

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*

Исходные данные. Очаговые параметры землетрясений Крыма за 2011 г. восстановлены для 17 землетрясений с энергетическими классами $K_{\Pi}=6.2-10.8$, произошедших в различных частях региона (рис. 1). В отличие от ситуации в 2007–2008 гг., когда для определения спектральных и динамических параметров очагов использовались записи как аналоговых, так и цифровых сейсмических станций [1, 2], в настоящее время, начиная с 2009 г. [3], исходными данными являются только цифровые сейсмограммы.

Наибольшее число изученных землетрясений, как и в предыдущие годы [1–4], относится к центральной зоне региона (районы № 2, 3), по два – к Судакско-Феодосийской и Анапской зонам (районы № 4 и № 5), а также к степному Крыму (район № 6) и одно, наиболее сильное, – к Черноморской впадине (район № 9).

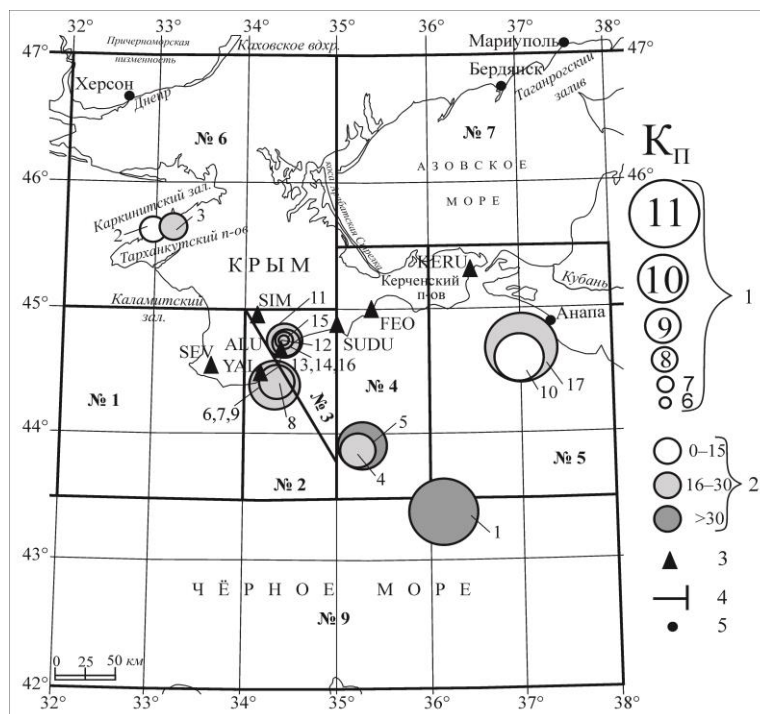


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений за 2011 г., для которых восстановлены очаговые параметры

1 – энергетический класс K_{Π} [5]; 2 – глубина очага, h км; 3 – сейсмическая станция; 4 – граница района (№№ 1–9); 5 – крупный населенный пункт; номера землетрясений даны по табл. 1.

Для анализа выбраны, прежде всего, наиболее значимые сейсмические события года с $K_{\Pi}>9$ и добавлены более слабые толчки материковой части Крыма, представляющие научный интерес с точки зрения их географического положения и слабой изученности сейсмичности данной территории. К таким районам относится Тарханкутский полуостров (район № 6) и зона Демерджинского глубинного разлома вблизи г. Алушта (район № 3). Основные параметры выбранных для анализа землетрясений приведены в табл. 1 по каталогу [6].

Таблица 1. Основные параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2011 г., для которых восстановлены очаговые параметры

№	Дата, д м	t_0 , ч мин с	Эпицентр		h , км	$K_{П}/n$	M_L/n	M_w/n	Район
			φ° , N	λ° , E					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	17.03	02 13 27.7	43.39	36.13	31	10.8/7	3.7/6	4.1/7	Черноморская впадина (№ 9)
2	10.07	15 33 12.1	45.63	32.95	12	7.5/4	2.0/4	2.6/1	Степной Крым (№ 6)
3	24.07	03 22 51.4	45.65	33.19	20	7.6/5	2.0/5	2.7/1	Степной Крым (№ 6)
4	26.08	14 33 32.6	43.89	35.23	25	9.4/5	2.9/5	3.2/5	Судакско-Феодосийский (№ 4)
5	26.08	15 38 19.3	43.91	35.27	34	9.8/6	3.1/6	3.3/8	Судакско-Феодосийский (№ 4)
6	09.09	07 46 20.5	44.39	34.34	20	9.7/6	3.0/6	3.5/6	Ялтинский (№ 2)
7	09.09	14 43 40.7	44.38	34.33	18	9.5/5	3.0/4	3.3/7	Ялтинский (№ 2)
8	09.09	14 49 28.3	44.42	34.34	22	9.3/5	2.9/5	3.3/7	Ялтинский (№ 2)
9	09.09	15 26 09.6	44.39	34.33	20	9.6/6	3.1/6	3.4/6	Ялтинский (№ 2)
10	25.10	13 00 59.5	44.6	36.96	10	10.1/8	3.5/7	3.8/6	Керченско-Анапский (№ 5)
11	10.11	18 55 17.9	44.74	34.43	17	8.5/5	2.5/5	3.2/5	Алуштинский (№ 3)
12	10.11	21 40 25.2	44.74	34.43	18	6.2/5		2.35/2	Алуштинский (№ 3)
13	11.11	09 54 43.9	44.73	34.42	17	8.2/5	2.3/5	2.9/7	Алуштинский (№ 3)
14	11.11	10 37 42.8	44.73	34.44	17	7.6/5	2.1/5	2.7/5	Алуштинский (№ 3)
15	12.11	00 28 18.5	44.74	34.43	17	7.4/5	1.9/5	2.4/5	Алуштинский (№ 3)
16	12.11	05 43 03.3	44.73	34.43	17	8.3/5	2.4/5	2.8/4	Алуштинский (№ 3)
17	29.11	02 17 41.6	44.68	37.02	24	10.6/8	3.7/7	3.7/8	Керченско-Анапский (№ 5)

Примечание. Параметры землетрясений в графах 2–7, 10 соответствуют таковым в [6]; значения M_L/n – из [7]; значения M_w/n – из табл. 5, где n – количество станционных определений.

Для расчета амплитудных спектров и восстановления динамических параметров очагов использовано 147 записей P - и S -волн по станциям «Алушта» (ALU), «Севастополь» (SEV), «Симферополь» (SIM), «Судак» (SUDU) и «Ялта» (YAL), для которых надежно определены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) сейсмографов. На рис. 2 дан пример АЧХ сейсмической станции «Ялта» для короткопериодных ЕН-каналов с сейсмометрами СМ-3.

Общая статистика использованных станционных записей землетрясений Крыма в 2011 г. для восстановления динамических параметров очагов дана в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что наибольшее число спектров получено по станциям «Севастополь» и «Судак». Процент участия этих же станций в общей оценке динамических параметров очагов отдельных землетрясений также наибольший, соответственно 94 % и 71 %. В большинстве случаев станционные определения очаговых параметров выполнены по записям S -волн. Для наиболее сильного ($K_{П}=10.8$) землетрясения 17 марта (№ 1 в табл. 1) получено решение механизма очага [8].

