

## ОПЕРАТИВНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕНЗОРОВ МОМЕНТА ДВОЙНОГО ДИПОЛЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КАМЧАТКИ И КОМАНДОРСКИХ О-ВОВ В 2023 Г.

© 2025 А.А. Раевская, Е.А. Матвеевко

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

Поступила в редакцию 16.08.2024; после доработки 09.04.2025; принята в печать 25.06.2025

В Камчатском филиале Федерального исследовательского центра «Единая Геофизическая служба РАН» (КФ ФИЦ ЕГС РАН) ведутся работы по определению механизмов очагов землетрясений Камчатки и Командорских о-вов. С начала 1970-х гг. механизмы рассчитывались по знакам первых вступлений объемных волн. С 2010 г. с развертыванием на Камчатке сети широкополосных цифровых сейсмических станций проводится определение тензоров сейсмического момента по разработанной в КФ ФИЦ ЕГС РАН методике RSMT (Regional Seismic Moment Tensor). С 1 января 2023 г. определение механизмов и параметров очагов по RSMT ведется в оперативном режиме; ведение каталога по знакам первых вступлений завершено. В работе представлен оперативный каталог механизмов и параметров очагов камчатских землетрясений за 2023 г., полученный в КФ ФИЦ ЕГС РАН по методике RSMT для тензоров типа двойной диполь без момента. Определения фокальных механизмов очагов, моментной магнитуды  $M_w$  и глубины эквивалентного точечного источника, приведенные в каталоге, хорошо согласуются с решениями, полученными агентством GCMT (Global Centroid Moment Tensor).

*Ключевые слова:* Камчатка, землетрясения, каталог механизмов очагов, тензор сейсмического момента.

### ВВЕДЕНИЕ

В Камчатском филиале ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН» (КФ ФИЦ ЕГС РАН) с 1970 гг. проводится определение фокальных механизмов очагов сильных ( $M_L \geq 5$  (Федотов, 1972; Чубарова и др., 2010)) землетрясений Камчатки и Командорских о-вов. Результаты этой работы имеют важнейшее значение как исходный материал для изучения закономерностей сейсмо-тектонических процессов в регионе. Получение систематических однородных данных о механизмах очагов камчатских землетрясений было начато В.М. Зобиным (Зобин, 1987) в 1970-х гг. Камчатская сейсмическая сеть, оснащенная к тому моменту в основном короткопериодными приборами, позволяла использовать единственную методику определения механизмов очагов — с использованием знаков первых вступлений объемных волн (FM — First Motion, первое вступление) с привлечением знаков из мировых

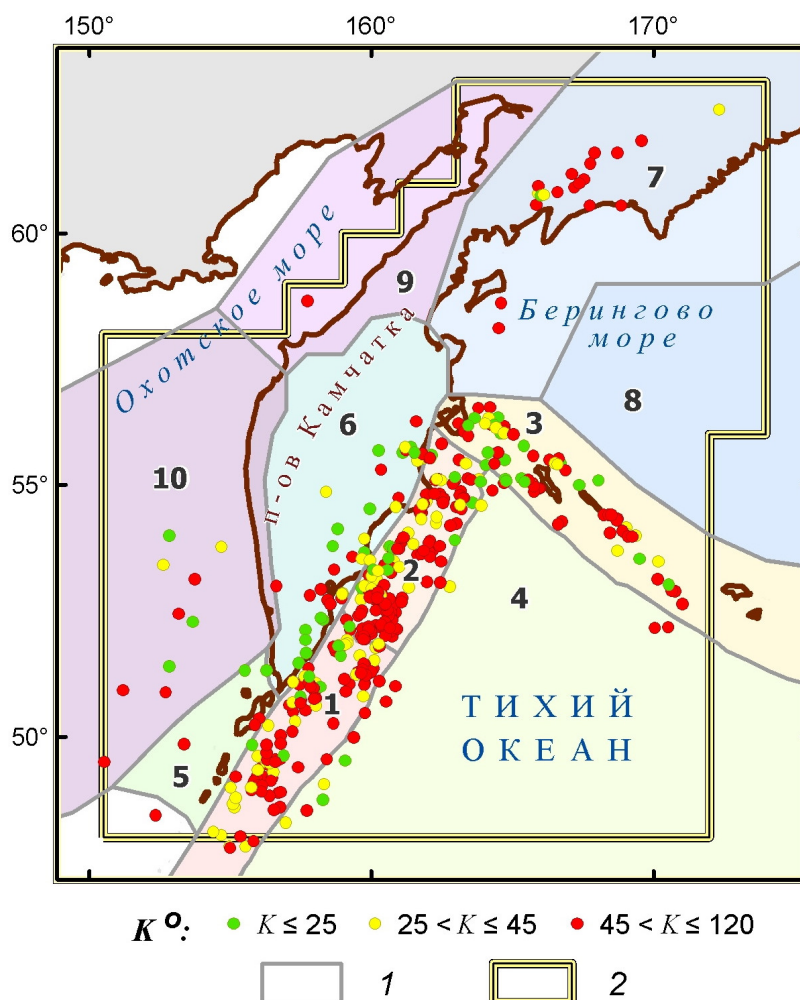
бюллетеней для удаленных станций. До 1981 г. расчет механизмов проводился по стандартной ручной методике (Введенская, 1969), затем на ЭВМ по методике (Аптекман и др., 1979). В 1985 г. в Единой службе сейсмологических наблюдений СССР были введены единые требования к форматам представления параметров механизмов очагов для унификации каталога и последующего корректного сопоставления с международными данными (Аптекман и др., 1988). С 1993 г. определение механизмов очагов камчатских землетрясений стало проводиться на персональных компьютерах по программе ФА А.В. Ландера (Иванова и др., 2011). По ФА были пересчитаны все ранее определенные механизмы, а по мере появления новых версий программы производился полный пересчет полученного ранее каталога механизмов, что обеспечило его однородность.

Полученный с помощью программы ФА камчатский каталог механизмов очагов

(<http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/mechanism.php>) охватывает период 1970–2022 гг. и содержит механизмы для 1797 событий. В работе (Иванова и др., 2011) показано, что средние механизмы из камчатского FM-каталога за 1980–2007 гг. для различных зон региональной сейсмичности, достаточно хорошо согласуются со средними решениями из каталога GСMT (Global Seismic Moment Tensor) (Dziewonski et al., 1981; Ekström et al., 2012). Отмечено, что точность определений механизмов очагов отдельных событий является невысокой. В качестве причин названы неверное снятие знаков из-за низкого соотношения сигнал/шум и случайное обращение полярности волны на приборах; критерии оценок точности не указаны и их значения не приводятся.

Нами было выполнено сравнение индивидуальных решений из камчатского FM-каталога механизмов с наилучшими двойными диполями (BDC — Best Double Couple (Ekström et al., 2012))

для решений GСMT за период 1976 (начало формирования каталога GСMT) — 2020 гг. по углу  $K$ , наименьшему, на который нужно повернуть тройку главных осей одного механизма, чтобы совместить ее с тройкой главных осей другого (Kagan, 2007). Для 731 события, имеющих определения механизмов в обоих каталогах, оказалось, что лишь у 14.6 % камчатских механизмов величина угла  $K$  не превышает  $25^\circ$  (такое расхождение можно считать приемлемым). Для 25.6 % механизмов угол  $K$  лежит в пределах  $26–45^\circ$ , а для остальных 59.8 % его величина превышает  $45^\circ$  (рис. 1). Для данных FM-каталога за период 1980–2007 гг., по которым поведился расчет средних механизмов в (Иванова и др., 2011), количество индивидуальных событий, где значения угла  $K$  лежат в указанных выше интервалах, составили 13.0, 21.7 и 65.3 % соответственно. Таким образом, точность более 80 % FM-определений механизмов, имеющих решения



**Рис. 1.** Значения угла  $K$  между тройками главных осей фокальных механизмов FA–GСMT (BDC) за период 1976–2020 гг.: 1 — границы зон сейсмичности (Левина и др., 2013; Чебров и др., 2015), 2 — границы зоны ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН (Левина, Чебров, 2009).

