимов затухания связывается с сильными афтершоками. Длительность затухающего афтершокового процесса $\Delta T_{\text{афт}} \sim 280$ сут.

Определены численные значения параметров, характеризующих афтершоковый процесс, они обобщены в табл. 4. Для сопоставления с афтершоковыми процессами других сильных землетрясений введен параметр $A_{M3.5}$ – интенсивность потока афтершоков, приведенная к единому магнитудному порогу $ML=3.5$.

Таблица 4. Параметры афтершоковой последовательности Охотоморского-III землетрясения 24 мая 2013 г. с $M_w=8.3$

Параметры главного события	Эллипс рассеяния афтершоков	Стадии афтершокового процесса и их параметры	Длительность ΔT , сут	Комментарии, особенности
$\varphi=54.75^\circ\text{N}$; $\lambda=153.78^\circ\text{E}$; $h=630$ км; $K_S=17.0$, $M_L=7.8$, $M_{w\text{пер}}=8.3$	$\varphi=53.86^\circ\text{N}$; $\lambda=153.96^\circ\text{E}$, $L_1=400$ км; $L_2=200$ км; $A_z=6^\circ$	Неустановившийся режим $\Delta t_0 \sim 80$ мин (0.057 сут), $N_0=11$ Закон Омори, $p=0.76$, $A=25$, $A_{M3.5}=75$, $\Delta t_1 \sim 12$ час ≈ 0.5 сут, $N_1=37$ Закон Омори, $p=0.78$, $A=2.5$, $A_{M3.5}=7.4$, $\Delta t_2 \sim 370$ сут, $N_2=37$	$\Delta T \sim 280$ (время выхода интенсивности афтершоков на уровень фоновой сейсмичности)	Представительность каталога афтершоков $ML_{\text{мин}}=4.0$ Смена фаз связывается с сильнейшим афтершоком

Примечание. N_i – количество событий на i стадии афтершокового процесса продолжительностью Δt_i .

Макросейсмические проявления Охотоморского-III землетрясения собраны для 221 населенного пункта. Из различных источников обработано 626 сообщений, из них через интернет-опросник (<http://www.emsd.ru/Isopool/poll.php>) поступило 90 сообщений из 29 пунктов.

Охотоморское-III землетрясение 24 мая 2013 г. имело огромную площадь макросейсмического воздействия, при этом из-за большой глубины оно нигде не имело катастрофических проявлений. Максимальная интенсивность сотрясений по шкале MSK-64 [29] зафиксирована до 6 баллов в ГМС «Семячки» и на кордоне Долины Гейзеров (Камчатка). Населенные пункты, для которых собраны данные о сотрясениях, расположены на эпицентральной расстоянии от 119 до 16073 км. В северном полушарии Земли на значительной части Евразии и Северной Америки его проявление зафиксировано в России, Казахстане, Киргизии, Японии, Китае, Индии, Объединенных Арабских Эмиратах, Саудовской Аравии, Польше, Финляндии, Италии,

Эстонии, Канаде, США, Мексике и Малайзии; в южном полушарии – в Индонезии на о-ве Ява, Бразилии и Австралии.

Перечень населенных пунктов с указанием расстояния от эпицентра (Δ) и макросейсмической интенсивности (I) в них приведен в Приложении [30]. Описание проявлений землетрясения в пунктах дано в Приложении [31–34].

На территории Камчатского края макросейсмические сведения были собраны из 64 населенных пунктов, в 50 из которых землетрясение ощущалось с интенсивностью от 2 до 6 баллов (рис. 9 а). В ближайшем к эпицентру пункте, пос. Крутогоровский (№ 1 в [30]), и других населенных пунктах западного побережья Камчатского полуострова землетрясение ощущалось с интенсивностью не более 4 баллов (за исключением пос. Октябрьский, $I=5$ баллов, № 8 в [30]). Сотрясения наибольшей интенсивности были отмечены в пунктах восточного побережья: $I=6$ баллов на ГМС Семячки и в Долине Гейзеров (№№ 36 и 39 в [30]), $I=5-6$ баллов на маяке Круглом (№ 41 в [30]). Таким образом, наблюдается смещение максимальной интенсивности сотрясений в пункты, наиболее близко расположенные к глубоководному Курило-Камчатскому желобу. Подобная особенность глубоких землетрясений характерна для островных дуг, и впервые была замечена еще в начале XX в. для событий сейсмофокальной зоны в Японии [35]. По мере накопления данных был сделан вывод, что это явление обеспечивается крупными неоднородностями среды в районах островных дуг.

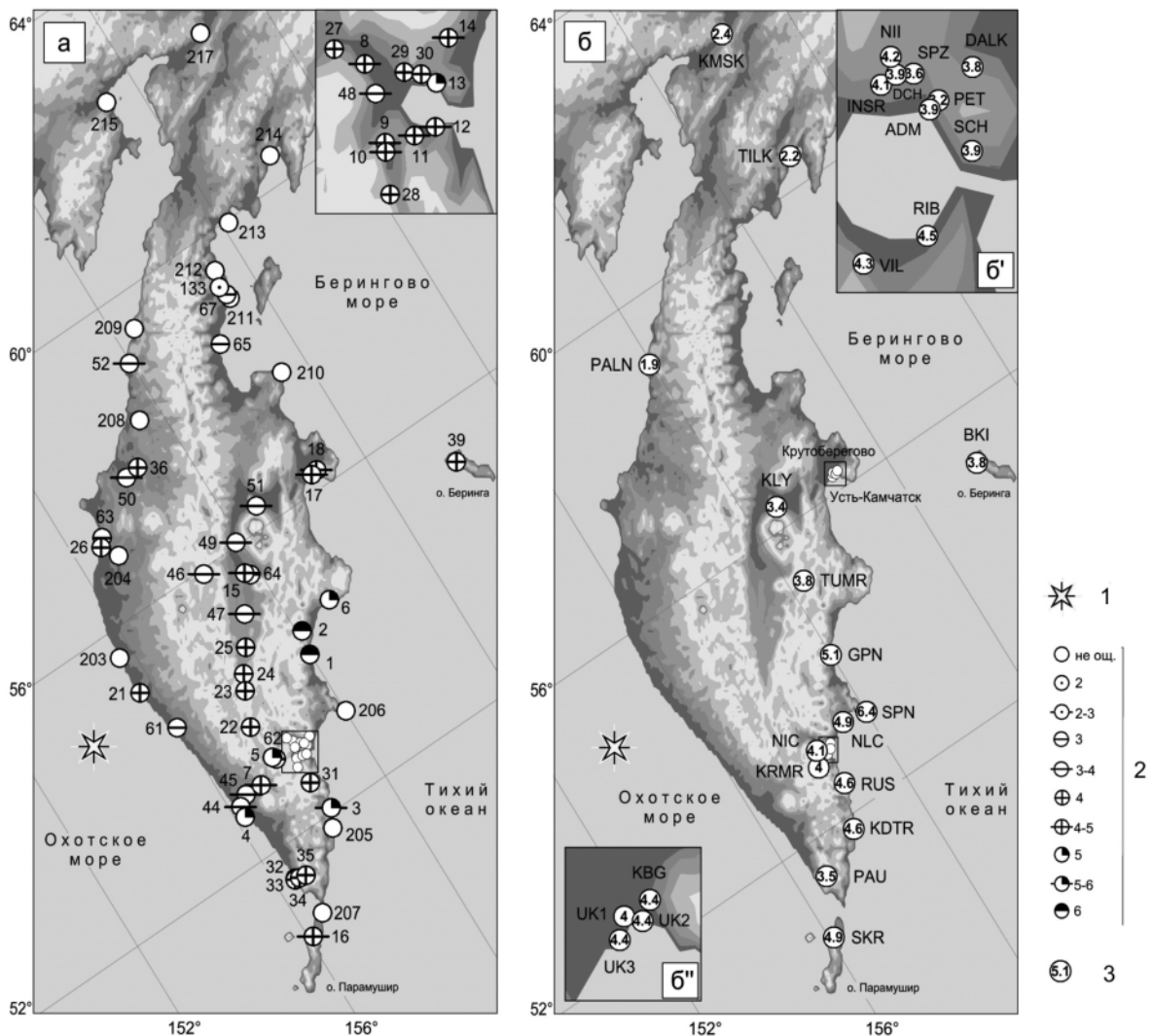


Рис. 9. Карта макросейсмического проявления (а) и распределения инструментальной интенсивности (б) Охотоморского-III землетрясения 24 мая 2013 г. на территории Камчатского края и Северных Курил

