

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2012 ГОДА

© Б. Г. Пустовитенко, И. В. Калинюк, Е. А. Мержей, А. А. Пустовитенко

Институт геофизики им. С. И. Субботина Национальной академии наук Украины

Приведены динамические параметры очагов семи землетрясений Крыма за 2012 г. с $K_{II}=8.1\div 12.1$, восстановленные по 47-ми амплитудным спектрам объемных волн P и S . Используются записи пяти региональных цифровых сейсмостанций. Для наиболее сильного землетрясения 10 декабря с $K_{II}=12.1$ в расчет сейсмического момента введена поправка за направленность излучения из очага на станции регистрации, полученная из решения механизма очага. Средние значения сейсмических моментов и радиусов круговой дислокации очагов землетрясений 2012 г. в пределах погрешностей их определения соответствуют средним долговременным зависимостям параметров от энергетического уровня землетрясений, полученным по аналоговым записям.

Исходные данные. Для расчета амплитудных спектров и оценки по ним динамических параметров очагов землетрясений Крыма, произошедших в 2012 г., использованы записи волновых форм, зарегистрированных на региональных цифровых сейсмических станциях. Для анализа отбирались записи только с четкими (i) вступлениями продольных P - и поперечных S -волн, амплитуды которых превышают фон помех как минимум в 2 раза, а амплитудно-частотные характеристики регистрирующих каналов на сейсмических станциях определены достаточно надежно. В соответствии с данными критериями, отобраны сейсмограммы семи землетрясений в диапазоне энергетических классов $K_{II}=8.1\div 12.1$; пространственное распределение очагов показано на рис. 1, а их основные параметры приведены в таблице 1 по работе [1].

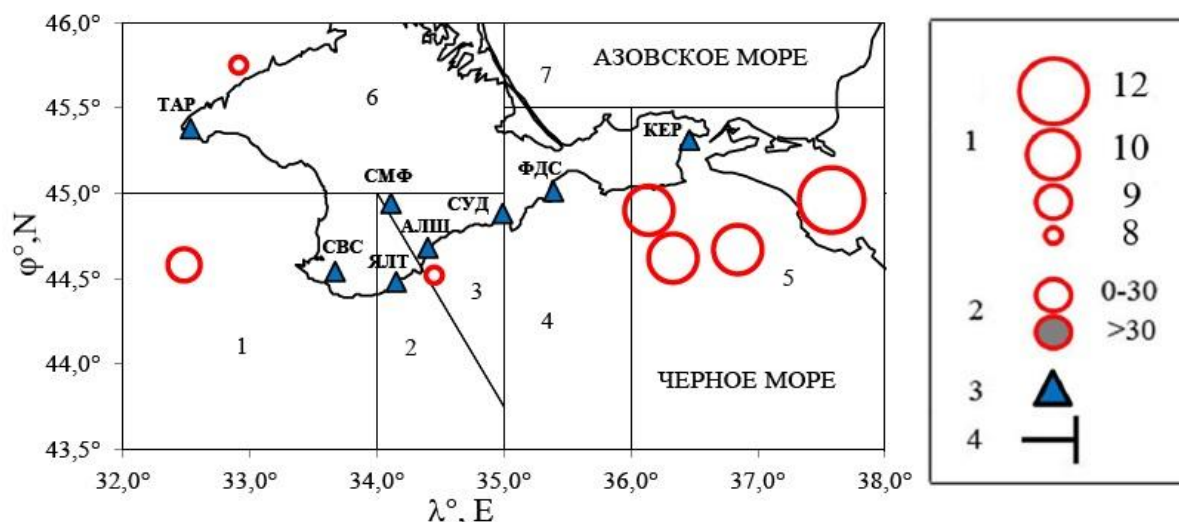


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений за 2012 г., для которых восстановлены очаговые параметры. 1 – энергетический класс K_{II} ; 2 – глубина очага, км; 3 – сейсмические станции; 4 – границы районов

Наибольшее количество изученных землетрясений относится к Керченско-Анапской зоне (район 5), по одному – к Севастопольской (район 1) и центральной зонам (район 3) и к Степному Крыму (район 6).

Таблица 1. Основные параметры землетрясений Крыма за 2012 год, для которых восстановлены очаговые параметры

№ п/п	Время возникновения землетрясения, t_0					Координаты эпицентра			Глубина очага, км		Энергетический класс		Магнитуда			Район
	мес	день	ч	мин	с	$\varphi^\circ N$	$\lambda^\circ E$	$\delta\varphi^\circ, \delta\lambda^\circ$	h	δh	K_{II}	δK	M_w/N^*	δM_w^*	MSH	
1	1	4	1	4	39.4	44.52	34.45	0.02	20	1	8.2	0.4	2.7/3	0.1		3
2	1	30	17	56	35.9	44.67	36.84	0.06	17	6	9.8	0.2	3.6/3	0.2	3.2	5
3	7	11	12	32	31.5	45.75	32.91	0.03	6	3	8.1	0.2	3.0/1			6
4	9	16	21	43	16.2	44.58	32.48	0.04	14	4	8.8	0.2	3.0/5	0.2		1
5	10	17	19	6	36.0	44.62	36.33	0.05	9	4	9.8	0.2	3.5/6	0.1	3.2	5
6	12	10	16	56	56.1	44.96	37.58	0.05	24	4	12.1	0.4	4.3/7	0.1	4.6	5
7	12	17	9	7	23.5	44.90	36.14	0.07	21	6	9.8	0.2	3.3/4	0.15	3.0	5

* Значения M_w/N и погрешность δM_w даны по результатам настоящей работы, где N – количество станционных определений (см. ниже табл.).

