

ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА

Б.Г. Пустовитенко, И.В. Калинюк, А.А. Пустовитенко

*Институт сейсмологии и геодинамики Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского,
г. Симферополь, bpustovitenko@mail.ru*

Аннотация. Приведены динамические параметры очагов семи землетрясений Крыма за 2012 г. с $K_{\Gamma}=8.1-12.1$, восстановленные по 47 амплитудным спектрам объемных P - и S -волн. Использованы записи пяти региональных цифровых сейсмических станций. Для наиболее сильного землетрясения 10 декабря с $K_{\Gamma}=12.1$ в расчет сейсмического момента введена поправка за направленность излучения из очага на станции регистрации, полученная из решения механизма очага. С учетом скалярного сейсмического момента $M_0=4 \cdot 10^{15}$ Н·м параметры механизма очага пересчитаны в компоненты тензора сейсмического момента. Наибольшие значения динамических параметров M_0 , r_0 , $\Delta\sigma$, ε , u , Eu получены для землетрясения 10 декабря с $K_{\Gamma}=12.1$ ($M_w=4.3$), произошедшего в Керченско-Анапской зоне очагов, а наименьшие – для слабого землетрясения 4 января с $K_{\Gamma}=8.2$ ($M_w=2.7$) в центральной части региона. В целом, с ростом энергии землетрясений наблюдается увеличение значений всех динамических параметров, кроме радиационного трения, которое характеризует степень нарушенности среды и гладкость скольжения по разрыву. Вместе с тем, в пределах одного и того же энергетического диапазона землетрясений наблюдаются различия очаговых параметров, вероятно связанные как с особенностями свойств очагов и глубинной среды, так и с невозможностью полностью учесть все искажающие сейсмический сигнал факторы. В целом получено хорошее согласие всех индивидуальных станционных определений динамических параметров с малыми стандартными отклонениями от средних значений, что позволяет восстановленные очаговые параметры землетрясений 2012 г. отнести к категории надежных. Средние значения сейсмических моментов и радиусов круговой дислокации очагов землетрясений 2012 г. в пределах погрешностей их определения соответствуют средним долгосрочным зависимостям параметров от энергетического уровня землетрясений, полученным ранее по аналоговым записям.

Abstract. The article contains the dynamic parameters of the foci of the seven Crimean earthquakes in 2012 with $K_{\Gamma}=8.1-12.1$ restored by 47 amplitude spectra of body waves P and S . The recordings of five regional digital seismic stations have been used. For the strongest earthquake of December 10, with $K_{\Gamma}=12.1$ the seismic moment has been calculated with amendment to the direction of the radiation from the source at the registering station, obtained from the solution of the focal mechanism. Taking into account the scalar seismic moment $M_0=4 \cdot 10^{15}$ N·m the parameters of the focal mechanism have been translated into components of the seismic moment tensor. The highest values of dynamic parameters M_0 , r_0 , $\Delta\sigma$, ε , u , Eu have been obtained for the earthquake on December 10 with $K_{\Gamma}=12.1$ ($M_w=4.3$) which occurred in the Kerch-Anapa foci area, and the smallest ones have been obtained for the weak January 4 earthquake, with $K_{\Gamma}=8.2$ ($M_w=2.7$) in the central part of the region. Overall, with the increase of the earthquake energy, an increase in the values of all dynamic parameters has been observed, except for the radiation friction, which characterizes the degree of disturbance of the environment and the smoothness of glide along the rupture. However, within the same energy range of the earthquakes, there are differences in focal parameters which are probably related to both the characteristic properties of foci and depth medium and inability to fully take into account all factors distorting the seismic signal. In general, good agreement was obtained for each individual station determination of dynamic parameters with small standard deviations from the average values which allows to classify the restored focal parameters of 2012 earthquakes, as reliable. The average values of seismic moments and radii of circular dislocation of the 2012 earthquakes foci within the experimental error of their determination correspond to average long-term dependencies of the parameters on the energy level of earthquakes obtained previously by analog records.

Исходные данные. Для расчета амплитудных спектров и оценки по ним динамических параметров очагов землетрясений Крыма, произошедших в 2012 г., использованы записи волновых форм на региональных цифровых сейсмических станциях только с четкими (i) вступлениями продольных P - и поперечных S -волн, амплитуды которых превышали фон помех как минимум в два раза, а амплитудно-частотные характеристики регистрирующих каналов на сейсмических станциях были определены достаточно надежно. В соответствии с данными критериями отобраны сейсмограммы семи наиболее значимых землетрясений в диапазоне энергетических классов $K_{\Gamma}=8.1-12.1$ (табл. 1), пространственное положение которых показано на рис. 1.