1 – эпицентр землетрясения 24 мая 2013 г. $M_{w, \text{epi}}=8.3$; 2 – интенсивность сотрясения в баллах по шкале MSK-64; 3 – инструментальная интенсивность I_a , рассчитанная по формуле (1) из значений пикового ускорения грунта на сейсмических станциях. Нумерация пунктов на карте (а) дана согласно [30].

Макросейсмические сведения о проявлениях Охотоморского землетрясения за пределами Камчатки собирались из различных новостных сайтов и других ресурсов Интернета. Кроме того, были направлены официальные запросы с просьбой сообщить имеющуюся информацию о проявлениях этого землетрясения в МЧС России, во все филиалы Геофизической службы РАН и Геофизической службы Сибирского отделения РАН, Институт физики Земли, Уральский Горный институт и ряд других научных учреждений в различных регионах России. Были отправлены письма коллегам-сейсмологам из Азербайджана, Киргизии, Узбекистана, Беларуси, Молдовы, Финляндии, в Казахстанский национальный центр данных, в Геологическую службу США (USGS).

Ответы пришли на 17 из 29 отправленных запросов. Наиболее подробные сведения прислали А.Д. Завьялов (ИФЗ РАН) [32], Е.П. Семёнова (Сахалинский филиал ГС РАН) [31], Л.И. Карпенко (Магаданский филиал ГС РАН) [33], Р.А. Дягилев (Горный институт УрО РАН, г. Пермь) [34]. Они провели специальную работу по сбору информации о проявлениях Охотоморского землетрясения в районе их проживания. Н.А. Гилёва из Байкальского филиала ГС СО РАН, Päivi Mäntyniemi из Института сейсмологии Университета Хельсинки и D.J. Wald из Геологической службы США любезно предоставили тексты анкет своих макросейсмических интернет-опросников: 14, 33 и 71 анкета соответственно. В результате анализа текста анкет были получены оценки интенсивности сотрясений в этих пунктах по шкале MSK-64 [29].

Искренняя благодарность всем, кто оказал помощь в сборе макросейсмической информации.

В итоге, помимо Камчатского края, была получена макросейсмическая информация из 93 населенных пунктов на территории России: в 88 пунктах землетрясение ощущалось, для 64 из них удалось оценить интенсивность по шкале MSK-64 от 2 до 4–5 баллов. Землетрясение ощутили жители Дальневосточного (за исключением входящего в него Приморского края, рис. 10), Сибирского, Приволжского, Центрального, Южного, Северо-Кавказского и Северо-Западного федеральных округов (ФО) Российской Федерации. На территории России за пределами Камчатского края сотрясения наибольшей интенсивности с $I=4-5$ баллов были отмечены в двух пунктах – г. Северо-Курильске и пос. Горное Сахалинской области (№№ 49, 87 в [30]). Колебания интенсивностью 4 балла ощущались в г. Магадане и пос. Клёпка Магаданской области, г. Углегорске, г. Аниве, пос. Тымовское и с. Троицкое Сахалинской области (№№ 51, 52, 77, 89, 71 и 86 в [30]). В Москве и Хабаровске (№№ 147 и 94 в [30]) интенсивность проявления землетрясения варьировала в пределах от 2 до 4 баллов, очевидно, в зависимости от типа грунтов и качества застройки. В остальных российских населенных пунктах землетрясение ощущалось с примерно равной интенсивностью сотрясений от 2 до 3 баллов.

По сведениям, полученным от сейсмологических служб Молдовы, Беларуси и Азербайджана, землетрясение на территории этих стран не ощущалось. В то же время информация о проявлениях Охотоморского землетрясения на территории Эстонии, Италии, Киргизии, Казахстана, Канады и нескольких городов РФ имеется на сайте Европейского Средиземноморского сейсмологического центра (EMSC) (<http://www.emsc-csem.org/Earthquake/Testimonies/comments.php?id=318696>). К сожалению, дать оценки интенсивности в этих пунктах по имеющимся данным не удалось.

В [30] и на рис. 10 также представлены сведения о макросейсмических проявлениях в разных пунктах мира (№№ 165–188, 190–208), собранные Геологической службой США (USGS) с помощью системы DYFI (Did You Feel It?) [36]. В большинстве анкет отмеченные респондентами проявления землетрясения 24 мая не превышают $I=3$ балла. Лишь в двух пунктах США зафиксированы более ощутимые сотрясения: Goleta (№ 176) – наибольшая интенсивность $I=4-5$ баллов; Rock Island (№ 178) – $I=3-4$ балла.

Из Казахстанского национального центра данных были получены макросейсмические сведения по семи населенным пунктам, расположенным на территории Казахстана (№№ 158–164 в [30]), что позволило дополнить и уточнить данные по ощущениям землетрясения в этой стране, размещенные Геологической службой США (USGS).

Таким образом, макросейсмический эффект Охотоморского-III землетрясения 2013 г. проявился в глобальном масштабе. Оно ощущалось практически во всех крупных городах России и вызвало заметный интерес сейсмологов. Исследованию особенностей макросейсмических проявлений от Охотоморского землетрясения посвящен ряд работ, например, [37, 38–41] и др.