**Fig. 1.** Values of the angle  $K$  between the triplets of the principal axes of the focal mechanisms FA–GСMT solutions for the period 1976–2020: 1 — boundaries of seismicity zones (Chebrov et al., 2015; Levina et al., 2013), 2 — boundaries of the zone of responsibility of the Kamchatka branch of Geophysical Survey RAS (Levina, Chebrov, 2009).

в каталоге GCMT, является недостаточной или полностью неудовлетворительной.

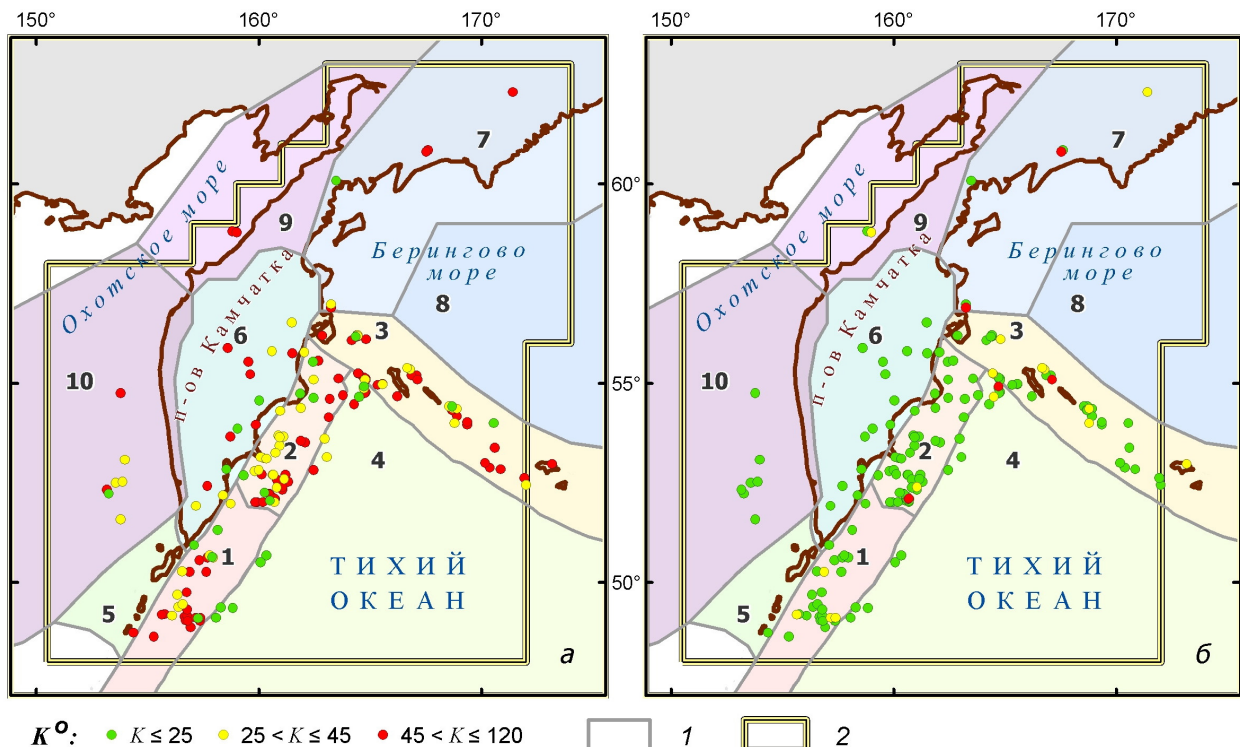
В 2006–2010 гг. на Камчатке была развернута сеть широкополосных цифровых сейсмических станций (Чебров и др., 2013). Это дало возможность перейти к принятому в мировой практике определению тензора сейсмического момента (ТСМ), объединяющего в себе фокальный механизм очага и скалярный сейсмический момент, путем инверсии волновых форм смещений в компоненты тензора. В КФ ФИЦ ЕГС РАН была разработана методика расчета ТСМ по записям смещений на региональных ( $\Delta \leq 20^\circ$ ) сейсмических станциях (Абубакиров, Павлов, 2021; Павлов, Абубакиров, 2012), получившая название RSMT (Regional Seismic Moment Tensor). Результаты ретроспективного применения RSMT на массиве камчатских землетрясений 2010–2020 гг. (Абубакиров, Павлов, 2019–2021; Абубакиров и др., 2021–2024) показали хорошее согласие полученных результатов с мировыми и позволили существенно улучшить качество регионального каталога механизмов: для 169 событий 2010–2020 гг., имеющих определения по методикам FA, RSMT и GCMT, величина угла  $K$  попадает в приемлемые границы  $0^\circ \leq K \leq 25^\circ$

у 87.8 % решений RSMT–GCMT (BDC) и 15.0 % решений FA–GCMT (BDC) соответственно (рис. 2).

С 1 января 2023 г. в КФ ФИЦ ЕГС РАН было начато оперативное (в течение нескольких суток после возникновения сейсмического события) определение механизмов и параметров очагов региональных землетрясений по методике RSMT. К этому моменту на Камчатке, Командорских о-вах и о-ве Парамушир работали 27 сейсмических станций, оборудованных широкополосными каналами, записи которых могут быть использованы для инверсии в компоненты ТСМ (рис. 3). Одновременно было завершено ведение каталога механизмов очагов камчатских землетрясений по знакам первых вступлений объемных волн по причине неудовлетворительной точности определения механизмов очагов индивидуальных событий относительно мировых.