Таблица 1. Основные параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2012 г., для которых рассчитаны динамические параметры очагов

№	Дата, д м	t_0 , ч мин с	Эпицентр		h , км	Магнитуда			K_{II}	Район
			φ°, N	λ°, E		M_c	M_w/n	MSH		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	04.01	01 04 39.4	44.52	34.45	20		2.7/3		8.2	Алуштинский (№ 3)
2	30.01	17 56 35.9	44.67	36.84	17	3.2	3.6/3	3.2	9.8	Керченско-Анапский (№ 5)
3	11.07	12 32 31.5	45.75	32.91	6		3.0/1		8.1	Степной Крым (№ 6)
4	16.09	21 43 16.8	44.58	32.48	14		3.0/5		8.8	Севастопольский (№ 1)
5	17.10	05 18 45.8	44.62	36.33	9	3.7	3.5/6	3.2	9.8	Керченско-Анапский (№ 5)
6	10.12	16 56 56.1	44.96	37.58	24	4.3	4.3/7	4.6	12.1	Керченско-Анапский (№ 5)
7	17.12	16 31 40.8	44.90	36.14	21		3.3/4	3.0	9.8	Керченско-Анапский (№ 5)

Примечание. Параметры землетрясений в графах 2–7, 9,11 соответствуют таковым в [1]; значения M_w/n – из табл. 3.

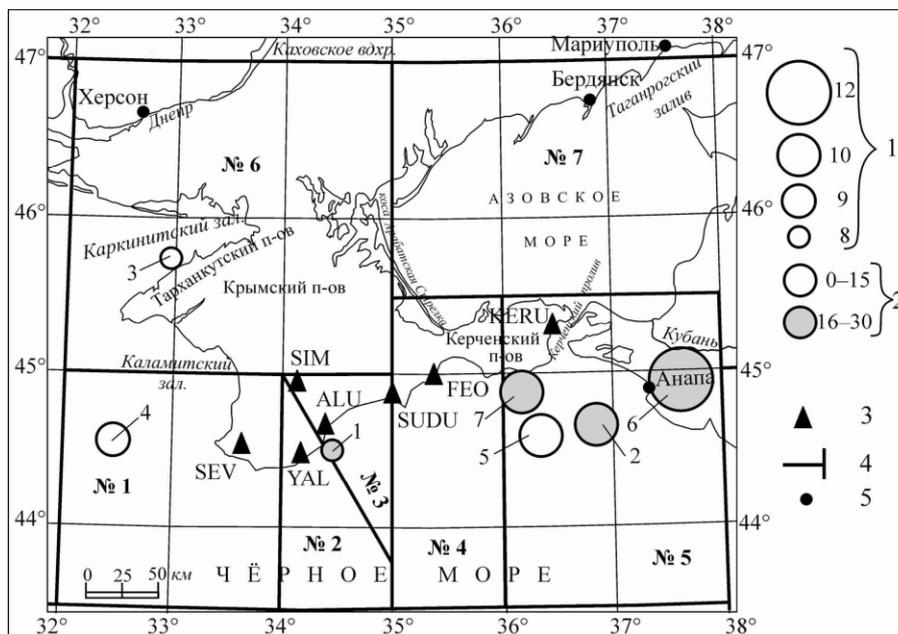


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2012 г., для которых определены динамические параметры очагов

1 – энергетический класс K_{II} [2]; 2 – глубина очага h , км; 3 – сейсмическая станция; 4 – граница районов; 5 – населенный пункт.

Наибольшее число изученных землетрясений относится к Керченско-Анапскому району № 5, по одному – к районам: Севастопольскому № 1, Алуштинскому № 3 и Степному Крыму № 6. Если для района № 5 взяты только наиболее сильные события с $K_{II} > 9.5$, то для остальных – относительно слабые с $K_{II} = 8.1–8.8$, но представляющие интерес из-за их географического положения для пополнения статистики по менее изученным районам.

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), для которых в 2012 г. надежно определены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) сейсмографов. Пример АЧХ сейсмической станции «Севастополь» приведен на рис. 2.

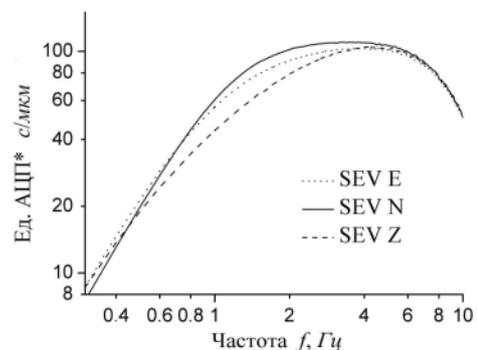


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики сейсмографов на сейсмической станции «Севастополь» в 2012 г.