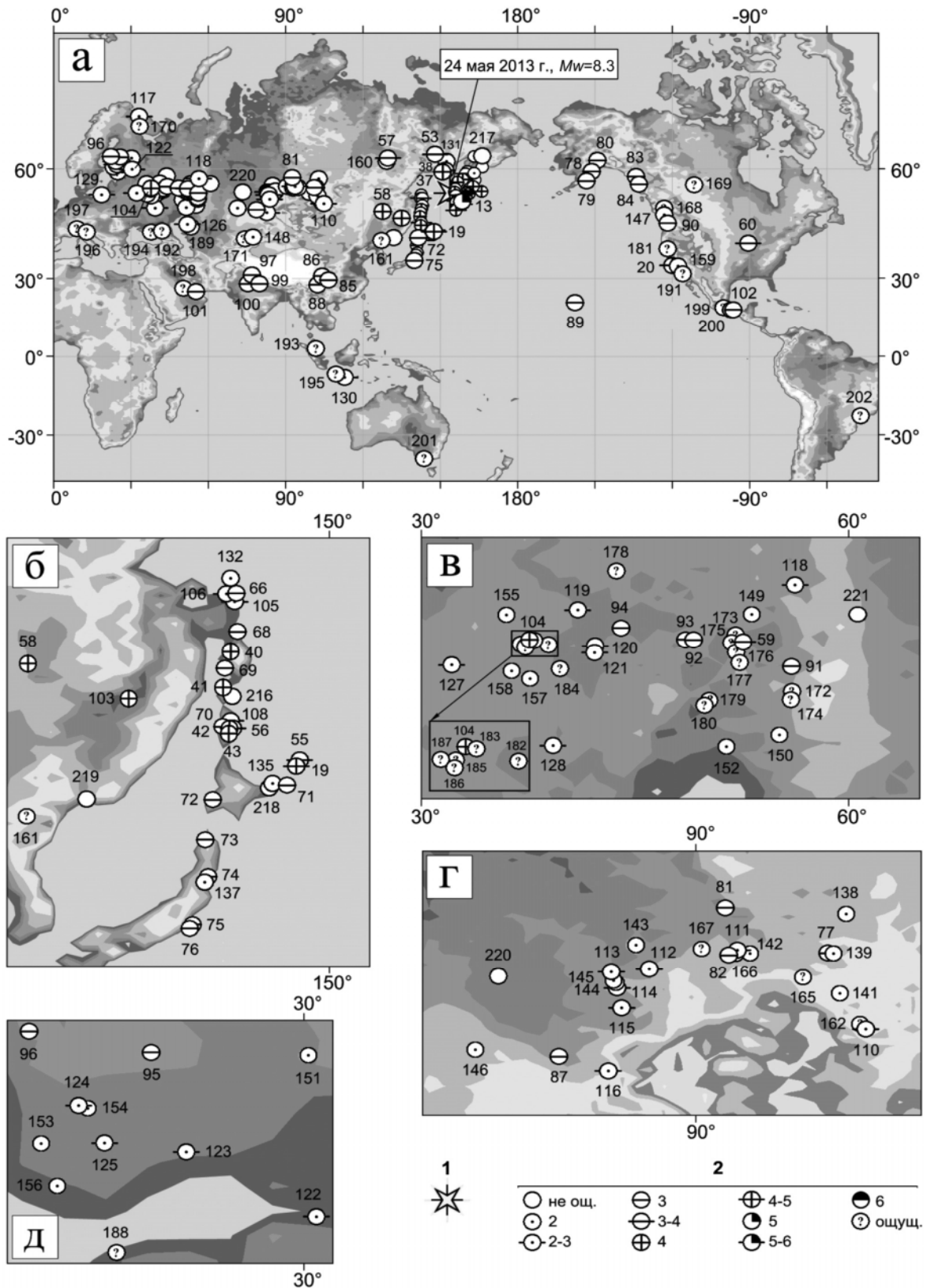


Рис. 10. Карта макросейсмического проявления Охотоморского-III землетрясения 24 мая 2013 г. (шкала интенсивности MSK-64) на Земном шаре и его отдельных районах а – весь Мир; б – Япония – Сахалин – Приморье, эпицентральные расстояния $\Delta=10-20^\circ$; в – Центральная Россия – Урал, $\Delta=50-60^\circ$; г – Сибирь – Северный Казахстан, $\Delta=30-40^\circ$; д – Финляндия – Эстония, $\Delta=50-60^\circ$

1 – эпицентр землетрясения 24 мая 2013 г. $M_{wGCMТ}=8.3$; 2 – интенсивность сотрясения в баллах по шкале MSK-64. Нумерация пунктов на карте дана согласно [30]. Для пунктов с примечанием 2 из [30] на карте дана максимальная интенсивность.

Сильные движения грунта от Охотоморского-III землетрясения 24 мая 2013 г. получены по записям сети цифровых сейсмических станций Дальнего Востока. Подробная информация о конфигурации и комплектации сети станций, данные которых использовались при обработке и анализе землетрясения 24 мая 2013 г., представлена в статье [41].

В табл. 6 приведены материалы обработки региональных сейсмических записей – максимальные пиковые амплитуды ускорений и скоростей на одном из горизонтальных каналов цифровых сейсмических станций Дальнего Востока. При наличии на станции акселерометра приводятся результаты, полученные с его помощью, в противном случае даются результаты, полученные с помощью велосиметра. Помимо пиковых ускорений в табл. 6 содержатся значения инструментальной интенсивности I_a , рассчитанной по формуле (1) из [42].

$$I_a = 2.5 \cdot \lg(a_{\text{пик}}) + 1.89, \quad (1)$$

где $a_{\text{пик}}$ – максимальные амплитуды пикового ускорения в $\text{см}/\text{с}^2$ на горизонтальных каналах.

Наибольшее значение ускорения грунта было зафиксировано на горизонтальной N -компоненте станции «Шипунский» (SPN) $a_{\text{пик}} = -62.3 \text{ см}/\text{с}^2$, которая расположена на восточном побережье Камчатского полуострова. Акселерограмма землетрясения 24 мая 2013 г., а также соответствующие сглаженные спектры Фурье и спектры реакции по ускорению для станции «Шипунский» показаны на рис. 11.

В целом наиболее высокие значения ускорений грунта и соответствующей инструментальной интенсивности I_a наблюдались не в ближайших от эпицентра пунктах, а на восточном побережье Камчатки, на продолжении наклонного участка погружающейся океанической плиты (рис. 9 б). А на расположенных на сопоставимых эпицентральных расстояниях северной и западной станциях «Палана» (PALN) и «Магадан» (MA2) зафиксированы аномально низкие амплитуды колебаний, инструментальная интенсивность на этих станциях составила $I_a \sim 1.9$ 2 балла (табл. 5).

Таблица 5. Пиковые амплитуды сильных движений грунта от землетрясения 24 мая 2013 г.

Название станции	Код станции ¹	Δ , км	r , км	$a_{\text{пик}}$, $\text{см}/\text{с}^2$	$v_{\text{пик}}$, $\text{см}/\text{с}$	I_a , балл
Николаевка	NIC ²	353	721	7.37	1.60	4.1
Карымшина	KRMR	356	723	-7.11	-0.86	4
Вилючинск	VIL ²	364	727	-9.02	0.92	4.3
Институт	INSR	367	728	-7.79	-1.35	4.1
НИГТЦ	NI ²	368	728	8.76	1.92	4.2
Дачная	DCH ²	369	729	-6.58	-1.12	3.9
Звёздный	SPZ ²	371	730	-5.05	-0.94	3.6
Администрация-ПК	ADM ²	372	731	-6.59	0.93	3.9
Петропавловск	PET	372	731	3.46	0.90	3.2
Рыбачий	RIB ²	372	731	-11.09	1.28	4.5
Дальний	DALK	377	733	-5.96	0.90	3.8
Школа	SCH ²	377	733	-6.39	0.97	3.9
Налычево	NLC	404	747	16.1	-1.36	4.9
Русская	RUS	405	748	11.9	0.87	4.6
Жупаново	GPN ²	408	749	19.8	2.16	5.1
Паужетка	PAU	417	755	4.56	1.13	3.5
Тумрок_источники	TUMR	424	759	-5.87	-0.83	3.8
Ходутка	KDTR	434	764	-12.60	-0.98	4.6
Шипунский	SPN	446	771	-62.30	4.81	6.4
Ключи	KLY	476	789	-4.17	1.42	3.4
Северо-Курильск	SKR	480	791	15.4	-1.04	4.9
Магадан	MA2	565	845	-0.98 ³	0.88	1.9
Морской порт	UK3 ²	573	851	-10.30	2.04	4.4
Администрация-УК	UK1 ²	578	854	7.05	1.65	4
Водозабор	UK2 ²	581	856	-10.02	-1.96	4.4
Крутоберегово	KBG	585	859	-10.50	-2.05	4.4
Палана	PALN	610	876	-1.04 ³	-0.41 ³	1.9
Оха	OKH	715	952	-3.48	1.12	3.2
Беринг	BKI	778	1000	-5.93	1.00	3.8
Тилички	TILK	967	1153	-1.37	-0.84	2.2
Углегорск	UGL	1018	1197	2.24	0.63	2.8
Каменская	KMSK	1113	1279	1.66	-0.52 ³	2.4
Ванино	A732 ²	1116	1281	-0.63	-0.41	1.4
Курильск	KUR	1137	1299	1.07	-0.27	2
Новоалександровск-сф	NVA	1152	1313	2.13	-0.74	2.7
Южно-Сахалинск	SSH ²	1157	1317	0.74	-0.51 ³	1.6
Южно-Курильск	YUK	1318	1460	2.51	0.61	2.9
Туманное	YUK3 ²	1325	1466	1.53	-0.24	2.4
Чегдомын	A720 ²	1437	1568	0.81	-0.58	1.7
Билибино	BILL	1613	1732	0.59	-0.31 ³	1.3
Герней	TEY	1622	1740	-0.29	0.33	0.5
Мыс Шульца	MSHR	2115	2207	0.13	0.14	-0.4