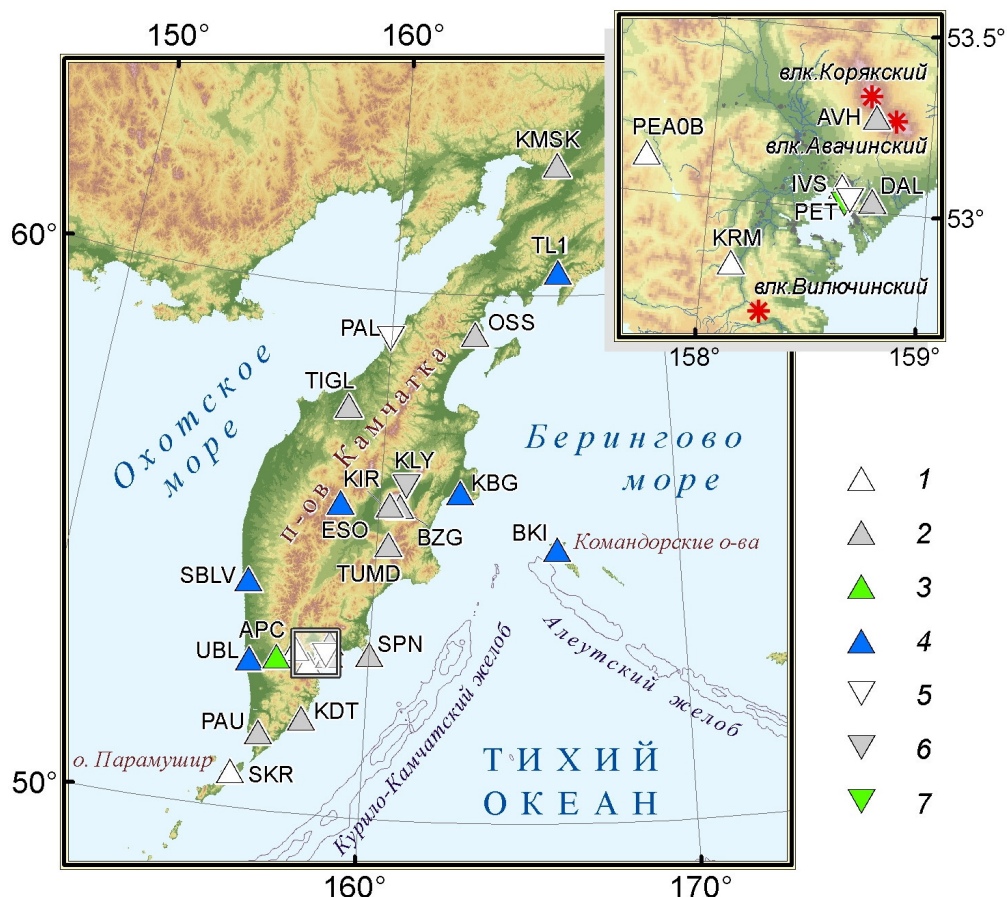
### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ИХ ОБРАБОТКА

Для расчета ТСМ из каталога землетрясений Камчатки и Командорских о-вов (<http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php>) по мере



**Рис. 2.** Значения угла  $K$  между тройками главных осей фокальных механизмов для решений FA–GCMT (BDC) (а) и RSMT–GCMT (BDC) (б) за период 2010–2020 гг. Отобраны землетрясения, имеющие определения механизмов очагов по всем трем методикам: 1 — границы зон сейсмичности; 2 — границы зоны ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН.

**Fig. 2.** Values of the angle  $K$  between the triplets of the principal axes of the focal mechanisms FA–GCMT (a) and RSMT–GCMT (BDC) (b) for the period 2010–2020. The earthquakes with focal mechanism determinations by all three methods were selected: 1 — boundaries of seismicity zones; 2 — boundaries of the zone of responsibility of the Kamchatka branch of Geophysical Survey RAS.



**Рис. 3.** Сейсмические станции Камчатки, Командорских о-вов и о-ва Парамушир, оборудованные широкополосными велосиметрами CMG-3ТВ (1), CMG-6ТД (2), CM3oc (3), TC120 (4), STS-2 (5), KS2000 (6), Trillium 360 (7) (<http://sdis.emsd.ru/info/instruments/seismostations.php>).

**Fig. 3.** Seismic stations of Kamchatka, Commander Islands and Paramushir Island, equipped with broadband velocimeters CMG-3ТВ (1), CMG-6ТД (2), CM3oc (3), TS120 (4), STS-2 (5), KS2000 (6), Trillium 360 (7) (<http://sdis.emsd.ru/info/instruments/seismostations.php>).

их возникновения выбирались землетрясения с  $ML \geq 5$ , произошедшие в зоне ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН и за ее пределами (максимальные границы района обработки землетрясений в КФ ФИЦ ЕГС РАН <http://emsd.ru/lisva/reglament>). Всего за 2023 г. было зарегистрировано 50 таких событий; самое сильное из них произошло в 50 км от г. Петропавловска-Камчатского 3 апреля 2023 г.,  $M_w = 6.6$ .

Обработка проводилась с задержкой 1–7 суток в зависимости от сложности расчетов в каждом конкретном случае. Для инверсии были использованы волновые формы широкополосных сейсмических станций Камчатки и Сахалина; при необходимости привлекались записи станций сетей GSN (Global Seismic Network) на Дальнем Востоке России и Алеутских о-вах (США) и F-net (Япония).

Расчеты проводились для ТСМ типа DC (Double Couple, двойной диполь без момента) в соответствии с методикой, изложенной в работе (Абубакиров, Павлов, 2021). В процессе инверсии одновременно с ТСМ определялись глубина  $h_c$

эквивалентного точечного источника и длительность  $\tau$  его временной функции. По ТСМ рассчитывались параметры фокального механизма очага и скалярный сейсмический момент  $M_0$ . Значения моментной магнитуды вычислялись из  $M_0$  по формуле  $M_w = 2/3(\lg(M_0[H \cdot м]) - 9.1)$  (Kanamori, 1977).

Контроль качества определений ТСМ осуществлялся сравнением полученных параметров с решениями из каталога GCMT путем оценки угла  $K$  между тройками главных осей RSMT-механизмов и наилучших двойных диполей (BDC) для GCMT-решений, глубины эквивалентного точечного источника  $h_c$  (RSMT) с глубиной центра  $h_c$  (GCMT) и определений моментной магнитуды  $M_w$ . Сравнение оценок длительности  $\tau$  временной функции источника не проводилось, поскольку не является информативным из-за различия в способе ее определения в методиках RSMT и GCMT и низкой надежности определения  $\tau$  для слабых и умеренной силы землетрясений в методике RSMT (Абубакиров, Павлов, 2021).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Оценки ТСМ типа двойной диполь без момента, глубины  $h_c$  эквивалентного точечного источника и длительности  $\tau$  временной функции источника были получены для 37 событий с  $5.0 \leq ML \leq 6.6$  ( $4.4 \leq M_w \leq 6.6$ ). Для 13 событий оценку параметров очагов получить не удалось из-за недостатка данных с приемлемым отношением сигнал-шум.

По ТСМ были рассчитаны параметры фокальных механизмов, значения скалярного сейсмического момента  $M_0$  и моментной маг-

нитуды  $M_w$ , приведенные в таблице вместе с дополнительной информацией из камчатского каталога землетрясений. Диаграммы механизмов, дающие наглядное представление о типе, положении и пространственной ориентации реализовавшихся подвижек, приведены на рис. 4.

Для 25 событий, имеющих решения в каталоге GCMT, рассчитанные нами определения  $M_w$ ,  $h_c$  и фокальных механизмов были сопоставлены с оценками, полученными GCMT (рис. 5). Максимальное абсолютное значение разности  $\Delta M_w = M_w(\text{GCMT}) - M_w(\text{RSMT})$  составляет 0.16 единиц магнитуды, а для 80 % событий не

