

**СПЕКТРАЛЬНЫЕ и ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА**

Б.Г. Пустовитенко, Э.Э. Эреджепов

Институт сейсмологии и геодинамики ФГАОУВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», г. Симферополь, seismosilver1@mail.ru, bpustovitenko@mail.ru

Аннотация. Представлены спектральные и динамические параметры очагов (M_0 , r_0 , $\Delta\sigma$, ε , $\eta\sigma$, σ_r , \bar{y} , E_0 и M_w) тринадцати землетрясений Крыма с $K_{II}=7.2-11.2$, $M_{w\text{per}}=2.6-4.1$, восстановленные по 123 амплитудным спектрам продольных и поперечных сейсмических волн, зарегистрированных цифровыми региональными сейсмическими станциями. Аппроксимация спектров и расчет по их характеристикам динамических параметров очагов землетрясений выполнены в рамках дислокационной модели Бруна. В осреднении очаговых параметров участвовало от четырех до семи стационарных определений, что обеспечило малую величину стандартного отклонения – показателя степени рассеяния индивидуальных оценок. Наилучшая сходимость стационарных определений отмечена для радиуса круговой дислокации. Наибольшие значения динамических параметров получены для ощутимого землетрясения 2 марта с $K_{II}=11.2$, а наименьшие – для его слабого афтершока 6 апреля с $K_{II}=7.2$. Во всем диапазоне энергий величина сброшенных напряжений не превысила $\Delta\sigma=10^6$ Па (10 бар), а кажущихся напряжений $\eta\sigma<3\cdot 10^5$ Па (3 бар). Средние значения сейсмических моментов и радиусов круговой дислокации в пределах погрешностей их определения удовлетворяют средним долговременным зависимостям параметров от энергетического уровня землетрясений, полученным по аналоговым записям. Для наиболее сильных землетрясений 2 марта с $K_{II}=11.2$, $M_{w\text{per}}=4.1$ и 18 октября с $K_{II}=10.1$, $M_{w\text{per}}=3.8$ получены решения механизмов очагов. Землетрясение 2 марта произошло в центральной части региона вблизи Южного берега Крыма под действием горизонтальных сил растяжения, ориентированных близширотно. Тип подвижки в очаге – сбросо-сдвиг, с преобладанием сбросовой компоненты над сдвиговой. Землетрясение 18 октября возникло в центральной части Черноморской впадины в обстановке субширотного сжатия и субмеридионального растяжения. Тип подвижки в очаге – чистый сдвиг. Для главного толчка 2 марта и его шести афтершоков по данным станции «Алушта» приведены энергетические спектры и их основные параметры. Дан анализ полученных результатов.

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

DOI: 10.35540/1818-6254.2020.23.25

Для цитирования: Пустовитенко Б.Г., Эреджепов Э.Э. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 23 (2014 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – С. 250–262 doi: 10.35540/1818-6254.2020.23.25

Исходные данные. Большинство (около 70 %) из всех зарегистрированных в 2014 г. землетрясений [1] относится к слабым ($K_{II}\leq 7$) сейсмическим событиям, непредставительным для региона [2]. Для таких землетрясений основные параметры, особенно глубины очагов, определены с меньшей надежностью, только по данным ограниченного числа ближайших к очаговой зоне сейсмических станций. В связи с этим их записи не были привлечены для восстановления очаговых параметров. Для анализа выбраны только все наиболее значимые представительные сейсмические события года с $K_{II}>9.5$, а также более слабые толчки из зоны ощутимого землетрясения 2 марта с $K_{II}=11.2$ и районов недостаточно изученных территорий **северо-западной части Крыма и Азовского моря** (районы № 6, № 7). Для предварительно отобранных землетрясений был проведен анализ качества сейсмограмм на сейсмических станциях с надежными амплитудно-частотными характеристиками приборов. Выбраны записи с четкими волновыми формами объемных *P*- и *S*-волн, не осложненные микросейсмическим шумом, с превышением полезного сигнала над фоном помех в два и более раза. По такому критерию для расчета спектральных и динамических параметров очагов отобрано 13 землетрясений с энергетическими классами $K_{II}=7.2-11.2$ (рис. 1, табл. 1).

Для двух наиболее сильных землетрясений: первого – 2 марта, произошедшего в центральной части региона вблизи Южного берега Крыма с $K_{II}=11.2$ и интенсивностью до трех баллов в городах Ялта и Алушта [2], и второго – 18 октября с $K_{II}=10.1$, возникшего в центральной части

Черноморской впадины, получено решение механизма очага [3]. Для этого использованы записи продольных P -волн по станциям Крымской, Турецкой и Кавказской сетей, а также данные о знаках первых вступлений P -волн, приведенные в бюллетенях международных сейсмологических агентств [4–6]. Углы выхода сейсмических волн определены для удаленных станций по годографу «ak135» [7], а для близких – по региональному годографу [8].

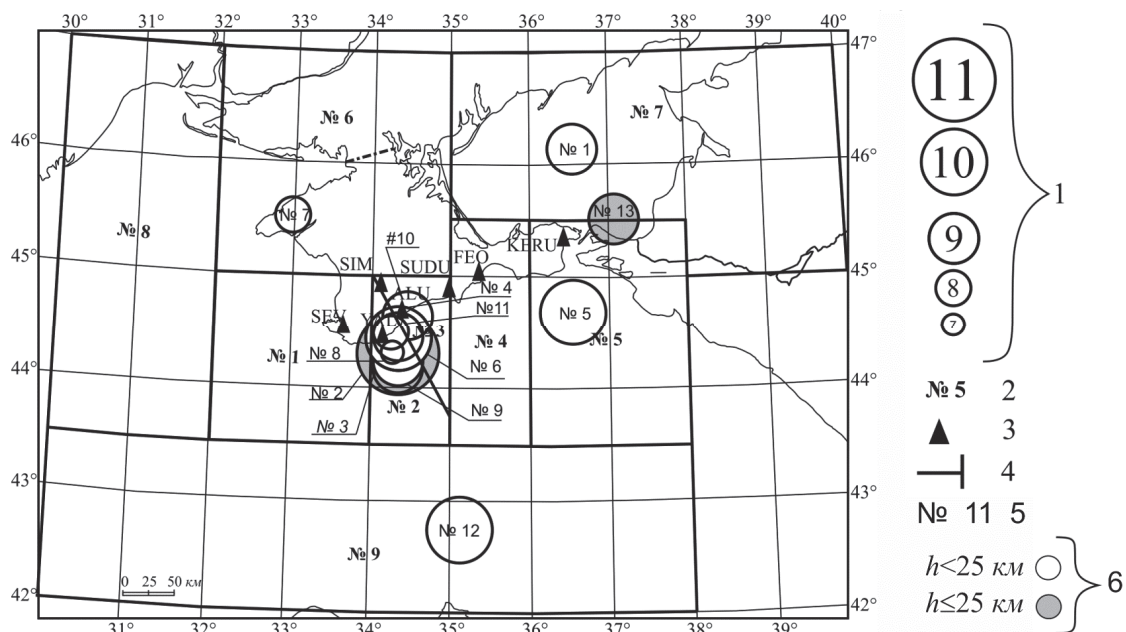


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2014 г., для которых восстановлены очаговые параметры

1 – энергетический класс K_{Π} [9]; 2 – номер района; 3 – сейсмическая станция; 4 – граница района; 5 – номер землетрясения по табл. 1; 6 – глубина очага h , км.

Максимальное количество изученных землетрясений (семь событий) относится к Ялтинской зоне региона (район № 2), два – к Азово-Кубанской (район № 7) и по одному – к Алуштинской, Керченско-Анапской зоне, Степному Крыму и Черноморской впадине (районы № 3, 5, 6 и 9 соответственно).