Наибольшее число амплитудных спектров получено по станциям «Алушта» и «Судак» (рис. 3, а), наименьшее – по станции «Симферополь». Процент участия первых двух станций и станции «Севастополь» в общей оценке динамических параметров отдельных землетрясений также наибольший, соответственно 86 % и 71 % (рис. 3, б). В большинстве случаев станционные определения очаговых параметров получены как по S -, так и P -волнам.

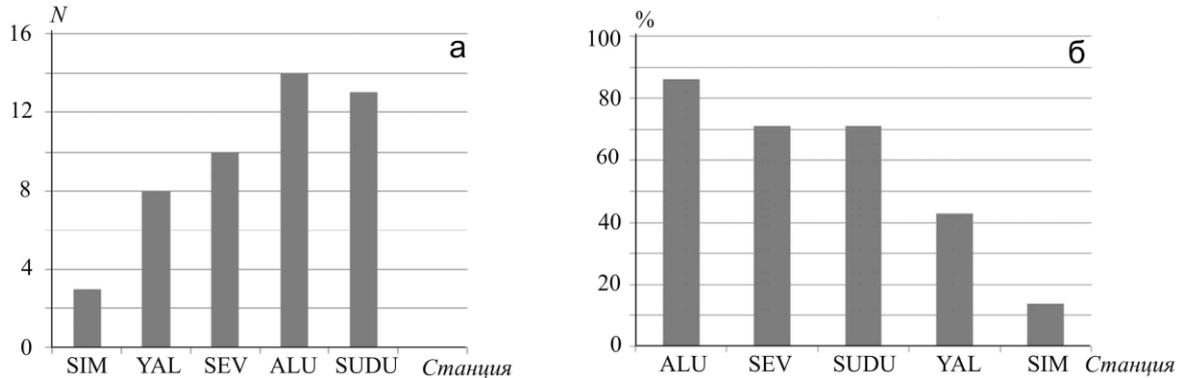


Рис. 3. Распределение числа спектров P - и S -волн по записям отдельных сейсмических станций (а) и процент участия отдельных станций в оценке очаговых параметров землетрясений (б)

Методика обработки и интерпретация амплитудных спектров. Амплитудные спектры S -волн для всех землетрясений рассчитывались по двум горизонтальным составляющим ($N-S$) и ($E-W$), вычислялся полный вектор колебаний, а P -волн – по вертикальной составляющей (Z). Длительность исследуемого участка записи, как и при обработке аналоговых сейсмограмм [3], принята равной времени от вступления P - и S -волн до времени спада максимальных колебаний A_{max} на уровень $1/3 A_{max}$. Примеры волновых форм слабого ($K_{II}=8.1$) землетрясения района Степного Крыма и наиболее сильного ($K_{II}=12.1$) из Керченско-Анапской района приведены на рис. 4.

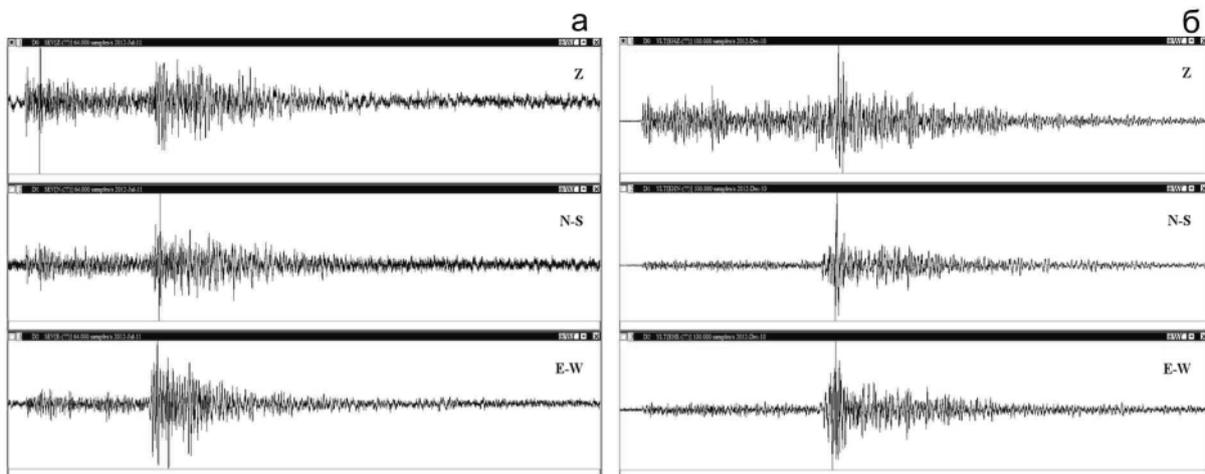


Рис. 4. Примеры цифровых записей на станциях «Севастополь» ($\Delta=147$ км) и «Ялта» ($\Delta=152$ км) по короткопериодным каналам EN для землетрясений: 11 июля в 12^h32^m с $K_{II}=8.1$, $M_w=3.0$ (а), 10 декабря в 16^h56^m с $K_{II}=12.1$, $M_w=4.3$ (б) соответственно

Спектры рассчитаны стандартным методом быстрого преобразования Фурье. Интерпретация спектров выполнена в рамках дислокационной модели Бруна [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. 5.