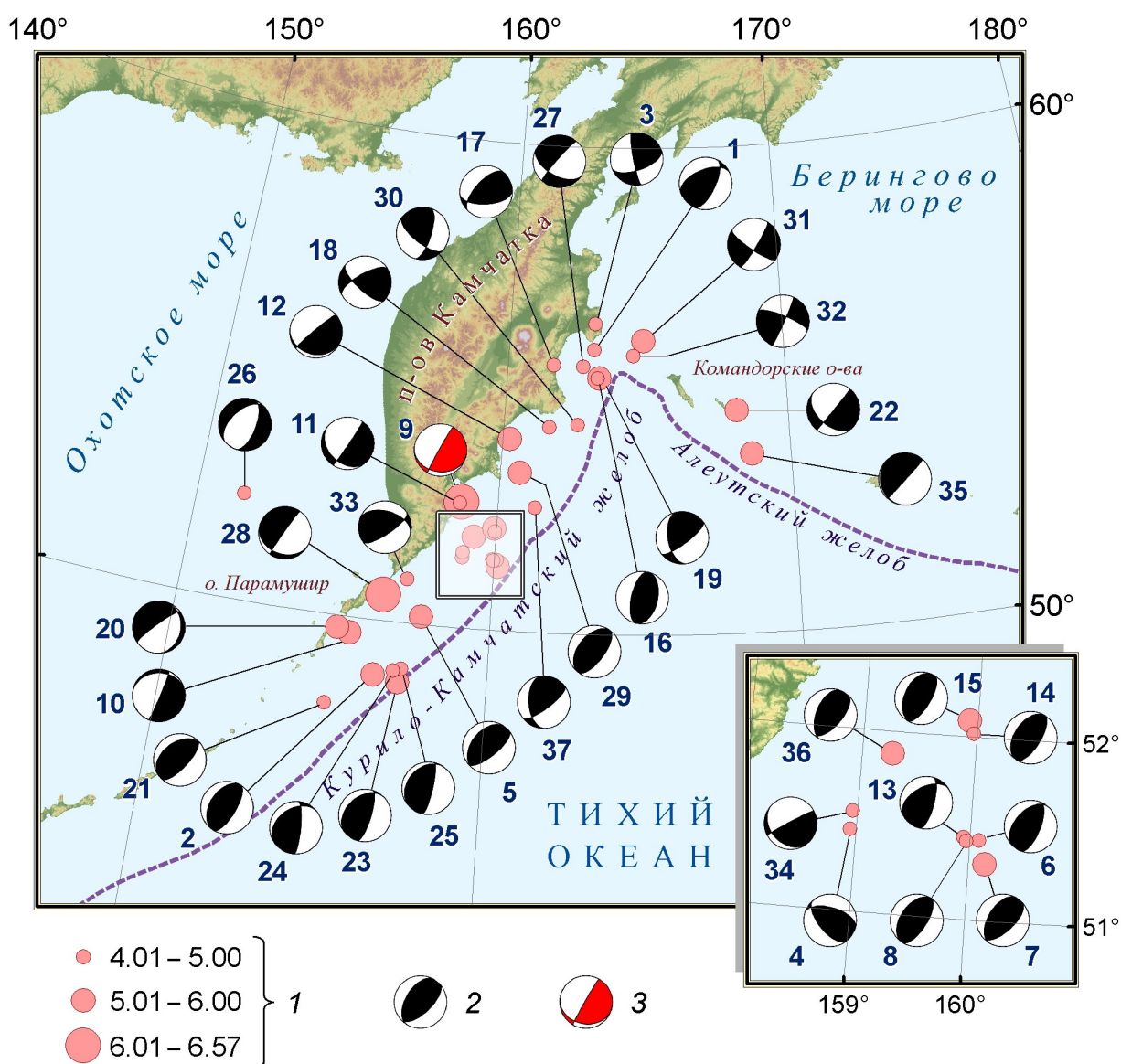


Рис. 4. Эпицентры камчатских землетрясений 2023 г. с  $ML \geq 5$  в трех диапазонах моментной магнитуды  $M_w$  (1), для которых были получены механизмы и параметры очагов; диаграммы DC-механизмов (2) в равноплощадной проекции нижней полусферы фокальной сферы (номера — по таблице); диаграмма DC-механизма (3) землетрясения 3 апреля 2023 г.,  $M_w$  6.6 (№ 9 в таблице).

Fig. 4. Epicenters of the 2023 Kamchatka earthquakes with  $ML \geq 5$  in three ranges of moment magnitude  $M_w$  (1), for which the mechanisms and focal parameters were obtained; diagrams of DC mechanisms (2) in an equal-area projection of the lower hemisphere of the focal sphere (numbers according to the table); diagram of the DC mechanism (3) of the earthquake of April 3, 2023,  $M_w$  6.6 (No. 9 in the table).

РАЕВСКАЯ, МАТВЕЕНКО

Механизмы и параметры очагов землетрясений Камчатки и Командорских островов в 2023 г. ( $ML \geq 5$ ), оперативно определенные путем инверсии региональных широкополосных записей в ТСМ типа двойной диполь без момента  
 Mechanisms and parameters of earthquake in Kamchatka and Commander Islands in 2023 ( $ML \geq 5$ ), operatively determined by inversion of regional broadband records into the seismic moment tensor for the double couple type without moment

№	дата, Г.М.Д	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
	время, Ч.МИН:С	$\varphi$ , с.Ш.	$\lambda$ , в.Д.	$h$ , км	$ML$	$h_{KM}$	$Ppl$ , °	$Pa2$ , °	$Npl$ , °	$Na2$ , °	$Tpl$ , °	$Ta2$ , °	$stkl$ , °	$dipI$ , °	$slipI$ , °	$stkl2$ , °	$dip2$ , °	$slip2$ , °	$\tau, c$	$M_{10}^{10} H.M.$	$p$	$M_w$	$n$	$\varepsilon, \%$	
1	2023.02.05	01:14:17	55.84	163.12	34	5.4	15	7	134	22	41	67	240	25	56	63	248	43	124	0	1.04	16	4.6	9	20.1
2	2023.02.07	06:45:39	48.88	156.47	45	5.8	15	15	121	0	31	75	300	31	60	89	212	30	91	0	9.96	16	5.3	11	17.1
3	2023.02.15	03:09:17	56.38	163.13	15	5.1	20	18	294	50	182	35	37	169	79	39	70	52	166	0	1.02	16	4.6	7	22.7
4	2023.02.25	06:25:17	51.45	158.95	58	5.4	45	2	214	18	305	72	119	141	50	114	286	46	64	2	1.67	16	4.8	6	13.6
5	2023.03.08	06:03:37	50.16	157.79	66	6.3	40	15	137	5	228	74	335	51	61	96	220	30	80	4	4.11	17	5.7	18	21
6	2023.03.08	16:10:50	51.44	160.08	54	5.2	15	11	120	9	28	75	258	22	57	79	222	35	107	0	2.93	16	4.9	9	18.9
7	2023.03.09	02:06:49	51.31	160.14	51	5.3	15	7	130	8	221	80	358	47	52	100	211	39	78	0	4.92	16	5.1	7	16.2
8	2023.03.14	10:01:13	51.43	159.97	68	5	15	11	123	0	33	79	301	33	56	89	214	34	91	0	1.29	16	4.7	8	20.9
9	2023.04.03	03:06:56	52.58	158.78	105	6.6	90	39	312	14	210	48	104	209	85	76	102	15	162	2	8.94	18	6.6	14	16.3
10	2023.04.07	02:22:39	49.68	155.59	128	6.1	90	49	281	11	24	39	123	23	85	-101	269	12	-24	2	6.71	17	5.8	13	21.3
11	2023.04.11	11:39:17	52.55	158.72	96	5.5	110	45	324	20	212	38	105	34	86	-69	133	21	-170	0	2.69	16	4.9	8	6.9
12	2023.04.18	02:40:51	53.94	160.25	123	6	100	37	329	10	231	51	128	230	83	80	105	12	144	0	2.96	17	5.6	13	18.4
13	2023.04.19	19:16:05	51.45	159.94	60	5.2	15	14	123	22	27	63	244	15	63	65	241	36	130	0	1.63	16	4.7	9	13.3
14	2023.05.03	19:06:11	52.02	159.97	45	5.4	40	11	123	1	32	78	297	32	56	89	214	34	92	0	1.94	16	4.8	10	10.6
15	2023.05.06	15:58:28	52.09	159.93	40	5.4	30	13	118	3	209	76	313	31	58	94	204	32	84	0	6.54	16	5.1	13	9.8
16	2023.05.11	04:48:51	55.26	163.26	32	5.1	10	8	283	0	13	82	103	193	53	90	13	37	90	0	1.4	16	4.7	5	37.1
17	2023.05.14	05:57:31	55.51	161.66	79	5.2	75	2	333	24	242	66	69	222	52	59	86	47	123	0	7.5	15	4.5	7	14.5
18	2023.05.28	01:17:40	54.22	161.61	67	5.3	55	1	187	47	278	43	96	133	62	146	241	60	33	0	7.42	15	4.5	10	15
19	2023.05.31	14:01:46	55.27	163.32	40	5.4	5	16	118	33	219	52	6	53	69	126	170	41	33	0	1.33	17	5.4	16	20.2
20	2023.07.01	09:14:58	49.76	155.19	151	5.5	120	55	156	10	52	33	316	234	79	-80	12	15	-131	0	10	16	5.3	7	14.7