Таблица 1. Основные параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2014 г., для которых определены очаговые параметры

№	Дата, д м	t_0 , ч мин с	Эпицентр		h , км	Магнитуда			K_{Π}	Район
			φ° , N	λ° , E		m_b	$Mw_{\text{per}/h}$ (табл. 4)	ML_{wsg}		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	04 01	07 48 00.3	46.14	36.57	6	3.6	3.52/7	3.3	9.4	Азово-Кубанский (№ 7)
2	02 03	03 34 28.3	44.30	34.33	28	3.4	4.12/7	3.9	11.2	Ялтинский (№ 2)
3	02 03	18 10 25.9	44.26	34.34	26	–	2.88/4	–	8.5	Ялтинский (№ 2)
4	17 03	23 13 36.0	44.43	34.34	19	–	3.31/7	3.0	9.8	Ялтинский (№ 2)
5	25 03	17 04 40.5	44.69	36.53	13	3.3	3.32/7	3.2	9.6	Керченско-Анапский (№ 5)
6	29 03	05 41 21.1	44.44	34.33	19	–	3.05/7	–	8.6	Ялтинский (№ 2)
7	30 03	07 55 59.1	45.51	32.98	21	–	3.13/4	–	8.2	Степной Крым (№ 6)
8	06 04	20 47 13.2	44.30	34.28	23	–	2.63/5	–	7.2	Ялтинский (№ 2)
9	27 04	02 51 33.6	44.23	34.33	22	–	2.9/6	–	8.5	Ялтинский (№ 2)
10	28 04	06 30 35.8	44.62	34.47	22	–	3.44/5	2.9	9.3	Алуштинский (№ 3)
11	20 08	17 05 27.2	44.49	34.25	15	–	2.83/7	–	7.9	Ялтинский (№ 2)
12	18 10	15 34 54.0	42.74	35.11	5	3.7	3.83/7	3.7	10.1	Черноморская впадина (№ 9)
13	09 11	04 08 13.7	45.51	37.07	25	–	3.05/4	–	8.5	Азово-Кубанский (№ 7)

Примечание. Параметры землетрясений в графах 2–7, 9–11 соответствуют таковым в [1]; значения Mw/n – из табл. 4.

Наибольшее количество спектров получено по записям станции «Судак». Процент участия этой станции в общей оценке динамических параметров отдельных землетрясений максимальный и составляет 100 %, для остальных также высокий – 85 %.

Пока не использованы для анализа записи сейсмических станций «Феодосия» и «Керчь», которые расположены, соответственно, на мергелистых глинах и мшанковых известняках с пониженными прочностными свойствами и повышенным затуханием высоких частот. Сейсмические колебания от местных землетрясений на этих станциях не только осложнены микросейсмическим шумом, но и сложным образом искажены амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) среды, которую в настоящее время без специальных исследований корректно учесть не представляется возможным. Записи сейсмической станции «Тарханкут», открытой в 2012 г. [10], также не привлечены для анализа из-за отсутствия надежных АЧХ сейсмографов и АЧХ локальных инженерно-геологических условий места расположения станции. На момент расчета спектров и оценки динамических параметров не были уточнены основные параметры сейсмографов станции «Ялта» за 2014 г., в связи с этим сейсмограммы этой станции также не использованы в данной работе.

Механизмы очагов землетрясений [3] получены с использованием теории дислокации по стандартной методике в рамках двойного диполя [11].

В соответствии с полученными решениями (табл. 2, рис. 2) землетрясение **2 марта** (№ 2 по табл. 1) произошло под действием горизонтальных сил растяжения ($PL_T=8^\circ$), ориентированных близшипротно ($AZM_T=117^\circ$). Тип подвижки в очаге – сбросо-сдвиг с преобладанием сбросовой компоненты над сдвиговой (табл. 2, рис. 2). Первая плоскость разрыва $NP1$ имела диагональную ориентацию ($STK_{NP1}=44^\circ$) с наклонным падением ($DP_{NP1}=57^\circ$) на юго-восток, а другая $NP2$ – близмеридиональную ($STK_{NP2}=184^\circ$), с пологим падением ($DP_{NP2}=41^\circ$) на запад.

Таблица 2. Параметры механизма очагов землетрясений 2 марта 2014 г. в 03^h34^m с $K_{\Pi}=11.2$ и 18 октября в 15^h34^m с $K_{\Pi}=10.1$

Дата, д м	t_0 , ч мин с	h , км	Магнитуды		K_{Π}	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости						Ис- точ- ник
			M_w	m_b (ML_{wsg})		T		N		P		NP1			NP2			
						PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP	
02.03	03 34 28.3	28	4.1	3.4(3.9)	11.2	8	117	21	210	68	5	44	57	-65	184	41	-122	[12]
18.10	15 34 54.0	16*	3.8	3.7(3.7)	10.1	28	167	60	326	9	72	302	77	27	206	64	166	[12]

Примечание. При расчетах углов выхода использована глубина очага по данным ISC [5].

Землетрясение **18 октября** (№ 12 по табл. 1) возникло в обстановке восток–северо-восточного сжатия ($AZM_P=72^\circ$, $PL_P=9^\circ$) и субмеридионального растяжения ($AZM_P=167^\circ$, $PL_T=28^\circ$). Тип подвижки в очаге – практически чистый сдвиг. Обе нодальные плоскости близвертикальны ($DP_{NP1}=77^\circ$ и $DP_{NP2}=64^\circ$) и простираются диагонально ($STK_{NP1}=302^\circ$ и $STK_{NP2}=206^\circ$).

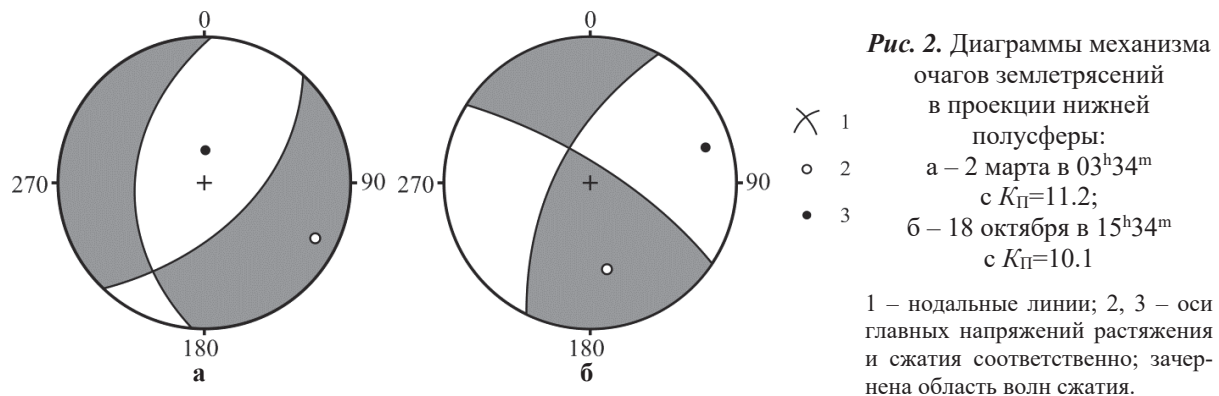


Рис. 2. Диаграммы механизма очагов землетрясений в проекции нижней полусферы:
 а – 2 марта в 03^h34^m с $K_{\Pi}=11.2$;
 б – 18 октября в 15^h34^m с $K_{\Pi}=10.1$
 1 – нодальные линии; 2, 3 – оси главных напряжений растяжения и сжатия соответственно; зачернена область волн сжатия.

По параметрам механизма очагов определены поправки за направленность излучения $R_{0\phi}$ из очага на станцию регистрации (табл. 3), которые далее использованы при оценке скалярного сейсмического момента M_0 для этих землетрясений по формуле (1).

Таблица 3. Значения станционных поправок $R_{\theta\varphi}$ для землетрясений 2 марта и 18 октября 2014 г.

Дата, д м	Станция Тип волны	SIM		SEV	SUDU	SUDU	ALU	ALU
		S	S	P	S	P	S	S
02.03	$R_{\theta\varphi}$	0.54	0.32	0.21	0.39	0.56	0.27	0.54
18.10	$R_{\theta\varphi}$	0.19	0.18	0.73	0.28	0.65	0.23	0.19

Методика обработки и интерпретации амплитудных спектров. Амплитудные спектры поперечных волн (S) во всех случаях рассчитывались по двум горизонтальным составляющим (N-S) и (E-W) и вычислялся полный вектор колебаний, а продольных (P) – по вертикальной составляющей (Z). Относительная длительность τ исследуемого участка записи принята равной интервалу времени от момента вступления S - и P -волн до времени спада их максимальных амплитуд A_{\max} на уровень $1/3 A_{\max}$ [12].