Примечание. Δ – эпицентральный расстояние, r – гипоцентральный расстояние; $a_{\text{пик}}$ – максимальная амплитуда пикового ускорения на горизонтальных каналах; $v_{\text{пик}}$ – максимальная амплитуда пиковой скорости на горизонтальных каналах; I_a – инструментальная интенсивность, рассчитанная по формуле (1); 1 – международный код станции; 2 – региональный код станций, не зарегистрированных в системе «Международная регистрация сейсмографов» ISC; 3 – приведены данные по каналу велосиметра.

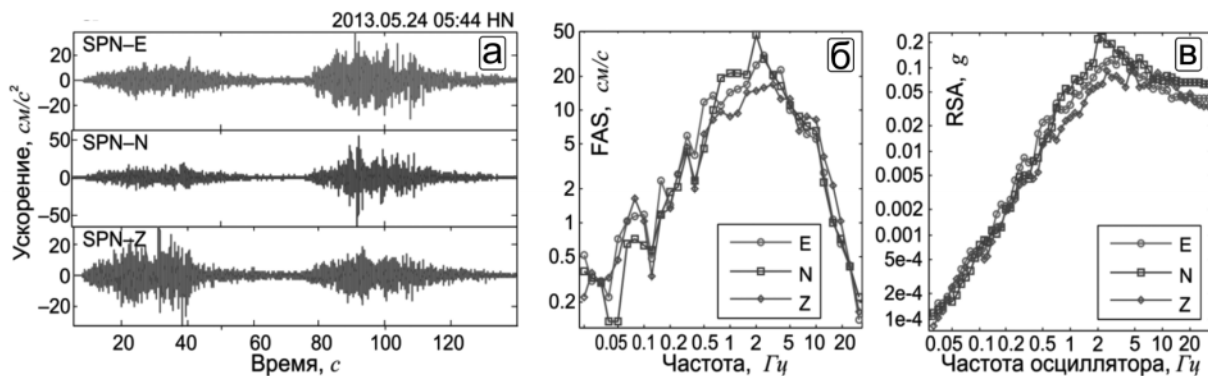


Рис. 11. Три компоненты записи ускорения грунта от землетрясения 24 мая 2013 г. (а), сглаженные амплитудные спектры Фурье (б) и спектры реакции по ускорению для этих записей (в) (записи получены каналами HNE/ HNN/ HNZ сейсмической станции «Шипунский» (SPN))

В работе [41] изучаются особенности воздействия Охотоморского землетрясения на территории, расположенные не только на региональных, но и на телесеismicких расстояниях. Результаты сравнения спектрального состава колебаний от глубокого Охотоморского землетрясения 24 мая 2013 г. и практически совпадающих с ним по магнитуде ($M_w=8.2-8.4$) двух мелкофокусных Симуширских землетрясений (15 ноября 2006 г. и 13 января 2007 г.) позволяют предположить, что причиной заметных ощущений Охотоморского землетрясения на больших расстояниях является высокочастотный характер спектра.

Сейсмическая история. Согласно делению сейсмичности Камчатки на зоны [15], Охотоморское-III землетрясение 24 мая 2013 г. и его афтершоки произошли в глубоком слое ($h>350$ км) сейсмофокальной зоны Курил и Южной Камчатки. На рис. 12 и в табл. 6 представлены сильные ($M_L \geq 6$) и ощутимые землетрясения этой зоны по данным каталога землетрясений Камчатки и Командорских островов [43] за период 01.01.1962–23.05.2013 г.

В зоне ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН регулярно регистрируются глубокие землетрясения с $h>350$ км, которые ассоциируются с нижним краем погружающейся в мантию Тихоокеанской плиты. Глубокие события редко сопровождаются большими сериями афтершоков. Максимальные макросейсмические проявления глубоких землетрясений камчатского региона смещены в сторону выхода на поверхность погружающейся в мантию Тихоокеанской плиты.

Среди всех глубоких землетрясений каталога Камчатки и Командорских островов выделяются два наиболее сильных события (№№ 13 и 14 из табл. 6), произошедших 5 июля и 24 ноября 2008 г. ($M_{wGCMT}=7.7$ и $M_{wGCMT}=7.3$ соответственно). Для этих событий, локализованных у западного побережья Камчатки, впервые была получена показательная картина обширного распределения макросейсмического воздействия на Камчатке и соседних территориях (в г. Магадане, Японии, на о. Сахалин и др.) от глубоких землетрясений и описаны аномалии наблюдаемого макросейсмического поля [3].

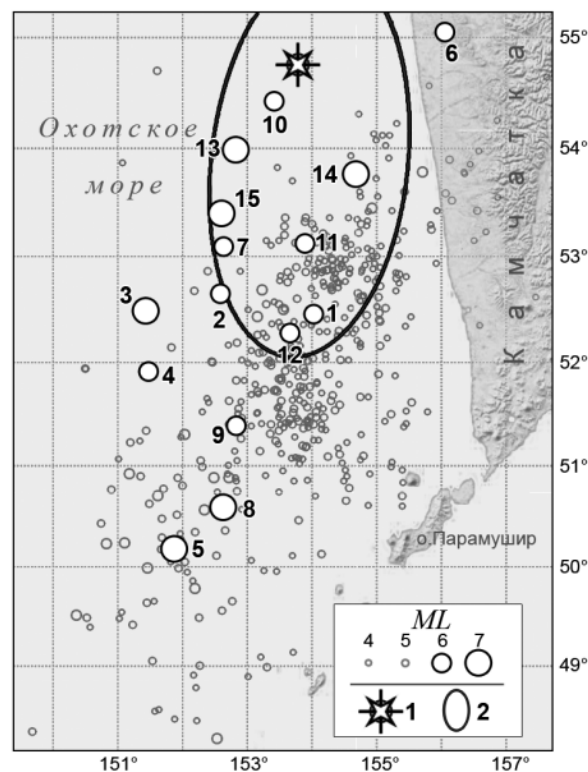


Рис. 12. Карта эпицентров землетрясений глубокого слоя сейсмофокальной зоны Курил и Южной Камчатки за период с 01.01.1962 г. по 24.05.2013 г., 05^h44^m. Нумерация землетрясений соответствует табл. 6

1 – землетрясение 24 мая 2013 г. $M_w=8.3$, 2 – очаг землетрясения 24 мая 2013 г. по афтершокам согласно рис. 1.