Таблица 2. Статистика использованного материала

Станция	% участия/(N)	Количество спектров	Количество записей объемных волн	
			P	S
«Алушта»	65/(11)	27	7	11
«Севастополь»	94/(16)	30		16
«Симферополь»	59/(10)	26	6	10
«Судак»	71/(12)	36	10	13
«Ялта»	65/(11)	28	6	11

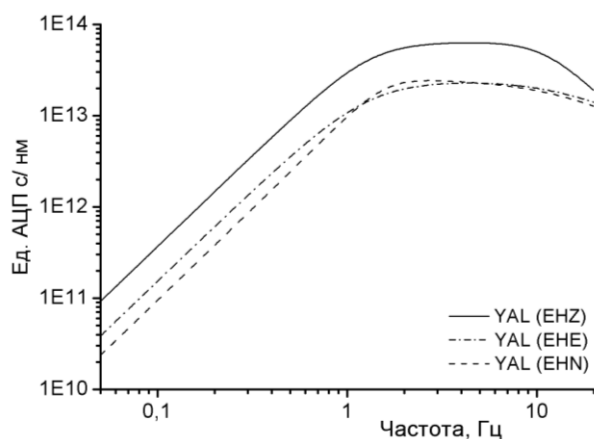


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики сейсмографов на сейсмической станции «Ялта» (YAL) в 2011 г.

Механизм очага землетрясения 17 марта в 02^h13^m27.7^s с $K_{\Gamma}=10.8$. Переход станций Мира, в том числе и Крыма, на цифровой способ регистрации сейсмических колебаний позволил оперативно собрать, проанализировать и единообразно проинтерпретировать первичные записи волновых форм на сейсмических станциях Крыма [7] и ближней зоны, окружающих очаг в широком азимутальном створе. Дополнительно собранные волновые формы землетрясения и определенные по ним знаки первых вступлений продольных волн в совокупности с данными международного сейсмологического центра [9] позволили получить надежное решение механизма очага (табл. 3) и параметры разрыва в очаговой зоне землетрясения.

Таблица 3. Параметры механизма очага землетрясения 17 марта 2011 г. в 02^h13^m с $K_{\Gamma}=10.8$

Дата, д м	t_0 , ч мин с	h , км	Магнитуды			K_{Γ}	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости						Ис- точ- ник
			$M_{w_{\text{пер}}}$	M_{PSP} [10]	m_b [9]		T		N		P		$NP1$			$NP2$			
							PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	$SLIP$	STK	DP	$SLIP$	
17.03	02 13 27.7	31	4.1	4.1	3.9	10.8	71	183	5	289	18	20	119	28	102	286	63	84	[8]

Определение двух возможных положений плоскости разрыва и осей главных напряжений, действующих в очаге, проведено по стандартной методике [11, 12]. Углы выхода сейсмических волн определены для удаленных станций по годографу «АК-135» [13], а для близких – по региональному годографу [14].

В соответствии с полученным в [8] решением, землетрясение произошло под действием близгоризонтальных ($PL_p=18^\circ$) сил сжатия близмеридиональной ориентации ($AZM_p=20^\circ$), и близвертикальных меридиональных сил растяжения ($PL_t=71^\circ$, $AZM_t=183^\circ$). Подвижка по крутой ($DP_{NP2}=63^\circ$) нодальной плоскости $NP2$ практически чистый взброс, с незначительным левосторонним сдвигом, по пологой ($DP_{NP1}=20^\circ$) плоскости $NP1$ – почти чистый надвиг, с минимальным правосторонним сдвигом (рис. 3, а). При этом первая плоскость разрыва $NP1$ имела юго-восточное простирание ($STK_{NP1}=119^\circ$) с пологим падением ($DP_{NP1}=28^\circ$) на юго-запад, а другая ($NP2$) – близширотное ($STK_{NP2}=286^\circ$), с крутым падением ($DP_{NP2}=63^\circ$) на север–северовосток. Наглядно полученное решение (рис. 3, а) в объемном изображении можно представить в виде схемы движения активных блоков для каждой из нодальных плоскостей (рис. 3, б, в).

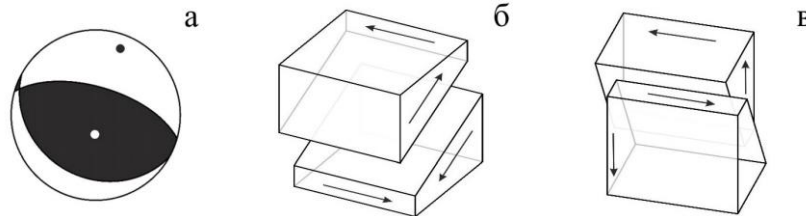


Рис. 3. Механизм очага землетрясения 17 марта 2011 г. в 02^h13^m с $K_{\Gamma}=10.8$ по знакам первых вступлений P -волн: а – стереограмма (нижняя полусфера); б, в – объемное представление механизма очага в виде схемы движения активных блоков, соответственно для первой и второй нодальной плоскости

Для этого землетрясения проведено также исследование процессов разрывообразования в очаговой зоне. Использована методика [15], разработанная из представления о протяженном, движущемся источнике излучения от его начального гипоцентра. Практическое применение данной методики заключается в интерпретации азимутального распределения времен τ запаздывания максимальной фазы P_{max} в группе продольных P -волн относительно первого вступления P на данную станцию наблюдения: $\tau = t_{P_{\text{max}}} - t_P$ [15, 16].

При построении азимутального годографа $\tau=f(AZM)$ землетрясения 17 марта 2011 г. (рис. 4) использованы волновые формы на сейсмических станциях Крыма, Украины, Кавказа и Турции, окружающих эпицентр землетрясения в широком азимутальном створе.

На азимутальном годографе землетрясения 17 марта 2011 г. (рис. 4) выделен только один максимум со значением $\tau_{\text{max}}=5.7$ с в азимуте 310° при $\tau_{\text{min}}=1$ с, что, согласно использованной методике [15], свидетельствует об однонаправленности процесса разрывообразования в очаговой зоне. С применением формул из работы [15]:

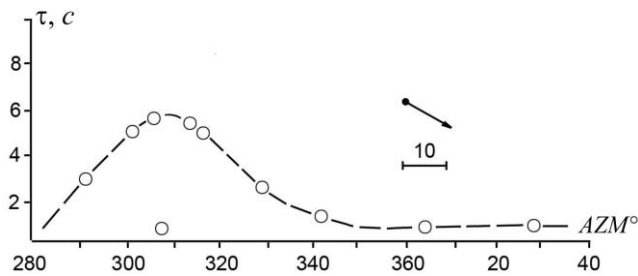


Рис. 4. Азимутальное распределение времен запаздывания продольных волн землетрясения 17 марта 2011 г. в 02^h13^m с $K_{II}=10.8$

Стрелкой показано положение разрыва на горизонтальной поверхности в указанном масштабе.

$$L = v_p (\tau_{\max} - \tau_{\min}) / 2$$

$$C = v_p (\tau_{\max} - \tau_{\min}) / (\tau_{\max} + \tau_{\min})$$

$$Az_0 = Az_{\max} - 180^\circ$$

$$T = L / C$$

рассчитаны численные значения параметров процесса вспарывания в очаговой зоне землетрясения 17 марта: разрыв протяженностью $L=15$ км ориентирован диагонально в юго-восточном направлении ($AZM_0=130^\circ$), скорость вспарывания $C=4.4$ км/с и время процесса $T=3.4$ с. Полученное направление распространения разрыва в очаговой зоне в $AZM_0 = 130^\circ$

в пределах погрешностей определения величин согласуется с диагональным простиранием первой плоскости разрыва ($STK_{NPI} = 119^\circ$) по данным о решении механизма очага (табл. 3).

Следует отметить, что простирание нодальных плоскостей, а также численные значения параметров разрывообразования в очаге землетрясения 17 марта не противоречат полученным ранее [17] решениям для очагов восточной части региона.

