

ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА

Б.Г. Пустовитенко, И.В. Калинюк

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

Аннотация. Восстановлены динамические параметры очагов 12 землетрясений Крыма с энергетическими классами $K_{II}=7.0-10.1$ по 63 амплитудным спектрам объемных волн P и S , зарегистрированных группой региональных сейсмических станций Крыма. Для трех наиболее сильных землетрясений: 1 мая, 15 октября и 9 декабря – получено решение механизма очагов и определена направленность излучения из очага на станции регистрации для учета при расчете скалярного сейсмического момента. Для этих землетрясений получена наилучшая сходимость станционных определений всех динамических параметров очагов. Средние значения сейсмических моментов и радиусов круговой дислокации в пределах погрешностей их определения удовлетворяют средним долговременным зависимостям параметров от энергетического уровня землетрясений, полученным ранее по аналоговым записям.

Ключевые слова: амплитудный спектр, механизм очага, модель Бруна, сейсмический момент, радиус дислокации, сброшенное и кажущееся напряжения, подвижка по разрыву, радиационное трение, моментная магнитуда.

DOI: 10.35540/1818-6254.2019.22.27

Для цитирования: Пустовитенко Б.Г., Калинюк И.В. Очаговые параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – С. 299–310. doi: 10.35540/1818-6254.2019.22.27

Исходные данные. Динамические параметры очагов землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2013 год восстановлены для 12 событий с энергетическими классами $K_{II}=7.0-10.1$, произошедших в различных частях региона (рис. 1). Для трех из пяти наиболее сильных ($K_{II}=9.8-10.1$) толчков получено решение механизма очагов.

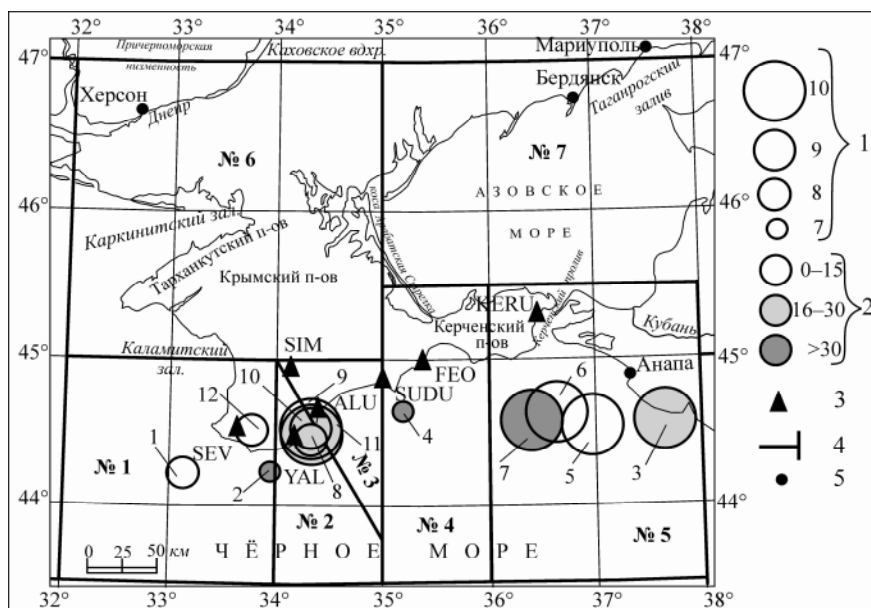


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2013 г., для которых определены динамические параметры очагов

1 – энергетический класс K_{II} [1]; 2 – глубина очага h , км; 3 – сейсмическая станция; 4 – граница района; 5 – населенный пункт; цифры рядом с эпицентрами – порядковые номера землетрясений в табл. 1.

Наибольшее количество изученных землетрясений (по четыресобытия), относится к Ялтинской и Керченско-Анапской зонам региона (районы № 2 и № 5), три – к Севастопольской (район № 1) и одно – к Феодосийско-Судакской (район № 4).

Для анализа выбраны наиболее значимые сейсмические события года с $K_{II} > 9.5$ и добавлены более слабые толчки из районов № 1 и № 4 для пополнения статистики по очаговому параметрам землетрясений слабо изученных территорий. Основные параметры отобранных для восстановления очаговых параметров землетрясений приведены в табл. 1 по работе [2].

Таблица 1. Основные параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2013 г., для которых определены очаговые параметры

№	Дата, д м	t_0 , ч мин с	Эпицентр		h , км	Магнитуда			K_{II}	Район
			φ°, N	λ°, E		m_b	M_w/n (табл. 5)	ML_{wsg}		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	11.01	23 49 37.3	44.22	33.13	13		2.5/1		7.8	Севастопольский (№ 1)
2	23.02	19 38 27.5	44.25	33.95	27		2.0/1		7.0	Севастопольский (№ 1)
3	11.03	04 57 19.4	44.61	37.63	17	3.4	3.5/5	3.3	9.8	Керченско-Анапский (№ 5)
4	13.04	00 42 05.2	44.64	35.15	22		2.6/4		7.3	Судакско-Феодосийский (№ 4)
5	19.04	12 58 14.7	44.55	36.95	14		3.1/2	2.9	9.5	Керченско-Анапский (№ 5)
6	01.05	01 44 10.6	44.64	36.60	11	3.5	3.8/4	3.3	10.1	Керченско-Анапский (№ 5)
7	07.06	07 05 02.2	44.59	36.37	27	3.7	3.5/7	3.2	9.8	Керченско-Анапский (№ 5)
8	19.09	05 38 08.2	44.45	34.30	19		2.7/2		8.0	Ялтинский (№ 2)
9	15.10	03 35 42.3	44.53	34.35	7	3.2	3.7/3	3.3	10.1	Ялтинский (№ 2)
10	15.10	03 37 03.1	44.54	34.33	8		3.0/5	2.6	9.0	Ялтинский (№ 2)
11	09.12	01 05 00.2	44.49	34.34	17		3.5/4		9.8	Ялтинский (№ 2)
12	11.12	08 14 17.3	44.53	33.78	10		2.6/1		7.5	Севастопольский (№ 1)

Примечание. Параметры землетрясений в графах 2–7, 9–11 соответствуют таковым в [2]; значения M_w/n – из табл. 5.

Для решения механизмов очагов наиболее сильных землетрясений (№№ 6, 9, 11 по табл. 1) использованы записи продольных P -волн по станциям Крымской сети и данные о знаках первых вступлений P -волн, приведенные в международных сейсмологических агентствах [3–5]. Углы выхода сейсмических волн определены для удаленных станций по годографу «ak135» [6], а для близких – по региональному годографу [7]. Ранее полученное по оперативным данным решение механизма очага землетрясения № 9 за 15 октября [8] при подготовке настоящей статьи было пересмотрено с учетом дополнительно собранных сейсмограмм по ближайшим к Крыму сейсмическим станциям и вновь появившейся информации по международной сети станций.