Для восстановления динамических параметров очагов использовано 47 записей объемных P - и S -волн на пяти региональных сейсмических станциях: «Алушта» (ALU), «Севастополь» (SEV), «Симферополь» (SIM), «Судак» (SUDU) и «Ялта» (YAL). Общая статистика использованного материала по каждой станции дана в табл. 2 и на рис. 2.

Таблица 2. Статистика использованного экспериментального материала

Станции	% участия	Количество спектров, N	Количество записей объемных волн	
			S	P
«Алушта»	86	14	9	5
«Севастополь»	71	10	10	0
«Симферополь»	14	3	2	1
«Судак»	71	13	8	5
«Ялта»	43	8	6	2

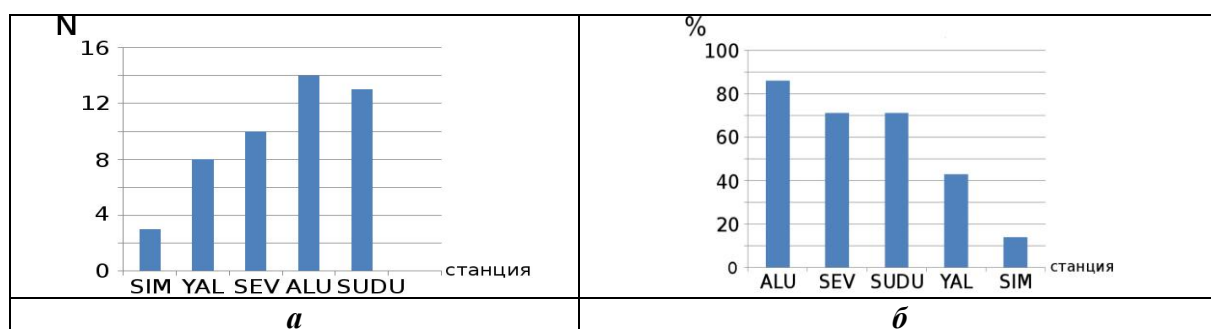


Рис. 2. Распределение количества использованных записей по сейсмическим станциям (а) и процент участия отдельных станций в оценке очаговых параметров землетрясений (б)

Наибольшее количество амплитудных спектров получено по станциям «Алушта» и «Судак» (рис. 2а), и наименьшее – по ст. «Симферополь». Процент участия первых двух станций и станции «Севастополь» в общей оценке динамических параметров отдельных землетрясений также наибольший, соответственно 86% и 71% (рис. 2б). В большинстве случаев станционные определения очаговых параметров получены как по S -, так и P -волнам.

Методика обработки и интерпретация амплитудных спектров.

Амплитудные спектры S -волн для всех землетрясений рассчитывались по двум горизонтальным составляющим ($N-S$) и ($E-W$) и вычислялся полный вектор колебаний, а P -волн – по вертикальной (Z). Относительная длительность исследуемого участка записи, как и при обработке аналоговых сейсмограмм [3], принята равной $\tau_{1/3}$, т. е. взят интервал времени от вступления S - и P -волн до времени спада максимальных колебаний A_{\max} на уровень $1/3$ от максимальной амплитуды записи A_{\max} . Примеры волновых форм землетрясений различного энергетического уровня по записям отдельных станций приведены на рис. 3.