Таблица 6. Параметры сильных ($ML \geq 6$) и ощутимых землетрясений глубокого слоя сейсмофокальной зоны Курил и Южной Камчатки за период детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке (01.01.1962–23.05.2013) по данным из [43]

№	Дата, д м г	t_0 , ч мин с	Гипоцентр			I_{max} , балл	ML [43]	M_w [8]	M_{max} [2]
			φ° N	λ° E	h , км				
1	18.03.1964	04 37 28	52.46	154.03	403	2–3	6.2	6.4	5.7
2	01.08.1965	16 41 06	52.65	152.58	460	–	6.3	–	5.2
3	30.08.1970	17 46 10	52.49	151.43	590	3–4	7.0	7.3	6.7
4	05.09.1970	07 52 26	51.91	151.47	551	2–3	6.1	6.5	5.8
5	29.01.1971	21 57 51	50.19	151.86	710	3–4	6.9	6.9	6.8
6	27.05.1972	04 06 45	55.05	156.05	467	3	6.3	5.9	6.2
7	29.11.1973	17 59 13	53.10	152.64	550	4–5	5.9	–	5.4
8	21.12.1975	10 54 06	50.60	152.61	701	3	6.9	6.8	6.4
9	30.12.1979	04 18 21	51.39	152.84	682	–	6.1	5.9	5.8
10	14.08.1988	10 56 59	54.43	153.41	629	2	6.3	–	5.6
11	20.12.1997	13 26 32	53.12	153.89	633	5–6	6.0	5.9	5.5
12	07.02.2001	15 16 10	52.28	153.66	476	3–4	6.4	5.7	5.9
13	05.07.2008	02 12 06	53.99	152.84	576	5	7.2	7.7	6.9
14	24.11.2008	09 02 52	53.77	154.69	564	4	6.9	7.3	6.5
15	10.12.2009	02 30 51	53.40	152.61	621	3–4	6.7	6.3	6.4

Примечание. M_{max} – максимальное значение из магнитуд по объемным волнам, полученных мировыми сейсмологическими центрами NEIC(USGS), ФИЦ ЕГС РАН (г. Обнинск), ISC, IDC.

Закключение. 24 мая 2013 г. под Охотским морем, в зоне ответственности камчатской региональной сейсмологической сети, на глубине 630 км зарегистрировано сильнейшее глубокое землетрясение с магнитудой $M_{w\text{пер}}=8.3$ за годы детальных наблюдений (с 1961 г. по настоящее время).

Основные особенности Охотоморского-III землетрясения 24 мая 2013 г. с $M_w=8.3$:

– тектоническая позиция в северо-восточном торцевом крае Курило–Южно-Камчатского сегмента погружающейся Тихоокеанской плиты;

– землетрясение отразилось в косейсмических скачках на большинстве станций GNSS-наблюдений;

– наличие большого числа афтершоков, глубина которых достигает максимально возможной для известных на Земле землетрясений; стадийность с различным характером протекания афтершокового процесса;

– заметные аномалии распределения интенсивности сотрясений:

1) на территории Камчатки максимальные сотрясения и движения грунта наблюдались в пунктах, расположенных на восточном побережье Камчатки, однако в сопоставимых по расстоянию северных и западных пунктах отмечены более низкие макросейсмические и инструментальные интенсивности сотрясений;

2) землетрясение ощущалось по всему Миру – дальность макросейсмических проявлений очень большая – свыше 16 тыс. км (Сапринас, Бразилия с $\Delta=16073$ км, [30]);

3) Несмотря на глобальность макросейсмического эффекта, оно ощущалось в ближайших населенных пунктах (Камчатский край) с интенсивностью лишь до 5–6 баллов и поэтому не вызвало разрушений.

Л и т е р а т у р а

1. Сениюков С.Л., Дрозина С.Я. (отв. сост.), Карпенко Е.А., Леднева Н.А., Назарова З.А., Кожевникова Т.Ю., Митюшкина С.В., Напылова Н.А., Раевская А.А., Ромашева Е.И. (сост.). Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов за 2013 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – Приложение на CD_ROM.
2. International Seismological Centre, Thatcham, Berkshire, United Kingdom, 2015 [Сайт]. – URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/>
3. Чеброва А.Ю., Митюшкина С.В., Иванова Е.И., Гусева Е.И. Охотоморское-I землетрясение 5 июля 2008 г. с $M_w=7.7$, $I_0=5$ и Охотоморское-II землетрясение 24 ноября 2008 г. с $M_w=7.3$, $I_0=5$ (Охотское

- море) // Землетрясения Северной Евразии, 2008 год. – Обнинск: ГС РАН, 2014. – С. 359–377.
4. **Митюшкина С.В. (отв. сост.), Раевская А.А. (сост.).** Макросейсмический эффект ощутимых землетрясений в населенных пунктах Камчатки в 2013 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – Приложение на CD_ROM.
 5. **Абубакиров И.Р., Павлов В.М. (сост.).** Каталог механизмов очагов землетрясений Камчатки и Командорских островов за 2013 г., определенных по волновым формам // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – Приложение на CD_ROM.
 6. **United States Geological Survey (USGS)** [Сайт]. – URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>
 7. **Сейсмологический бюллетень (сеть телесеизмических станций), 2013** // ФИЦ ЕГС РАН [Сайт]. – URL: ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_bulletin/2013
 8. **Global CMT Catalog (GCMТ)** [Сайт]. – URL: <http://www.globalcmt.org/>
 9. **Чубарова О.С., Гусев А.А., Чебров В.Н.** Свойства колебаний грунта при Олюторском землетрясении 20.04.2006 г. и его афтершоках по данным цифровой регистрации // Вулканология и сейсмология. 2010. – №2. – С. 57–70.
 10. **Федотов С.А.** Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. — М. Наука, 1972. — 117 с.
 11. **Ландер А.В., Левина В.И., Фокина Т.А.** Регионализация и характеристики сейсмичности сейсмофокальной зоны Курил и Южной Камчатки // Четвертая научно-техническая конференция. Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. 30 сентября – 4 октября 2013 г., г. Петропавловск-Камчатский. http://www.emsd.ru/conf2013lib/rpdf/2seismicity/Lander_etc_r.pdf
 12. **Ландер А.В., Левина В.И.** Систематические ошибки определения гипоцентров Камчатских землетрясений – результат преломления волн на границах погружающейся плиты // Изменение окружающей среды и климата, природные и связанные с ними техногенные катастрофы. – Т. 1. – Сейсмические процессы и катастрофы. – М.: ИФЗ РАН, 2008. – С. 117–126.
 13. **Гордеев Е.И., Левина В.И., Чебров В.Н., Иванова Е.И., Шевченко Ю.В., Степанов В.В.** Землетрясения Камчатки и Командорских островов // Землетрясения Северной Евразии в 1993 году. – М. : ГС РАН, 1999. – С. 102–114.
 14. **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(20). – С. 149–158.
 15. **Левина В.И., Ландер А.В., Митюшкина С.В., Чеброва А.Ю.** Сейсмичность Камчатского региона // Вулканология и сейсмология. – 2013. – № 1. – С. 195–213.
 16. **Авдейко Г.П., Попруженко С.В., Палуева А.А.** Тектоническое развитие и вулканотектоническое районирование Курило-Камчатской островодужной системы // Геотектоника. – 2002. – № 4. – С. 64–80.
 17. **Lander A.V., Shapiro M.N.** The Origin of the Modern Kamchatka Subduction Zone // *Volcanism and Subduction The Kamchatka Region*, AGU Geophysical Monograph Series. – 2007. – V. 172. – P. 57–64.
 18. **Herring T.A., King R.W., McClusky S.C.** GAMIT: GPS Analysis at MIT. Release 10.4. / Massachusetts Institute of Technology, 2010a. – 171 p.
 19. **Herring T.A., King R.W., McClusky S.C.** GLOBK: Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program. Release 10.4. / Massachusetts Institute of Technology, 2010b. – 95 p.
 20. **Чеброва А.Ю. (отв. сост.), Иванова Е.И., Митюшкина С.В. (сост.).** Каталог механизмов очагов землетрясений Камчатки и Командорских островов за 2013 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – Приложение на CD_ROM.
 21. **Абубакиров И.Р., Павлов В.М., Титков Н.Н.** Механизм глубокого Охотоморского землетрясения 24.05.2013 по статическим смещениям и широкополосным сейсмограммам // Вулканология и сейсмология. – 2015. – № 4. – С. 23–39.
 22. **Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки и Командорских островов** (отчет за 01.01.2003–31.12.2003). – Петропавловск-Камчатский: Фонды КФ ГС РАН, 2004. – 350 с.
 23. **Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки и Командорских островов** (отчет за 01.01.2005–31.12.2005). – Петропавловск-Камчатский: Фонды КФ ГС РАН, 2006. – 478 с.
 24. **Шестаков Н.В., Ohzono M., Takahashi H., Герасименко М.Д., Быков В.Г., Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Титков Н.Н., Сероветников С.С., Василенко Н.Ф., Прытков А.С., Сорокин А.А., Серов М.А., Кондратьев М.Н., Пупатенко В.В.** Моделирование косейсмических движений земной коры, инициированных глубокофокусным Охотоморским землетрясением 24.05.2013 г., $M_w=8.3$ //