Методика обработки и интерпретация амплитудных спектров. Для анализа отбирались записи только с четкими фазами P - и S -волн, не осложненные микросейсмическим шумом. Примеры записей землетрясения 17 марта с $K_{II}=10.8$ приведены на рис. 5.

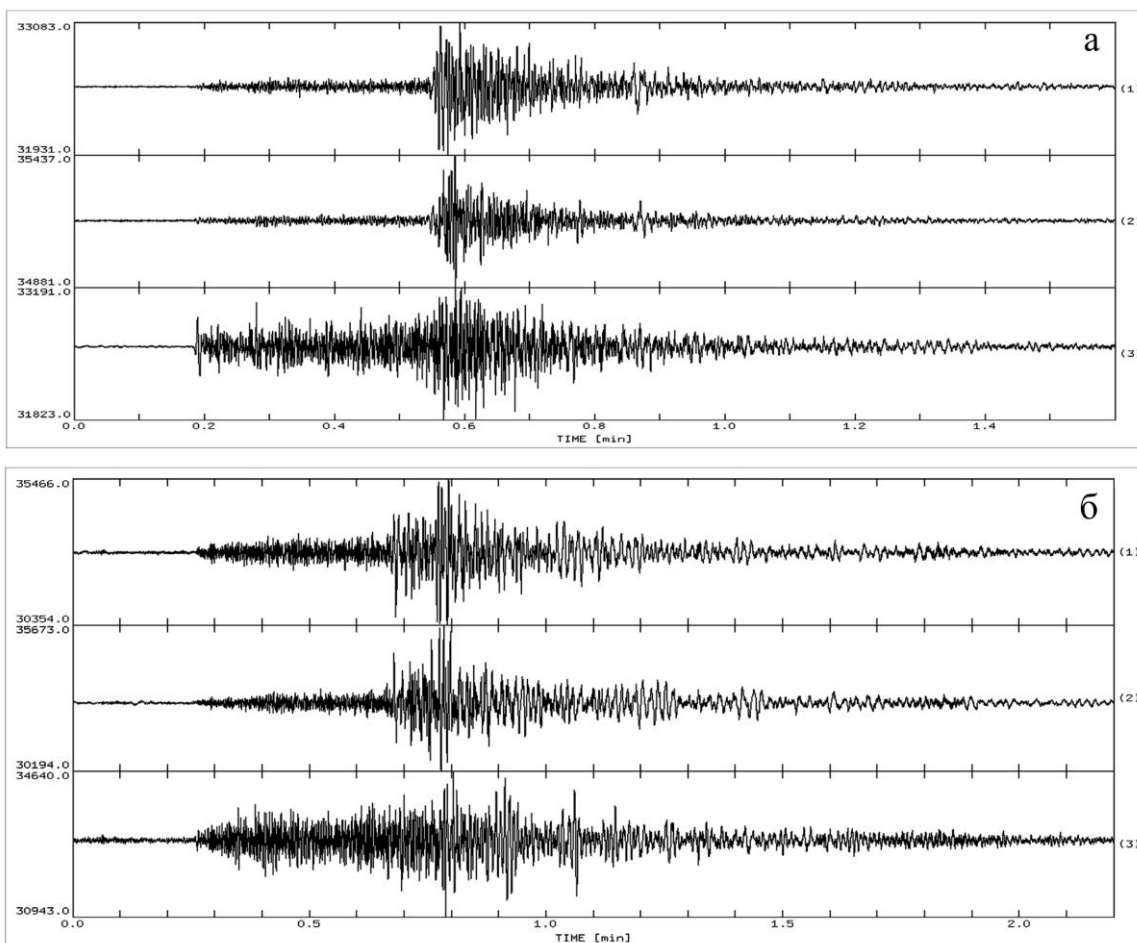
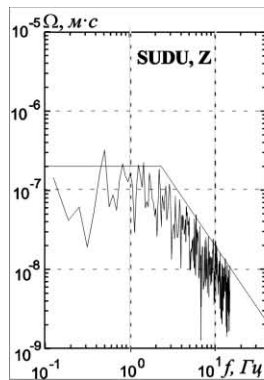


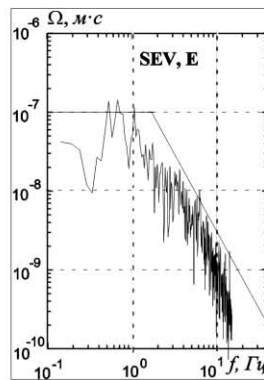
Рис. 5. Записи землетрясения 17 марта 2011 г. в 02^h13^m с $K_{II}=10.8$ по составляющим N-S, E-W, Z (1–3) на станциях «Ялта» (а), Симферополь» (б) с $\Delta=200$ км и 236 км соответственно

Амплитудные спектры S -волн в большинстве случаев рассчитывались по записям двух горизонтальных составляющих (N–S), (E–W) и затем вычислялся полный горизонтальный вектор колебаний, а спектры P -волн – по вертикальной (Z). Длительность исследуемого участка записи, как и при обработке аналоговых сейсмограмм [18], 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 $1/3 A_{\max}$. Спектры рассчитаны стандартным методом быстрого преобразования Фурье с учетом АЧХ сейсмографов. Интерпретация спектров выполнена в рамках дислокационной модели Бруна [19].

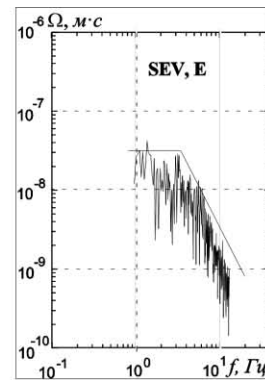
Спектр объемной волны в модели Бруна описывается тремя основными характеристиками: спектральной плотностью $\Omega_0(x, f)$ при $f \rightarrow 0$, пропорциональной скалярному сейсмическому моменту M_0 ; угловым коэффициентом γ и угловой частотой $f_0(\omega_0)$, связанной с размером дислокации r_0 . Полученные спектры записей землетрясений Крыма за 2011 г. уверенно аппроксимируются двумя прямыми: в длиннопериодной части спектра – прямой, параллельной оси частот; в области коротких периодов – наклонной прямой с угловым коэффициентом $\gamma \sim -2$ (рис. 6), что соответствует выбранной теоретической модели.



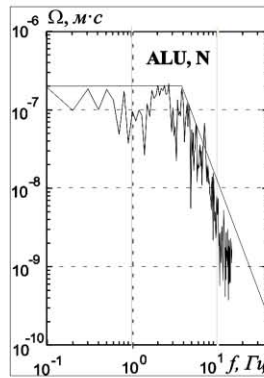
17 марта в $t_0=02^h13^m27.7^s$
(№ 1 в табл. 1)



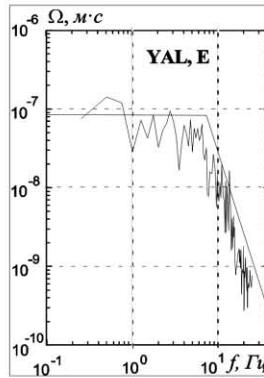
10 июля в $t_0=15^h33^m12.1^s$
(№ 2)



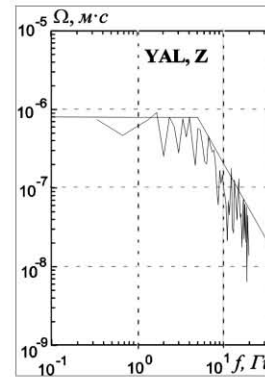
24 июля в $t_0=03^h22^m51.4^s$
(№ 3)