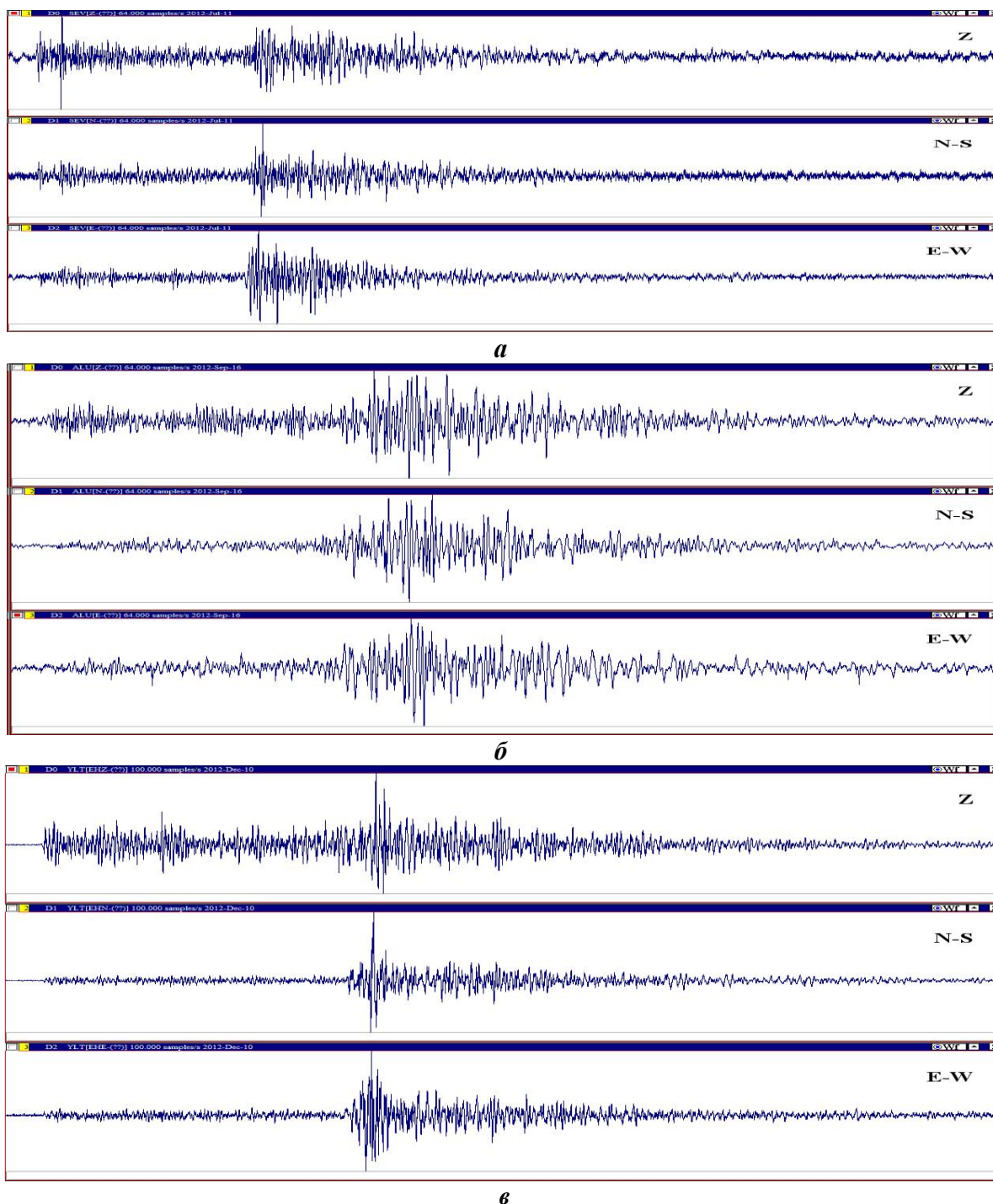
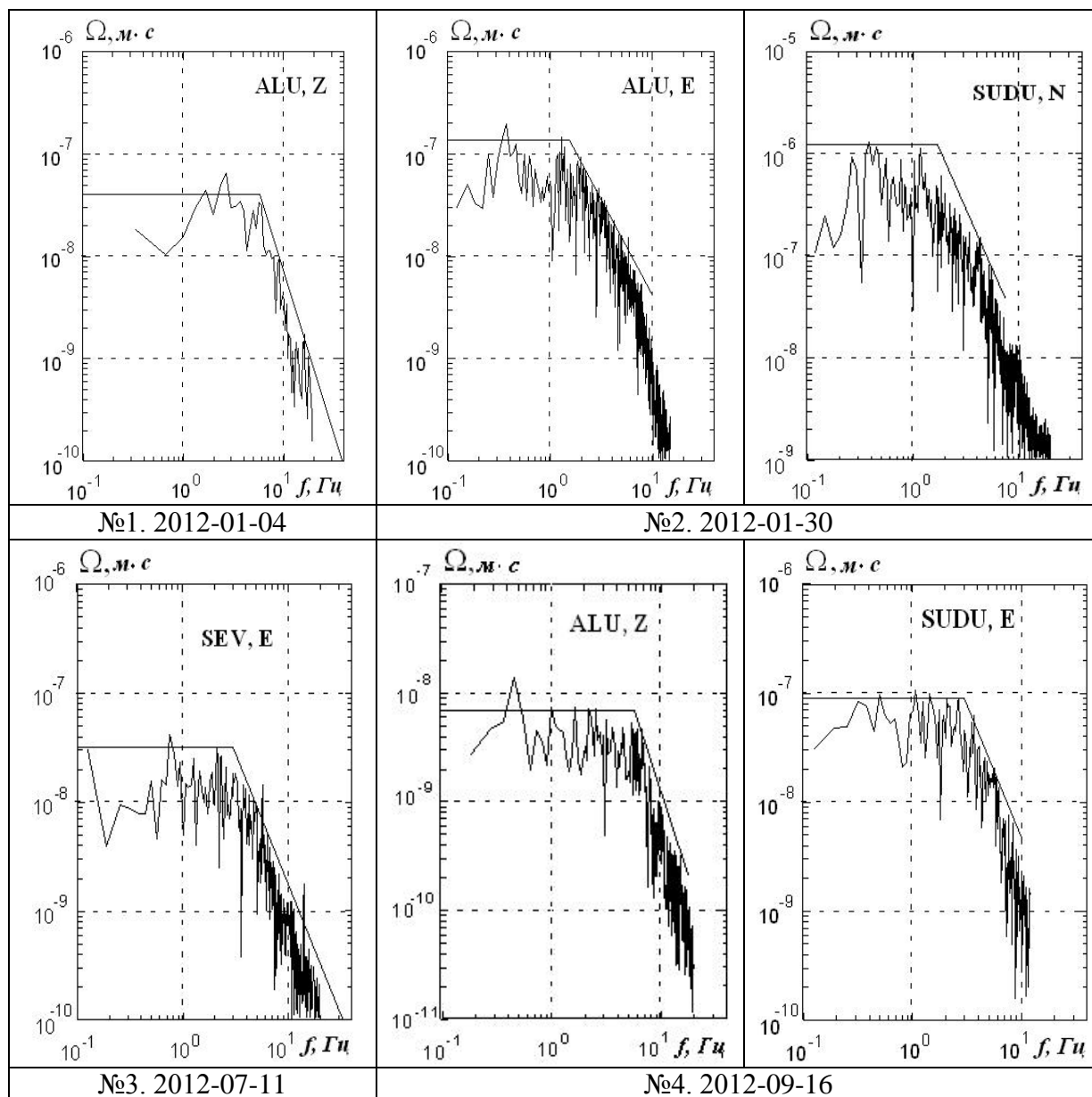


Рис. 3. Примеры цифровых записей землетрясений по составляющим Z , $N-S$, $E-W$: а – 11 июля с $Kп=8.1$; б – 16 сентября с $Kп=8.8$; в – 10 декабря с $Kп=12.1$ соответственно по станциям «Севастополь», «Алушта» и «Ялта»

Спектры рассчитаны стандартным методом быстрого преобразования Фурье. Интерпретация спектров выполнена в рамках дислокационной модели Бруна (ω^{-2}) [4].