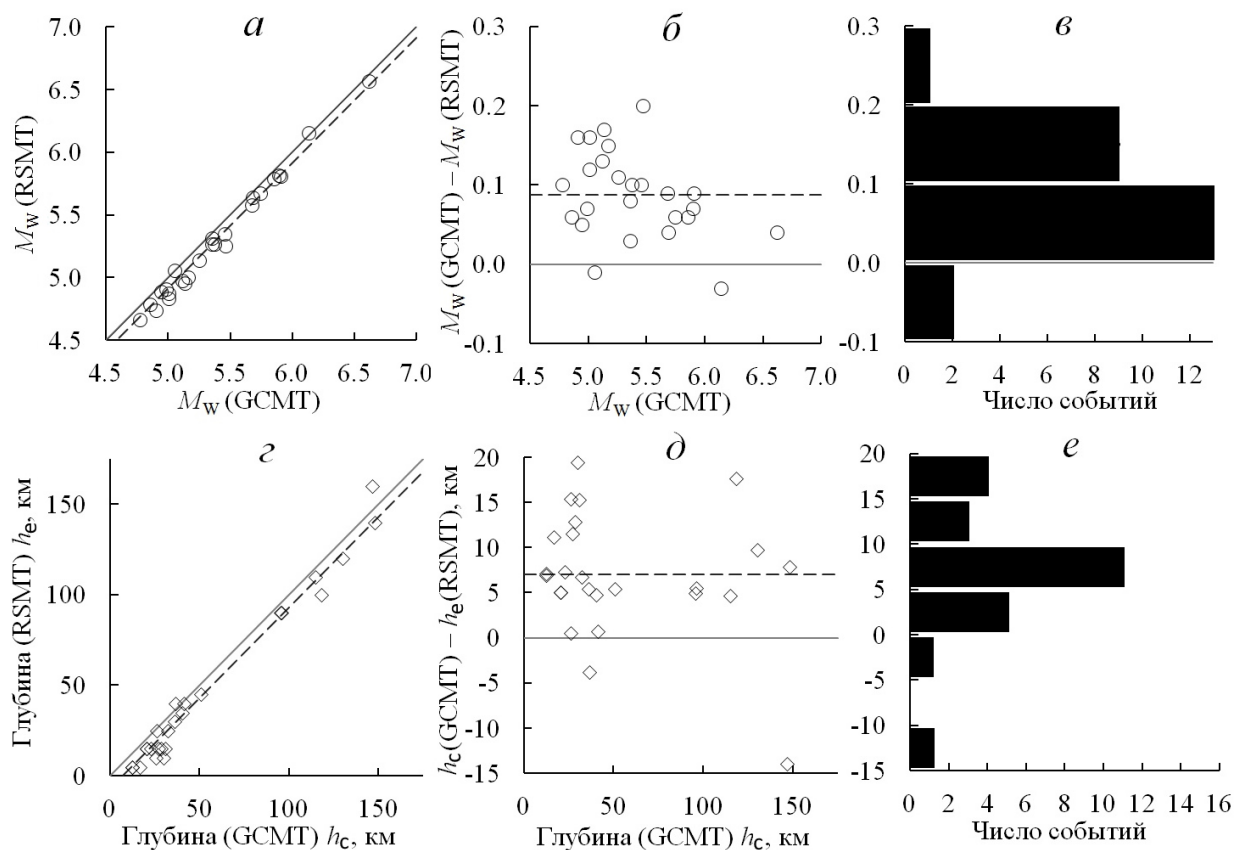
ОПЕРАТИВНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕНЗОРОВ МОМЕНТА

Окончание  
Continued

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
21	2023.07.15	21:11:35	48.19	155.09	86	5.4	25	17	137	5	46	72	301	43	62	85	235	28	100	0	3.42	16	5.0	6	14.5
22	2023.08.01	16:49:48	54.58	168.2	45	5.8	5	38	339	34	217	33	100	39	88	-56	133	35	-176	0	3.66	17	5.6	18	16.3
23	2023.08.16	15:02:31	48.77	157.26	17	5.7	15	23	116	11	22	64	267	17	69	78	228	25	118	0	9.71	16	5.3	11	22.5
24	2023.08.16	15:11:47	49.00	157.07	22	5.1	10	27	109	17	10	57	251	5	74	72	234	24	137	0	1.1	16	4.6	5	23.8
25	2023.08.16	18:43:45	49.05	157.33	30	5.4	10	29	109	8	15	59	271	13	75	82	222	17	118	2	2.28	16	4.8	7	22.4
26	2023.08.18	08:17:56	52.15	151.55	604	5.2	590	75	236	14	32	6	123	21	52	-107	228	41	-69	0	2.9	16	4.9	7	18.7
27	2023.08.30	04:38:12	55.49	162.73	58	5.2	25	41	95	38	228	26	340	221	81	-129	120	40	-14	0	5.92	15	4.5	7	17.7
28	2023.09.01	20:49:53	50.53	156.52	150	6.4	160	47	108	16	216	38	319	215	86	-106	110	17	-16	0	2.16	18	6.2	14	18.4
29	2023.10.16	06:48:31	53.26	160.68	55	5.7	45	12	128	1	37	78	305	37	57	89	218	33	91	0	1.21	17	5.3	18	11.4
30	2023.10.24	15:34:49	54.30	162.6	61	5.1	30	2	74	44	166	46	342	18	61	142	128	58	35	0	6.03	15	4.5	4	18.2
31	2023.10.26	16:05:12	56.04	164.89	47	5.7	5	20	347	70	182	5	79	31	80	-18	125	73	-169	2	6.57	17	5.8	11	15.5
32	2023.10.30	05:02:31	55.73	164.54	49	5	5	9	156	70	39	17	249	24	85	19	292	71	174	2	5.38	15	4.4	6	11.5
33	2023.12.10	08:51:34	50.90	157.22	146	5.4	140	17	165	23	68	61	287	56	66	64	286	35	134	0	2.64	16	4.9	9	20.8
34	2023.12.22	11:25:60	51.55	158.96	52	5.4	50	38	348	18	243	47	133	242	85	72	137	19	165	0	6.2	15	4.5	7	10.6
35	2023.12.23	15:30:59	53.68	168.67	127	5.8	10	42	129	4	222	48	316	42	87	94	172	5	39	0	4.1	16	5.0	8	10.1
36	2023.12.23	17:48:03	51.88	159.27	48	5.9	35	5	123	9	214	79	3	41	51	102	203	40	76	2	6.2	17	5.8	17	9.5
37	2023.12.24	18:42:39	52.56	161.25	47	5.2	25	16	121	29	220	56	4	53	67	121	176	38	39	0	3.71	16	5.0	11	16.7

Примечания. Номер столбца: 1 — порядковый номер землетрясения; 2–7 — данные каталога КФ ФИЦ ЕГС РАН (дата, время, широта, долгота и глубина гипоцентра, локальная магнитуда  $ML$ ); 8 — оценка глубины  $h_e$  эквивалентного точечного источника, полученная при расчете механизма; 9–14 — углы (*plunge, azimuth*), задающие ориентацию главных осей  $P, N, T$  механизма; 15–20 — углы (*strike, dip, slip*), задающие ориентацию нодальных плоскостей механизма; 21 — оценка длительности  $\tau$  временной функции источника; 22 — скалярный сейсмический момент; 23 — десятичный логарифм масштабированного момента при скалярном сейсмическом моменте; 24 — моментная магнитуда; 25 — число станций, записи которых использованы в расчетах; 26 — остаточная невязка.