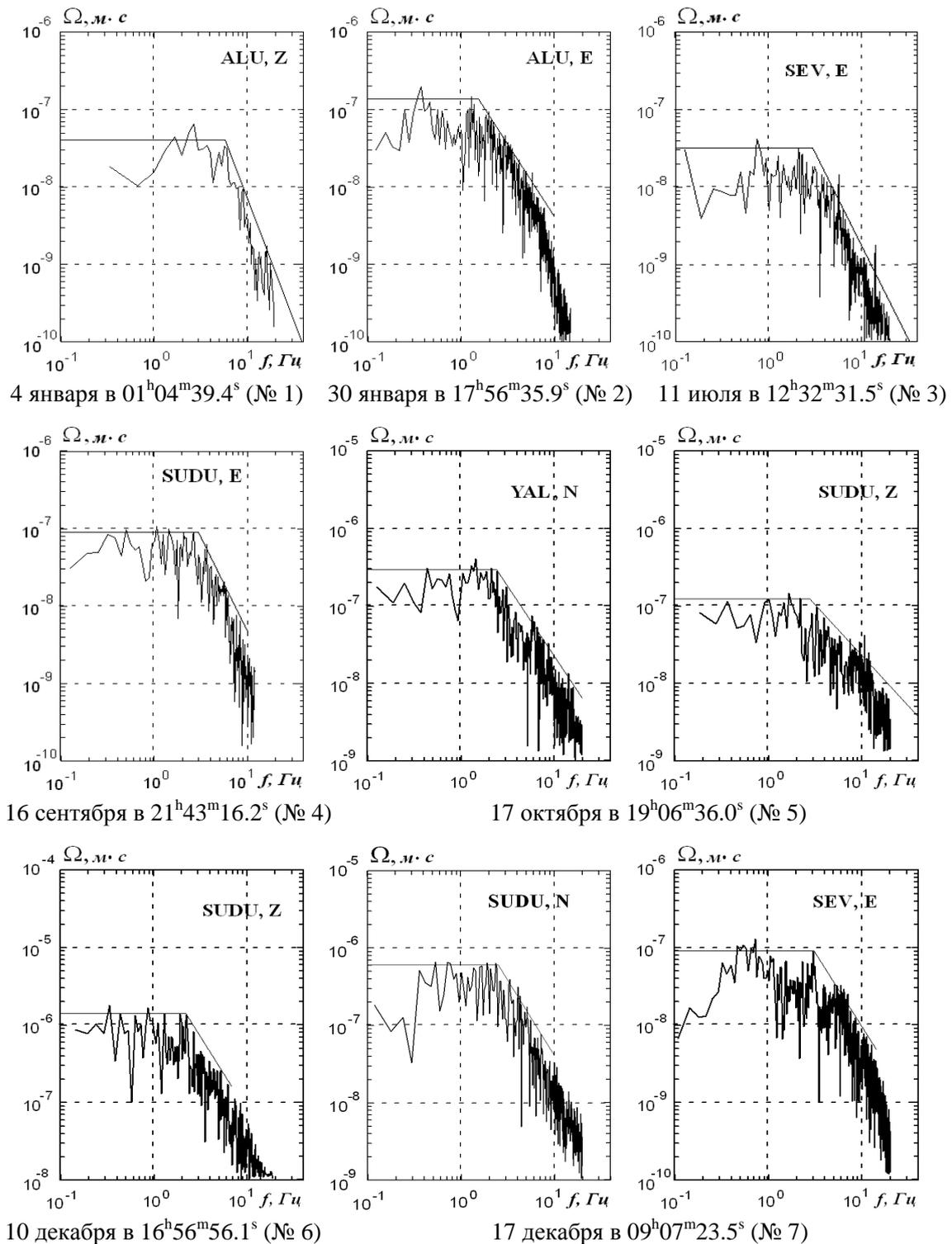


Рис. 5. Примеры амплитудных спектров объемных сейсмических волн землетрясений Крыма за 2012 г. по записям региональных цифровых сейсмических станций (номера и даты землетрясений соответствуют таковым в табл. 1)

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

Для наиболее сильного землетрясения 10 декабря с $K_{II}=12.1$ по данным о параметрах механизма из работы [7] рассчитаны диаграммы направленности излучения P - и S -волн из очага на станции регистрации (рис. 5) и оценены вводимые для расчета скалярного сейсмического момента M_0 поправки $R_{\theta\phi}$ для станций, использованных в работе (табл. 2).