Для расчета амплитудных спектров и восстановления динамических параметров очагов использованы 63 цифровые записи объемных P - и S -волн на станциях «Алушта» (ALU), «Севастополь» (SEV), «Симферополь» (SIM), «Судак» (SDK) и «Ялта» (YAL), для которых в 2013 г. надежно определены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) сейсмографов. На рис. 2 дан пример АЧХ сейсмометрических каналов MI17 и MI20 [9], соответственно, на станциях «Симферополь» и «Ялта», рассчитанных генераторным методом с помощью платформы.

Общая статистика использованного материала по станциям представлена в табл. 2.

Таблица 2. Статистика использованного материала

Станции	% участия станций	Количество спектров	Количество записей объемных волн	
			P	S
Алушта	33	11	3	8
Севастополь	75	17		17
Симферополь	50	15	5	10
Судак	58	19	5	14
Ялта	8	1	1	0

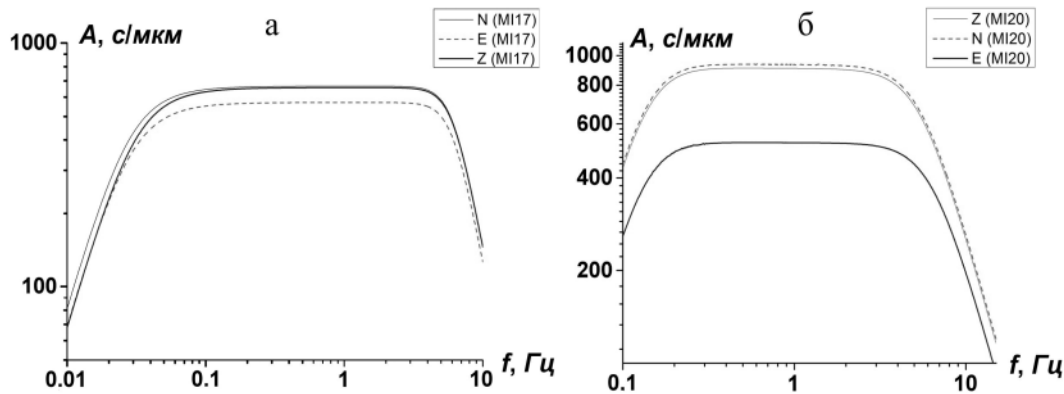


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики сейсмографов на сейсмических станциях «Симферополь» (а) и «Ялта» (б) в 2013 г.

Наибольшее количество спектров получено по записям станций «Севастополь» и «Судак». Процент участия этих же станций в общей оценке динамических параметров отдельных землетрясений также наибольший, соответственно 75% и 58%. В большинстве случаев станционные определения очаговых параметров получены по полному вектору колебаний S- волны.

Механизм очагов землетрясений. Решения механизмов трех очагов в табл. 3 получены с использованием теории дислокации [10] по стандартной методике в рамках двойного диполя [11].

Таблица 3. Параметры механизмов очагов землетрясений 2013 г.

Дата, д м	t_0 , ч мин с	h , км	Магнитуды		K_{Γ}	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости						Ис- точ- ник
			M_w	m_b (MSH)		T		N		P		NP1			NP2			
						PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP	
01.05	01 44 10.6	11	3.8	4.0 (3.3)	10.1	8	109	25	203	64	3	40	58	-60	173	43	-128	[12]
15.10	03 35 42.3	7	3.6	3.6 (3.3)	10.1	72	350	15	200	8	108	31	55	109	181	38	64	[12]
09.12	01 05 00.2	17	3.4	(3.3)	9.8	72	350	16	201	9	108	32	56	109	180	39	65	[12]

В соответствии с полученными решениями (табл. 3, рис. 3), землетрясение 1 мая (№ 6 по табл. 1) произошло в восточной части региона под действием горизонтальных ($PL_p=8^\circ$) напряжений растяжения, ориентированных близширно ($AZM_p=109^\circ$), и близвертикальных ($PL_T=62^\circ$) напряжений сжатия. Тип подвижки в очаге – сдвиго-сброс, с преобладанием сбросовой компоненты над сдвиговой (табл. 3, рис. 3 а). Первая плоскость разрыва NP1 имела диагональную ориентацию ($STK_{NP1}=40^\circ$) с наклонным ($DP_{NP1}=58^\circ$) падением на юго-восток, а другая плоскость NP2 – близмеридиональную ($STK_{NP2}=173^\circ$), с пологим ($DP_{NP2}=43^\circ$) падением на запад.

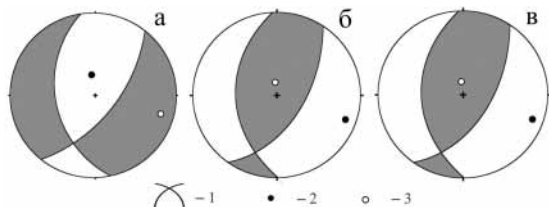


Рис. 3. Диаграммы механизмов очагов землетрясений за 2013 г. в проекции нижней полусферы: 1 мая в 01^h44^m (а), 15 октября в 03^h35^m (б) и 9 декабря в 01^h05^m (в)

1 – нодальные линии; 2, 3 – оси главных напряжений сжатия и растяжения соответственно; зачернена область волн сжатия.

Два других землетрясения, 15 октября и 9 декабря, произошли в центральной части региона под действием горизонтальных ($PL_p=8^\circ$ и 9°) напряжений сжатия, ориентированных близширно. Тип подвижки в очагах – взброс (рис. 3 б, в). Механизмы этих очагов идентичны по всем параметрам (табл. 3).

По параметрам механизма очагов определены поправки $R_{\theta\phi}$ за направленность излучения из очага на станцию регистрации (табл. 4), которые далее использованы при оценке сейсмического момента M_0 для этих землетрясений.

Таблица 4. Значения станционных поправок $R_{\theta\phi}$ для землетрясений №№ 6, 9, 11 за 2013 г.

Дата (№ землетрясения)	Станция Тип волны	SIM		SEV	SUDU	YAL
		P	S	S	S	P
01.05.2013 (№ 6)	$R_{\theta\phi}$	0.07		0.24	0.32	0.12
15.10.2013 (№ 9)	$R_{\theta\phi}$	0.12	0.52	0.25		
09.12.2013 (№ 11)	$R_{\theta\phi}$	0.14	0.50	0.32	0.7	

Примечание: № землетрясения по табл. 1.

Методика обработки и интерпретация амплитудных спектров. Для анализа отобраны записи сейсмических колебаний по станциям с надежными амплитудно-частотными характеристиками приборов и только с четкими фазами объемных P - и S -волн, не осложненные микро-сейсмическим шумом. Пример такой записи дан на рис. 4.