Полученные спектры записей землетрясений Крыма за 2012 г. надежно аппроксимируются двумя прямыми: в длиннопериодной части спектра – прямой, параллельной оси частот, в области коротких периодов – наклонной прямой с угловым коэффициентом $\gamma \sim -2$, что соответствует дислокационной теоретической модели. Примеры спектров и их аппроксимация в рамках выбранной модели даны на рис. 4.



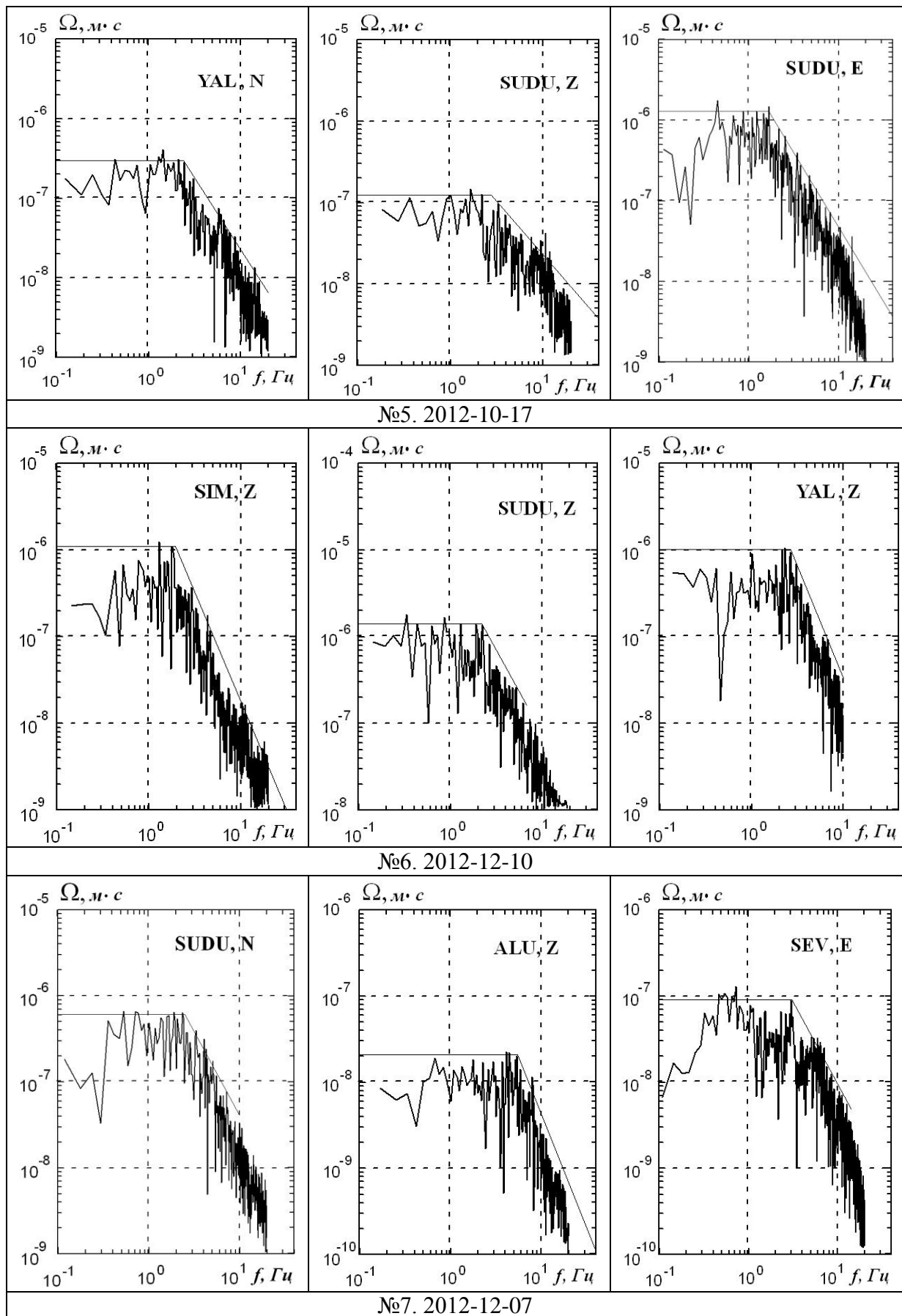


Рис. 4. Примеры амплитудных спектров объемных сейсмических волн землетрясений Крыма за 2012 год по записям региональных цифровых сейсмостанций. Номера и даты землетрясений соответствуют таковым в таблице 1

Расчет динамических параметров. К динамическим параметрам очагов относятся: сейсмический момент M_0 и размер разрыва, представленный в модели Бруна радиусом круговой дислокации r_0 , сброшенное напряжение $\Delta\sigma$, величина деформации сдвига ε , кажущееся напряжение $\eta\bar{\sigma}$, величина радиационного трения σ_r , средняя подвижка по разрыву \bar{U} (или величина дислокации), энергия образования дислокации в очаге E_U и моментная магнитуда M_w (табл. 4). Методика и формулы для расчета динамических параметров очагов по стационарным спектрам описаны в работах [3–6].

Для наиболее сильного землетрясения 10 декабря с $K_p=12.1$ по данным о параметрах механизма из работы [2], рассчитаны диаграммы направленности излучения волн P и S из очага на станции регистрации (рис. 5) и оценены вводимые для расчета скалярного сейсмического момента очага данного землетрясения M_0 поправки $R_{\theta\phi}$ для станций, использованных в работе (табл. 3).