Notes. Column number: 1 — earthquake serial number; 2–7 — data from the KB GS RAS catalogue (date, time, latitude, longitude and hypocenter depth, local magnitude  $ML$ ); 8 — estimated depth  $h_e$  of an equivalent point source obtained in the mechanism calculation; 9–14 — angles (*plunge, azimuth*) that define the orientation of the main axes  $P, N, T$  of the mechanism; 15–20 — angles (*strike, dip, slip*) that define the orientation of the nodal planes of the mechanism; 21 — estimated duration  $\tau$  of the source time function; 22 — scalar seismic moment; 23 — decimal logarithm of the scaling factor for the scalar seismic moment; 24 — moment magnitude; 25 — number of stations whose records were used in the calculations; 26 — residual error.



**Рис. 5.** Сопоставление оценок моментной магнитуды  $M_w$  (а) – (в) и глубины  $h_e$  эквивалентного точечного источника (с) – (е), представленных в таблице, с решениями из каталога GCMT. Сплошной линией на (а, с) отмечены точки, для которых соответствующие оценки совпадают, а на (б, д) нанесены разности; штриховой линией на (а, б, с, д) обозначены средние значения: 0.09 для  $\Delta M_w$  и 7.0 для  $\Delta h$ , стандартные отклонения составляют 0.06 и 7.0. На (в, е) показаны гистограммы зависимости для (б, д) соответственно.

**Fig. 5.** Comparison of the estimates of the moment magnitude  $M_w$  (a) – (в) and the depth  $h_e$  of the equivalent point source (с) – (е), presented in table, with the solutions from the GCMT catalogue. The solid line in (a, с) marks the points for which the corresponding estimates coincide; in (б, д) the differences are plotted; the dashed line in (а, б, с, д) denotes the average values: 0.09 for  $\Delta M_w$  and 7.0 for  $\Delta h$ , the standard deviations are 0.06 and 7.0. In (в, е) the histograms of the dependence for (б, д), respectively, are shown.

превышает 0.1. Среднее значение  $\mu(\Delta M_w) = 0.09$ ; стандартное отклонение  $\sigma(\Delta M_w) = 0.06$ .

Максимальное абсолютное значение разности  $\Delta h = h_c(\text{GCMT}) - h_c(\text{RSMT})$  достигает 20 км, а для 69 % событий не превышает 10 км. Среднее значение  $\mu(\Delta h) = 7.0$  км, стандартное отклонение  $\sigma(\Delta h) = 7.0$  км.

Величина угла  $K$  между тройками между тройками главных осей фокальных механизмов RSMT (DC) и GCMT (BDC) лежит в интервале 0–25° для 88 % событий, для остальных 12 % — в интервале 27–29° (рис. 6).

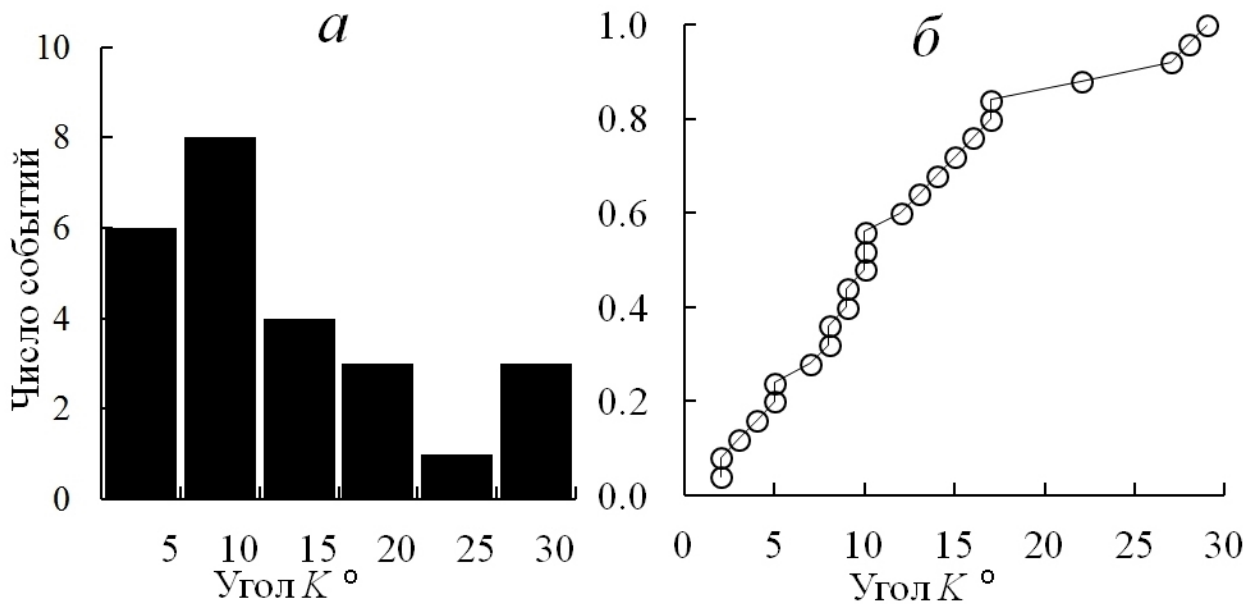
Результаты сопоставления оценок  $M_w(\text{RSMT})$ ,  $M_w(\text{GCMT})$  и значения угла  $K$  хорошо согласуются с соответствующими результатами, полученными в работе (Абубакиров, Павлов, 2021). Незначительный систематический дефицит моментной магнитуды  $M_w(\text{RSMT})$  относительно  $M_w(\text{GCMT})$  в пределах  $\Delta M_w \approx 0.1$  может объясняться тем, что в условиях медленного роста очагового спектра с увеличением периода

в диапазоне от десятка до сотен секунд среднепериодная оценка  $M_w(\text{RSMT})$  оказывается меньше длиннопериодной оценки  $M_w(\text{GCMT})$  (Абубакиров и др., 2018; Абубакиров, Павлов, 2021).

В работе (Абубакиров, Павлов, 2021) для поверхностных землетрясений предлагается оценки глубины  $h_c(\text{RSMT})$ , меньшие относительно  $h_c(\text{GCMT})$ , считать более правдоподобными, т.к. для решений GCMT действует ограничение на минимум глубины 12 км из-за сложности ее определения по длиннопериодным волновым формам. Для промежуточных и глубоких событий предпочтение рекомендуется отдавать оценкам  $h_c(\text{GCMT})$ , поскольку они обеспечены большим количеством данных и лучшим азимутальным покрытием.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С 1 января 2023 г. в КФ ФИЦ ЕГС РАН завершено определение механизмов очагов



**Рис. 6.** Гистограмма (а) и статистическая функция распределения (б) значений угла  $K$  между тройками главных осей фокальных механизмов RSMT (DC) и GCMT (BDC).