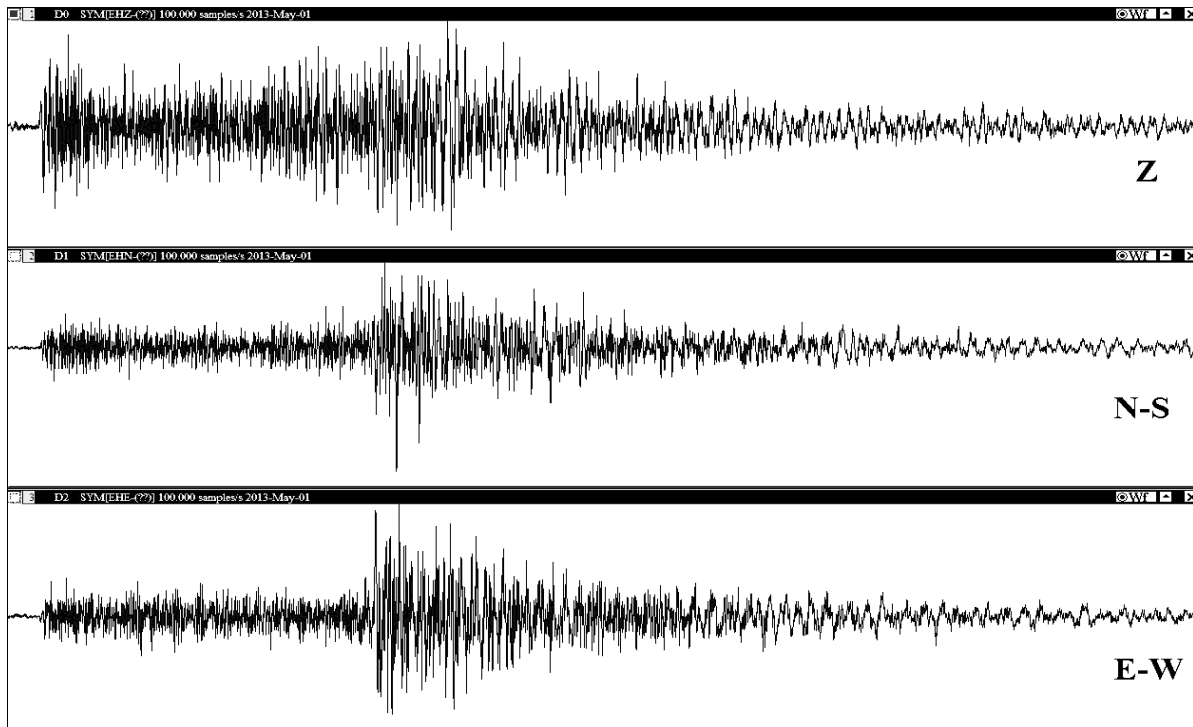
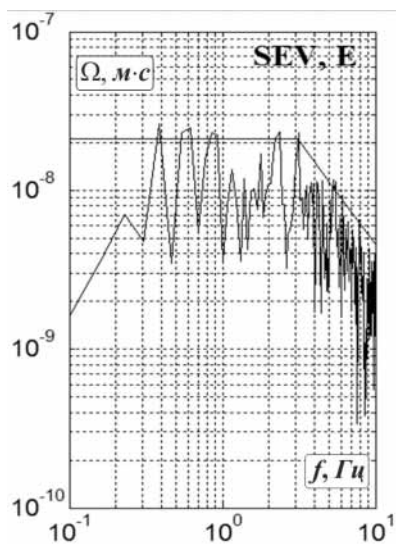


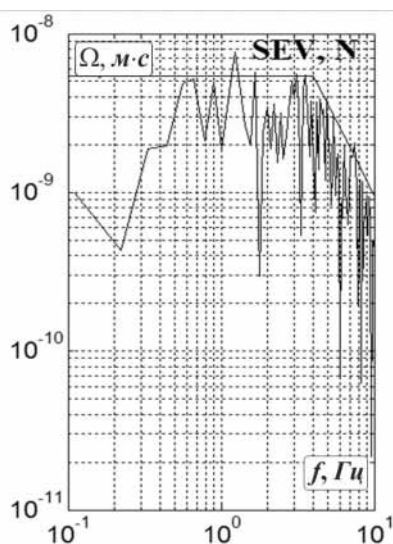
Рис. 4. Сейсмограмма землетрясения 1 мая 2013 г. с $K_{II}=10.1$ (№ 6 из табл. 1), станция «Симферополь»

Амплитудные спектры S -волн рассчитывались по обеим горизонтальным составляющим (N-S) и (E-W), вычислялся полный вектор колебаний, а P -волн – по вертикальной (Z). Исключением является использование только одной компоненты (N-S) сейсмограммы на станции «Севастополь» землетрясения 11 декабря, произошедшего на эпицентральной расстоянии 8 км. Относительная длительность τ исследуемого участка записи принята равной интервалу времени от вступления P - и S -волн до времени спада максимальных колебаний A_{max} на уровень $1/3 A_{max}$ [13]. Спектры рассчитаны стандартным методом быстрого преобразования Фурье. Интерпретация спектров выполнена в рамках дислокационной модели Брюна (ω^{-2}) [14].

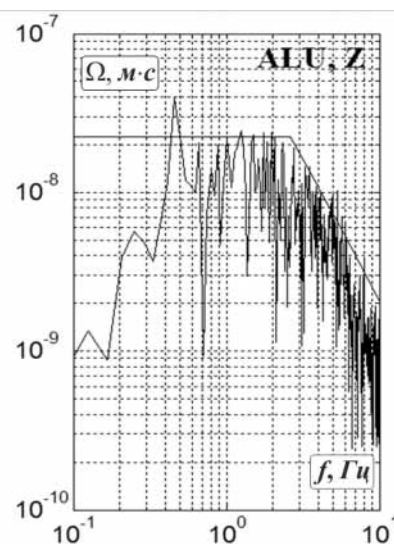
В модели Брюна [14] амплитудный спектр объемной волны характеризуется тремя основными параметрами: спектральной плотностью $\Omega_0(x, f)$ в длиннопериодной части (при $f \rightarrow 0$), угловой частотой $f_0(\omega_0)$ и углом наклона $\gamma \sim -2$. Спектральная плотность Ω_0 пропорциональна скалярному сейсмическому моменту M_0 , а угловая частота f_0 прямо связана с размером дислокации r_0 . Амплитудные спектры записей землетрясений Крыма за 2013 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. 5), что соответствует выбранной теоретической модели.