Станционные амплитудные спектры рассчитаны стандартным методом быстрого преобразования Фурье. Для интерпретации выбрана теоретическая дислокационная модель Бруна (ω^{-2}) [13], согласно которой 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 $\gamma \sim -2$. Полученные амплитудные спектры записей землетрясений Крыма за 2014 г. уверенно аппроксимируются двумя прямыми: в длиннопериодной части спектра – прямой, параллельной оси частот и наклонной, с угловым коэффициентом $\gamma \sim -2$ в области коротких периодов (рис. 3), что соответствует выбранной теоретической модели.

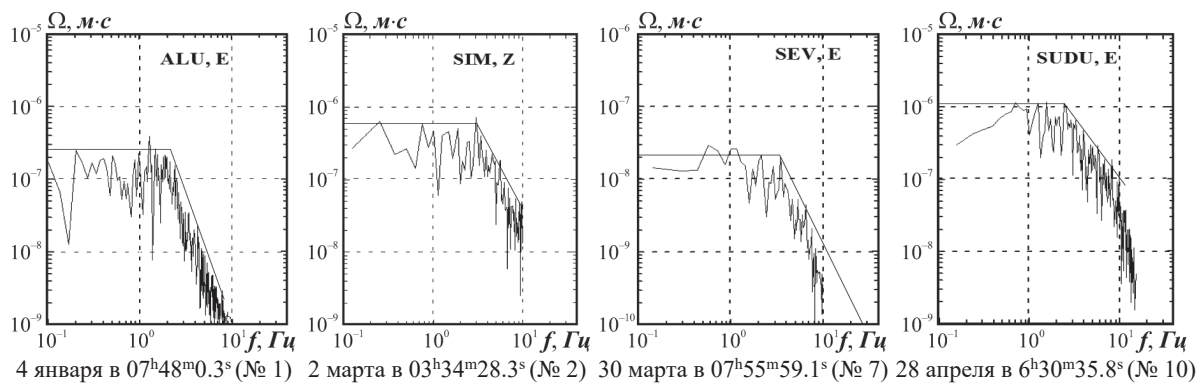


Рис. 3. Примеры амплитудных спектров объемных сейсмических волн землетрясений Крыма за 2014 г. по записям региональных цифровых сейсмостанций и их аппроксимации в рамках теоретической модели Бруна (номера и даты землетрясений соответствуют таковым в табл. 1)

Расчет динамических параметров очага. Согласно теоретической дислокационной модели Бруна [13], спектральная плотность Ω_0 пропорциональна скалярному сейсмическому моменту M_0 , а угловая частота f_0 прямо связана с размером дислокации r_0 .

Формула для расчета M_0 по станционному спектру имеет вид:

$$M_0 = \Omega_0 (4\pi\rho \cdot V^3) / R_{\theta\varphi} \cdot G(\Delta, h) C(\omega) \cdot Sm(f), \quad (1)$$

где Ω_0 – максимальное значение спектральной плотности при $\omega \rightarrow 0$; V – скорость распространения объемной волны; ρ – плотность пород в окрестности очага, $R_{\theta\varphi}$ – направленность излучения из очага на станцию регистрации; $G(\Delta, h)$ – 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 [12–15].

Геометрические размеры очага определялись по угловой частоте f_0 амплитудного спектра смещения. Для дислокационной модели Бруна с разрывом в виде круга, радиус дислокации r_0 вычисляется по формуле:

$$r_0 = 2.34 \frac{V_P}{2\pi f_0} \quad (2)$$

По найденным значениям сейсмического момента M_0 и размеров разрыва r_0 с использованием формул из работ [12–17] определены другие динамические параметры очагов: сброшенное напряжение $\Delta\sigma$, величина деформации сдвига ε , кажущееся напряжение $\eta\bar{\sigma}$, величина радиационного трения σ_r , сейсмическая энергия E_s , средняя подвижка по разрыву \bar{u} (или величина дислокации), энергия образования дислокации в очаге E_u и моментная магнитуда $M_{w\text{рег}}$ (табл. 4). Моментная магнитуда рассчитана по индивидуальным оценкам скалярных сейсмических моментов M_0 с использованием формул из [18]:

$$M_w = 2/3 \cdot \lg M_0 - 10.7, \quad (3)$$

$$M_w = 2/3 \cdot (\lg M_0 + 7) - 10.7, \quad (4)$$

где M_0 имеет размерность [дин·см] в системе СГС и [Н·м] – в системе СИ.

Большинство динамических параметров получено по группе независимых стационарных определений.

Осреднение стационарных динамических параметров (кроме радиационного трения $\Delta\sigma_r$) и вычисление их стандартных отклонений проведены, как и прежде, с учетом логнормального закона распределения величин [12]. Стационарные значения $\Delta\sigma_r$ получились знакопеременными, поэтому их среднее значение для данного очага вычислено по среднегеометрическим напряжениям $\Delta\sigma$ и $\eta\bar{\sigma}$ по формуле $\Delta\sigma_r = 1/2 \Delta\sigma - \eta\bar{\sigma}$ из [16]. В этом случае графа δS в табл. 4 не заполнялась. Среднее значение моментной магнитуды $M_{w\text{рег}}$ определено как среднее арифметическое с соответствующей погрешностью.

Результаты расчета стационарных и средних для землетрясения динамических параметров представлены в табл. 4. Для каждой станции указаны эпицентральное расстояние Δ , км, тип использованной волны (P , S) и составляющая записи, где (N+E) – полный вектор колебаний по N–S и E–W.

Таблица 4. Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крыма за 2014 г.

Код ст	Тип волны	Сост.	Δ , км	$\Omega_0 \cdot 10^{-6}$, м·с	$\Sigma\Omega_0 \cdot 10^{-6}$, 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	$\eta\bar{\sigma} \cdot 10^5$, Па	$\Delta\sigma_r \cdot 10^5$, Па	$E_u \cdot 10^8$, Дж	$M_{w\text{рег}}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
Землетрясение (1) 4 января: $t_0=07^h48^m0.3^s$; $\varphi=46.14^\circ$, $\lambda=36.57^\circ$; $h=6$ км; $K_{\Pi}=9.4$																
ALU	P	Z	234	0.041	–	3.2	9.43	0.58	2.1	7.0	0.3	1.59	–0.55	3.3	3.25	
ALU	S	N+E	234	–	0.41	2.1	20.4	0.53	5.9	19.7	0.76	0.74	2.2	20.1	3.48	
SEV	S	N+E	287	–	0.39	2.1	23.7	0.53	6.9	23.0	0.89	0.63	2.8	27.3	3.52	
SIM	P	Z	233	0.1	–	3.25	11.4	0.57	2.66	8.9	0.37	1.31	0.02	5.1	3.31	
SIM	S	N+E	233	–	1.41	2.1	34.9	0.53	10.1	33.8	1.31	0.43	4.63	58.9	3.63	
SUDU	P	Z	186	0.22	–	3.1	40.2	0.60	8.11	27.0	1.18	0.37	3.68	54.2	3.67	
SUDU	S	N+E	186	–	1.44	2.0	56.8	0.56	14.2	47.5	1.93	0.26	6.86	135.0	3.77	
S								23.65	0.56	5.95	19.87	0.81	0.63	23.65	23.52	3.52
δS								0.11	0.01	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.22	0.14
Землетрясение (2) 2 марта: $t_0=03^h34^m28.3^s$; $\varphi=44.30^\circ$, $\lambda=34.33^\circ$; $h=28$ км; $K_{\Pi}=11.2$																
ALU	P	Z	43	2.0	–	2.7	148.0	0.91	8.6	28.6	1.9	3.21	1.08	212.0	4.05	
ALU	S	N+E	43	–	6	1.7	182	0.76	13.8	46.0	2.8	2.61	4.29	419	4.11	
SEV	S	N+E	59	–	3	1.65	123	0.86	8.5	28.4	1.77	3.87	0.39	174	4.0	
SIM	P	Z	75	0.6	–	2.8	280	0.88	18.1	60.5	3.86	1.7	0.74	848	4.23	
SIM	S	N+E	75	–	12	1.52	189	0.93	10.2	34.1	2.31	2.52	2.6	322.0	4.12	
SUDU	P	Z	84	0.5	–	2.5	220.0	0.98	10.1	33.7	2.41	2.17	2.89	370.0	4.16	
SUDU	S	N+E	84	–	4.95	1.5	223.0	0.94	11.6	38.8	2.66	2.13	3.69	433.0	4.17	
S								188.96	0.89	11.18	37.32	2.46	2.52	1.68	352.5	4.12
δS								0.04	0.01	0.04	0.04	0.04	0.05	0.15	0.09	0.04
Землетрясение (3) 2 марта: $t_0=18^h10^m25.9^s$; $\varphi=44.26^\circ$, $\lambda=34.34^\circ$; $h=26$ км; $K_{\Pi}=8.5$																
ALU	P	Z	47	0.01	–	5.0	0.94	0.49	0.35	1.16	0.04	2.01	–1.84	0.05	2.59	
ALU	S	N+E	47	–	0.15	2.9	2.69	0.49	1.01	3.38	0.12	0.7	–0.19	0.46	2.89	
SIM	S	N+E	79	–	0.15	2.5	3.13	0.57	0.76	2.52	0.1	0.6	–0.22	0.39	2.93	
SUDU	S	N+E	87	–	0.12	2.8	5.48	0.51	1.86	6.19	0.23	0.35	0.58	1.69	3.1	
S								2.57	0.51	0.84	2.8	0.1	0.74	–0.32	0.35	2.88
δS								0.16	0.02	0.15	0.15	0.16	0.16	–	0.32	0.14