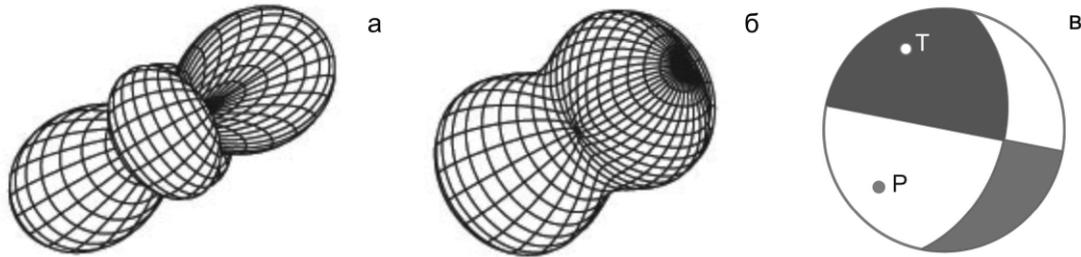


Рис. 6. Объемное представление направленности излучения для волн P (а) и S (б) (вид сверху) при землетрясении 10 декабря 2012 г. с $K_{II}=12.1$ в соответствии с решением механизма очага (в) по работе [7]

Таблица 2. Значения $R_{\theta\phi}$ для землетрясения 10 декабря 2012 г.

Станция	ALU		SIM		SEV		SUDU		YAL	
	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 [8]. Большинство динамических параметров получено по пяти и более независимым станционным определениям. Только для одного слабого сейсмического толчка № 3 из района № 6 (вблизи п-ва Тарханкут) динамические параметры рассчитаны по записям поперечной волны S на одной ближайшей к очагу станции «Севастополь» (табл. 3).

Таблица 3. Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крыма за 2012 г.

Станция	Составляющая	Δ , км	$\Omega_0 \cdot 10^{-6}$, м·с	f_0 , Гц	$M_0 \cdot 10^{13}$, Н·м	r_0 , км	$\Delta\sigma \cdot 10^5$, Па	$\epsilon \cdot 10^{-6}$	$\bar{u} \cdot 10^{-2}$, м	$\eta\sigma \cdot 10^5$, Па	$\Delta\sigma_r \cdot 10^5$, Па	M_w
Землетрясение (1) 4 января; $t_0 = 01^h 04^m 39.4^s$; $\varphi = 44.52^\circ$; $\lambda = 34.45^\circ$; $h = 20$ км; $K_{II} = 8.2$												
ALU	Z	18	0.042	6.2	1.53	0.38	1.27	4.22	0.11	0.87	-0.24	2.7
ALU	N+E	18	0.20	3.8	1.39	0.35	1.39	4.63	0.12	0.96	-0.27	2.7
YAL	N+E	24	0.11	5.6	1.12	0.24	3.56	11.9	0.21	1.2	0.58	2.6
S					1.34	0.32	1.85	6.15	0.14	1.00	-0.07	2.7
δS					0.04	0.06	0.14	0.14	0.09	0.04		0.1
Землетрясение (2) 10 июля; $t_0 = 17^h 56^m 35.9^s$; $\varphi = 44.67^\circ$; $\lambda = 36.84^\circ$; $h = 17$ км; $K_{II} = 9.8$												
SUDU	Z	147	0.12	3.0	36.6	0.78	3.43	11.5	0.65	0.82	0.9	3.7
SUDU	N+E	147	1.6	1.8	93.3	0.74	9.88	32.9	1.78	0.32	4.6	3.9
ALU	N+E	193	0.2	2.0	10.2	0.67	1.47	4.92	0.24	2.95	-2.2	3.3
S					32.7	0.73	3.68	12.3	0.65	0.92	0.92	3.6
δS					0.28	0.02	0.24	0.24	0.25	0.28		0.2
Землетрясение (3) 11 июля; $t_0 = 12^h 32^m 31.5^s$; $\varphi = 45.75^\circ$; $\lambda = 2.91^\circ$; $h = 6$ км; $K_{II} = 8.1$												
SEV	N+E	147	0.07	3.0	3.44	0.42	2.0	6.67	0.2	0.33	0.67	3.0
Землетрясение (4) 16 сентября; $t_0 = 21^h 43^m 16.2^s$; $\varphi = 44.58^\circ$; $\lambda = 32.48^\circ$; $h = 14$ км; $K_{II} = 8.8$												
ALU	Z	152	0.08	5.5	1.48	0.41	0.97	3.26	0.095	2.55	-2.06	2.7
ALU	N+E	152	0.07	3.2	2.36	0.40	1.67	5.56	0.16	1.6	-0.76	2.85
SEV	N+E	95	0.075	3.1	2.37	0.41	1.52	5.1	0.15	1.6	-0.83	2.85
SUDU	Z	201	0.02	4.8	7.38	0.47	3.2	10.7	0.36	0.51	1.09	3.2
SUDU	N+E	201	0.15	3.2	10.1	0.40	7.11	23.7	0.68	0.37	3.18	3.3
S					3.61	0.42	2.24	7.48	0.22	1.04	0.08	3.0
δS					0.16	0.01	0.15	0.15	0.15	0.16		0.2