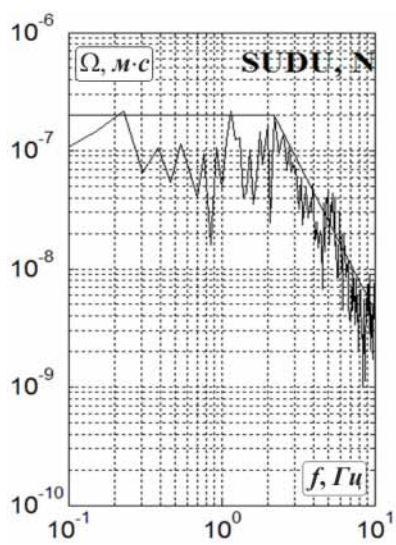
11 января в 23^h49^m37.3^s
(№ 1)



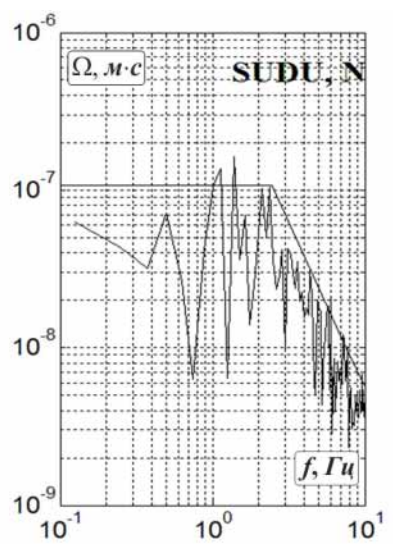
23 февраля в 19^h38^m27.5^s
(№ 2)



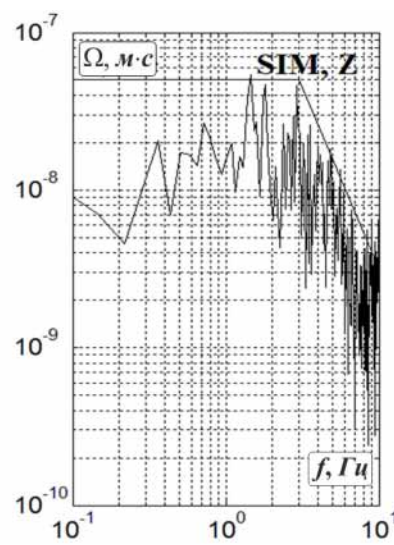
11 марта в 04^h57^m19.4^s
(№ 3)



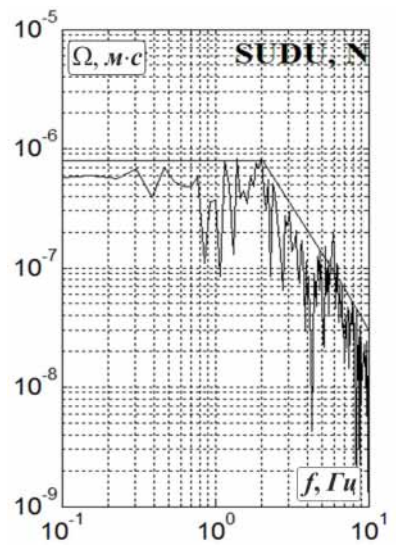
13 апреля в 00^h42^m05.2^s
(№ 4)



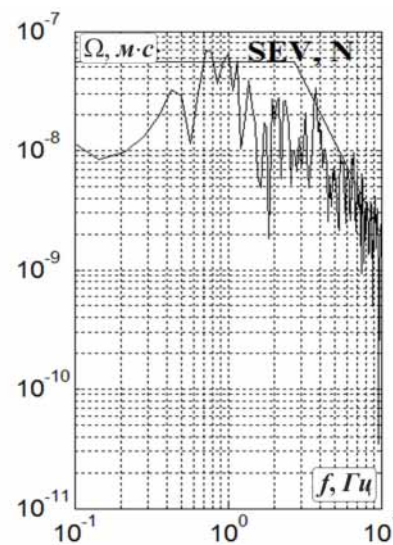
19 апреля в 12^h58^m14.7^s
(№ 5)



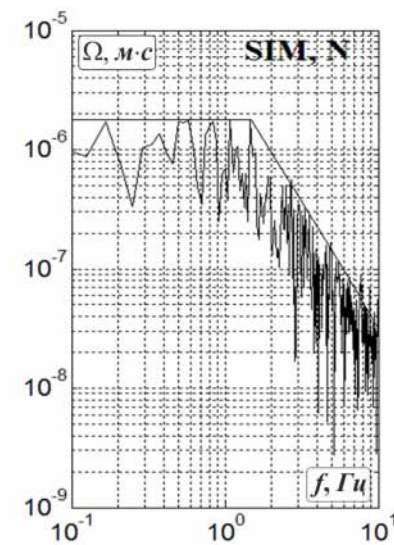
1 мая в 01^h44^m10.6^s
(№ 6)



7 июня в 07^h05^m02.2^s
(№ 7)



19 сентября в 05^h38^m08.2^s
(№ 8)



15 октября в 03^h35^m42.3^s
(№ 9)

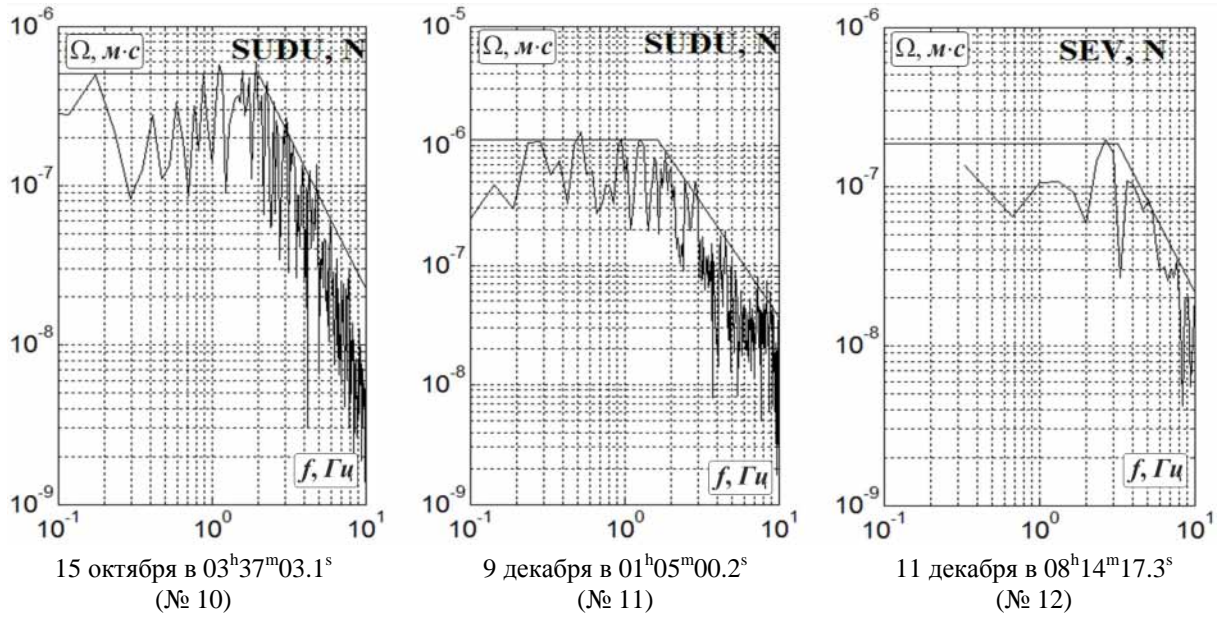


Рис. 5. Примеры амплитудных спектров объемных сейсмических волн землетрясений Крыма за 2013 г. по записям региональных цифровых сейсмических станций и их аппроксимация в рамках теоретической модели Бруна (номера и даты землетрясений соответствуют таковым в табл. 1)

Расчет динамических параметров. Интерпретация амплитудных спектров и расчет динамических параметров очага по основным характеристикам спектра (спектральной плотности Ω_0 и угловой частоте f_0) не изменились по сравнению с [13, 15–17]. Переход от стационарного спектра к спектру источника и учет факторов, влияющих на характер записи объемных волн, осуществлялся согласно методическим рекомендациям в [13, 18].