- ДАН. 2014. – Т. 457. – № 4. – С. 471–476.
25. **Павлов В.М.** Алгоритм расчета статических смещений в слоисто однородной сферической земле на основе техники матричного импеданса // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2017. – № 3. – Выпуск 35. – С. 50–59.
 26. **Павлов В.М.** Алгоритмы расчета синтетических сейсмограмм от дипольного источника с использованием производных функций Грина // Физика Земли. – 2017. – № 4. – С. 67–75.
 27. **Писаренко В.Ф.** О законе повторяемости землетрясений // Дискретные свойства геофизической среды. – М.: Наука. – 1989. – С. 47–60.
 28. **Салтыков В.А.** О проблеме оценки пространственно-временных особенностей представительности каталога землетрясений // Материалы XIII Международной сейсмологической школы «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных». Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – С. 237–242.
 29. **Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В.** Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. – М.: МГК АН СССР, 1965. – 11 с.
 30. **Митюшкина С.В. (отв. сост.), Раевская А.А. (сост.).** Макросейсмические сведения об Охотоморском-III землетрясении 24 мая 2013 г. (таблица пункты-баллы). // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – Приложение на CD_ROM.
 31. **Чеброва А.Ю., Митюшкина С.В., Раевская А.А., Семенова Е.П.** Макросейсмические проявления Охотоморского-III землетрясения 24 мая 2013 г. ($M_w=8.3$) в России и других странах Мира // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – Приложение на CD_ROM.
 32. **Завьялов А.Д.** Макросейсмическое проявление Охотоморского-III землетрясения 24 мая 2013 г. ($M_w=8.3$) на территории г. Москвы и в других населенных пунктах РФ // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – Приложение на CD_ROM.
 33. **Карпенко Л.В., Алёшина Е.И., Гунбина Л.В., Гумарова Е.В., Комарова Р.С., Чернецова А.Г., Габдрахманова Ю.В., Данченко Г.В., Ильянова О.С., Шейкина С.В.** Макросейсмическое проявление Охотоморского-III землетрясения 24 мая 2013 г. ($M_w=8.3$) в г. Магадане и населенных пунктах Магаданской области // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – Приложение на CD_ROM.
 34. **Дягилев Р.А.** Макросейсмическое проявление Охотоморского-III землетрясения 24 мая 2013 г. ($M_w=8.3$) на территории г. Перми. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – Приложение на CD_ROM.
 35. **Utsu T.** Regional differences in absorption of seismic waves in the upper mantle as inferred from abnormal distributions of seismic intensities // J. Fac. Sci. Hokkaido Univ. Jap. – 1966. – Ser. 7. 2. № 4. – P. 359–374.
 36. **Wald D.J., Quitoriano V., Wolden B., Hopper M., Dewey J.W.** USGS “Did You Feel It?” Internet-based macroseismic intensity maps // Annals of geophysics. – 2011. – 54, N 6. – Pp. 688–707.
 37. **Старовойт О.Е., Коломиец М.В., Рыжикова М.И.** Анализ макросейсмических данных глубокого землетрясения 24 мая 2013 г. в Охотском море // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Восьмой Международной сейсмологической школы. – Обнинск: ГС РАН, 2013. – С. 10–16.
 38. **Маловичко А.А., Маловичко Е.А.** Макросейсмические проявления в Москве от глубокофокусного землетрясения 24 мая 2013 г. в Охотском море // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Восьмой Международной сейсмологической школы. – Обнинск: ГС РАН, 2013. – С. 3–9.
 39. **Рогожин Е.А., Завьялов А.Д., Зайцева Н.В.** Макросейсмические проявления Охотского землетрясения 24.05.2013 г. на территории г. Москвы // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2013. – № 3. – С. 64–77.
 40. **Татевосян Р.Э., Косарев Г.Л., Быкова В.В., Мацевский С.А., Уломов И.В., Аптекман Ж.Я., Вакарчук Р.Н.** Глубокофокусное землетрясение с $M_w=8.3$, ощущавшееся на расстоянии 6500 км // Физика Земли. – 2014. – № 3. – С. 154–162.
 41. **Чеброва А.Ю., Чебров В.Н., Гусев А.А., Ландер А.В., Гусева Е.М., Митюшкина С.В., Раевская А.А.** Воздействие Охотоморского землетрясения 24 мая 2013 г. ($M_w=8.3$) на территории Камчатки и Мира // Вулканология и сейсмология. – 2015. – №4. – С. 3–22.
 42. **ГОСТ Р 57546–2017.** Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности. – Москва Стандартинформ, 2017.
 43. **Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов КФ ФИЦ ЕГС РАН.** – URL: <http://emsd.ru/sdis/info/earthquakes/catalogue.php>

METADATA IN ENGLISH

OKHOTSK-III EARTHQUAKE 24.05.2013 with $M_{w,reg}=8.3$, $I_0=6$ (Sea of Okhotsk)

**A.Yu. Chebrova¹, I.R. Abubakirov¹, A.A.Gusev¹, S.Ya. Droznina¹, A.V. Lander²,
S.V. Mityushkina¹, V.M. Pavlov¹, V.A. Saltykov¹, N.N. Titkov¹, D.V. Chebrov¹**

¹*Kamchatka branch of Geophysical survey of Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, ayuch@emsd.ru*

²*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics,
Moscow, Russia, land@mitp.ru*