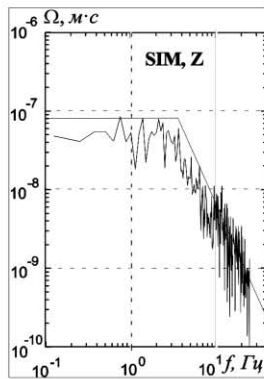
26 августа в $t_0=14^h33^m32.6^s$
(№ 4)



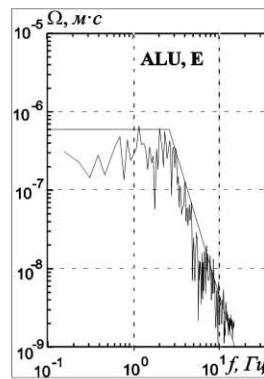
26 августа в $t_0=15^h38^m19.3^s$
(№ 5)



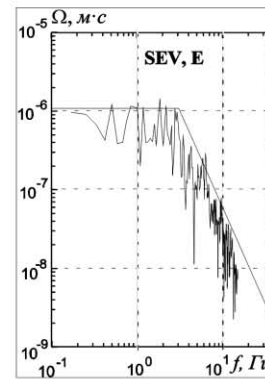
9 сентября в $t_0=07^h46^m20.5^s$
(№ 6)



9 сентября в $t_0=14^h43^m40.7^s$
(№ 7)



9 сентября в $t_0=14^h49^m28.3^s$
(№ 8)



9 сентября в $t_0=15^h26^m09.6^s$
(№ 9)

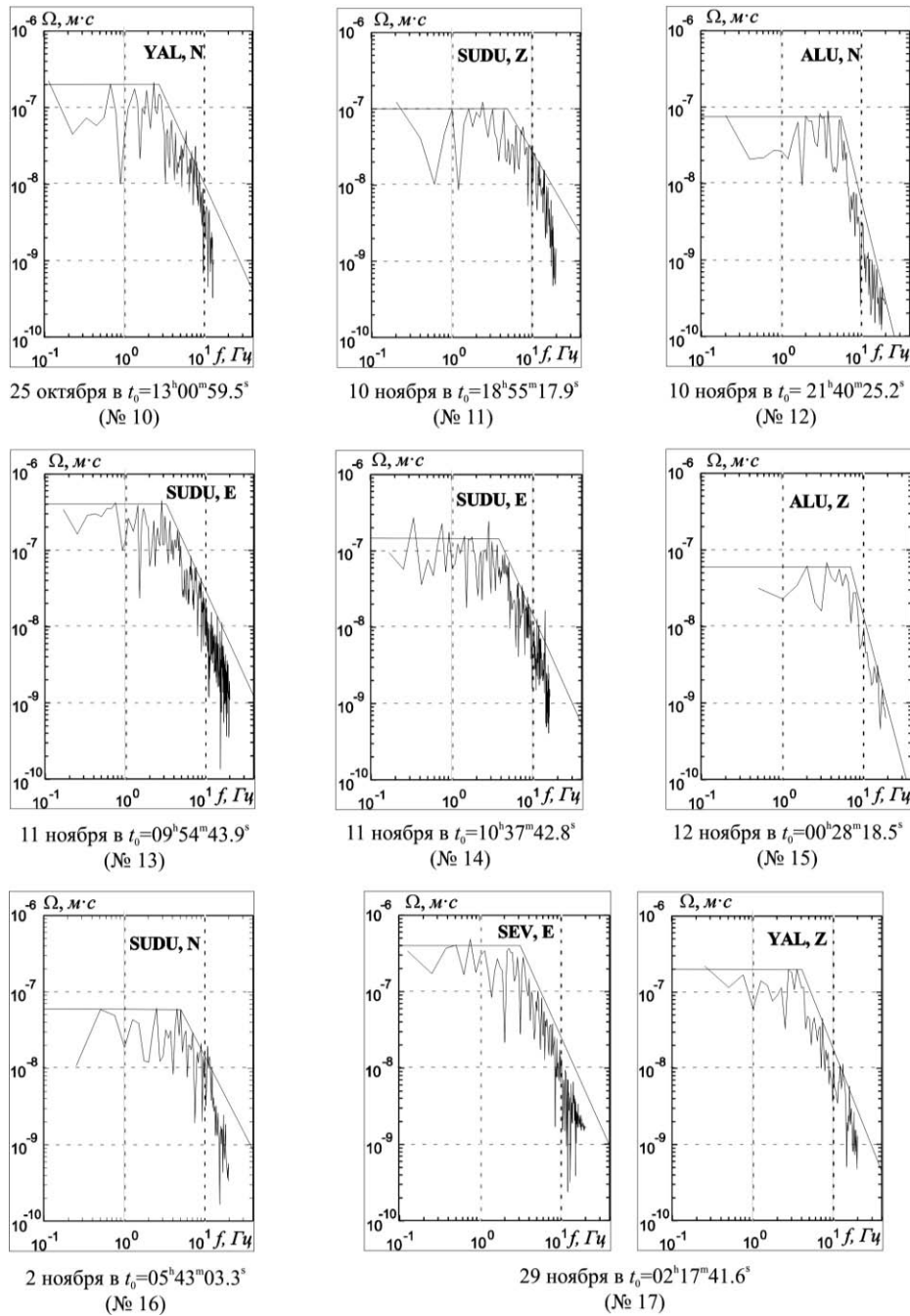


Рис. 6. Примеры амплитудных спектров землетрясений Крымско-Черноморского региона из табл. 1 по записям региональных цифровых сейсмических станций

Расчет динамических параметров. Спектр записи землетрясения на станции регистрации является суперпозицией эффектов самого источника, характеристики регистрирующего прибора, среды на пути очаг-станция, направленности излучения. Формула для расчета скалярного сейсмического момента M_0 по станционному спектру имеет вид:

$$M_0 = \Omega_0 (4\pi \cdot \rho \cdot v^3) / R_{\theta\phi} \cdot G(\Delta, h) \cdot C(\omega) \cdot Sm(f),$$

где Ω_0 – максимальное значение спектральной плотности при $\omega \rightarrow 0$; ρ – плотность пород в окрестности очага; v – скорость распространения волны; $R_{\theta\phi}$ – направленность излучения из очага на станцию; $G(\Delta, h)$ – поправка за геометрическое расхождение; $C(\omega)$ – частотная характеристика среды под станцией; $Sm(f)$ – поправка за неупругое затухание в мантии. Методика учета всех этих факторов при переходе от станционного спектра к спектру источника подробно изложена в работах [18, 20].

Для землетрясения 17 марта введена поправка за направленность излучения $R_{0\phi}$ по табл. 4, для остальных принято среднее $R_{0\phi} = 0.4$ [18].

Таблица 4. Значения $R_{0\phi}$ для землетрясения 17 марта 2011 г.