СПЕКТРАЛЬНЫЕ и ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ
КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА Б.Г. Пустовитенко, Э.Э. Эреджепов

Код ст	Тип волны	Сост.	Δ , км	$\Omega_0 \cdot 10^{-6}$, м·с	$\Sigma \Omega_0 \cdot 10^{-6}$, 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	$\Delta \sigma_f \cdot 10^5$, Па	$E_u \cdot 10^8$, Дж	M_{Wper}	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
Землетрясение (4) 17 марта: $t_0=23^{h13}36.0^s$; $\varphi=44.43^\circ$; $\lambda=34.34^\circ$; $h=19$, км; $K_{II}=9.8$																
ALU	P	Z	28	0.15	–	3.6	7.06	0.65	1.14	3.81	0.18	4.25	–3.68	1.35	3.17	
ALU	S	N+E	28	–	0.7	2.3	6.3	0.58	1.39	4.64	0.2	4.76	–4.06	1.46	3.14	
SEV	S	N+E	54	–	0.4	2.85	9.05	0.47	3.8	12.7	0.43	3.31	–1.41	5.74	3.24	
SIM	P	Z	60	0.14	–	3.9	9.09	0.6	1.87	6.23	0.27	3.3	–2.37	2.83	3.24	
SIM	S	N+E	60	–	1.64	2.1	20.2	0.64	3.4	11.3	0.53	1.48	–0.21	11.5	3.47	
SUDU	P	Z	73	0.1	–	3.8	15.7	0.61	3.0	9.97	0.44	1.91	–0.41	7.84	3.4	
SUDU	S	N+E	73	–	0.8	2.15	24.0	0.62	4.3	14.5	0.65	1.25	0.92	17.4	3.52	
S								11.58	0.59	2.43	8.1	0.35	2.59	–1.38	4.69	3.31
δS								0.09	0.02	0.09	0.09	0.08	0.09	–	0.16	0.13
Землетрясение (5) 25 марта: $t_0=17^{h4}40.5^s$; $\varphi=44.69^\circ$; $\lambda=36.53^\circ$; $h=13$, км; $K_{II}=9.6$																
ALU	P	Z	169	0.012	–	3.5	4.21	0.67	0.63	2.1	0.1	5.05	–4.73	0.44	3.02	
ALU	S	N+E	169	–	0.15	2.3	10.0	0.58	2.2	7.4	0.31	2.1	–1.0	3.87	3.27	
SEV	S	N+E	227	–	0.11	2.6	9.86	0.52	3.15	10.5	0.39	2.15	–0.58	5.15	3.27	
SIM	P	Z	193	0.08	–	3.2	15.9	0.73	1.8	6.0	0.32	1.33	–0.43	4.82	3.4	
SIM	S	N+E	193	–	0.32	2.05	12.2	0.65	1.9	6.3	0.30	1.74	–0.79	3.87	3.33	
SUDU	P	Z	123	0.06	–	4.0	15.3	0.58	3.4	11.3	0.48	1.39	0.31	8.67	3.39	
SUDU	S	N+E	123	–	0.6	2.2	29.3	0.61	5.65	18.8	0.84	0.73	–2.1	27.6	3.58	
S								12.01	0.62	2.24	7.48	0.33	1.77	–0.65	4.53	3.32
δS								0.1	0.02	0.11	0.11	0.1	–	0.2	0.12	
Землетрясение (6) 29 марта: $t_0=05^{h41}21.1^s$; $\varphi=44.44^\circ$; $\lambda=34.33^\circ$; $h=19$, км; $K_{II}=8.6$																
ALU	P	Z	28	0.06	–	4.0	2.82	0.58	0.63	2.1	0.09	0.95	–0.63	0.29	2.9	
ALU	S	N+E	28	–	0.46	2.5	4.14	0.54	1.17	3.9	0.15	0.65	–0.06	0.81	3.0	
SEV	S	N+E	53	–	0.16	2.3	3.55	0.58	0.78	2.6	0.11	0.75	–0.36	0.47	2.97	
SIM	P	Z	59	0.1	–	3.5	6.61	0.67	0.98	3.28	0.16	0.4	–0.09	1.08	3.15	
SIM	S	N+E	59	–	0.43	2.15	5.43	0.62	0.98	3.26	0.15	0.49	–0.003	0.89	3.09	
SUDU	P	Z	73	0.03	–	4.0	4.65	0.58	1.03	3.44	0.15	0.57	–0.06	0.8	3.05	
SUDU	S	N+E	73	–	0.24	2.25	7.1	0.60	1.74	4.9	0.21	0.38	0.36	1.74	3.17	
S								4.68	0.59	1	3.25	0.14	0.57	–0.07	0.76	3.05
δS								0.05	0.01	0.05	0.04	0.04	0.05	–	0.09	0.08
Землетрясение (7) 30 марта: $t_0=07^{h55}59.1^s$; $\varphi=45.51^\circ$; $\lambda=32.98^\circ$; $h=21$, км; $K_{II}=8.2$																
SEV	S	N+E	121	–	0.07	2.9	3.35	0.46	1.48	4.95	0.17	0.4	0.3	0.83	2.95	
SIM	P	Z	108	0.06	–	3.0	6.7	0.78	0.63	2.1	0.12	0.2	0.11	0.7	3.15	
SIM	S	N+E	108	–	0.4	2.0	8.53	0.67	1.24	4.13	0.2	0.16	0.46	1.76	3.22	
SUDU	S	N+E	173	–	0.12	2.25	8.2	0.6	1.7	5.65	0.25	0.16	0.68	2.32	3.21	
S								6.29	0.62	1.18	3.95	0.18	0.21	0.38	1.24	3.13
δS								0.09	0.05	0.1	0.1	0.07	0.09	0.17	0.13	0.09
Землетрясение (8) 6 апреля: $t_0=20^{h47}13.2^s$; $\varphi=44.30^\circ$; $\lambda=34.28^\circ$; $h=23$, км; $K_{II}=7.2$																
ALU	P	Z	44	0.01	–	4.2	0.68	0.55	0.18	0.58	0.02	0.25	–0.16	0.02	2.49	
ALU	S	N+E	44	–	0.075	2.8	0.98	0.48	0.39	1.3	0.04	0.17	0.02	0.06	2.6	
SEV	S	N+E	55	–	0.04	2.4	0.94	0.56	0.24	0.79	0.03	0.18	–0.06	0.04	2.6	
SUDU	P	Z	87	0.008	–	4.0	1.49	0.58	0.33	1.11	0.05	0.11	0.05	0.08	2.72	
SUDU	S	N+E	87	–	0.045	2.3	1.61	0.58	0.35	1.18	0.05	0.1	0.07	0.09	2.74	
S								1.08	0.55	0.29	0.95	0.04	0.15	–0.01	0.05	2.63
δS								0.07	0.02	0.06	0.06	0.08	0.07	–	0.12	0.08
Землетрясение (9) 27 апреля: $t_0=02^{h51}33.6^s$; $\varphi=44.23^\circ$; $\lambda=34.33^\circ$; $h=22$, км; $K_{II}=8.5$																
ALU	P	Z	51	0.02	–	5.0	1.52	0.47	0.66	2.2	0.07	1.25	–0.9	0.17	2.72	
ALU	S	N+E	51	–	0.15	2.75	2.18	0.49	0.82	2.7	0.09	0.87	–0.46	0.3	2.83	
SIM	P	Z	82	0.02	–	4.0	1.75	0.58	0.39	1.3	0.06	1.1	–0.88	0.11	2.77	
SIM	S	N+E	82	–	0.25	2.85	4.19	0.47	1.76	5.9	0.2	0.45	0.43	1.23	3.02	
SUDU	P	Z	90	0.018	–	5.0	3.44	0.47	1.49	5.0	0.17	0.55	0.2	0.86	2.96	
SUDU	S	N+E	90	–	0.14	2.8	5.12	0.48	2.04	6.8	0.24	0.37	0.65	1.74	3.08	
S								2.75	0.49	1.02	3.4	0.12	0.69	–0.18	0.47	2.9
δS								0.09	0.01	0.11	0.11	0.1	0.09	–	0.2	0.12
Землетрясение (10) 28 апреля: $t_0=06^{h30}35.8^s$; $\varphi=44.62^\circ$; $\lambda=34.47^\circ$; $h=22$, км; $K_{II}=9.3$																
SEV	S	N+E	63	–	0.64	2.15	17.0	0.62	3.07	10.2	0.46	0.63	0.9	8.69	3.42	
SIM	P	Z	46	0.39	–	3.8	20.4	0.61	3.83	13.0	0.58	0.53	1.42	13.2	3.48	
SIM	S	N+E	46	–	1.56	2.1	16.6	0.64	2.63	8.75	0.41	0.68	0.63	6.84	3.4	