Abstract. The strongest deep earthquake on May 24, 2013 ($M_{w,reg}=8.3$) is discussed. It occurred under the Sea of Okhotsk at a depth of about 630 km. The instrumental hypocenter location reported by the KB GS RAS is $\varphi=54.75^\circ\text{N}$, $\lambda=153.78^\circ\text{E}$, $h=630$ km. Three magnitudes were obtained: local magnitude $ML=7.8$, code-wave magnitude $M_c=7.6$, moment magnitude $M_{w,reg}=8.3$. The Okhotsk earthquake hypocenter is located on the northern part of the ancient slab, practically at the lower end of the seismogenic region. The earthquake caused significant co-seismic displacements at most GNSS observation points. The earthquake focal mechanisms solutions have been obtained by three ways. The solutions are very similar. The submeridial hollow falling nodal plane seems more preferable. For the deep quake of May 24, 2013, a series of aftershocks were registered. The aftershock process had three consistent stages with different decay character. The cloud of deep-focus aftershocks has the 400×200 km size, with the 450–700 km depth range and is extended in the North–South direction. The aftershock process has the three-phase character and can be considered as a stream of seismic events decreasing in time with three successive stages with different attenuation modes. The change in attenuation modes is associated with strong aftershocks. The duration of the decaying aftershock process is ~ 280 days. The anomalous distribution of impact was observed for the earthquake: 1) a large range of macroseismic effect – quake was felt throughout the World; 2) in the territory of Kamchatka, maximum shakes and ground motions were observed at the points located on the eastern coast of Kamchatka, and at comparable northern and western distances macroseismic and instrumental intensities were lower. Despite the globality of the macroseismic effect, in the nearest settlements (Kamchatka region), the earthquake was felt with intensity up to 5–6 and caused no damage. The May 24, 2013 earthquake produced many strong motion records. The ground motion characteristics such as peak amplitudes of motion, spectral shape and response spectrum were received using the records of the earthquake from Kamchatka network of digital accelerographs.

Keywords: Okhotsk Sea, Kamchatka, earthquake, aftershocks, co-seismic displacements, global macroseismic.

DOI: 10.35540/1818-6254.2019.22.34

For citation: Chebrova, A.Yu., Abubakirov, I.R., Gusev, A.A., Droznina, S.Ya., Lander, A.V., Mityushkina, S.V., Pavlov, V.M., Saltykov, V.A., Titkov, N.N., & Chebrov, D.V. (2019). Okhotsk-III earthquake 24.05.2013 with $M_{w,reg}=8.3$. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 22 (2013), 377–396. (In Russ.). doi: 10.35540/1818-6254.2019.22.34

References

1. Senyukov, S.L., Droznina, S.Ya., Karpenko, E.A., Ledneva, N.A., Nazarova, Z.A., Kojevnikova, T.Yu., Mityushkina, S.V., Napilova, N.A., Raevskaya, A.A., & Romasheva, E.I. (2019). *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 22 (2013), Appendix on CD. (In Russ.).
2. International Seismological Centre. (2019). On-line Bulletin, Internatl. Seis. Cent., Thatcham, United Kingdom. Retrieved from <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/>
3. Chebrova, A.Yu., Mityushkina, S.V., Ivanova, E.I., & Guseva, E.M. (2014). [Okhotsk-I Earthquake 5.07.2008 and Okhotsk-II Earthquake 24.11.2008]. In *Zemletryaseniia Severnoi Evrazii, 2008 god* [Earthquakes in Northern Eurasia, 2008] (pp. 359–377). Obninsk: GS RAS Publ. (In Russ.).
4. Mityushkina, S.V., & Raevskaya A.A. (2019). Macroscopic effects of felt earthquakes in Kamchatka settlements in 2013. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 22 (2013), Appendix on CD. (In Russ.).
5. Abubakirov, I.R., & Pavlov, V.M. (2019). Catalogue of Earthquake Focal Mechanisms for Kamchatka and the Commander Islands in 2013 (defined by earthquake waveforms). *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 22 (2013), Appendix on CD. (In Russ.).
6. USGS National Earthquake Information Centre (2019). Retrieved from <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/>

7. GS RAS, Bulletin of Telesismic Stations. (2019). Retrieved from ftp://ftp.gsras.ru/pub/Telesismic_bulletin/2013/
8. Global CMT catalog (2019). Retrieved from <http://www.globalcmt.org/>
9. Chubarova, O.S., Gusev, A.A., & Chebrov, V.N. (2010). The ground motion excited by the Olyutorskii earthquake of April 20, 2006 and by its aftershocks based on digital recordings. *Journal of Volcanology and Seismology*, 4 (2), 126–138. DOI: 10.1134/S0742046310020065.
10. Fedotov, S.A. (1972). *Energeticheskaya klassifikatsiya Kurilo-Kamchatskih zemletryaseniy i problema magnitud* [Energy classification of Kuril-Kamchatka earthquakes and the magnitude problem]. Moscow: Nauka Publ., 117 p.
11. Lander, A.V., Levina, V.I., & Fokina, T.A. (2013). [Regionalization and characteristics of the focal zone seismicity for the Kuriles and South Kamchatka]. In *Chetvyortaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya. Problemi kompleksnogo geofizicheskogo monitoringa Dal'nego Vostoka Rossii. Petropavlovsk-Kamchatsky*. [The IV science conference "Problems of complex geophysical monitoring of Far East of Russia. Petropavlovsk-Kamchatsky"]. Retrieved from http://www.emsd.ru/conf2013lib/rpdf/2seismicity/Lander_etc_r.pdf (In Russ.).
12. Lander, A.V., & Levina, V.I. (2008). [Systematic errors in determining the hypocenters of Kamchatka earthquakes – the result of the waves refraction at the boundaries of the subducting plate] In *Izmeneniye okrujayushey sredi klimata, prirodnye i svyazaniye s nimi tehnogenniye katastrofi. Tom I. Seismicheskiye processy i katastrofi* [Environmental and climate change, natural and related man-made disasters. Vol. 1. Seismic processes and disasters] (pp. 117–126). Moscow: IFZ RAN Publ. (In Russ.).
13. Gordeev, E.I., Levina, V.I., Chebrov, V.N., Ivanova, E.I., Shevchenko, Yu.V., & Stepanov, V.V. [Earthquakes of Kamchatka and Komandor Islands]. In *Zemletryaseniya Severnoi Evrazii v 1993 godu* [Earthquakes in Northern Eurasia in 1993] (pp. 102–114). Moscow: GS RAS Publ. (In Russ.).
14. Pavlov, V.M., & Abubakirov, I.R. (2012). [Algorithm for Calculation of Seismic Moment Tensor of Strong Earthquakes Using Regional Broadband Seismograms of Body Waves] *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle* [Bulletin of KRAESC. Earth sciences], 20 (2), 149–158 (in Russ.).
15. Levina, V.I., Lander, A.V., Mityushkina, S.V., & Chebrova, A.Yu. (2013). The seismicity of the Kamchatka region: 1962–2011, *Journal of Volcanology and Seismology*, 7 (2), 37–57. doi: 10.1134/S0742046313010053.
16. Avdeiko, G.P., Popruzhenko, S.V., & Palueva, A.A. (2002). The Tectonic Evolution and Volcano–Tectonic Zonation of the Kuril–Kamchatka Island-Arc System. *Geotectonics*, 36 (4), 312–327.
17. Lander, A.V., & Shapiro, M.N. (2007). The origin of the modern Kamchatka subduction zone. *Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series*, 172, 57–64.
18. Herring, T.A., King, R.W., & McClusky, S.C. (2010). *GAMIT: GPS Analysis at MIT*. Release 10.4. Massachusetts Institute of Technology, 171 p.
19. Herring, T.A., King, R.W., & McClusky, S.C. (2010). *GLOBK: Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program*. Release 10.4. Massachusetts Institute of Technology, 95 p.
20. Chebrova, A.Yu., Ivanova, E.I., & Mityushkina, S.V. (2019). Catalogue of Earthquake Focal Mechanisms for Kamchatka and the Commander Islands in 2013. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 22 (2013), Appendix on CD. (In Russ.).
21. Abubakirov, I.R., Pavlov, V.M., & Titkov, N.N. (2015). The Mechanism of the Deep-Focus, Sea of Okhotsk Earthquake of May 24, 2013 as Inferred from Static Displacements and Broadband Seismograms. *Journal of Volcanology and Seismology*, 9 (4), 242–257. doi: 10.1134/S0742046315040028.
22. *Complex seismological and geophysical investigations of Kamchatka and Commander Islands (report 01.01.2003–31.12.2003)*. (2004). Petropavlovsk-Kamchatsky, Funds of KB GS RAS, 350 p. (In Russ.).
23. *Complex seismological and geophysical investigations of Kamchatka and Commander Islands (report 01.01.2005–31.12.2005)*. (2006). Petropavlovsk-Kamchatsky, Funds of KB GS RAS, 478 p. (In Russ.).
24. Gerasimenko, M.D., Bykov, V.G., Gordeev, E.I., ... & Prytkov, A.S. (2014). Modeling of Coseismic Crustal Movements Initiated by the May 24, 2013, $M_w=8.3$ Okhotsk Deep Focus Earthquake. *Doklady Earth Sciences*, 457, 976–981. doi: 10.1134/S1028334X1408008X.
25. Pavlov, V.M. (2017). [Algorithm for calculation of the static displacements in the layered spherical earth based using the matrix impedance technique]. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle* [Bulletin of KRAESC. Earth sciences], 35 (3), 50–59 (in Russ.).
26. Pavlov, V.M. (2017). The algorithms for calculating synthetic seismograms from a dipole source using the derivatives of Green's function. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 53 (4), 556–564. doi: 10.1134/S1069351317030077.