Станция Тип волны	«Алушта»		«Симферополь»		«Севастополь»		«Судак»		«Ялта»	
	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>P</i>	<i>S</i>
$R_{0\phi}$	0.052	0.45	0.05	0.48	0.093	0.31	-0.06	0.65	0.083	0.34

Геометрические размеры очага определялись по угловой частоте f_0 амплитудного спектра смещения. Частота f_0 связана с длительностью импульса, излученного очагом, которая, в свою очередь, определяется размером источника, скоростью испарывания и положением точки наблюдения по отношению к источнику. Для дислокационной модели Бруна [19] с разрывом в виде круга, радиус дислокации r_0 вычисляется по формуле:

$$r_0 = 2.34 \frac{v_p}{2\pi \cdot f_0}$$

По найденным значениям сейсмического момента M_0 и размеров разрыва r_0 с использованием формул из работ [18–22] определены другие динамические параметры очагов: сброшенное напряжение $\Delta\sigma$, величина деформации сдвига ϵ , кажущееся напряжение $\eta\sigma$, величина радиационного трения $\Delta\sigma_r$, средняя подвижка или величина дислокации по разрыву \bar{u} и моментная магнитуда Mw (табл. 5). Моментная магнитуда рассчитана по индивидуальным оценкам сейсмических моментов M_0 с использованием формулы Канамори [22]. Большинство динамических параметров получено по пяти и более независимым станционным определениям. Только для двух слабых сейсмических толчков района п-ва Тарханкут динамические параметры рассчитаны по записям одной составляющей *S*-волны на ближайшей к очагам станции «Севастополь» (табл. 5).

Осреднение станционных динамических параметров (кроме радиационного трения $\Delta\sigma_r$) и вычисление их стандартных отклонений выполнены, как и прежде [18], с учетом логнормального закона распределения величин. Поскольку индивидуальные станционные значения $\Delta\sigma_r$ получились знакопеременными, то их среднее значение вычислено по среднегеометрическим для данного очага напряжениям $\Delta\sigma$ и $\eta\sigma$ по формуле [21]:

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

Среднее значение моментной магнитуды Mw определено как среднее арифметическое с соответствующей погрешностью. Результаты расчета станционных и средних для землетрясения динамических параметров представлены в табл. 5. Для каждой станции указаны эпицентральное расстояние Δ , км и составляющая записи, где (N+E) означает полный вектор горизонтальных колебаний.

Таблица 5. Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2011 г.

Код станции	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	Mw
Землетрясение (1) 17 марта; $t_0 = 02^h 13^m 27.7^s$; $\phi = 43.39^\circ$; $\lambda = 36.13^\circ$; $h = 31$ км; $K_{II} = 10.8$												
SIM	Z	236	0.08	3	197	0.82	15.7	52.3	3.12	3.4	4.4	4.1
SIM	N+E	236	1.73	1.8	84.8	0.79	7.6	25.5	1.46	7.9	-4.1	3.9
YAL	Z	200	0.4	2.5	594	0.93	32.2	107	7.27	1.1	15.0	4.4
YAL	N+E	200	1.15	1.8	113	0.79	10.2	33.9	1.94	6.0	-0.9	4.0
SUDU	Z	190	0.2	2.6	339	0.90	20.6	68.8	4.48	2.0	8.4	4.3
SUDU	N+E	190	3.46	1.85	219	0.76	21.4	71.5	3.98	3.1	7.7	4.2
SEV	N+E	234	0.92	1.8	144	0.79	12.9	43.1	2.47	4.7	1.8	4.0
S					198	0.82	14.2	52.0	3.11	3.4	3.7	4.1
δS					0.11	0.01	0.08	0.08	0.09	0.11		0.1

ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА
 Б.Г. Пустровитенко, И.В. Калинин, А.А. Пустровитенко

Код станции	Составляющая	Δ , км	$\Omega_0 \cdot 10^{-6}$, мс	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 (2) 10 июля; $t_0 = 15^h 33^m 12.1^s$; $\varphi = 45.63^\circ$; $\lambda = 32.95^\circ$; $h = 12$ км; $K_{II} = 7.5$												
SEV	Е	134	0.02	3.2	0.96	0.40	0.68	2.26	0.06	1.97	-1.63	2.6
Землетрясение (3) 24 июля; $t_0 = 03^h 22^m 51.4^s$; $\varphi = 45.65^\circ$; $\lambda = 33.19^\circ$; $h = 20$ км; $K_{II} = 7.6$												
SEV	Е	129	0.03	3.2	1.38	0.40	0.97	3.25	0.09	1.37	-0.8	2.7
Землетрясение (4) 26 августа; $t_0 = 14^h 33^m 32.6^s$; $\varphi = 43.89^\circ$; $\lambda = 35.23^\circ$; $h = 25$ км; $K_{II} = 9.4$												
ALU	Z	109	0.03	5	4.5	0.47	1.96	6.52	0.22	9.4	-8.4	3.0
ALU	N+E	109	0.23	3.2	6.6	0.42	3.93	13.1	0.4	6.4	-4.4	3.2
YAL	N+E	108	0.1	3.2	3.6	0.42	2.11	7.0	0.21	11.9	-10.9	3.0
SEV	N+E	143	0.13	3.1	7.4	0.43	3.98	13.3	0.42	5.76	-3.8	3.2
SUDU	N+E	112	0.2	3.0	8.9	0.45	4.35	1.45	0.47	4.8	-2.6	3.2
S					5.9	0.44	3.09	6.49	0.33	7.23	-5.69	3.2
δS					0.07	0.01	0.07	0.18	0.07	0.07		0.1
Землетрясение (5) 26 августа; $t_0 = 15^h 38^m 19.3^s$; $\varphi = 43.91^\circ$; $\lambda = 35.27^\circ$; $h = 34$ км; $K_{II} = 9.8$												
SEV	N+E	142	0.2	3.0	14.2	0.47	5.91	19.7	0.68	5.96	-3.0	3.3
SUDU	N+E	113	0.38	3.0	21.5	0.47	8.97	29.9	1.03	3.93	0.56	3.5
SUDU	Z	113	0.04	5.3	11.9	0.46	5.21	17.4	0.59	7.12	-4.5	3.3
ALU	N+E	110	0.45	3.0	16.5	0.47	6.9	22.9	0.78	5.13	-1.7	3.4
YAL	Z	107	0.05	5.5	11.6	0.45	5.7	19.0	0.62	7.26	-4.4	3.3
YAL	N+E	107	0.23	3.2	10.2	0.44	5.2	17.2	0.56	8.27	-5.7	3.3
SIM	N+E	147	0.28	2.9	10.3	0.49	3.88	12.9	0.46	8.2	-6.2	3.3
SIM2	N+E	147	0.29	3.0	10.7	0.47	4.46	14.8	0.51	7.9	-5.7	3.3
S					12.9	0.46	5.61	18.7	0.63	6.71	-3.91	3.3
δS					0.04	0.005	0.04	0.04	0.04	0.05		0.05
Землетрясение (6) 9 сентября; $t_0 = 07^h 46^m 20.5^s$; $\varphi = 44.39^\circ$; $\lambda = 34.34^\circ$; $h = 20$ км; $K_{II} = 9.7$												
SEV	N+E	55	1.2	3.05	26.1	0.44	13.5	44.8	1.43	2.3	4.4	3.55
SIM2	N+E	65	2.5	2.0	32.1	0.67	4.7	15.5	0.76	1.9	0.5	3.6
SUDU	Z	76	0.125	5.0	18.8	0.47	8.2	27.2	0.92	1.6	2.5	3.45
SUDU	N+E	76	1.22	2.9	35.1	0.46	15.5	51.7	1.74	0.85	6.9	3.65
YAL	Z	18	0.8	5	36.4	0.47	15.8	52.7	1.78	0.82	7.1	3.65
YAL	N+E	18	1.4	2.9	12.2	0.46	5.4	18.0	0.61	2.5	0.23	3.35
S					25.0	0.49	9.4	31.2	1.11	1.52	3.2	3.5
δS					0.08	0.03	0.10	0.10	0.08	0.09		0.07
Землетрясение (7) 9 сентября; $t_0 = 14^h 43^m 40.7^s$; $\varphi = 44.38^\circ$; $\lambda = 34.33^\circ$; $h = 18$ км; $K_{II} = 9.5$												
ALU	N+E	34	0.7	3.0	7.1	0.45	3.5	11.6	0.38	8.4	-6.7	3.2
SEV	N+E	55	0.98	2.5	21.3	0.54	6.0	20.2	0.79	2.8	21.9	3.5
SIM	Z	65	0.08	4.0	5.6	0.58	1.2	4.1	0.17	10.8	-10.2	3.1
SUDU	Z	77	0.1	5.2	15.9	0.45	7.8	25.9	0.84	3.8	0.13	3.4
SUDU	N+E	77	1.0	2.4	30.5	0.56	7.7	25.5	1.04	2.0	1.9	3.6
YAL	Z	18	0.6	6.0	26.2	0.39	19.6	65.4	1.85	2.3	7.5	3.55
YAL	N+E	18	0.6	5.2	5.0	0.26	12.8	42.6	0.8	12.0	-5.6	3.1
S					12.7	0.45	6.3	20.9	0.68	4.7	-1.55	3.3
δS					0.13	0.05	0.15	0.15	0.13	0.12		0.2
Землетрясение (8) 9 сентября; $t_0 = 14^h 49^m 28.3^s$; $\varphi = 44.42^\circ$; $\lambda = 34.34^\circ$; $h = 22$ км; $K_{II} = 9.3$												
ALU	Е	34	0.84	2.8	9.0	0.48	3.6	12.0	0.42	6.6	-4.8	3.2
SEV	N+E	55	1.1	2.8	25.9	0.48	10.3	34.3	1.2	2.3	2.8	3.55
SIM	Z	65	0.08	5.0	5.4	0.47	2.3	7.8	0.26	5.6	-4.4	3.1
SIM	N+E	65	1.2	2.0	16.1	0.67	2.3	7.8	0.38	1.8	0.68	3.4
SUDU	N+E	77	0.9	3.1	27.1	0.43	14.7	48.9	1.54	1.1	6.2	3.55
YAL	Z	19	0.5	5	24.7	0.47	10.7	35.7	1.21	1.2	4.14	3.5
YAL	N+E	19	0.8	3.2	7.6	0.42	4.5	15.0	0.46	4.0	-1.73	3.2
S					14.0	0.48	5.4	18.2	0.64	2.6	0.1	3.3
δS					0.11	0.03	0.13	0.13	0.12	0.12		0.1