Код ст	Тип волны	Сост.	Δ , км	$\Omega_0 \cdot 10^{-6}$, м·с	$\Sigma \Omega_0 \cdot 10^{-6}$, м·с	f_0 , Гц	$M_0 \cdot 10^{13}$, Н·м	r_0 , км	$\Delta \sigma \cdot 10^5$, Па	$\varepsilon \cdot 10^{-6}$	$\bar{u} \cdot 10^{-2}$, м	$\eta \sigma \cdot 10^5$, Па	$\Delta \sigma_r \cdot 10^5$, Па	$E_u \cdot 10^8$, Дж	$M_{W_{\text{пер}}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SUDU	P	Z	51	0.1	–	4.2	11.4	0.55	2.93	9.76	0.39	0.93	0.53	5.56	3.31
SUDU	S	N+E	51	–	1.4	2.2	30.5	0.61	5.89	19.6	0.87	0.35	2.6	29.9	3.59
S							18.21	0.61	3.51	11.73	0.52	0.59	1.17	10.55	3.44
δS							0.07	0.01	0.06	0.06	0.06	0.07	0.13	0.13	0.08
Землетрясение (11) 20 августа: $t_0=17^{\text{h}}05^{\text{m}}27.2^{\text{s}}$; $\varphi=44.49^\circ$, $\lambda=34.25^\circ$; $h=15$ км; $K_{\text{П}}=7.9$															
ALU	P	Z	24	0.02	–	5.1	1.18	0.46	0.54	1.86	0.06	0.57	–0.29	0.11	2.65
ALU	S	N+E	24	–	0.15	3.1	1.7	0.43	0.92	3.06	0.09	0.4	0.06	0.26	2.76
SEV	S	N+E	46	–	0.1	3.15	1.92	0.43	1.1	3.6	0.11	0.35	0.19	0.35	2.79
SIM	P	Z	52	0.05	–	3.9	2.79	0.6	0.57	1.91	0.08	0.41	0.46	0.27	2.9
SIM	S	N+E	52	–	0.2	2.5	2.13	0.54	0.6	2.02	0.08	0.31	–0.01	0.21	2.82
SUDU	P	Z	73	0.01	–	5.05	1.55	0.46	0.69	2.31	0.08	0.43	–0.08	0.18	2.73
SUDU	S	N+E	73	–	0.21	3.0	6.22	0.45	3.05	10.2	0.33	0.11	1.42	3.2	3.13
S							2.16	0.48	0.88	2.93	0.1	0.34	0.1	0.32	2.83
δS							0.09	0.02	0.1	0.1	0.09	0.09	–	0.18	0.11
Землетрясение (12) 18 октября: $t_0=15^{\text{h}}34^{\text{m}}54.0^{\text{s}}$; $\varphi=42.74^\circ$, $\lambda=35.11^\circ$; $h=15$ км; $K_{\text{П}}=10.1$															
ALU	P	Z	224	0.11	–	2.95	33.5	0.79	3.0	9.9	0.57	3.57	2.08	16.6	3.62
ALU	S	N+E	224	–	0.48	2.0	62.5	0.63	10.8	35.9	1.65	1.91	3.47	112	3.8
SEV	S	N+E	232	–	0.45	1.82	77.4	0.78	4.57	33.5	1.7	1.54	3.48	130	3.86
SIM	P	Z	255	0.3	–	3.0	48.8	0.62	6.88	15.2	0.86	2.45	–0.16	37.2	3.73
SIM	S	N+E	255	–	1.2	1.8	107.0	0.70	13.5	45.0	2.3	1.11	5.64	242	3.96
SUDU	P	Z	240	0.26	–	2.95	73.8	0.79	6.57	21.9	1.26	1.62	1.67	80.8	3.85
SUDU	S	N+E	240	–	1.5	1.75	129	0.68	17.9	59.6	2.95	0.93	8.01	384	4.01
S							69.78	0.71	7.71	27.06	1.42	1.71	2.15	94.54	3.83
δS							0.08	0.02	0.1	0.1	0.09	0.08	–	0.18	0.08
Землетрясение (13) 09 ноября: $t_0=04^{\text{h}}08^{\text{m}}13.7^{\text{s}}$; $\varphi=45.51^\circ$, $\lambda=37.07^\circ$; $h=25$ км; $K_{\text{П}}=8.5$															
ALU	S	N+E	228	–	0.04	3.3	2.44	0.41	1.59	5.3	0.16	0.78	0.02	0.65	2.86
SEV	S	N+E	287	–	0.04	3.1	4.53	0.43	2.45	8.2	0.26	0.42	0.8	1.85	3.04
SUDU	P	Z	176	0.02	–	4.1	7.29	0.57	1.74	5.8	0.24	0.26	0.61	2.12	3.18
SUDU	S	N+E	176	–	0.08	3.0	5.57	0.45	2.73	9.1	0.3	0.34	1.03	2.54	3.1
S							4.6	0.46	2.07	6.92	0.23	0.41	0.63	1.6	3.05
δS							0.1	0.03	0.06	0.06	0.06	0.1	0.4	0.13	0.1

Обсуждение результатов. Количественные параметры амплитудного стационарного спектра существенно зависят от энергии в очаге, направленности излучения на станцию регистрации, свойств глубинной среды на пути распространения сейсмических волн и под станцией регистрации, а также от ряда факторов, которые трудно учесть. Поэтому для надежных оценок очаговых параметров в настоящей работе использованы не только записи нескольких станций, но и разные типы волн. В осреднении очаговых параметров (*S*) участвовало от четырех до семи стационарных определений, что обеспечило малую величину стандартного отклонения δS показателя степени рассеяния индивидуальных оценок. Наилучшая сходимость стационарных определений получена для радиуса круговой дислокации ($\delta r_0=0.01-0.05$), величина которого (см. формулу 2) в явном виде не зависит от направленности излучения энергии из очага и условий среды под станцией регистрации. Стандартные отклонения δS по другим параметрам для большинства землетрясений менее <0.1 . Уверенно определены средние значения моментных магнитуд $M_{W_{\text{пер}}}$ с погрешностью не выше ± 0.14 или округленно ± 0.1 . В целом, восстановленные значения динамических параметров очагов землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2014 г. уверенно относятся к категории надежных.