Для землетрясений 1 мая, 15 октября и 9 декабря при расчете сейсмического момента использована поправка за направленность излучения $R_{\theta\phi}$ из табл. 4, для остальных принято среднее $R_{\theta\phi}=0.4$ [8].

С использованием формул из работ [14, 18–20] определены динамические параметры очагов: сейсмический момент M_0 , радиус круговой дислокации r_0 , сброшенное напряжение $\Delta\sigma$, величина деформации сдвига ϵ , кажущееся напряжение $\eta\bar{\sigma}$, величина радиационного трения $\Delta\sigma_r$, средняя подвижка по разрыву \bar{u} (или величина дислокации) и моментная магнитуда M_w (табл. 5). Моментная магнитуда рассчитана по индивидуальным оценкам сейсмических моментов M_0 (выраженных в *дин·см*) с использованием формулы Канамори [20]. Большинство динамических параметров получено по группе независимых стационарных определений. Только для трех слабых сейсмических толчков Севастопольского района динамические параметры рассчитаны по записям *S*-волны на ближайшей к очагам станции «Севастополь».

Среднение стационарных динамических параметров (кроме радиационного трения $\Delta\sigma_r$) и вычисление их стандартных отклонений проведены, как и прежде, с учетом логнормального закона распределения величин [13]. Стационарные значения $\Delta\sigma$, получились знакопеременными, потому их среднее значение вычислено по среднегеометрическим для данного очага напряжениям $\Delta\sigma$ и $\eta\sigma$ по формуле:

$$\Delta\sigma_r=1/2\Delta\sigma-\eta\sigma [19].$$

Среднее значение моментной магнитуды M_w определено как среднее арифметическое с соответствующей погрешностью. Результаты расчета стационарных и средних для землетрясения динамических параметров представлены в табл. 5. Для каждой станции указаны эпицентральное расстояние Δ км, тип использованной волны (*P*, *S*) и составляющая записи, где (N+E) – полный вектор колебаний.

Таблица 5. Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крыма за 2013 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	$\varepsilon \cdot 10^{-6}$	$\bar{u} \cdot 10^{-2}$, м	$\eta\sigma \cdot 10^5$, Па	$\Delta\sigma_r \cdot 10^5$, Па	M_w
Землетрясение (№ 1) 11 января; $t_0=23^h49^m37.3^s$; $\varphi=44.22^\circ$; $\lambda=33.13^\circ$; $h=13$ км; $K_{II}=7.8$												
SEV	N+E	57	0.032	3.2	0.63	0.40	0.45	1.49	0.04	0.75	-0.53	2.5
Землетрясение (№ 2) 23 февраля; $t_0=19^h38^m27.51^s$; $\varphi=44.253^\circ$; $\lambda=33.95^\circ$; $h=27$ км; $K_{II}=7.0$												
SEV	N+E	39	0.052	4.0	0.11	0.35	0.11	0.38	0.01	1.04	-0.99	2.0
Землетрясение (№ 3) 11 марта; $t_0=04^h57^m19.4^s$; $\varphi=44.61^\circ$; $\lambda=37.63^\circ$; $h=17$ км; $K_{II}=9.8$												
SUDU	Z	210	0.08	1.91	34.8	0.97	1.67	5.56	0.39	0.86	0.03	3.63
SUDU	N+E	210	0.1	1.45	91.5	0.92	5.06	16.9	1.14	0.38	2.2	3.9
SIM	N+E	280	0.3	1.42	16.7	0.94	0.87	2.89	0.20	1.8	-1.37	3.42
ALU	Z	255	0.023	2.7	10.1	0.86	0.69	2.31	0.14	2.96	-2.62	3.27
ALU	N+E	255	0.26	1.5	21.9	0.89	1.34	4.47	0.29	1.37	-0.7	3.5
S					25.9	0.92	1.47	4.89	0.32	1.19	-0.36	3.54
δS					0.16	0.01	0.15	0.15	0.16	0.15		0.17
Землетрясение (№ 4) 13 апреля; $t_0=00^h42^m05.2^s$; $\varphi=44.64^\circ$; $\lambda=35.15^\circ$; $h=22$ км; $K_{II}=7.3$												
SUDU	Z	30	0.02	3.6	1.23	0.65	0.20	0.66	0.03	0.19	-0.09	2.66
SUDU	N+E	30	0.14	2.7	1.67	0.50	0.60	2.0	0.07	0.14	0.15	2.75
ALU	Z	59	0.006	5.1	0.73	0.46	0.34	1.13	0.04	0.32	-0.15	2.52
ALU	N+E	59	0.042	3.0	1.06	0.45	0.52	1.73	0.06	0.22	0.03	2.62
S					1.12	0.50	0.38	1.27	0.07	0.12	0.07	2.63
δS					0.07	0.04	0.10	0.10	0.14	0.07		0.08
Землетрясение (№ 5) 19 апреля; $t_0=12^h58^m14.7^s$; $\varphi=44.55^\circ$; $\lambda=36.95^\circ$; $h=14$ км; $K_{II}=9.5$												
SUDU	Z	159	0.01	5.9	3.3	0.39	2.35	7.84	0.22	4.55	-3.38	2.95
SUDU	N+E	159	0.21	2.3	11.2	0.55	2.93	9.76	0.39	1.35	0.12	3.3
S					6.08	0.46	2.62	8.75	0.29	2.48	-0.17	3.12
δS					0.27	0.07	0.05	0.05	0.12	0.24		0.17
Землетрясение (№ 6) 1 мая; $t_0=01^h44^m10.6^s$; $\varphi=44.63^\circ$; $\lambda=36.60^\circ$; $h=11$ км; $K_{II}=10.1$												
SUDU	N+E	129	1.1	1.7	59.0	0.74	6.25	24.1	1.13	2.41	0.71	3.78
SEV	N+E	231	0.29	1.8	38.5	0.70	4.84	16.1	0.83	3.7	-1.27	3.66
SIM	Z	199	0.05	3.0	58.9	0.78	5.52	18.4	1.04	2.41	-0.35	3.78
YAL	Z	194	0.08	2.8	88.6	0.83	6.75	22.5	1.36	1.6	1.77	3.9
S					58.68	0.76	5.79	20.0	1.07	2.42	0.48	3.78
δS					0.07	0.02	0.03	0.04	0.04	0.07		0.03
Землетрясение (№ 7) 7 июня; $t_0=07^h05^m02.2^s$; $\varphi=44.59^\circ$; $\lambda=36.37^\circ$; $h=27$ км; $K_{II}=9.8$												
SUDU	Z	114	0.2	4.0	55.8	0.61	10.5	35.1	1.57	0.54	4.72	3.77
SUDU	N+E	114	0.94	2.05	50.1	0.69	6.7	22.2	1.11	0.6	2.73	3.74
SIM	Z	183	0.1	3.2	22.3	0.77	2.15	7.16	0.4	1.35	-0.27	3.5
SIM	N+E	183	0.23	2.0	9.8	0.71	1.21	4.02	0.21	3.07	-2.47	3.26
SEV	N+E	213	0.14	2.2	13.9	0.64	2.29	7.62	0.36	2.16	-1.01	3.37
ALU	Z	156	0.06	4.0	15.2	0.61	2.87	9.58	0.43	1.97	-0.53	3.39
ALU	N+E	156	0.18	2.2	8.72	0.64	1.43	4.78	0.22	3.44	-2.72	3.23
S					19.6	0.67	2.90	9.66	0.47	1.53	-0.08	3.47
δS					0.12	0.01	0.13	0.13	0.13	0.12		0.17
Землетрясение (№ 8) 19 сентября; $t_0=05^h38^m08.2^s$; $\varphi=44.45^\circ$; $\lambda=34.30^\circ$; $h=19$ км; $K_{II}=8.0$												
SEV	N+E	50	0.078	2.7	1.63	0.50	0.58	1.94	0.07	0.58	-0.29	2.74
ALU	N+E	27	0.114	2.4	1.24	0.56	0.31	1.04	0.04	0.76	-0.61	2.67
S					1.42	0.53	0.42	1.42	0.05	0.66	-0.45	2.7
δS					0.06	0.02	0.14	0.14	0.12	0.06		0.04
Землетрясение (№ 9) 15 октября; $t_0=03^h35^m42.3^s$; $\varphi=44.53^\circ$; $\lambda=34.35^\circ$; $h=7$ км; $K_{II}=10.1$												
SEV	N+E	53	1.8	1.5	55.3	0.87	3.7	12.3	0.78	2.57	-0.7	3.77
SIM	Z	50	0.1	3.7	30.2	0.60	5.2	20.0	0.88	4.7	-1.69	3.56
SIM	N+E	50	2.7	1.60	37.4	0.81	3.03	10.1	0.6	3.8	-2.28	3.65
S					39.68	0.75	3.88	13.5	0.74	3.58	-1.64	3.66
δS					0.08	0.05	0.07	0.09	0.05	0.08		0.05