Станция	Составляющая	Δ , км	$\Omega_0 \cdot 10^{-6}$, 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	M_w
Землетрясение (5) 17 октября; $t_0=19^h06^m36.0^s$; $\varphi=44.62^\circ$; $\lambda=36.33^\circ$; $h=9$ км; $K_{II}=9.8$												
ALU	N+E	152	0.34	2.0	11.5	0.63	1.98	6.59	0.3	2.6	-1.6	3.3
SEV	N+E	210	0.3	2.0	21.0	0.63	3.62	12.1	0.55	1.43	0.38	3.5
SUDU	Z	109	0.12	3.0	23.9	0.74	2.53	8.45	0.45	1.25	0.01	3.5
SUDU	N+E	109	1.5	1.9	54.5	0.67	8.05	26.8	1.3	0.55	3.47	3.8
YAL	Z	173	0.52	3.5	13.7	0.64	2.3	7.68	0.36	2.19	-1.04	3.4
YAL	N+E	173	0.35	2.1	16.8	0.60	3.35	11.2	0.49	1.79	-0.11	3.4
S					20.4	0.65	3.22	10.76	0.51	1.47	0.14	3.5
δS					0.10	0.01	0.09	0.09	0.09	0.10		0.1
Землетрясение (6) 10 декабря; $t_0=16^h56^m56.1^s$; $\varphi=44.96^\circ$; $\lambda=37.58^\circ$; $h=24$ км; $K_{II}=12.1$												
ALU	Z	252	0.8	1.8	242	1.29	4.9	16.3	1.54	11.1	-8.6	4.2
SIM	Z	272	1.0	2.0	402	1.16	11.2	37.2	3.15	6.65	-1.1	4.3
SIM	N+E	272	7.1	1.1	162	1.22	3.9	13.1	1.16	16.5	-14.5	4.1
YAL	Z	275	1.0	2.3	345	1.01	14.6	48.6	3.58	7.75	-0.5	4.3
YAL	N+E	275	3.6	1.2	451	1.12	14.2	47.2	3.84	5.9	1.15	4.4
SUDU	Z	203	1.3	2.1	641	1.11	20.6	68.7	5.54	4.2	6.13	4.5
SEV	N+E	311	5.66	1.0	324	1.34	5.9	19.6	1.91	8.2	-5.3	4.3
S					339	1.17	9.2	30.5	2.61	7.90	-3.3	4.3
δS					0.07	0.02	0.10	0.10	0.09	0.07		0.1
Землетрясение (7) 17 декабря; $t_0=09^h07^m23.5^s$; $\varphi=44.90^\circ$; $\lambda=36.14^\circ$; $h=21$ км; $K_{II}=9.8$												
ALU	Z	132	0.022	5.1	4.21	0.47	1.83	6.1	0.21	7.1	-6.2	3.0
ALU	N+E	132	0.3	2.0	11.0	0.67	1.6	5.3	0.26	2.7	-1.9	3.3
SEV	N+E	199	0.22	2.0	17.3	0.67	2.5	8.4	0.41	1.73	-0.5	3.4
SUDU	N+E	90	0.78	2.2	27.8	0.61	5.4	17.9	0.79	1.1	1.6	3.6
S					12.22	0.60	2.51	8.35	0.36	2.46	-1.2	3.3
δS					0.17	0.04	0.12	0.12	0.13	0.17		0.15

Осреднение станционных 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 станционные значения $\Delta\sigma_r$ имеют знакопеременный характер, то их среднее значение вычислено по среднегеометрическим для данного очага напряжениям $\Delta\sigma$ и $\eta\sigma$ по формуле [6]:

$$\Delta\sigma_r = 1/2 \Delta\sigma - \eta\sigma.$$

Среднее значение моментной магнитуды M_w определено как среднее арифметическое с соответствующей погрешностью. Результаты расчета станционных и средних для землетрясения динамических параметров очагов представлены в табл. 4. Для каждой станции указаны эпицентральное расстояние Δ км, составляющая записи, где (N+E) означает полный вектор колебаний в S-волне.