27. Pisarenko, V.F. (1989). [About the earthquake recurrence law]. In *Diskretniye svoystva geofizicheskoy sredi* [Discrete properties of the geophysical environment] (pp. 47–60). Moscow: Nauka Publ. (In Russ.).
28. Saltykov, V.A. (2018). [On the problem of estimating the spatial-temporal features of the Kamchatka catalog representativeness] In *Materiali XIII Mejdunarodnoy seismologicheskoy shkoly "Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh"* [Proceedings of the XIII International Seismological Workshop "Modern methods of processing and interpretation of seismological data"] (pp. 237–242). Obninsk: GS RAS Publ. (In Russ.).
29. Medvedev, S.V. Shponhoyer, V., & Karnik, V. (1965). *Shkala seysmicheskoy intensivnosti MSK-64* [MSK-64 seismic intensity scale]. Moscow: MGK Academy of Sciences USSR Publ., 11 p.
30. Mityushkina, S.V., Raevskaia, A.A. Macroseismic information about the Okhotsk-III earthquake on May 24, 2013. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 22 (2013), Appendix on CD. (In Russ.).
31. Chebrova, A.Yu., Mityushkina, S.V., Raevskaya, A.A., & Semenova, E.P. (2019). Macroseismic manifestation of Okhotsk Earthquake 24.05.2013 ($M_w=8.3$) in Russia and other countries. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 22 (2013), Appendix on CD. (In Russ.).
32. Zav'yalov, A.D. (2019). Macroseismic manifestation of Okhotsk Earthquake 24.05.2013 ($M_w=8.3$) in Moscow and in other settlements of the Russian Federation. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 22 (2013), Appendix on CD. (In Russ.).
32. Karpenko, L.V., Alyoshina, E.I., Gunbina, L.V., Gumarova, E.V., Komarova, R.S., Chernetsova, A.G., Gабдраhmanova, Yu.V., Danchenko, G.V., Il'yanova, O.S., & Sheykina, S.V. (2019). [Macroseismic manifestation of Okhotsk Earthquake 24.05.2013 ($M_w=8.3$) in Magadan and in other settlements of the Magadan region]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 22 (2013), Appendix on CD. (In Russ.).
34. Dyagilev, R.A. (2019). Macroseismic manifestation of Okhotsk Earthquake 24.05.2013 ($M_w=8.3$) in Perm'. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 22 (2013), Appendix on CD. (In Russ.).
35. Utsu, T. (1966). Regional Differences in Absorption of Seismic Waves in the Upper Mantle as Inferred from Abnormal Distributions of Seismic Intensities. *Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University. Series 7, Geophysics*, 2 (4), 359–374.
36. Wald, D.J., Quitoriano, V., Wolden, B., Hopper, M., & Dewey, J.W. (2011). USGS "Did You Feel It?" Internet-based macroseismic intensity maps. *Annals of geophysics*, 54 (6), 688–707.
37. Starovoyt, O.E., Kolomiyc, M.V., Rijikova, M.I. (2013). [Analysis of macroseismic data of a deep earthquake 24.05.2013 in the Sea of Okhotsk]. In *Materialy VIII Mezhdunarodnoy seysmologicheskoy shkoly "Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seysmologicheskikh dannykh"*. [Proceedings of the VIII International Seismological Workshop "Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data"] (pp. 10–16). Obninsk: GS RAS Publ. (In Russ.).
38. Malovichko, A.A., & Malovichko, E.A. [Macroseismic manifestations in Moscow of the deep Okhotsk earthquake of May 24, 2013]. In *Materialy VIII Mezhdunarodnoy seysmologicheskoy shkoly "Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seysmologicheskikh dannykh"*. [Proceedings of the VIII International Seismological Workshop "Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data"] (pp. 3–9). Obninsk: GS RAS Publ. (In Russ.).
39. Rogozhin, E.A., Zavyalov, A.D., & Andreeva, N.V. (2014). Macroseismic manifestations of the Okhotsk earthquake of May 24, 2013 in the territory of Moscow. *Seismic Instrument*, 50 (4), 278–289. doi: 10.3103/S0747923914040057.
40. Tatevosian, R.E., Kosarev, G.L., Bykova, V.V., Matsievskii, S.A., Ulomov, I.V., Aptekman, Z.Y., & Vakarchuk, R.N. (2014). A deep-focus earthquake with $M_w=8.3$ felt at a distance of 6500 km. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 50 (3), 453–461. doi: 10.7868/S0002333714030120.
41. Chebrova, A.Yu., Chebrov, V.N., Gusev, A.A., Lander, A.V., Guseva, E.M., Mityushkina, S.V., & Raevskaya, A.A. (2015). The impacts of the $M_w=8.3$ Sea of Okhotsk earthquake of May 24, 2013 in Kamchatka and worldwide. *Journal of Volcanology and Seismology*, 9 (4), 223–241. doi: 10.1134/S074204631504003X.
42. *GOST R 57546–2017*. (2017). [State Standard 57546–2017. Earthquakes. Seismic intensity scale]. Moscow: Standardinform Publ., 27 p. (In Russ.).
43. Earthquakes Catalogue for Kamchatka and the Commander Islands of KB GS RAS (2019). Retrieved from <http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php>