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 (№ 10) 15 октября; $t_0=03^h37^m03.1^s$; $\varphi=44.53^\circ$; $\lambda=34.33^\circ$; $h=8$ км; $K_{II}=9.0$												
SUDU	Z	65	0.04	4.70	3.73	0.44	1.97	6.56	0.21	1.43	-0.45	2.98
SUDU	N+E	65	0.59	2.1	8.92	0.53	2.59	8.64	0.33	0.6	0.7	3.24
SEV	N+E	51	0.35	2.0	4.14	0.56	1.04	3.47	0.14	1.29	-0.77	3.0
SIM	Z	49	0.08	3.0	2.92	0.68	0.4	1.34	0.06	1.83	-1.63	2.91
SIM	N+E	49	0.5	1.75	3.59	0.68	0.5	1.66	0.08	1.49	-1.24	2.97
S					4.28	0.57	1.01	3.37	0.14	1.25	-0.74	3.02
δS					0.08	0.04	0.16	0.16	0.13	0.08		0.07
Землетрясение (№ 11) 9 декабря; $t_0=01^h05^m00.2^s$; $\varphi=44.49^\circ$; $\lambda=34.34^\circ$; $h=17$ км; $K_{II}=9.8$												
SIM	Z	49	0.12	2.8	20.3	0.83	1.55	5.15	0.31	4.16	-3.39	3.47
SIM	N+E	49	1.44	1.65	13.0	0.81	1.06	3.54	0.21	6.48	-5.95	3.35
SEV	N+E	51	1.37	1.62	38.0	0.84	2.83	9.42	0.57	2.25	-0.8	3.66
SUDU	N+E	65	1.49	1.65	23.4	0.81	1.90	6.35	0.37	3.62	-2.67	3.52
S					22.00	0.82	1.72	5.75	0.34	3.85	-3.04	3.50
δS					0.1	0.004	0.09	0.09	0.09	0.09		0.08
Землетрясение (№ 12) 11 декабря; $t_0=08^h14^m17.3^s$; $\varphi=44.53^\circ$; $\lambda=33.78^\circ$; $h=10$ км; $K_{II}=7.5$												
SEV	N	8	0.22	3.3	0.97	0.38	0.75	2.5	0.07	0.35	0.03	2.6

Обсуждение результатов. Для большинства землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2013 г. получено удовлетворительное согласие между собой индивидуальных станционных определений динамических параметров очагов при стандартном отклонении менее $\delta S \leq 0.1$ (табл. 6). При этом разброс значений моментных магнитуд M_w не превысил погрешности ± 0.1 . Наилучшая сходимость результатов по группе станций ($\delta S < 0.1$) отмечена для очаговых параметров с известным механизмом очагов (№№ 6, 9, 11). Для двух из этих землетрясений одинакового энергетического уровня ($K_{II}=10.1$), произошедших на разных глубинах и в разных сеймотектонических условиях, получены наибольшие значения сейсмического момента M_0 , сброшенного напряжения $\Delta\sigma$, величины деформации сдвига ε , средней подвижки по разрыву \bar{u} и моментной магнитуды M_w . Наибольшие значения радиуса круговой дислокации r_0 получены для очагов землетрясений 11 марта и 9 декабря с $K_{II}=9.8$ (№ 3 и № 11), произошедших в восточной и центральной частях региона на глубине $h=17$ км. При этом сброшенное напряжение и деформация сдвига в обоих случаях оказались примерно в два раза ниже, чем для землетрясения № 7 такого же энергетического уровня, возникшего 7 июня на глубине $h=27$ км. В целом можно отметить увеличение значений всех динамических параметров (кроме радиационного трения) с ростом энергии землетрясений и глубины очага.

Проведем сравнение полученных в 2013 г. динамических параметров очагов со средними их долговременными величинами (рис. 6). Сравнение, как и в предыдущие годы [15–17], проведено только для сейсмического момента M_0 , и радиуса круговой дислокации r_0 , с использованием их зависимостей от энергии землетрясений $M_0(K_{II})$ и $r_0(K_{II})$ для аналоговых сейсмических станций [21]:

$$\lg M_0 = 0.645(\pm 0.027) K_{II} + 8.142 (\pm 0.271), \quad \rho = 0.99;$$

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

Прежде всего можно отметить, что все средние значения M_0 и r_0 по группе станций удовлетворяют долговременным зависимостям $M_0(K_{II})$, $r_0(K_{II})$, находясь в пределах их доверительных областей (рис. 6). Исключение составляет только M_0 для самого слабого землетрясения 23 февраля (№ 2) с $K_{II}=7.0$, восстановленного по записи поперечных волн одной станции «Севастополь» (рис. 6, а). Вместе с тем, для большинства землетрясений 2013 г. значения отклонений δM_0 относительно долговременной зависимости имеют отрицательные значения (рис. 6, а), а радиусов круговой дислокации r_0 – положительные (рис. 6, б). Для наиболее сильных землетрясений с известным механизмом очагов введение поправки $R_{\text{ф}}$ приводило к хорошей внутренней сходимости станционных определений скалярного сейсмического момента по группе станций и минимизировало отклонения M_0 от регрессии $M_0(K_{II})$, по сравнению с прежними определениями [8].