Обсуждение результатов. Получено хорошее согласие всех станционных определений динамических параметров с очень малыми стандартными отклонениями δS от средних значений S (табл. 3). 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 динамических параметров 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 Южного берега Крыма (район № 3). В целом, с ростом энергетического уровня землетрясений происходит увеличение значений всех динамических параметров, кроме радиационного трения, которое характеризует степень шероховатости среды и гладкость скольжения по разрыву и не связано с выделенной энергией.

Вместе с тем, в пределах одного и того же диапазона энергетических классов наблюдаются различия очаговых параметров (табл. 3). Так, для землетрясений №№ 2, 5, 7 с $K_{II}=9.8$ средние значения сейсмического момента, средней подвижки по разрыву и кажущегося напря-

жения отличаются в 2–2.5 раза, сброшенного напряжения и упругой деформации сдвига примерно в 1.5 раза. Близкими по значениям получились только средние радиусы круговой дислокации. Такие различия очаговых параметров землетрясений одного уровня энергии 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 $M_0=3.39 \cdot 10^{15} \text{ Н}\cdot\text{м}$ (см. табл. 3) параметры механизма очага из работы [7] пересчитаны в компоненты тензора сейсмического момента (рис. 7).

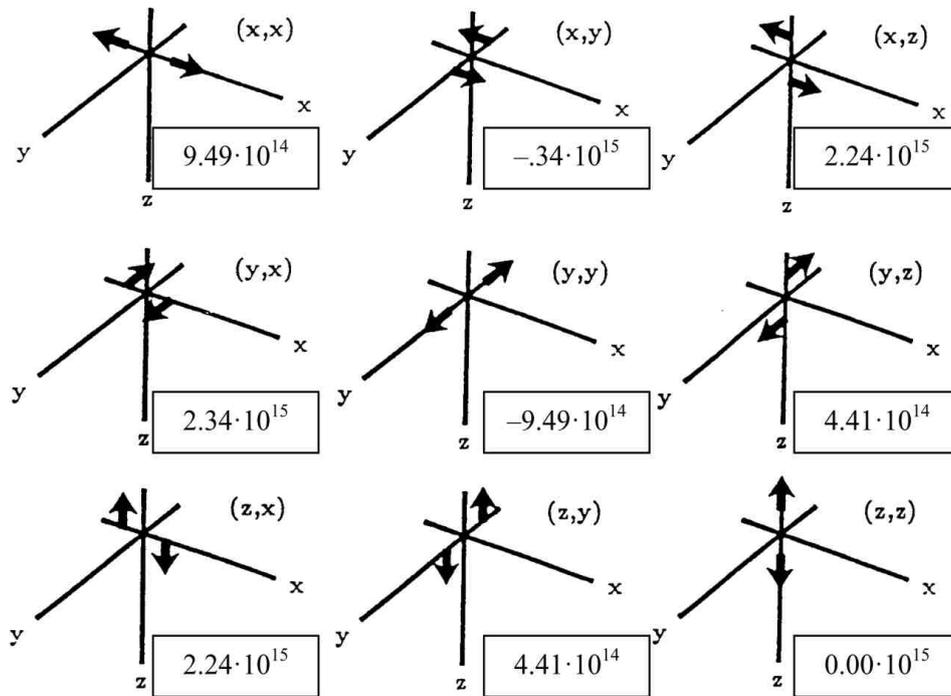


Рис. 7. Компоненты тензора сейсмического момента ($\text{Н}\cdot\text{м}$) очага землетрясения 10 декабря 2012 г. с $K_{\Pi}=12.1$ и $M_0=3.39 \cdot 10^{15} \text{ Н}\cdot\text{м}$

Как и в предыдущие годы [9–11], проведем сравнение полученных в 2012 г. динамических параметров очагов со средними их долговременными величинами (рис. 8). 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 $M_0(K_{\Pi})$ и $r_0(K_{\Pi})$, полученные по записям с аналоговой регистрации сейсмических волн [3, 12].

Как видно из рис. 8, полученные средние значения M_0 и r_0 по группе станций удовлетворяют долговременным зависимостям $M_0(K_{\Pi})$, $r_0(K_{\Pi})$, находясь в их доверительных областях. При этом для двух событий δM_0 имеют положительные значения, а для пяти – отрицательные. В отличие от предыдущих лет [9–10], в 2012 г. большинство значений радиусов круговой дислокации r_0 (рис. 8, б) находится вблизи долговременной зависимости $r_0(K_{\Pi})$. Полное соответствие $r_0(K_{\Pi})$ отмечено для трех землетрясений: самого сильного 10 декабря с $K_{\Pi}=12.1$ (№ 6), 17 октября с $K_{\Pi}=9.8$ (№ 5) и слабого из района Степного Крыма с $K_{\Pi}=8.1$ (№ 3). Таким образом, высказанное ранее [9–10] предположение, 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 г., так и за предыдущий 2011 г. [11]. Вероятно, причины широкого диапазона определяемых динамических параметров в пределах одного уровня энергии зависят не только от технических причин (способа регистрации), но и в большей степени – от пространственно-временных вариаций динамических параметров и полноты учета искажающих сигнал факторов.