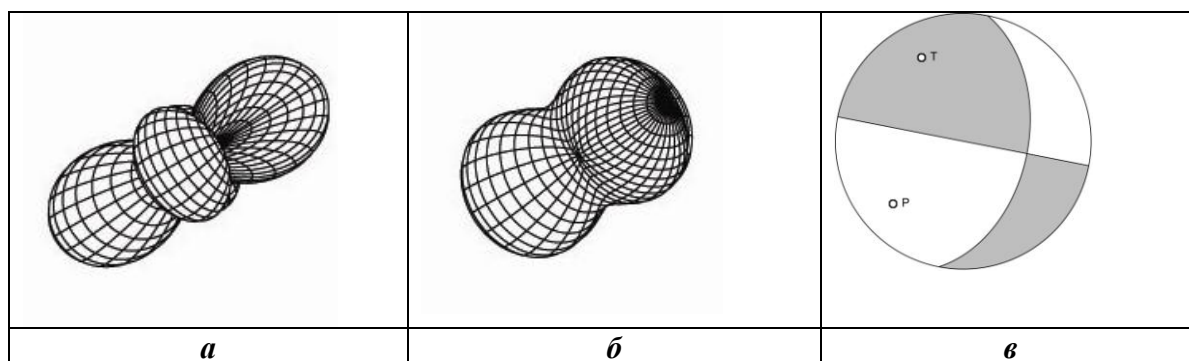


Рис. 5. Объемное представление направленности излучения для волн $P(a)$ и $S(b)$ (вид сверху) при землетрясении 10 декабря 2012 г. с $K_p=12.1$ в соответствии с решением механизма очага (v) по работе [2]

Таблица 3. Значения $R_{\theta\phi}$ для землетрясения 10 декабря 2012 г.

Станция	«Алушта»		«Симферополь»		«Севастополь»		«Судак»		«Ялта»	
	P	S	P	S	P	S	P	S	P	S
$R_{\theta\phi}$	0.45	0.88	0.28	0.94	0.49	0.86	0.34	0.92	0.55	0.82

Моментная магнитуда определена по индивидуальным оценкам сейсмических моментов M_0 с использованием формулы Канамори [7]. Большинство динамических параметров получено по пяти и более независимым стационарным определениям. Только для одного слабого сейсмического толчка из района б (вблизи полуострова Тарханкут) динамические параметры рассчитаны по записям поперечной волны S на одной ближайшей к очагам станции «Севастополь» (табл. 4).

Осреднение стационарных динамических параметров (кроме радиационного трения $\Delta\sigma_r$) и вычисление их стандартных отклонений выполнены, как и прежде, с учетом логнормального закона распределения величин [3]. Поскольку индивидуальные стационарные значения $\Delta\sigma_r$ имеют знакопеременный характер, то их среднее значение вычислено по среднегеометрическим для данного очага напряжениям $\Delta\sigma$ и $\eta\bar{\sigma}$ по формуле [6]: $\Delta\sigma_r = 1/2\Delta\sigma - \eta\bar{\sigma}$. Среднее значение моментной магнитуды M_w определено как среднее арифметическое с соответствующей погрешностью. Результаты расчета стационарных и средних для землетрясения динамических параметров очагов представлены в табл. 4. Для каждой станции указаны эпицентральное расстояние Δ км, тип использованной волны (P , S) и составляющая записи, где ($N+E$) означает полный вектор колебаний.

Таблица 4. Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крыма за 2012 год

Станция	Волна	Сост.	Δ , км	$\Omega_0 \cdot 10^{-6}$, м·с	$\sum \Omega_0 \cdot 10^{-6}$, м·с	f_0 , Гц	$M_0 \cdot 10^{13}$, Н·м	r_0 , км	$\Delta\sigma \cdot 10^5$, Па	$\varepsilon \cdot 10^{-6}$	$\bar{u} \cdot 10^{-2}$, м	$\eta\sigma \cdot 10^5$, Па	$\Delta\sigma_r \cdot 10^5$, Па	$E_u \cdot 10^{15}$, эрг	Mw
№ 1. 4 января; $t_0=1$ ч 4 мин 39.4 с; $\varphi = 44.52^\circ$; $\lambda = 34.45^\circ$; $h = 20$ км; $K = 8.2$															
ALU	P	Z	18	0.042		6.2	1.53	0.38	1.27	4.22	0.11	0.87	-0.24	0.32	2.7
ALU	S	N+E	18		0.2	3.8	1.39	0.35	1.39	4.63	0.12	0.96	-0.27	0.32	2.7
YAL	S	N+E	24		0.11	5.6	1.12	0.24	3.56	11.9	0.21	1.2	0.58	0.66	2.6
X- среднее значение							1.34	0.32	1.85	6.15	0.14	1.00	-0.07	0.41	2.7
стандартное отклонение							0.04	0.06	0.14	0.14	0.09	0.04		0.10	0.1
№ 2. 30 января; $t_0=17$ ч 56 мин 35.9 с; $\varphi = 44.67^\circ$; $\lambda = 36.84^\circ$; $h = 17$ км; $K = 9.8$															
SUDU	P	Z	147	0.12		3.0	36.6	0.78	3.43	11.5	0.65	0.82	0.9	20.9	3.7
SUDU	S	N+E	147		1.6	1.8	93.3	0.74	9.88	32.9	1.78	0.32	4.6	154	3.9
ALU	S	N+E	193		0.2	2.0	10.2	0.67	1.47	4.92	0.24	2.95	-2.2	2.5	3.3
X- среднее значение							32.7	0.73	3.68	12.3	0.65	0.92	0.92	20.0	3.6
стандартное отклонение							0.28	0.02	0.24	0.24	0.25	0.28		0.52	0.2
№ 3. 11 июля; $t_0=12$ ч 32 мин 31.5 с; $\varphi = 45.75^\circ$; $\lambda = 32.91^\circ$; $h = 6$ км; $K = 8.1$															
SEV	S	N+E	147		0.07	3.0	3.44	0.42	2.0	6.67	0.2	0.33	0.67	1.15	3.0
№ 4. 16 сентября; $t_0=21$ ч 43 мин 16.2 с; $\varphi = 44.58^\circ$; $\lambda = 32.48^\circ$; $h = 14$ км; $K = 8.8$															
ALU	P	Z	152	0.008		5.5	1.48	0.41	0.97	3.26	0.095	2.55	-2.06	0.24	2.7
ALU	S	N+E	152		0.07	3.2	2.36	0.40	1.67	5.56	0.16	1.6	-0.76	0.66	2.85
SEV	S	N+E	95		0.075	3.1	2.37	0.41	1.52	5.1	0.15	1.6	-0.83	0.6	2.85
SUDU	P	Z+E	201	0.02		4.8	7.38	0.47	3.2	10.7	0.36	0.51	1.09	3.95	3.2
SUDU	S	N+E	201		0.15	3.2	10.1	0.40	7.11	23.7	0.68	0.37	3.18	11.9	3.3
X- среднее значение							3.61	0.42	2.24	7.48	0.22	1.04	0.08	1.35	3.0
стандартное отклонение							0.16	0.01	0.15	0.15	0.15	0.16		0.31	0.2