**Fig. 6.** Histogram (a) and statistical distribution function (б) values of the angle  $K$  between the triplets of the principal axes of the focal mechanisms RSMT (DC) and GCMT (BDC) tensors.

камчатских землетрясений по знакам первых вступлений объемных волн. Полученный по этой методике каталог охватывает период 1970–2022 гг. и является наиболее полным и однородным из подобных каталогов для камчатского региона. В то же время, его данные рекомендуется с осторожностью использовать при проведении научных исследований по причине существенного расхождения определений большей части механизмов очагов индивидуальных событий с данными каталога GCMT.

С начала 2023 г. проводится оперативный (в течение 1–7 суток после возникновения сейсмического события) расчет тензоров сейсмического момента типа двойной диполь без момента для землетрясений Камчатки и Командорских о-вов по методике RSMT (Regional Seismic Moment Tensor), разработанной в КФ ФИЦ ЕГС РАН. Для инверсии используются волновые формы смещений на широкополосных сейсмических станциях Камчатки, Сахалина и сетей GSN (Global Seismic Network) на Дальнем Востоке России и Алеутских о-вах (США) и F-net (Япония). Одновременно с тензором определяются глубина  $h_c$  эквивалентного точечного источника, длительность  $\tau$  временной функции источника; по параметрам тензора рассчитывается механизм очага и скалярный сейсмический момент  $M_0$ . Из значений  $M_0$  вычисляется моментная магнитуда  $M_w$ . За 2023 г. получен каталог механизмов и параметров очагов для 37 из 50 событий из камчатского каталога землетрясений с  $5.0 \leq ML \leq 6.6$ ; ( $4.4 \leq M_w \leq 6.6$ ), произошедших в зоне ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН и за ее пределами.

Для событий 2023 г., имеющих определения в каталоге GCMT, сравнение значений  $M_w$  показывает, что определения  $M_w$ (RSMT) систематически незначительно (в пределах  $\Delta M_w \approx 0.1$ ) меньше определений  $M_w$ (GCMT). Глубины  $h_c$ (RSMT) оцениваются в среднем на 7 км меньше  $h_c$ (GCMT). Величина угла  $K$  между тройками главных осей механизмов из каталогов RSMT (DC) и GCMT (BDC) лежит в интервале 0–25° для 88 % событий, для остальных 12 % — в интервале 27–29°. Эти результаты демонстрируют хорошее согласование определений механизмов и параметров очагов по методике RSMT с определениями GCMT. Оперативный каталог ТСМ продолжает пополняться и в настоящее время доступен по запросу к ответственному исполнителю [gaevs@emsd.ru](mailto:gaevs@emsd.ru).

Авторы выражают глубокую благодарность В.М. Павлову и И.Р. Абубакирову за руководство, помощь и поддержку, оказанные А.А. Раевской в освоении методики RSMT.

Работа выполнена с использованием данных, полученных на УНУ (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>) в рамках государственного задания № 075-00604-25.

#### Список литературы [References]

Абубакиров И.Р., Гусев А.А., Гусева Е.М. и др. Мас-совое определение моментных магнитуд  $M_w$  и установление связи между  $M_w$  и  $ML$  для умеренных и слабых камчатских землетрясений // Физика Земли. 2018. № 1. С. 37–51 [Abubakirov I.R., Gusev A.A., Guseva E.M. et al. Mass determination of moment magnitudes  $M$  and establishment of a

- relationship between MW and ML for moderate and weak Kamchatka earthquakes // *Physics of the Earth*. 2018. №. 1. P. 33–47. <https://doi.org/10.1134/S1069351318010019>.
- Абубакиров И.Р., Павлов В.М.* 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 [*Abubakirov I.R., Pavlov V.M.* Catalog of earthquake focal mechanisms in Kamchatka and the Commander Islands for 2013, determined by wave forms // *Earthquakes of Northern Eurasia*. Iss. 22 (2013). Obninsk: GS RAS, 2019. Supplement on CD-ROM].
- Абубакиров И.Р., Павлов В.М.* Каталог механизмов очагов землетрясений Камчатки и Командорских островов за 2014 г. // *Землетрясения Северной Евразии*. Вып. 23 (2014 г.). Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. Приложение на CD ROM [*Abubakirov I.R., Pavlov V.M.* Catalog of earthquake focal mechanisms in Kamchatka and the Commander Islands for 2014 // *Earthquakes in Northern Eurasia*. Iss. 23 (2014). Obninsk: GS RAS, 2020. Supplement on CD ROM].
- Абубакиров И.Р., Павлов В.М., Раевская А.А.* Каталог механизмов очагов землетрясений Камчатки и Командорских островов за 2015 г. // *Землетрясения Северной Евразии*. Вып. 24 (2015 г.). Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. Приложение на CD-ROM [*Abubakirov I.R., Pavlov V.M., Raevskaya A.A.* Catalog of earthquake focal mechanisms in Kamchatka and the Commander Islands for 2015 // *Earthquakes in Northern Eurasia*. Iss. 24 (2015). Obninsk: GS RAS, 2021. Supplement on CD-ROM].
- Абубакиров И.Р., Павлов В.М., Раевская А.А.* Каталог механизмов очагов землетрясений Камчатки и Командорских островов за 2016–2017 гг. // *Землетрясения Северной Евразии*. 2022. Вып. 25 (2016–2017 гг.). Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, [Электронное приложение]. URL: <http://www.ceme.gsras.ru/zse/app-25.html> [*Abubakirov I.R., Pavlov V.M., Raevskaya A.A.* Catalog of earthquake focal mechanisms in Kamchatka and the Commander Islands for 2016–2017 // *Earthquakes of Northern Eurasia*. Iss. 25 (2016–2017). Obninsk: GS RAS, 2022 [Electronic supplement]. URL: <http://www.ceme.gsras.ru/zse/app-25.html>].
- Абубакиров И.Р., Павлов В.М., Раевская А.А.* Каталог механизмов очагов землетрясений Камчатки и Командорских островов за 2018–2019 гг. // *Землетрясения Северной Евразии*. Вып. 26 (2018–2019 гг.). Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2023 [Электронное приложение]. URL: <http://www.ceme.gsras.ru/zse/app-26.html> [*Abubakirov I.R., Pavlov V.M., Raevskaya A.A.* Catalog of earthquake focal mechanisms in Kamchatka and the Commander Islands for 2018–2019 // *Earthquakes of Northern Eurasia*. Iss. 26 (2018–2019). Obninsk: GS RAS, 2023 [Electronic supplement]. URL: <http://www.ceme.gsras.ru/zse/app-26.html>].
- Абубакиров И.Р., Павлов В.М., Раевская А.А.* Каталог механизмов очагов землетрясений Камчатки и Командорских островов за 2020 г. // *Землетрясения Северной Евразии*. Вып. 27 (2020 г.). Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2024 [Электронное приложение]. URL: <http://www.ceme.gsras.ru/zse/app-27.html> [*Abubakirov I.R., Pavlov V.M., Raevskaya A.A.* Catalog of earthquake focal mechanisms in Kamchatka and the Commander Islands for 2020 // *Earthquakes of Northern Eurasia*. Iss. 27 (2020). Obninsk: GS RAS, 2024 [Electronic supplement]. URL: <http://www.ceme.gsras.ru/zse/app-27.html>].
- Абубакиров И.Р., Павлов В.М.* Определение тензора момента двойного диполя для землетрясений Камчатки по волновым формам региональных сейсмических станций // *Физика Земли*. 2021. № 3. С. 45–62. <https://doi.org/10.31857/S0002333721030017> [*Abubakirov I.R., Pavlov V.M.* Determining the Double Couple Moment Tensor for Kamchatka Earthquakes from Regional Seismic Waveforms // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2021. V. 57. Iss. 3. P. 332–347. <https://doi.org/10.1134/S1069351321030010>].
- Аптекман Ж.Я., Желанкина Т.С., Кейлис-Борок В.И. и др.* Массовое определение механизмов очагов землетрясений на ЭВМ // *Теория и анализ сейсмологических наблюдений*. М.: Наука, 1979. С. 45–58. (Вычислительная сейсмология, вып. 12) [*Aptekman Zh.Ya., Zhelankina T.S., Keilis-Borok V.I. et al.* Mass determination of earthquake focal mechanisms on a computer // *Theory and analysis of seismological observations*. Moscow: Nauka, 1979. P. 45–58. (Computational Seismology, issue 12) (in Russian)].
- Аптекман Ж.Я., Захарова А.И., Кронрод Т.Л., Чепкунас Л.С.* Представление данных о механизме очагов землетрясений. Введение международного формата // *Землетрясения в СССР в 1985 году*. М.: Наука, 1988. С. 11–15 [*Aptekman Zh.Ya., Zakharova A.I., Kronrod T.L., Chepkunas L.S.* Presentation of data on the mechanism of earthquake foci. Introduction of an international format // *Earthquakes in the USSR in 1985*. Moscow: Nauka, 1988. P. 11–15 (in Russian)].
- Введенская А.В.* Исследование напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций. М.: Наука, 1969. 136 с. [*Vvedenskaya A.V.* Study of stresses and displacements in earthquake centres using the theory of dislocations. Moscow: Nauka, 1969. 136 p. (in Russian)].
- Зобин В.М.* Механизм очагов землетрясений и сеймотектоническое деформирование Камчатско-Командорского региона в 1964–1982 гг. // *Вулканология и сейсмология*. 1987. № 6. С. 78–92 [*Zobin V.M.* Mechanism of earthquake foci and seismotectonic deformation of the Kamchatka-Commander region in 1964–1982 // *Vulkanologiya i seismologiya*. 1987. №. 6. P. 78–92 (in Russian)].
- Иванова Е.И., Ландер А.В., Токарев А.В. и др.* Каталог механизмов очагов землетрясений Камчатки и Командорских островов за период 1980–2007 гг. // *Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Третьей научно-технической конференции, 9–15 октября 2011 г. Петропавловск-Камчатский*. 2011. С. 74–79 [*Ivanova Ye.I., Lander A.V., Tokarev A.V. et al.* Catalogue of earthquake focal mechanisms in Kamchatka and the Commander Islands for the 1980–2007 // *Problemy kompleksnogo geofizicheskogo*