Наибольшие значения динамических параметров (M_0 , r_0 , $\Delta \sigma$, ε , $\eta \bar{\sigma}$, \bar{u} , E_u и $M_{W_{\text{пер}}}$) получены для очага ощутимого землетрясения 2 марта с $K_{\text{П}}=11.2$, произошедшего в центральной части региона (район 2) на глубине $h=28$ км (№ 2), а наименьшие – для его слабого афтершока 6 апреля с $K_{\text{П}}=7.2$ (№ 8). При этом отметим, что радиационное трение σ_r для всех исследованных очагов зоны ощутимого землетрясения 2 марта имело отрицательное значение, указывая на сложное

скольжение разрыва в очаге за счет неравномерного распределения прочностных свойств глубинной среды в данной очаговой зоне [16]. Во всем диапазоне энергий величина сброшенных напряжений не превысила $\Delta\sigma=1\cdot 10^6$ Па (10 бар), а кажущихся напряжений – $\eta\sigma<3\cdot 10^5$ Па (3 бар).

Проведем сравнение полученных в 2014 г. динамических параметров очагов со средними их долговременными величинами, установленными по аналоговым записям [12, 19] (рис. 4). Сравнение, как и в предыдущие годы [20–22], проведено только для сейсмического момента M_0 и радиуса круговой дислокации r_0 , поскольку они являются главными, определяемыми непосредственно по спектрам записей сейсмических колебаний, а остальные параметры вычисляются по их значениям. Для сравнения использованы зависимости $M_0(K_{II})$ и $r_0(K_{II})$ из [19].

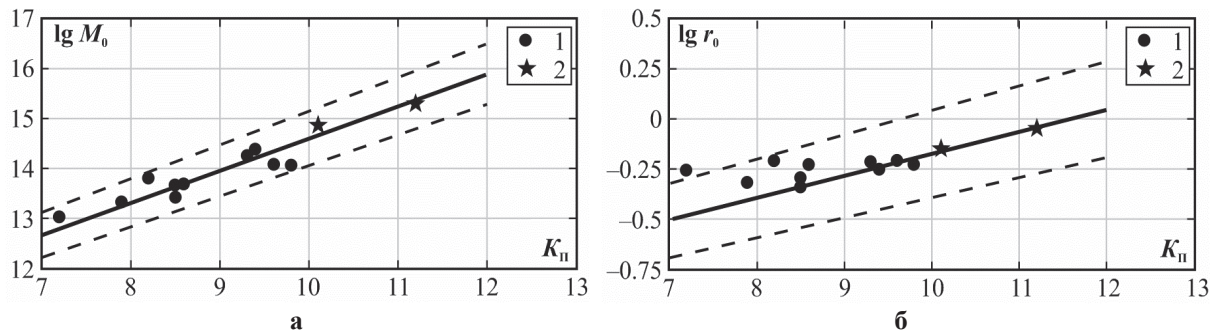


Рис. 4. Сравнение динамических параметров очагов землетрясений за 2014 г.: сейсмического момента M_0 (а) и радиуса круговой дислокации r_0 (б) с долговременными зависимостями $M_0(K_{II})$ и $r_0(K_{II})$ из [19]

1 – экспериментальные значения за 2014 г; 2 – значения для землетрясений с известными механизмами очагов: пунктиром обозначены пределы погрешностей.

Как видно из рис. 4, для большинства землетрясений 2014 г. средние значения M_0 и r_0 находятся в пределах доверительных областей долговременных зависимостей $M_0(K_{II})$, $r_0(K_{II})$. При этом значения M_0 равномерно распределены относительно регрессии $M_0(K_{II})$, а r_0 – в двух случаях имели наибольшие положительные отклонения δr_0 от зависимости $r_0(K_{II})$. Это относится к сравнительно слабым землетрясениям 30 марта в 07^h55^m с $K_{II}=8.2$, $h=21$ км (№ 7) из **Северо-Западного района** (район № 6) и 6 апреля в 20^h47^m с $K_{II}=7.2$, $h=23$ км (№ 8) из **центральной зоны региона** (район № 2). Завышение значений r_0 для сейсмических событий низкого энергетического уровня может быть связано не только с естественными особенностями очагов, но с меньшей точностью определения глубин очагов и, соответственно, выбором скоростной модели среды для этих глубин. Наилучшее соответствие долговременным параметрам M_0 (рис. 4) отмечено для землетрясений с известными механизмами очагов, для которых учтена реальная направленность излучения в соответствии с табл. 3.

Энергетические спектры землетрясений. Спектральные свойства очагов землетрясений 2014 г. изучены также по энергетическим спектрам. Переход от спектральной плотности амплитудного спектра к энергетическому спектру осуществлялся по формуле из [23]:

$$q = \frac{\rho c}{2\pi \lg e} \omega^3 \Omega^2(\omega), \quad (5)$$

где ρ – плотность пород в окрестности очага, c – скорость распространения объемных волн (P или S), $\Omega(\omega)$ – модуль спектральной плотности из амплитудного спектра. Методика и алгоритм расчета энергетических спектров, их обработка описаны в [12, 23].

На рис. 5 приведены примеры сглаженных энергетических спектров для двух компактных групп землетрясений центральной зоны региона по данным станции «Алушта» с эпицентрными расстояниями $\Delta=(46\pm 3)$ км и $\Delta=(27\pm 2)$ км.

Сглаживание проводилось скользящим осреднением в пределах октавной ширины по оси частот. Для всех энергетических спектров (рис. 5) получена характерная резонансная форма с выраженным максимумом плотности энергии q_{max} в ограниченной области частот, как и для других землетрясений Крымско-Черноморского региона [12].

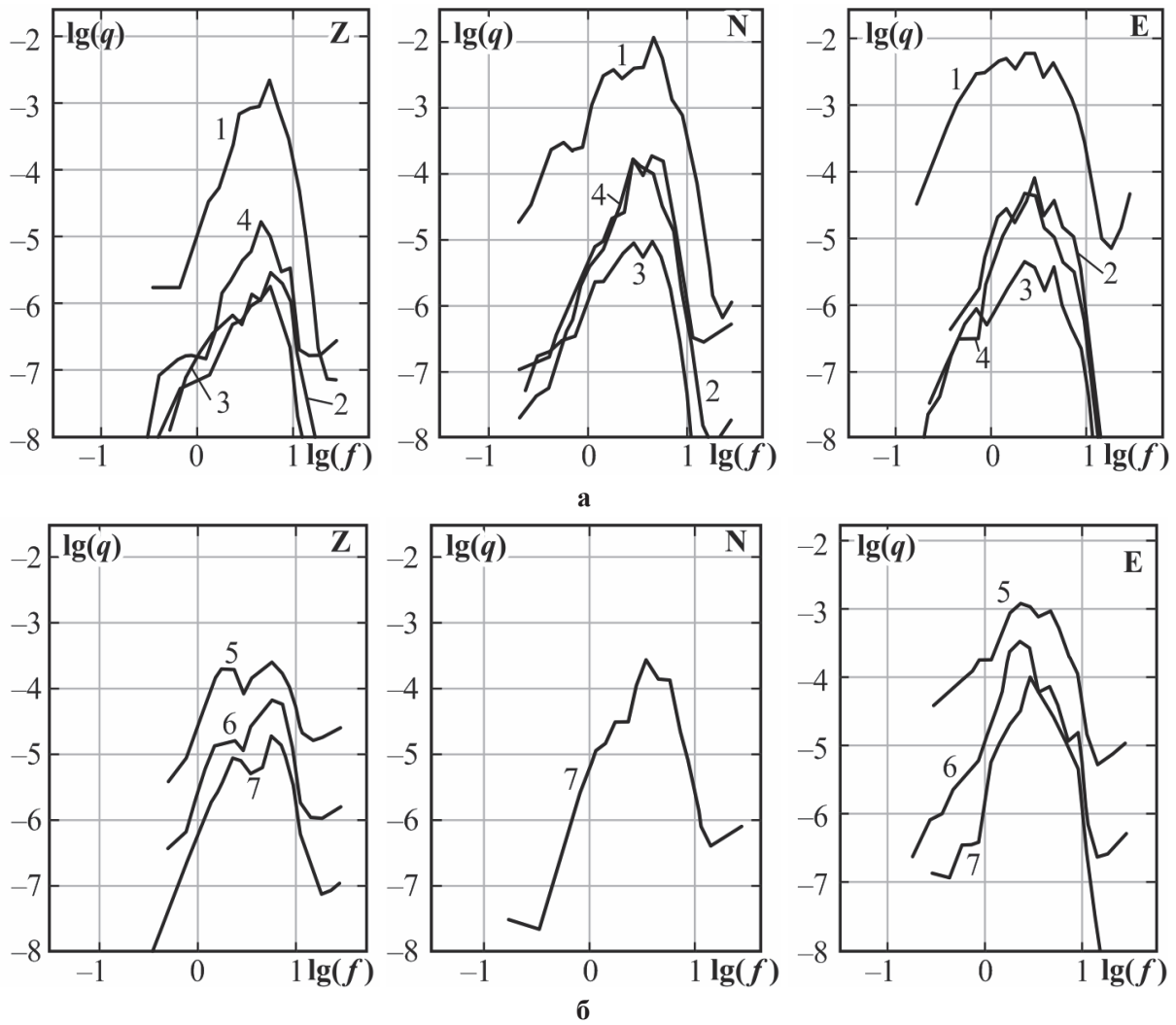


Рис. 5. Сглаженные энергетические спектры двух компактных групп землетрясений по данным станции «Алушта»: а – $\Delta=(46\pm3)$ км; б – $\Delta=(27\pm2)$ км (номера спектров (1–7) соответствуют таковым в табл. 5)