Код станции	Составляющая	Δ , км	$\Omega_0 \cdot 10^{-6}$, мс	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 (9) 9 сентября; $t_0=15^h 26^m 9.6^s$; $\varphi=44.39^\circ$; $\lambda=34.33^\circ$; $h=20$ км; $K_{\Pi}=9.6$												
ALU	N	32	1.1	3.0	10.9	0.45	5.3	17.7	0.58	2.0	0.7	3.3
SEV	N+E	55	1.48	3.0	32.2	0.45	15.8	52.6	1.71	0.66	7.2	3.6
SIM	Z	64	0.09	4.0	6.0	0.58	1.3	4.4	0.19	3.6	-2.9	3.1
SIM	N+E	64	1.5	2.2	18.9	0.61	3.7	12.2	0.54	1.12	0.71	3.45
SUDU	Z	76	0.15	4.8	23.6	0.48	9.0	30.2	1.06	0.9	3.6	3.5
SUDU	N+E	76	1.68	3.1	50.5	0.43	27.3	91.0	0.29	0.42	13.2	3.7
S					19.0	0.50	6.8	22.7	0.56	1.12	2.3	3.4
δS					0.14	0.03	0.19	0.19	0.14	0.14		0.2
Землетрясение (10) 25 октября; $t_0=13^h 00^m 59.5^s$; $\varphi=44.6^\circ$; $\lambda=36.96^\circ$; $h=10$ км; $K_{\Pi}=10.1$												
ALU	Z	202	0.2	3.3	49.4	0.68	7.0	23.2	1.14	1.2	2.3	3.7
ALU	N+E	202	0.8	2.3	36.0	0.55	9.4	31.5	1.26	1.7	3.0	3.6
SEV	N+E	260	0.78	2.2	67.5	0.58	15.5	51.6	2.16	0.9	6.8	3.8
SUDU	Z	158	0.3	3.1	87.1	0.72	10.2	33.9	1.78	0.7	4.4	3.9
SUDU	N+E	158	3.8	2.1	201	0.6	40	133	5.99	0.3	19.7	4.1
YAL	N+E	223	0.44	2.3	27.3	0.55	7.2	23.9	0.96	2.2	1.4	3.6
S					62.1	0.61	12.0	39.9	1.78	1.0	5.0	3.8
δS					0.13	0.2	0.12	0.12	0.12	0.13		0.1
Землетрясение (11) 10 ноября; $t_0=18^h 55^m 17.9^s$; $\varphi=44.74^\circ$; $\lambda=34.43^\circ$; $h=17$ км; $K_{\Pi}=8.5$												
SUDU	Z	48	0.1	5.5	10	0.42	5.8	19.3	0.59	0.19	2.7	3.3
SUDU	N+E	48	1.8	3.0	34.5	0.45	16.9	56.3	1.8	0.05	8.4	3.6
SEV	N+E	63	0.33	3.4	8.2	0.39	5.8	19.5	0.56	0.23	2.7	3.2
YAL	N+E	36	0.33	3.2	4.3	0.42	2.6	8.6	0.26	0.44	0.8	3.0
SIM	N+E	34	0.6	3.5	4.4	0.38	3.5	11.5	0.32	0.43	1.3	3.0
S					8.8	0.41	5.5	18.4	0.55	0.33	2.4	3.2
δS					0.16	0.01	0.14	0.14	0.15	0.08		0.2
Землетрясение (12) 10 ноября; $t_0=21^h 40^m 25.2^s$; $\varphi=44.74^\circ$; $\lambda=34.43^\circ$; $h=18$ км; $K_{\Pi}=6.2$												
ALU	Z	7	0.016	7.5	0.43	0.31	0.6	2.1	0.05	0.05	0.26	2.4
ALU	N+E	7	0.07	6	0.36	0.22	1.4	4.6	0.07	0.06	0.64	2.3
S					0.39	0.26	0.9	3.1	0.06	0.05	0.4	2.35
δS					0.04	0.07	0.18	0.17	0.07	0.04		0.05
Землетрясение (13) 11 ноября; $t_0=09^h 54^m 43.9^s$; $\varphi=44.73^\circ$; $\lambda=34.42^\circ$; $h=17$ км; $K_{\Pi}=8.2$												
ALU	Z	6	0.15	6	3.64	0.39	2.73	9.1	0.26	0.52	0.85	3.0
ALU	N+E	6	0.92	4	4.27	0.34	4.96	16.5	0.40	0.44	2.04	3.0
SEV	N+E	62	0.084	4	2.12	0.34	2.46	8.2	0.20	0.89	0.34	2.8
YAL	N+E	34	0.09	3.9	1.14	0.34	1.23	4.1	0.10	1.66	-1.04	2.6
SIM	N+E	34	0.16	4.5	1.22	0.30	2.02	6.7	0.15	1.55	-0.54	2.7
SUDU	Z	49	0.03	6.2	3.08	0.38	2.54	8.5	0.23	0.6	0.65	2.9
SUDU	N+E	49	0.64	3.0	12.5	0.45	6.15	20.5	0.67	0.15	2.9	3.3
S					2.91	0.36	2.78	9.3	0.24	0.65	0.74	2.9
δS					0.14	0.02	0.09	0.09	0.10	0.14		0.2
Землетрясение (14) 11 ноября; $t_0=10^h 37^m 42.8^s$; $\varphi=44.73^\circ$; $\lambda=34.44^\circ$; $h=17$ км; $K_{\Pi}=7.6$												
ALU	Z	6	0.09	6.8	2.19	0.34	2.39	7.9	0.2	0.15	1.04	2.8
ALU	N+E	6	0.58	4.5	2.69	0.30	4.46	14.9	0.32	0.13	2.1	2.9
SEV	N+E	64	0.03	5.5	0.76	0.24	2.3	7.6	0.13	0.44	0.7	2.5
SIM	N+E	35	0.04	5.5	0.30	0.24	0.92	3.1	0.05	1.1	-0.64	2.3
SUDU	N+E	47	0.18	4.0	3.4	0.34	3.9	13.0	0.32	0.1	1.86	3.0
S					1.35	0.29	2.45	8.15	0.17	0.25	1.0	2.7
δS					0.20	0.03	0.12	0.12	0.15	0.2		0.2
Землетрясение (15) 12 ноября; $t_0=00^h 28^m 18.5^s$; $\varphi=44.74^\circ$; $\lambda=34.43^\circ$; $h=17$ км; $K_{\Pi}=7.4$												
ALU	Z	7	0.06	7	1.55	0.33	1.84	6.1	0.15	0.87	0.06	2.7
ALU	N+E	7	0.017	7	1.78	0.26	4.5	15.1	0.28	0.75	1.5	2.8
SEV	N+E	63	0.015	5.8	0.38	0.23	1.36	4.6	0.08	3.48	-2.8	2.3