- monitoringa Dal'nego Vostoka Rossii. Trudy Tret'ey nauchno-tehnicheskoy konferentsii, 9–15 oktyabrya 2011 g. Petropavlovsk-Kamchatskiy. 2011. P. 74–79 (in Russian)].
- Левина В.И., Чебров В.Н.* Камчатка и Командорские острова // Землетрясения России в 2006 г. Обнинск: ГС РАН, 2009. С. 42–47. [*Levina V.I., Chebrov V.N.* Kamchatka and the Commander Islands // *Zemletryaseniya v Rossii v 2006 godu.* Obninsk: GS RAS, 2009. P. 42–47 (in Russian)].
- Павлов В.М., Абубакиров И.Р.* Алгоритм расчета тензора сейсмического момента сильных землетрясений по региональным широкополосным сейсмограммам объемных волн // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 2. Вып. 20. С. 149–158 [*Pavlov V.M., Abubakirov I.R.* Algorithm for calculating the seismic moment tensor of strong earthquakes using regional broadband seismograms of body waves // *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle.* 2012. No. 2. Issue 20. P. 149–158 (in Russian)].
- Федотов С.А.* Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука. 1972. 117 с. [*Fedotov S.A.* Energy classification of Kuril-Kamchatka earthquakes and the problem of magnitudes. Moscow: Nauka. 1972. 117 p. (in Russian)].
- Чебров В.Н., Дрознина С.Я., Сеньюков С.Л.* Камчатка и Командорские острова // Землетрясения России в 2013 году. Обнинск, 2015. С. 58–65 [*Chebrov V.N., Droznina S.Ya., Senyukov S.L.* Kamchatka and the Commander Islands // *Zemletryaseniya v Rossii v 2013 godu.* Obninsk, 2015. P. 58–65 (in Russian)].
- 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 [*Chubarova O.S., Gusev A.A., Chebrov V.N.* Properties of ground vibrations during the Olyutor earthquake of 20.04.2006 and its aftershocks according to digital recording data. // *Journal of Volcanology and Seismology.* 2010. № 2. P. 126–138].
- Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Кугаенко Ю.А. и др.* Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 18–40 [*Chebrov V.N., Droznin D.V., Kugaenko Yu.A. et al.* The system of detailed seismological observations in Kamchatka in 2011 // *Journal of Volcanology and Seismology.* 2013. V. 7. Iss. 1. P. 16–36].
- Dziewonski A.M., Chou T.-A., Woodhouse J.H.* Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity. *Journal Geophysical Research.* 1981. V. 86. № B4. P. 2825–2852. <https://doi.org/10.1029/JB086iB04p02825>
- Ekström G., Nettles M., Dziewonski A.M.* The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes // *Physics of the Earth and Planetary Interiors.* 2012. V. 200–201. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2012.04.002>
- Kagan Y.* Simplified algorithms for calculating double-couple rotation // *Geophysical Journal International.* 2007. V. 171. Iss. 1. P. 411–418.
- Kanamori H.* The energy release in great earthquakes // *Journal Geophysical Research.* 1977. V. 82. № 20. P. 2981–2987.

## OPERATIVE DETERMINATION OF DOUBLE COUPLE MOMENT TENSORS OF KAMCHATKA AND KOMANDER ISLANDS EARTHQUAKES IN 2023

A.A. Raevskaya, E.A. Matveenko

*Kamchatka Branch of Geophysical Survey of RAS, Petropavlovsk-Kamchatskiy, Russia, 683006*

Received August 16, 2024; revised April 09, 2025; accepted June 25, 2025

The Kamchatka Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (KB GS RAS) is working to determine the focal mechanisms of earthquakes in Kamchatka and the Commander Islands. Since the early 1970s, the mechanisms have been calculated based on the signs of the first arrivals of body waves. Since 2010, with the deployment of a network of broadband digital seismic stations in Kamchatka, seismic moment tensors have been determined using the Regional Seismic Moment Tensor (RSMT) technique developed at the KB GS RAS. Since January 1, 2023, the determination of focal mechanisms and parameters using RSMT has been carried out in real time; maintenance of the catalog based on the signs of the first arrivals has been completed. The paper presents an operative catalog of focal mechanisms and parameters of Kamchatka earthquakes for 2023, obtained at the KB GS RAS using the RSMT technique for double-dipole-type tensors without a moment. The definitions of focal mechanisms of focal points, moment magnitude  $M_w$  and equivalent point source depth given in the catalogue are in good agreement with the solutions obtained by the GCMT (Global Centroid Moment Tensor) agency.

*Keywords: Kamchatka, earthquakes, catalog of source mechanisms, seismic moment tensor.*