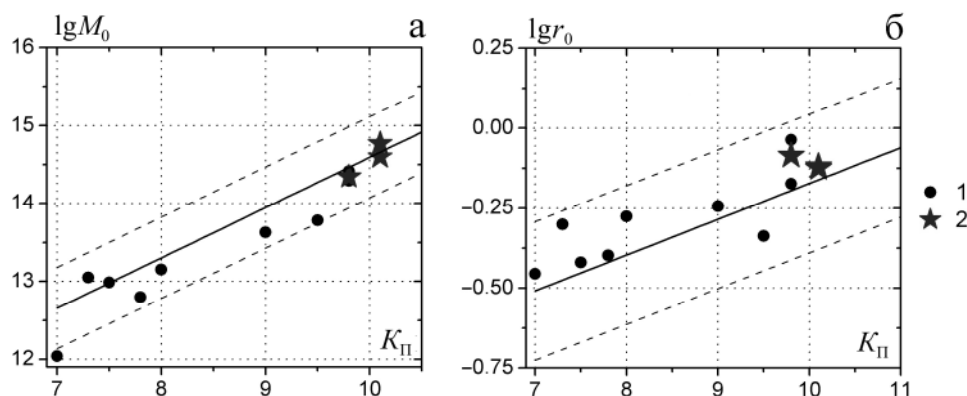


Рис. 6. Сравнение динамических параметров очагов землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2013 г.: сейсмического момента M_0 (а) и радиуса круговой дислокации r_0 (б) с долговременными зависимостями $M_0(K_{II})$ и $r_0(K_{II})$ в [21]

1 – экспериментальные значения за 2013 г.; 2 – значения для землетрясений с известными механизмами очагов; Прямые линии – долговременные зависимости $M_0(K_{II})$ и $r_0(K_{II})$; пунктир – доверительные области на уровне 0.95.

Следует отметить, что распределения очаговых параметров M_0 и r_0 относительно долговременных зависимостей $M_0(K_{II})$, $r_0(K_{II})$ в 2013 г. аналогичны таковым за 2009–2010 гг. [15, 16] и не соответствуют за 2011–2012 гг. [17, 22]. Одной из причин таких различий могут быть пространственно-временные флуктуации значений M_0 и r_0 в регионе, ранее отмеченные в период аналоговой регистрации [13].

Л и т е р а т у р а

1. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е. Об энергетической оценке землетрясений Крымско-Черноморского региона // *Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений*. Т. 2. – М.: ИФЗ АН СССР, 1974. – С. 113–125.
2. Козиненко Н.М., Свидлова В.А., Сыкчина З.Н. (отв. сост.). Каталог землетрясений Крымско-Черноморского региона в 2013 г. // *Землетрясения Северной Евразии*. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – Приложение на CD-ROM.
3. Козиненко Н.М., Свидлова В.А., Сыкчина З.Н. (отв. сост.); Антонюк Г.П., Антонюк В.А., Курьянова И.В., Лукьянова Ж.Н., Подвинцев В.А., Росляков А.В. (сост.). Каталог и подробные данные о землетрясениях Крымско-Черноморского региона за 2013 г. // *Сейсмологический бюллетень Украины за 2013 год*. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2014. – С. 61–91.
4. International Seismological Centre, Thatcham, Berkshire, United Kingdom, 2015 [Сайт]. – URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/>
5. Сейсмологический бюллетень (сеть телесеизмических станций), 2013 // ФИЦ ЕГС РАН [Сайт]. – URL: ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_bulletin/2013
6. Kennet B.L.N. Seismological Tables: ak135 // Research School of earth Sciences Australian national University. – Australia, Canberra, ACT0200. – 2005. – 80 p.
7. 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.
8. Пустовитенко Б.Г., Мерзей Е.А., Пустовитенко А.А., Калинюк И.В. Очаговые параметры землетрясений Крыма 2013 года // *Сейсмологический бюллетень Украины за 2013 г.* Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2014. – С. 12–21.
9. Панков Ф.Н. (отв. сост.). Сейсмические станции Крымско-Черноморского региона в 2013 г. // *Землетрясения Северной Евразии*. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – Приложение на CD-ROM.
10. Введенская А.В. Исследование напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокации. – Москва: Наука, 1969. – 260 с.
11. Балакина Л.А., Введенская А.В., Голубева Н.В., Мишарина Л.А., Широкова Е.И. Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений. – Москва: Наука, 1972. – 198 с.

12. Пустовитенко Б.Г. (отв. сост.). Каталог механизмов очагов землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2013 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – Приложение на CD_ROM.
13. Пустовитенко Б. Г., Пантелеева Т.А. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма. – Киев: Наукова думка, 1990. – 251 с.
14. Brune I.V. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // J. Geophys. Res.– 1970. – 75. – N 26. – P. 4997–5009.
15. 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.
16. 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.
17. Пустовитенко Б.Г., Калинюк И.В., Пустовитенко А.А. Очаговые параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона, 2011 г.// Землетрясения Северной Евразии, 2011 год. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – С. 282–293.
18. 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.
19. Костров Б. Механика очага тектонического землетрясения. – М.: Наука, 1975. – 179 с.
20. Hanks T., Kanamori H. A moment magnitude scale // J. Geophys. Res. – 1979. – 84. – № 35. – P. 2348–2350.
21. 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.
22. Пустовитенко Б.Г., Калинюк И.В., Пустовитенко А.А. Очаговые параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона – 2012 // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 21 (2012 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – С. 286–293.

METADATA IN ENGLISH

SOURCE PARAMETERS of CRIMEAN-BLACK SEA REGION EARTHQUAKES

B.G. Pustovitenko, I. V. Kalinyuk

*Institute of Seismology and Geodynamics FSAEI HE «Of the V. I. Vernadsky
Crimean Federal University», Simferopol, Russia, bpustovitenko@mail.ru*

Abstract. The source dynamic parameters of 12 earthquakes in Crimea with energy classes $K_{II}=7.0-10.1$ have been restored by 63 amplitude spectra of *P* and *S* body waves registered by a group of regional seismic stations of the Crimea. For three strongest earthquakes: May 1, October 15 and December 9, the solution of focal mechanism has been obtained and the direction of radiation from the source at the registration station has been determined to take into account in calculation of the scalar seismic moment. For these earthquakes, the best convergence of station definitions of all source dynamic parameters has been obtained. The average values of seismic moments and radii of circular dislocation within the experimental error of their determination satisfy the average long-term dependencies of the parameters on the energy level of earthquakes obtained previously by analog records.