Код станции	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
SIM	N+E	34	0.017	7	0.13	0.19	0.8	2.7	0.04	10.3	-9.9	2.0
SIM	Z	34	0.008	8	0.32	0.29	0.57	1.9	0.04	4.2	-3.9	2.3
S					0.53	0.26	1.39	4.7	0.09	2.5	-1.8	2.4
δS					0.22	0.04	0.16	0.16	0.16	0.22		0.3
Землетрясение (16) 12 ноября; $t_0=05^h43^m3.3^s$; $\varphi=44.73^\circ$; $\lambda=34.43^\circ$; $h=17$ км; $K_{II}=8.3$												
SEV	N+E	63	0.12	4.2	2.98	0.32	4.0	13.3	0.31	0.63	1.37	2.9
SUDU	N+E	48	0.072	5	1.38	0.27	3.13	10.4	0.20	1.37	0.19	2.7
SUDU	Z	48	0.04	10	4.01	0.23	13.9	46.4	0.78	0.47	6.5	3.0
YAL	N+E	35	0.06	4.2	0.76	0.32	1.02	2.4	0.09	2.48	-1.97	2.5
S					1.88	0.28	3.65	11.1	0.26	1.00	0.83	2.8
δS					0.16	0.03	0.23	0.26	0.20	0.16		0.2
Землетрясение (17) 29 ноября; $t_0=02^h17^m41.6^s$; $\varphi=44.68^\circ$; $\lambda=37.02^\circ$; $h=24$ км; $K_{II}=10.6$												
ALU	Z	208	0.1	5	28.7	0.47	12.4	41.5	1.41	5.9	0.35	3.6
ALU	N+E	208	0.61	2.8	33.5	0.48	13.3	44.4	1.55	5.0	1.6	3.6
SUDU	Z	163	0.3	4.8	101	0.48	38.8	129	4.56	1.7	17.7	3.9
SUDU	N+E	163	2.3	2.3	148	0.58	32.7	109	4.63	1.14	15.2	4.0
SEV	N+E	266	0.64	3.0	67.4	0.45	33.0	110	3.58	2.5	14	3.8
YAL	Z	229	0.2	4.0	79	0.58	17.5	58.5	2.47	2.14	6.63	3.9
YAL	N+E	229	0.21	3.2	15.8	0.42	9.43	31.4	0.96	10.6	-5.9	3.4
SIM	Z	232	0.2	4.0	47.8	0.58	10.6	35.4	1.5	3.5	1.8	3.7
S					52.5	0.50	18.2	60.7	2.22	3.21	5.89	3.7
δS					0.11	0.02	0.09	0.09	0.09	0.11		0.2

Обсуждение результатов. Восстановленные очаговые параметры для изученных землетрясений 2011 г. можно отнести к категории надежных, поскольку получено хорошее согласие всех станционных определений динамических параметров с малыми стандартными отклонениями (табл. 5). Для большинства землетрясений индивидуальные значения моментных магнитуд $M_{w\text{пер}}$ либо полностью совпали, либо их разброс не превысил погрешности $\delta M_w = \pm 0.2$. Наибольшие значения динамических параметров: M_0 , r_0 , $\Delta\sigma$, ε , \bar{u} получены для землетрясения 17 марта с $K_{II}=10.8$ и $h=31$ км (№ 1), произошедшего в восточной части глубоководной впадины Чёрного моря, а наименьшее – для самого слабого ($K_{II}=6.2$) землетрясения № 12, зарегистрированного 10 ноября в районе горы Демерджи. В целом для всех землетрясений наблюдается увеличение значений динамических параметров (кроме радиационного трения) с ростом энергии землетрясений.

С учетом среднего для землетрясения 17 марта скалярного сейсмического момента $M_{0\text{пер}}=1.98 \cdot 10^{15}$ Н·м (табл. 5) параметры механизма очага пересчитаны в компоненты тензора сейсмического момента (рис. 7).

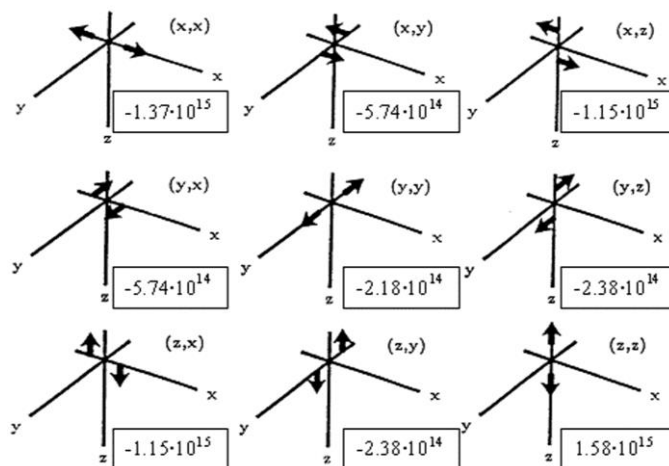


Рис. 7. Компоненты тензора сейсмического момента $M_{0\text{пер}}$ (Н·м)

Как и в предыдущие годы [2, 3, 4], проведено сравнение полученных в 2011 г. динамических параметров очагов землетрясений [23] со средними их долговременными величинами (рис. 8). Сравнение проведено только для сейсмического момента $M_{0\text{ пер}}$ и радиуса круговой дислокации r_0 , с использованием их зависимостей от энергии землетрясений $M_0(K_{\Pi})$ и $r_0(K_{\Pi})$, полученных по записям с аналоговой регистрацией сейсмических волн [24]:

$$\lg M_{0\text{ пер}} = 0.645(\pm 0.027) \cdot K_{\Pi} + 8.142(\pm 0.271), \quad \rho = 0.99;$$

$$\lg r_0 = 0.112(\pm 0.011) \cdot K_{\Pi} - 1.293(\pm 0.107), \quad \rho = 0.93.$$