№ 5. 17 октября; $t_0=19$ ч 6 мин 36.0 с; $\varphi = 44.62^\circ$; $\lambda = 36.33^\circ$; $h = 9$ км; $K = 9.8$															
ALU	S	N+E	152		0.34	2.0	11.5	0.63	1.98	6.59	0.3	2.6	-1.6	3.78	3.3
SEV	S	N+E	210		0.3	2.0	21.0	0.63	3.62	12.1	0.55	1.43	0.38	12.7	3.5
SUDU	P	Z	109	0.12		3.0	23.9	0.74	2.53	8.45	0.45	1.25	0.01	10.1	3.5
SUDU	S	N+E	109		1.5	1.9	54.5	0.67	8.05	26.8	1.3	0.55	3.47	73.0	3.8
YAL	P	Z	173	0.052		3.5	13.7	0.64	2.3	7.68	0.36	2.19	-1.04	5.3	3.4
YAL	S	N+E	173		0.35	2.1	16.8	0.60	3.35	11.2	0.49	1.79	-0.11	9.38	3.4
X- среднее значение							20.4	0.65	3.22	10.76	0.51	1.47	0.14	11.0	3.5
стандартное отклонение							0.10	0.01	0.09	0.09	0.09	0.10		0.18	0.1
№ 6. 10 декабря; $t_0=16$ ч 56 мин 56.1 с; $\varphi = 44.96^\circ$; $\lambda = 37.58^\circ$; $h = 24$ км; $K = 12.1$															
ALU	P	Z	252	0.8		1.8	242	1.29	4.9	16.3	1.54	11.1	-8.6	197	4.2
SIM	P	Z	272	1.0		2.0	402	1.16	11.2	37.2	3.15	6.65	-1.1	747	4.3
SIM	S	N+E	272		7.1	1.1	162	1.22	3.9	13.1	1.16	16.5	-14.5	106	4.1
YAL	P	Z	275	1.0		2.3	345	1.01	14.6	48.6	3.58	7.75	-0.5	838	4.3
YAL	S	N+E	275		3.6	1.2	451	1.12	14.2	47.2	3.84	5.9	1.15	1050	4.4
SUDU	P	Z	203	1.3		2.1	641	1.11	20.6	68.7	5.54	4.2	6.13	2200	4.5
SEV	S	N+E	311		5.66	1.0	324	1.34	5.9	19.6	1.91	8.2	-5.3	317	4.3
X- среднее значение							339	1.17	9.2	30.5	2.61	7.90	-3.3	515	4.3
стандартное отклонение							0.07	0.02	0.10	0.10	0.09	0.07		0.17	0.1
№ 7. 17 декабря; $t_0=9$ ч 7 мин 23.5 с; $\varphi = 44.90^\circ$; $\lambda = 36.14^\circ$; $h = 21$ км; $K = 9.8$															
ALU	P	Z	132	0.022		5.1	4.21	0.47	1.83	6.1	0.21	7.1	-6.2	1.3	3.0
ALU	S	N+E	132		0.3	2.0	11.0	0.67	1.6	5.3	0.26	2.7	-1.9	2.9	3.3
SEV	S	N+E	199		0.22	2.0	17.3	0.67	2.5	8.4	0.41	1.73	-0.5	7.3	3.4
SUDU	S	N+E	90		0.78	2.2	27.8	0.61	5.4	17.9	0.79	1.1	1.6	25.0	3.6
X- среднее значение							12.22	0.60	2.51	8.35	0.36	2.46	-1.2	5.12	3.3
стандартное отклонение							0.17	0.04	0.12	0.12	0.13	0.17		0.28	0.15

Обсуждение результатов. Получено хорошее согласие всех стационарных определений динамических параметров с очень малыми стандартными отклонениями от средних значений (табл. 4). В связи с этим, восстановленные очаговые параметры для изученных землетрясений 2012 г. можно отнести к категории надежных. Для большинства землетрясений индивидуальные значения моментных магнитуд M_w определены с погрешностью ± 0.1 . Наибольшие значения сейсмического момента M_0 , r_0 , $\Delta\sigma$, ϵ , u , E_u получены для землетрясения 10 декабря с $K_{II}=12.1$ и $h=24$ км (№6), произошедшего в Керченско-Анапской зоне очагов (район 5), а наименьшее – для слабого землетрясения 4 января с $K_{II}=8.2$ и $h=20$ км (№1) в центральной части региона вблизи ЮБК (район 3). В целом, с ростом энергии землетрясений происходит увеличение значений всех динамических параметров, кроме радиационного трения, которое характеризует степень нарушения среды и гладкость скольжения по разрыву.