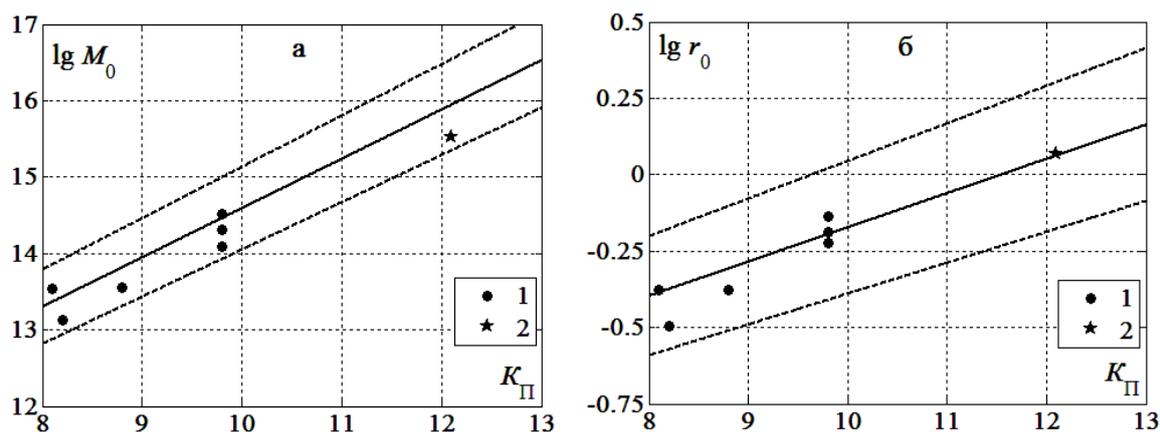


Рис. 8. Сравнение динамических параметров очагов землетрясений 2012 г: сейсмического момента (а) и радиуса круговой дислокации (б) с долговременными зависимостями $M_0(K_{\Pi})$ и $r_0(K_{\Pi})$ из [12]

1 – экспериментальные значения за 2012 г.; 2 – значения для землетрясения 10 декабря с известным механизмом очага. Пунктиром обозначены пределы погрешностей (доверительная область на уровне 0.95).

Л и т е р а т у р а

1. Козиненко Н.М., Свидлова В.А., Сыччина З.Н. (отв. сост.). Каталог землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2012 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 21 (2012 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – Приложение на CD_ROM.
2. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е. Об энергетической оценке землетрясений Крымско-Черноморского региона // Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений, т. II. – М.: ИФЗ АН СССР, 1974. – С. 113–125.
3. Пустовитенко Б.Г., Пантелеева Т.А. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма. – Киев: Наукова думка, 1990. – 251 с.
4. Brune I.V. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // J. Geophys. Res. – 1970. – 75 – N 26. – P. 4997–5009.
5. Аптекман Ж.Я., Белавина Ю.Ф., Захарова А.И., Зобин В.М., Коган С.Я., Корчагина О.А., Москвина А.Г., Поликарпова Л.А., Чепкунас Л.С. 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.В. Механика очага тектонического землетрясения. – М.: Наука, 1975. – 179 с.
7. 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 – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2013 – С. 35–45.
8. Hanks T.C., Kanamori H. A Moment Magnitude Scale // J. Geophys. Res. – 1979. – 84. – N 135. – P. 2348–2350.
9. Пустовитенко Б.Г., Калинюк И.В., Мерзей Е.А., Пустовитенко А.А. Очаговые параметры землетрясений Крыма // Землетрясения Северной Евразии, 2009 год. – Обнинск: ГС РАН, 2015. – С. 262–271.
10. Пустовитенко Б.Г., Калинюк И.В., Мерзей Е.А. Динамические параметры очагов землетрясений Крымско-Черноморского региона // Землетрясения Северной Евразии, 2010 год. – Обнинск: ГС РАН, 2016 – С. 296–304.
11. Пустовитенко Б.Г., Калинюк И.В., Мерзей Е.А., Пустовитенко А.А. Очаговые параметры землетрясений Крыма 2011 года // Сейсмологический бюллетень Украины за 2011 год. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ – Гидрофизика», 2012 – С. 17–35.
12. Пустовитенко Б.Г., Пустовитенко А.А., Капитанова С.А., Поречнова Е.И. Пространственные особенности очаговых параметров землетрясений Крыма // Сейсмичность Северной Евразии. – Обнинск: ГС РАН, 2008. – С. 238–242.