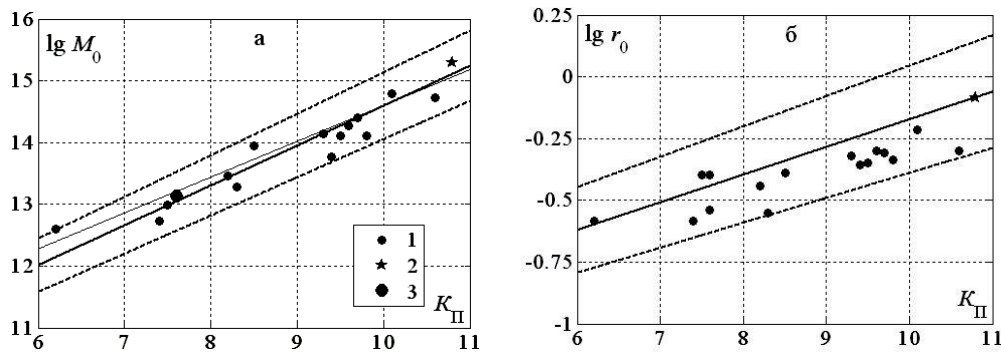


Рис. 8. Сравнение динамических параметров очагов землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2011 г.: сейсмического момента $M_{0\text{ пер}}$ (а) и радиуса круговой дислокации r_0 (б) – с долговременными зависимостями $M_0(K_{\Pi})$ и $r_0(K_{\Pi})$ в [24]

1 – экспериментальные значения за 2011 г.; 2 – значения для землетрясения 17 марта с известным механизмом очага; 3 – наложение двух одинаковых значений; пунктиром обозначены пределы погрешностей (доверительная область на уровне 0.95).

Как видно из рис. 8, все средние значения $M_{0\text{ пер}}$ по группе станций удовлетворяют долговременной зависимости $M_0(K_{\Pi})$, находясь в ее доверительной области. Для большинства землетрясений значения отклонений δM_0 относительно зависимости $M_0(K_{\Pi})$ распределены равномерно (рис. 8, а). При этом для четырех событий $\delta M_0 \approx 0$, для шести – δM_0 имеют положительные значения, а для семи – отрицательные. В отличие от предыдущих лет [2, 3, 4] большинство значений радиусов круговой дислокации r_0 за 2011 г. (рис. 8, б) – ниже долговременной зависимости $r_0(K_{\Pi})$. Только для двух относительно слабых толчков района мыса Тарханкут $\delta r_0 > 0$. Полное соответствие $r_0(K_{\Pi})$ отмечено для самого сильного землетрясения 17 марта с $K_{\Pi} = 10.8$ и слабого ($K_{\Pi} = 6.2$) из Демерджиинской серии. В связи с этим, высказанное ранее [3, 4] предположение о том, что завышение δr_0 для большинства землетрясений 2009–2010 г. «может быть объяснено использованием более широкополосных цифровых сейсмических каналов по сравнению с прежними аналоговыми», должно быть проверено на более длительных рядах наблюдений для исключения возможных пространственно-временных вариаций динамических параметров.

Л и т е р а т у р а

1. Пустовитенко Б.Г., Мерзей Е.А., Поречнова Е.И., Сыкчина З.Н. Динамические параметры очагов землетрясений Крыма // Землетрясения Северной Евразии, 2007 год. – Обнинск: ГС РАН, 2013. – С. 291–296.
2. Пустовитенко Б.Г., Калинюк И.В., Мерзей Е.А., Поречнова Е.И., Сыкчина З.Н. Динамические параметры очагов землетрясений Крыма // Землетрясения Северной Евразии, 2008 год. – Обнинск: ГС РАН, 2014. – С. 289–296.
3. Пустовитенко Б.Г., Калинюк И.В., Мерзей Е.А., Пустовитенко А.А. Динамические параметры очагов землетрясений Крыма // Землетрясения Северной Евразии, 2009 год. – Обнинск: ГС РАН, 2015. – С. 261–270.
4. 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.

5. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е. Об энергетической оценке землетрясений Крымско-Черноморского региона // Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. – М.: ИФЗ АН СССР, 1974. – Т. 2. – С. 113–125.
6. Козиненко Н.М., Свидлова В.А., Сыкчина З.Н. (отв. сост.). Каталог землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2011 г. // Землетрясения Северной Евразии, 2011 год. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – Приложение на CD_ROM.
7. Козиненко Н.М., Свидлова В.А., Сыкчина З.Н. (отв. сост.), Антонюк Г.П., Антонюк В.А., Бондарь М.Н., Курьянова И.В., Подвинцев А.В., Росляков А.В., Сусин Д.А. (сост.). Каталог и подробные данные о землетрясениях Крымско-Черноморского Региона за 2011 г. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2012. – С. 94–135.
8. Пустовитенко А.А. (отв. сост.). Каталог механизмов очагов землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2011 г. // Землетрясения Северной Евразии, 2011 год. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – Приложение на CD_ROM.
9. International Seismological Centre (ISC), On-line Bulletin, Internatl. Seis. Cent., Thatcham, United Kingdom, 2014. – URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/>.
10. Сейсмологический бюллетень (ежедекадный) за 2011 год / Отв. ред. О.Е. Старовойт. – Обнинск: ГС РАН, 2011–2012. – URL: ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_bulletin/2011.
11. Введенская А.В. Исследование напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокации. – М.: Наука, 1969. – 136 с.
12. Балакина Л.А., Введенская А.В., Голубева Н.В., Мишарина Л.А., Широкова Е.И. Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений. – М.: Наука, 1972. – 198 с.
13. Kennet B.L.N. Seismological Tables: AK-135 // Research School of earth Sciences Australian national University. Australia, Canberra, ACT0200. – 2005. – 80 p.
14. Кульчицкий В.Е., Сафонова Г.П., Свидлова В.А. Годографы сейсмических волн Крымско-Черноморских землетрясений // Сейсмологический бюллетень Западной территориальной зоны ЕССН СССР (Крым-Карпаты) за 1983 г. – Киев: Наукова думка, 1986. – С. 94–103.
15. Горбунова И.В., Бойчук А.Н., Доцев Н.И., Кальметьева З.А., Капитанова С.А., Кучай О.А., Михайлова Н.Н., Пустовитенко Б.Г., Симбирёва И.Г., Товмасын А.К. Интерпретация очаговых волн на записях землетрясений. – М.: Наука, 1992. – 130 с.
16. Горбунова И.В., Пустовитенко Б.Г. Новая методология изучения сложного сейсмического разрывообразования // Геофизический журнал. – 1997. – 19. – № 3. – С. 42–47.
17. Пустовитенко Б.Г., Пустовитенко А.А., Капитанова С.А. Экспериментальные данные о процессах в очагах черноморских землетрясений // Сейсмологический бюллетень Украины за 2005 год. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2007. – С. 152–163.
18. Пустовитенко Б.Г., Пантелеева Т.А. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма. – Киев: Наукова думка, 1990. – 251 с.
19. Brune I.V. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // J. Geophys. Res.– 1970. – 75. – N 26. – P. 4997–5009.
20. 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 Р-волн в задаче определения динамических параметров очагов землетрясений. Переход от станционного спектра к очаговому и расчет динамических параметров очага // Вулканология и сейсмология. – 1989. – № 2. – С. 66–79.
21. Костров Б. Механика очага тектонического землетрясения. – М.: Наука, 1975. – 179 с.
22. Hanks T.C., Kanamori H. A Moment Magnitude Scale // J. Geophys. Res. – 1979. – 84. – N 135. – P. 2348–2350.
23. 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
24. 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.