Вместе с тем, в пределах одного и того же диапазона энергетических классов наблюдаются различия очаговых параметров (табл. 4). Так для землетрясений № 2, 5, 7 с $K_{II}=9.8$ средние значения сейсмического момента, средней подвижки по разрыву и кажущегося напряжения отличаются в 2–2.5 раза, сброшенного напряжения и упругой деформации сдвига примерно в 1.5 раза, а дислокационной энергии в очаге – в 2–4 раза. Близкими по значениям получились только средние радиусы круговой дислокации. Такие различия очаговых параметров землетрясений одного уровня энергий естественны и могут быть объяснены как особенностями процессов в очаге каждого землетрясения и свойствами глубинной среды, вмещающий очаг, так и погрешностями в определении глубин очагов, а следовательно, и скоростей продольных и поперечных волн в очаговой зоне, используемых для расчета динамических параметров.

С учетом скалярного сейсмического момента $M_0=3.39 \cdot 10^{15}$ Н·м (см. табл. 4) параметры механизма очага из работы [2] пересчитаны в компоненты тензора сейсмического момента (рис. 6).

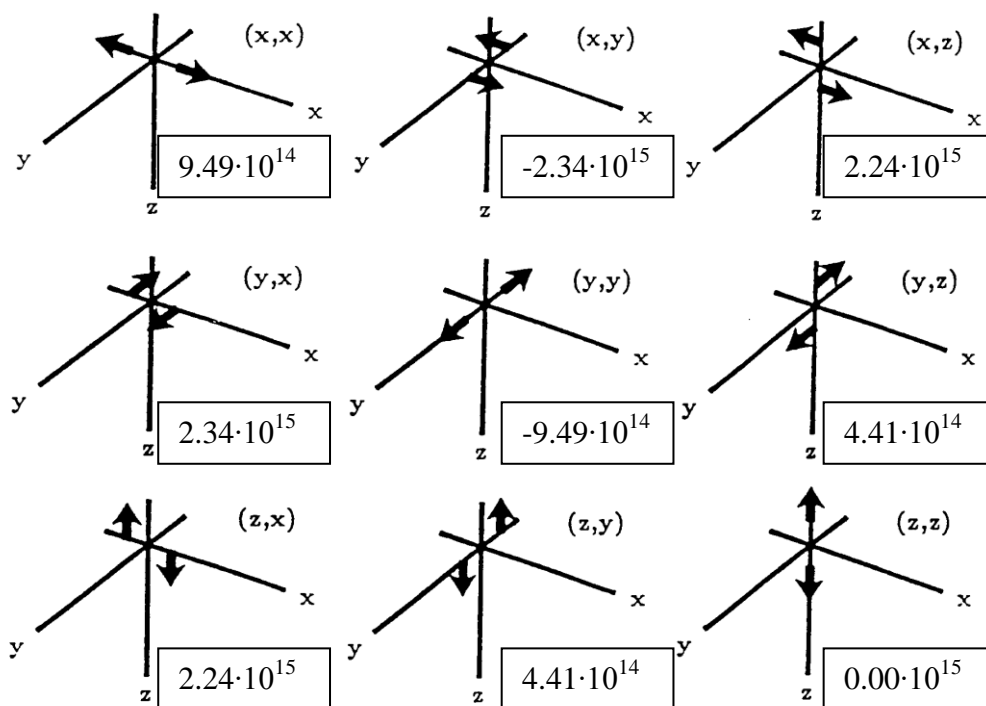


Рис. 6. Компоненты тензора сейсмического момента (Н·м) очага землетрясения 10 декабря 2012 г. с $K_{II}=12.1$ и $M_0=3.39 \cdot 10^{15}$ Н·м

Как и в предыдущие годы [8–10] проведем сравнение полученных в 2012 г. динамических параметров очагов со средними их долговременными величинами (рис. 7). Сравнение проведено только для прямых определений по спектрам сейсмического момента M_0 и радиуса круговой дислокации r_0 , поскольку остальные параметры напрямую с ними связаны. Используются зависимости от энергии землетрясений $M_0(K_{II})$ и $r_0(K_{II})$, полученные по записям с аналоговой регистрации сейсмических волн [3, 11].