Keywords: amplitude spectrum, source mechanism, Bruna model, seismic moment, dislocation radius, stress drop, apparent voltage, rupture displacement, radiation friction, moment magnitude.

DOI: 10.35540/1818-6254.2019.22.27

For citation: Pustovitenko B.G., & Kalinyuk I.V. (2019). Source parameters of Crimean-Black Sea Region Earthquakes. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 22 (2013), 299–310. (In Russ.). doi: 10.35540/1818-6254.2019.22.27

References

1. Pustovitenko, B.G., & Kul'chickij, V.E. (1974). *Ob energeticheskoy ocenke zemletryasenij Krymsko-Chernomorskogo regiona. Magnituda i energeticheskaya klassifikaciya zemletryasenij* [On the energy assessment of the earthquakes of the Crimean Black Sea region. Magnitude and energy classification of earthquakes]. Moscow: IEP AS USSR Publ., Pt. 2, 113–125.
2. Kozinenko, N.M., Svidlova, V.A., & Sykchina, Z.N. (2019). Catalog of the earthquakes of the Crimean Black Sea region in 2013. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 22(2013), Appendix on CD. (In Russ.).
3. Kozinenko, N.M., Svidlova, V.A., Sykchina, Z.N., Antonyuk, G.P., Antonyuk, V.A., Kur'yanova, I.V., Luk'yanova, Z.N., Podvincev, V.A., & Roslyakov, A.V. (2014). [Catalog and detailed data on the earthquakes of the Crimean-Black Sea region for 2013]. In *Seismologicheskij byulleten' Ukrainy za 2013 god* [Ukraine seismological bulletin for 2013] (pp. 61–91). Sevastopol: NPC «ECOSY-Hydrophysica» Publ. (In Russ.).
4. International Seismological Centre. (2019). On-line Bulletin, Internatl. Seis. Cent., Thatcham, United Kingdom. Retrieved from <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/>
5. GS RAS, Bulletin of Teleseismic Stations. (2019). Retrieved from ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_bulletin/2013/
6. Kennet, B.L.N. (2005). Seismological Tables: ak135//Research School of earth Sciences Australian national University. *Australia, Canberra, ACT0200*, 80.
7. Kul'chickij, V.E., Safonova, G.P., & Svidlova, V.A. (1986). [Hodographs of seismic waves of the Crimean-Black Sea earthquakes]. In *Seismologicheskij byulleten' Zapadnoj territorial'noj zony ESSN SSSR (Krym-Karpaty) za 1983 g.* [Seismological bulletin of the Western territorial zone ESSN USSR (Crimea-Carpathians) for 1983] (pp. 94–103). Kiev: Naukova Dumka Publ. (In Russ.).
8. Pustovitenko, B.G., Merzhej, E.A., Pustovitenko, A. A., & Kalinyuk, I. V. (2014). [Focal parameters of the earthquakes of the Crimea in 2013]. In *Seismologicheskij byulleten' Ukrainy za 2013 god* [Ukraine seismological bulletin for 2013] (pp. 12–21). Sevastopol: NPC «ECOSY-Hydrophysica» Publ. (In Russ.).
9. Pankov, F.N. (2019). Seismic stations of the Crimean Black Sea region in 2013. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 22(2013), Appendix on CD. (In Russ.).
10. Vvedenskaya, A.V. (1969). *Issledovanie napryazhenij i razryvov v ochagah zemletryasenij pri pomoshchi teorii dislokacii* [Investigation of stresses and ruptures in earthquake foci using dislocation theory]. Moscow: Nauka Publ., 260 p.
11. Balakina, L.A., Vvedenskaya, A.V., Golubeva, N.V., Misharina, L.A., & Shirokova, E.I. (1972). *Pole uprugih napryazhenij Zemli i mekhanizm ochagov zemletryasenij* [The field of elastic stress of the Earth and the mechanism of earthquake foci]. Moscow: Nauka Publ., 198 p.
12. Pustovitenko, B.G. (2019). Catalog of Earthquake Focal Mechanisms of the Crimean Black Sea Region for 2013. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 22(2013), Appendix on CD. (In Russ.).
13. Pustovitenko, B.G., & Panteleeva, T.A. (1990). *Spektral'nye i ochagovye parametry zemletryasenij Kryma*. [Crimea earthquakes Spectral and focal parameters]. Kiev: Naukova Dumka Publ., 251 p.
14. Brune, J.N. (1970). Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of geophysical research*, 75(26), 4997–5009.
15. Pustovitenko, B.G., Kalinyuk, I.V., Merzhej, E.A., & Pustovitenko, A.A. (2015). [Focal parameters of the earthquakes of the Crimea]. In *Zemletryaseniia Severnoj Evrazii, 2009* [Earthquakes in Northern Eurasia, 2009] (pp. 262–271). Obninsk: GS RAS Publ. (In Russ.).
16. Pustovitenko, B.G., Kalinyuk, I.V., & Merzhej, E.A. (2016). [Dynamic parameters of earthquake foci of the Crimean Black Sea region]. In *Zemletryaseniia Severnoj Evrazii, 2010* [Earthquakes in Northern Eurasia, 2010] (pp. 296–304). Obninsk: GS RAS Publ. (In Russ.).
17. Pustovitenko, B.G., Kalinyuk, I.V., & Pustovitenko, A.A. (2017). [Focal parameters of earthquakes in the Crimean Black Sea region, 2011]. In *Zemletryaseniia Severnoj Evrazii, 2011 god* [Earthquakes in Northern Eurasia, 2011] (pp. 282–293). Obninsk: FRC GGS RAS Publ. (In Russ.).
18. Aptekman, Zh.Ya., Belavina, Yu.F., Zaharova, A.I., Zobin, V.M., Kogan, S.YA., Korchagina, O.A., Moskvina, A.G., Polikarpova, L.A., & Chepkunas, L.S. (1989). [P-wave spectra in the problem of determining the dynamic parameters of earthquake foci. Transition from station spectrum to focal and calculation of dynamic parameters of the sources]. *Vulkanologiya i seismologiya* [Journal of Volcanology and Seismology], 2, 66–79. (In Russ.).

-
19. Kostrov, B.V. (1975). *Mekhanika ochaga tektonicheskogo zemletryaseniya* [Tectonic earthquake source mechanics]. Moscow: Nauka Publ., 179 p.
 20. Hanks, T.C., & Kanamori, H. (1979). A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84 (B5), 2348–2350.
 21. Pustovitenko, B.G., Pustovitenko, A.A., Kapitanova, S.A., & Porechnova, E.I. (2008). [Spatial features of the focal parameters of the earthquakes of the Crimea]. In *Sejsmichnost' Severnoj Evrazii. Materialy Mezhdunarodnoj konferencii* [Seismicity of Northern Eurasia. Proceedings of the International Conference] (pp. 238–242). Obninsk: GS RAS Publ. (In Russ.).
 22. Pustovitenko, B.G., Kalinyuk, I.V., & Pustovitenko, A.A. (2017). Focal parameters of earthquakes in the Crimean Black Sea region. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 21 (2012), 286–293. (In Russ.).