Рассмотрены основные характеристики энергетических спектров: преобладающие частоты, на которые приходится максимум плотности энергии ($f_{q_{\max}}$) и ширина спектра δf_q на уровне 0.9 от q_{\max} в высокочастотной (f_{q_1}) и низкочастотной (f_{q_2}) части спектра:

$$\delta f_q = f_{q_1} - f_{q_2}. \quad (6)$$

Результаты расчета $f_{q_{\max}}$ и δf_q для двух групп очагов по записям станции «Алушта»: эпицентральные расстояния (46 ± 3) км и (27 ± 2) км по продольным волнам (составляющая Z) и поперечным (N, E) представлены в табл. 5.

Таблица 5. Значения максимума $f_{q_{\max}}$ и ширины δf_q энергетических спектров землетрясений за 2014 г. по станции «Алушта» для двух групп очагов

№	Дата, дн мес г	K_{Π}	Δ , км	$f_{q_{\max}}$, Гц			$\delta f_q (f_{q_1} - f_{q_2})$, Гц		
				Z	N	E	Z	N	E
Первая группа, $\Delta=(46\pm3)$ км									
1	02.03.2014	11.2	43	5.69	4.56	2.83	4.35	5.79	4.43
2	02.03.2014	8.5	47	5.69	4.51	2.88	5.55	4.95	4.58
3	06.04.2014	7.2	44	5.71	4.53	2.26	5.42	5.67	4.63
4	27.04.2014	8.5	51	4.51	2.85	2.27	6.62	4.23	4.54
Вторая группа, $\Delta=(27\pm2)$ км									
5	17.03.2014	9.8	28	5.76	–	2.29	5.58	–	4.39
6	29.03.2014	8.6	28	5.76	–	2.27	5.52	–	3.02
7	20.08.2014	7.9	24	5.69	3.59	2.86	6.74	5.34	5.43

Из табл. 5 видно, что, несмотря на вариации индивидуальных энергетических спектров, значения q_{\max} по всем станциям и разным составляющим записи находились в сравнительно ограниченном диапазоне частот: $f q_{\max} = 2.26, \dots, 5.76$ Гц. При этом для продольных волн (Z) преобладали максимальные значения плотности сейсмической энергии вблизи $f = 5.7$ Гц, а для поперечных – 4.5 Гц (по N) и <3 Гц (по E). Отмечен ожидаемый сдвиг q_{\max} в сторону более высоких частот для продольных волн (Z-составляющая) по сравнению с поперечными волнами. Прямой зависимости значений $f q_{\max}$ и $\delta f q$ от энергетического уровня землетрясения и эпицентрального расстояния из-за ограниченного числа статистических данных не установлено. В то же время ранее по представительной выборке данных (112 значений) по аналоговым записям поперечных S-волн на сейсмической станции «Алушта» для компактной группы с $\Delta = (20 \pm 5)$ км была установлена прямая корреляционная связь между периодом q_{\max} и энергетическим классом [12]:

$$\lg T q_{\max} = (0.023 \pm 0.007) \cdot K_{II} - (0.79 \pm 0.05), \rho = 0.8.$$

Расчеты по этой формуле дают для волн S как близкие (в пределах погрешностей), так и несколько отличающиеся значения $f q_{\max} = 1/T q_{\max}$, в сравнении с теми, что приведены в табл. 5. Только наращивание статистических данных по энергетическим спектрам за длительный срок наблюдений и расширение динамического диапазона исследуемых землетрясений позволит уточнить ранее полученные зависимости по аналоговым записям [12], исследовать причины индивидуальных отклонений и общие пространственно-временные и станционные свойства для их использования в задачах инженерной сейсмологии.

Л и т е р а т у р а

1. Козиненко Н.М., Свидлова В.А., Сыкчина З.Н. (отв. сост.). Каталог землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2014 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 23 (2014 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – Приложение на CD-ROM.
2. Пустовитенко Б.Г., Свидлова В.А., Бондарь М.Н. Крымско-Черноморский регион // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 23 (2014 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – С. 38–48. doi: 10.35540/1818-6254.2020.23.03
3. Пустовитенко Б.Г. (отв. сост.) Каталог механизмов очагов землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2014 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 23 (2014 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – Приложение на CD-ROM.
4. Сейсмологический каталог (сеть телесеизмических станций), 2014 (2020) // ФИЦ ЕГС РАН [сайт]. – URL: ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_Catalog/2014
5. International Seismological Centre (2020), On-line Bulletin, <https://doi.org/10.31905/D808B830>
6. DDA http://www.isc.ac.uk/cgi-bin/serve_contribution?repid=600387869
7. Kennet B.L.N. Seismological Tables: ak135 // Research School of earth Sciences Australian national University. Australia, Canberra, ACT0200. – 2005. – P. 80.
8. 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.
9. 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.
10. Пустовитенко Б.Г., Свидлова В.А. Крымско-Черноморский регион // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 21 (2012). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – С. 49–58.
11. 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.
12. Пустовитенко Б.Г., Пантелеева Т.А. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма. – Киев: Наукова думка, 1990. – 251 с.
13. Brune J.N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // J. Geophys. Res. – 1970. – 75. – N 26. – P. 4997–5009.

14. 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.
15. Аптекман Ж.Я., Дараган С.К., Долгополов В.В., 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. Унификация исходных данных и процедуры расчета амплитудных спектров // Вулканология и сейсмология. – 1985. – № 2. – С. 60–70.
16. Костров Б.В. Механика очага тектонического землетрясения. – М.: Наука, 1975. – 179 с.
17. Кейлис-Борок В.И. Исследование источников, приближенно эквивалентных очагам землетрясений // Труды Геофизического Института АН СССР. – 1959. – № 9 (136). – С. 20–42.
18. Hanks Т.С., Kanamori Н. А moment magnitude scale // J. Geophys. Res. – 1979. – 84. – N 35. – P. 2348–2350.
19. 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.
20. 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.
21. Пустовитенко Б.Г., Калинюк И.В., Пустовитенко А.А. Очаговые параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона // Землетрясения Северной Евразии в 2011 г.– Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – С. 282–293.
22. Пустовитенко Б.Г., Калинюк И.В., Пустовитенко А.А. Очаговые параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 21 (2012 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – С. 286–293.
23. Ризниченко Ю.В., Сейдузова С.С. Спектрально-временная характеристика сейсмической опасности. – М.: Наука, 1984. – 180 с.