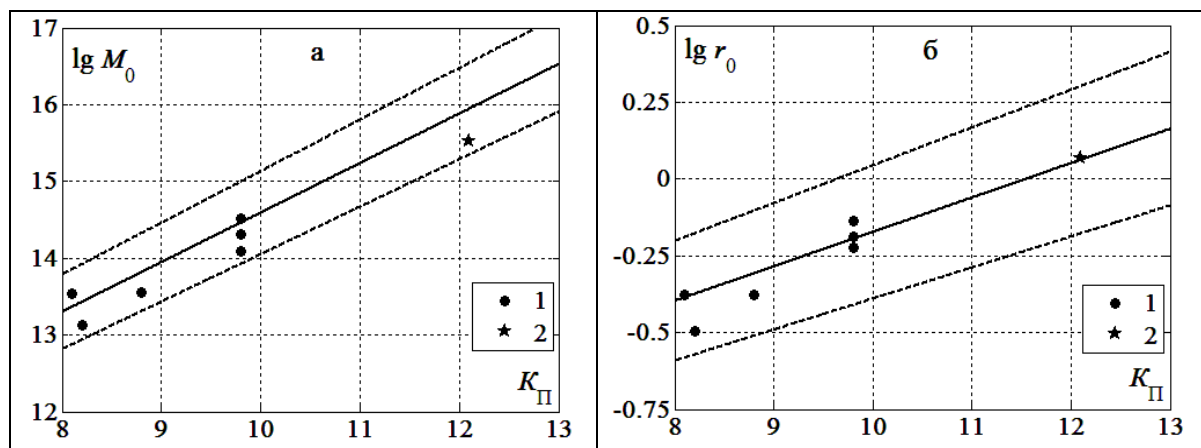


Рис. 7. Сравнение динамических параметров очагов землетрясений Крыма за 2012 г. (*а* – сейсмического момента, *б* – радиуса круговой дислокации) с долговременными зависимостями исследуемых параметров от энергетического класса K_{II} (прямые линии). Пунктиром обозначены пределы погрешностей. 1 – экспериментальные значения за 2012 г; 2 – значения для землетрясения 10 декабря с известным механизмом очага

Полученные средние значения M_0 и r_0 по группе станций удовлетворяют долговременным зависимостям $M_0(K_{II})$, $r_0(K_{II})$, находясь в их доверительных областях (рис. 7*а*, *б*). При этом для двух событий δM_0 имеют положительные значения, а для пяти – отрицательные. В отличие от предыдущих лет [8–10] за 2012 год большинство значений радиусов круговой дислокации r_0 (рис. 7*б*) – находится вблизи долговременной зависимости $r_0(K_{II})$. Полное соответствие $r_0(K_{II})$ отмечено для трех землетрясений: самого сильного 10 декабря с $K_{II}=12$ (№6), 17 октября с $K_{II}=9.8$ (№5) и слабого из района Степного Крыма с $K_{II}=8.1$ (№3). Таким образом, высказанное нами ранее предположение [8, 9], что завышение δr_0 для большинства землетрясений 2009–2010 гг. «может быть объяснено использованием более широкополосных цифровых сейсмических каналов по сравнению с прежними аналоговыми», не подтверждается результатами расчета очаговых параметров как за 2012 год, так и за предыдущий 2011 г. [10]. Вероятно, причины широкого диапазона определяемых динамических параметров в пределах одного уровня энергии зависят не только от технических причин (способа регистрации), но в большей степени – от пространственно-временных вариаций динамических параметров и полноты учета искажающих сигнал факторов.

1. **Каталог и подробные данные** о землетрясениях Крымско-Черноморского региона за 2012 г. (отв. составители: Н. М. Козиненко, В. А. Свидлова, З. Н. Сыкчина; составители: Г. П. Антонюк, В. А. Антонюк, М. Н. Бондарь, И. В. Курьянова, А. В. Подвинцев, Ж. Н. Лукьянова, А. В. Росляков // Сейсмологический бюллетень Украины за 2012 год – Наст. сборник. – С. 57–85.
2. **Габсатарова И. П., Малянова Л. С., Селиванова Е. А., Якушева В. Н.** Землетрясение 10 декабря 2012 года с $M_w=4.6$ вблизи г. Анапы // Сейсмологический бюллетень Украины за 2012 год – Наст. сборник. – С. 35–45.

3. **Пустовитенко Б. Г., Пантелева Т. А.** Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма. – Киев: Наук. думка, 1990. – 251 с.
4. **Brune I. V.** Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // J.Geophys. Res.–1970. – V. 75, № 26. – P. 4997–5009.
5. **Аптекман Ж. Я., Белавина Ю. Ф., Захарова А. И. и др.** Спектры *P*-волн в задаче определения динамических параметров очагов землетрясений. Переход от стационарного спектра к очаговому и расчет динамических параметров очага // Вулканология и сейсмология. –1989.– № 2. – С. 66–79.
6. **Костров Б.** Механика очага тектонического землетрясения. – М.: Наука, 1975. – 179 с.
7. **Kanamori H.** Quantification of great earthquakes // Tectonophysics. –1978. – № 49, № 3/4. – P. 207 – 210.
8. **Пустовитенко Б. Г., Калинин И. В., Мерзей Е. А.** Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крыма 2009 года // Сейсмологический бюллетень Украины за 2009 год. – Севастополь: НПЦ "ЭКОСИ-Гидрофизика", 2011 – С. 11–23.
9. **Пустовитенко Б. Г., Калинин И. В., Мерзей Е. А.** Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крыма 2010 года // Сейсмологический бюллетень Украины за 2010 год. – Севастополь: НПЦ "ЭКОСИ-Гидрофизика", 2011 – С. 11–23.
10. **Пустовитенко Б. Г., Калинин И. В., Мерзей Е. А., Пустовитенко А. А.** Очаговые параметры землетрясений Крыма 2011 года // Сейсмологический бюллетень Украины за 2011 г. – Севастополь: НПЦ ЭКОСИ – "Гидрофизика", 2012 – С. 17–35.
11. **Пустовитенко Б. Г., Пустовитенко А. А., Капитанова С. А., Поречнова Е. И.** Пространственные особенности очаговых параметров землетрясений Крыма // Сейсмичность Северной Евразии. Материалы Международной конференции. – Обнинск: ГС РАН, 2008. – С. 238–242.