SPECTRAL and SOURCE PARAMETERS of CRIMEAN-BLACK SEA EARTHQUAKES

B.G. Pustovitenko, E.E. Eredzhepov

*Institute of Seismology and Geodynamics, Crimean Federal University V.I. Vernadsky,
Simferopol, seimosilver1@mail.ru; Brustovitenko@mail.ru*

Abstract. The spectral and dynamic source parameters (M_0 , r_0 , $\Delta\sigma$, ϵ , $\eta\sigma$, σ_r , \bar{u} , E_u and Mw) of 13 Crimean earthquakes with $K_{II} = 7.2$ –11.2 ($Mw=2.6$ –4.1), restored by 123 amplitude spectra of longitudinal and transverse seismic waves recorded by digital regional seismic stations is shown. Approximation of the spectra and the source dynamic parameters calculation based on their parameters is performed in the framework of the Brune dislocation model. Four to seven station definitions participated in the averaging of focal parameters, which ensured a small standard deviation, the scattering degree index of the individual estimates. The best convergence of the station definitions is obtained for the radius of a circular dislocation. The highest values of dynamic parameters have been obtained for the perceptible earthquake on March 2 with $K_{II}=11.2$, and the lowest values have been obtained for its weak aftershock on April 6 with $K_{II} = 7.2$. Within the total range of energies the value of the stress drop does not exceed $\Delta\sigma=10^6 Pa$ (10 bar), and the apparent stress drop does not exceed $\eta\sigma < 3 \cdot 10^5 Pa$ (3 bar). The average values of seismic moments and circular dislocation radius within the errors of their determination match the average long-term correlations of the parameters on the earthquake energy level obtained by the analog recording. For the strongest earthquakes on March 2 with $Mw_{reg}=4.1$ and October 18 with $Mw_{reg}=3.8$ solutions of the focal mechanisms were obtained. The March 2 earthquake occurred in the central part of the region near the South Coast of Crimea under the action of horizontal tensile forces oriented near the latitude. The type of movement in the focus is a oblique slip with predominance of a normal component over a strike-slip. The earthquake on October 18 occurred in the central part of the Black Sea basin in condition of sublatitudinal compression and submeridional extension. Type of movement in the source is a pure strike-slip. For the main shock on March 2 and its six aftershocks, energy spectra according to the data of Alushta station and their main parameters are given. The analysis of obtained results is given.

Keywords: source mechanism, amplitude spectrum, Brune model, spectral density, the angular frequency, seismic moment, dislocation radius, apparent stress drop, radiation friction, energy spectra.

DOI: 10.35540/1818-6254.2020.23.25

For citation: Pustovitenko, B.G., Eredzhepov E.E. (2020). [Spectral and Source Parameters of Crimean-Black Sea Earthquakes]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), 250–262. (In Russ.). doi: 10.35540/1818-6254.2020.23.25

R e f e r e n c e s

1. Kozinenko, N.M., Svidlova, V.A., & Sykchina, Z.N. (2020). Catalog of earthquakes in the Crimean Black Sea region for 2014. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), Appendix on CD. (In Russ.).
2. Pustovitenko, B.G., Svidlova, V.A., & Bondar, M.N. (2020). Crimean Black sea region. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), 38–48. (In Russ.). doi: 10.35540/1818-6254.2020.23.03
3. Pustovitenko, B.G. (2020). Catalog of earthquake foci mechanisms in the Crimean Black Sea region for 2014. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), Appendix on CD. (In Russ.).
4. GS RAS, Catalogues of Teleseismic Stations, 2014 (2020). Retrieved from ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_Catalog/2014
5. International Seismological Centre (2020), On-line Bulletin, <https://doi.org/10.31905/D808B830>
6. DDA. (2020). Retrieved from http://www.isc.ac.uk/cgi-bin/serve_contribution?repid=600387869
7. Kennet, B.L.N. (2005). *Seismological Tables: ak135*. Research School of Earth Sciences. Australian national University. Australia, Canberra, ACT0200, 80 p.
8. Kul'chickij, V.E., Safonova, G.P., & Svidlova, V.A. (1986). [Hodographs of seismic waves of the Crimean-Black sea earthquakes]. In *Seismologicheskii biulleten' Zapadnoi territorial'noi zony ESSN SSSR (Krym-Karpaty) za 1983 g.* [Seismological Bulletin of the Western Territorial Zone of the ESSN of the USSR (Crimea-Carpathians) for 1983] (pp. 94–103). Kyiv, Ukraine: Naukova Dumka Publ. (In Russ.).
9. Pustovitenko, B.G., & Kul'chickij, V.E. (1974). [On the energy assessment of the earthquakes of the Crimean Black Sea region] In *Magnituda i energeticheskaja klassifikatsiia zemletriasenii, tom 2* [Magnitude and energy classification of earthquakes, Pt. 2] (pp. 113–125). Moscow, Russia: IEP AS USSR Publ. (In Russ.).
10. Pustovitenko, B.G., & Svidlova, V.A. (2018). [Crimean Black Sea region]. In *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii v 2012* [Earthquakes in Northern Eurasia, 2012] (pp. 49–58). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
11. Balakina, L.A., Vvedenskaya, A.V., Golubeva, N.V., Misharina, L.A., & Shirokova, E.I. (1972). Pole uprugikh napriazhenii Zemli i mekhanizm ochagov zemletriasenii [Field of elastic stresses of the Earth and the mechanism of earthquake foci]. Moscow, Russia: Nauka Publ. 198 p. (In Russ.).
12. Pustovitenko, B.G., & Panteleeva, T.A. (1990). Spektral'nye i ochagovye parametry zemletriasenii Kryma [Spectral and focal parameters of earthquakes of the Crimea]. Kiev, Ukraine: Naukova Dumka Publ., 251 p. (In Russ.).
13. Brune, J.N. (1970). Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of geophysical research*, 75(26), 4997–5009.
14. Aptekman, Zh.Ya., Belavina, Yu.F., Zakharova, A.I., Zobin, V.M., Kogan, S.Ya., Korchagina, O.A., Moskvina, A.G., Polikarpova, L.A., & Chepkunas, L. (1989). [Spectra of P-waves in the problem of determining the dynamic parameters of earthquake sources. The transition from station to focal range and the calculation of dynamic source parameters]. *Vulkanologiya i seismologiya* [Journal of Volcanology and Seismology], 2, 66–79. (In Russ.).
15. Aptekman, Zh.Ya., Daragan, S.K., Dolgoplov, V.V., Zakharova, A.I., Zobin, V.M., Kogan, S.Ya., Korchagina, O.A., Moskvina, A.G., Polikarpova, L.A., & Chepkunas, L.S. (1985). [Spectra of P-waves in the problem of determining the dynamic parameters of earthquake sources. Harmonization of raw data and the procedure of calculating the amplitude spectra]. *Vulkanologiya i seismologiya* [Journal of Volcanology and Seismology], 2, 60–70. (In Russ.).
16. Kostrov, B.V. (1975). Mekhanika ochaga tektonicheskogo zemletriaseniia [Mechanics of the tectonic earthquake focus]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 179 p. (In Russ.).

-
17. Kejlis-Borok, V. I. (1959). [Study of the sources, approximately equivalent to the foci of earthquakes]. *Trudy Geofizicheskogo Instituta AN SSSR*. [Proceedings of the Geophysical Institute of the USSR Academy of Sciences], 9(136), 20–42 (In Russ.).
 18. Hanks, T.C., & Kanamori, H. (1979). A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research*, 84, 2348–2350.
 19. Pustovitenko, B.G., Pustovitenko, A.A., Kapitanova, S.A., & Porechnova, E.I. (2008). [Spatial features of focal parameters of earthquakes in the Crimea]. In *Seismichnost' Severnoi Evrazii* [Seismicity of Northern Eurasia] (pp. 238–242). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
 20. Pustovitenko, B.G., Kalinyuk, I.V., & Merzhej, E.A. (2016). [Dynamic parameters of the foci of earthquakes of the Crimea]. In *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii, 2010 god.* [Earthquakes in Northern Eurasia, 2010] Obninsk, Russia: GS RAS Publ., 296–304. (In Russ.).
 21. Pustovitenko, B. G., Kalinyuk, I. V. & Pustovitenko, A.A. (2017). [Focal parameters of earthquakes of the Crimea in 2011]. In *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii, 2011 god.* [Earthquakes in Northern Eurasia, 2011] Obninsk, Russia: GS RAS Publ., 282–293. (In Russ.).
 22. Pustovitenko, B.G., Kalinyuk, I.V., & Pustovitenko, A.A. (2018). [Focal parameters of earthquakes of the Crimea in 2012] *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 21(2012), 286–293. (In Russ.).
 23. Riznichenko, Yu.V., & Sejduzova, S.S. (1984) *Spektral'no-vremennaia kharakteristika seismicheskoi opasnosti* [Spectral-temporal characteristics of seismic hazard]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 180 p. (In Russ.).